

สมบัติทางกายภาพและสัญญาณวิทยาของฟิล์มเป่าแอลแอลดีพีอีแบบหลายชั้น: ผลของอัตราส่วนการเป่า

นางสาวสุธากาญจน์ อักษรกุล

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
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF MULTILAYER LLDPE
BLOWN FILM: EFFECT OF BLOW-UP RATIO

Miss Suthakarn Auksornkul



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่าแอล
แอลดีพีอีแบบหลายชั้น: ผลของอัตราส่วนการเป่า
โดย นางสาวสุธากาญจน์ อักษรกุล
สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.รัตติกาล ชันธุ์เครือ)

สุธากาญจน์ อักษรกุล : สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่าแอลแอลดีพีอีแบบหลายชั้น: ผลของอัตราส่วนการเป่า (PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF MULTILAYER LLDPE BLOWN FILM: EFFECT OF BLOW-UP RATIO) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ, 75 หน้า.

ฟิล์มพอลิเอทีลินความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ถูกผลิตด้วยเครื่องเป่าอัดรีดแบบ 3 ชั้น ผลของอัตราส่วนการเป่าและลักษณะสมบัติของพอลิเมอร์ต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม สัณฐานวิทยาของผลึกและการจัดเรียงโมเลกุลระหว่างกระบวนการเป่าฟิล์มถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์แบบมุมเล็ก (SAXS) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การเพิ่มอัตราส่วนการเป่าทำให้การจัดเรียงโมเลกุลในทิศทางตั้งฉากเครื่อง (TD) เพิ่มขึ้น แต่การจัดเรียงโมเลกุลในทิศทางเครื่อง (MD) ลดลง ผลจากสัณฐานวิทยาของ LLDPE ถูกอธิบายในเทอมของการซ้อนกันของชั้นลามลลาที่ตั้งฉากกับทิศทางเครื่อง พบว่าสัณฐานวิทยาของฟิล์มมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมาก เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าพบว่าทั้งฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 มีความทนแรงดึงในทิศทางตั้งฉากเครื่องเพิ่มขึ้น แต่ในทิศทางเครื่องลดลง ขณะที่ความทนแรงฉีกในทิศทางตั้งฉากเครื่องลดลง แต่ในทิศทางเครื่องเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) พบว่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 ลดลง ขณะที่ LLDPE-C4 ไม่เปลี่ยนแปลง ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระดับความเป็นผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5772409023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: LLDPE / BLOWN FILM / POLYETHYLENE / BLOW UP RATIO

SUTHAKARN AUKSORNKUL: PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF MULTILAYER LLDPE BLOWN FILM: EFFECT OF BLOW-UP RATIO. ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, 75 pp.

A series of linear low density polyethylene (LLDPE) films were produced by using three layer co-extrusion machine. The effects of the blow up ratio (BUR) and resin characteristics on final film morphology and physical properties were studied. The crystalline morphology and orientation during blown film process of LLDPE film were investigated using Small-Angle X-Ray Scattering (SAXS), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM). Increasing BUR increased molecular orientation in the transverse direction (TD) but decreased orientation in machine direction (MD). The resulting morphology of LLDPE could be described in terms of regular lamellar stacking perpendicular to the MD direction. Film morphology was observed to strongly influence the mechanical properties. With increasing BUR, tensile strength decreased in MD but increased in TD for both LLDPE-C4 and LLDPE-C8. Tear strength was increased in the MD and decreased in the TD with increasing BUR. Moreover, from Differential Scanning Calorimeter (DSC) results, the degree of crystallinity (X_c) decreased with increasing BUR for LLDPE-C8 but not changed for LLDPE-C4. Water vapor and oxygen permeability increased with increasing BUR for LLDPE-C8 related to X_c .

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ความช่วยเหลือในด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัยและความช่วยเหลือด้านอื่นๆ จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางการดำเนินงานวิจัย แนวทางการแก้ปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และ ดร.รัตติกาล ชันธุ์เครือ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

บริษัท ชันชีพลาสติก พี.เอส. จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบในระหว่างทำงานวิจัย

เจ้าหน้าที่หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ในการประสานงานต่างๆ ทำให้การนำเสนองานเป็นไปอย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจอย่างดีและสนับสนุนให้จนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ [1, 2].....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้	3
บทที่ 2	2
วารสารปริทัศน์	2
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น: (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) [3]	2
2.2 การเป่าฟิล์ม [3-5]	5
2.3 เทคโนโลยีเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น (Co-extrusion blown film technology) [5]	10
2.4 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [6, 7].....	12
2.5 การเกิดผลึกจากการเหนี่ยวนำของการไหล (Flow-Induced Crystallization) [6, 8, 9]	14
2.6 การจัดเรียงโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxial orientation) [5, 6, 10]	18
2.7 การวิเคราะห์การจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิค SAXS [11]	20

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3	26
การทดลอง	26
3.1 วัตถุประสงค์.....	26
3.2 เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ	27
3.3 การขึ้นรูป.....	28
3.4 การทดสอบ	32
3.4.1 การทดสอบความทนแรงดึง	32
3.4.2 การทดสอบความทนแรงฉีก	32
3.4.3 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)	33
3.4.4 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	34
3.4.5 การทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน	35
3.4.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM).....	35
3.4.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	35
3.4.8 การตรวจสอบการจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมเล็ก (SAXS).....	36
บทที่ 4	37
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	37
4.1.1 การวิเคราะห์การจัดเรียงผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค SAXS.....	37

4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ผิวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค FE-SEM.....	40
4.1.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวาง (ระนาบ ND-MD) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค TEM.....	42
4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8.....	44
4.2.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	44
4.2.2 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	50
4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	52
4.4 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8.....	54
บทที่ 5	57
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
รายการอ้างอิง	59
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	64
ภาคผนวก ข.....	66
ข้อมูลภาวะในการขึ้นรูป.....	66
ภาคผนวก ค.....	67
ข้อมูลผลการทดสอบ	67
ภาคผนวก ง	71

ญ

หน้า

ข้อมูลสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่า LLDPE 71

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 75



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) LLDPE C4 และ (b) LLDPE C8.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบเป่าฟิล์ม.....	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะการซ้อนทับของฟิล์มที่ไม่มีระบบปิดเกลี่ยความหนา	6
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	7
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของลูกโป่งฟิล์ม.....	9
รูปที่ 2.6 แบบจำลองฟิล์มที่ได้จากการเป่าแบบหลายชั้น.....	10
รูปที่ 2.7 หัวตายสำหรับการเป่าฟิล์มแบบ 3 ชั้น	11
รูปที่ 2.8 แบบจำลองผลึกฟริงก์ไมเซลล์.....	12
รูปที่ 2.9 แบบจำลองสายโซ่แบบพับ	13
รูปที่ 2.10 สันฐานวิทยาที่ผิวของโครงสร้างแบบซิซเคบ์ส์ที่ได้จากการทดลองของ Penning.....	15
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของโครงสร้างผลึกแบบซิซเคบ์ส์.....	15
รูปที่ 2.12 (a) โครงสร้างผลึกแบบซิซเคบ์ส์ (b) โครงสร้างแบบนิวเคลียสแถว.....	26
รูปที่ 2.13 สันฐานวิทยาของ LDPE ที่ได้จากการทดลองของ Keller a) Keller I model และ b) Keller II model.....	18
รูปที่ 2.14 ระบบระนาบผลึกของ LLDPE.....	19
รูปที่ 2.15 XRD pattern of LDPE Film (a) Draw ratio = 9.8 (b) Draw ratio = 23.8.....	19
รูปที่ 2.16 หลักการของเทคนิค SAXS.....	20
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างภาพ 2 มิติ ที่ได้จากเทคนิค SAXS.....	21

รูปที่ 2.18 แบบจำลองรูปภาพที่ได้จากเทคนิค SAXS กับลักษณะโครงสร้างผลึก	24
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	30
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดเป่าฟิล์มแบบ 3 สกรู	31
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างขั้นตอนทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงดึง	32
รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีก	33
รูปที่ 3.5 ขนาดขั้นตอนทดสอบสำหรับการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	34
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	34
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนทดสอบสำหรับการทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน	35
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิค SAXS	36
รูปที่ 4.1 ภาพ 2 มิติจากเทคนิค SAXS ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4; (a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5 (e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0 (c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7	37
รูปที่ 4.2 ความเข้มการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเป่า (a) LLDPE-C4 (b) LLDPE-C8.....	39

รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาที่ผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4;

(a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5

(e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0

(c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7 41

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางจากเทคนิค TEM ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4;

(a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5

(e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0

(c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7 43

รูปที่ 4.5 Stress-strain ของฟิล์มเป่า LLDPE ในทิศทาง MD และ TD 46

รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4

และ LLDPE-C8..... 47

รูปที่ 4.7 การจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำและอัตราส่วนการเป่าสูง 48

รูปที่ 4.8 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 50

รูปที่ 4.9 แบบจำลองโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8..... 51

รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC (a) ฟิล์มเป่า LLDPE-C4 (b) LLDPE-C853

รูปที่ 4.11 ความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มเป่า LLDPE (a) การซึมผ่านของไอน้ำ และ

(b) การซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน.....56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชุดอุปกรณ์และหน้าที่ของเครื่องเป่าฟิล์ม	8
ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	26
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	27
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8	29
ตารางที่ 4.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8	45
ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC	53
ตารางที่ 4.3 WVTR และ OTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ [1, 2]

ปัจจุบันพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) ได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆเป็นวงกว้าง เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร ฯลฯ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในหลายด้าน เช่น ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อความชื้น ความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น แต่มีข้อเสียคือ ขึ้นรูปยาก จำเป็นต้องเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) 10-20% เข้าไปช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงพอลิเมอร์หลอมในการขึ้นรูป ในด้านเทคนิคการผลิตนั้น การได้มาซึ่งฟิล์มที่มีคุณภาพขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นเกรดของเม็ดพลาสติก เครื่องมือที่ใช้ผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาวะการผลิต สำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมไม่เพียงแต่เพื่อให้มีคุณภาพดีที่สุดเพียงด้านใดด้านหนึ่ง แต่ต้องหาจุดที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย [1]

ฟิล์มเป่า LLDPE ที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ นิยมขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่า เนื่องจากขั้นตอนไม่ซับซ้อน เทคโนโลยีการเป่าฟิล์มได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตฟิล์มบางความหนา 0.02-0.25 มม. ในการผลิตฟิล์มแต่ละครั้งมีความกว้างของฟิล์มไม่เท่ากันส่งผลให้อัตราส่วนการเป่า (Blow up ratio) เปลี่ยนไป เป็นที่แน่นอนว่าปัจจัยนี้มีผลต่อการจัดเรียงตัวระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลต่อสมบัติฟิล์มได้ ในการเป่าสามารถผลิตฟิล์มที่มีความกว้างและความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน สมบัติฟิล์มที่ได้ขึ้นกับชนิดเม็ดพลาสติกและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์สำหรับ LLDPE นั้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนา LLDPE หลายเกรดเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งาน เกรดที่นิยมใช้ในงานบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปเป็นกลุ่ม LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ซึ่ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกันที่ความยาวของกิ่ง LLDPE-C8 เป็นเกรดที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเนื่องจากความยาวของกิ่งที่ยาวขึ้นทำให้มีความสม่ำเสมอของกิ่งมากขึ้นนำไปสู่การให้สมบัติเชิงกลที่ดี [2]

ในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเป่า พอลิเมอร์มีการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง คือ ทิศทางของเครื่อง (MD) และทิศทางตั้งฉากกับเครื่อง (TD) โดยการจัดเรียงตัวในแต่ละทิศทางนั้นขึ้นกับชนิดเม็ดพลาสติกและภาวะการขึ้นรูป สำหรับการเป่าฟิล์มในเชิงพาณิชย์นั้นจะเป่าตามความ

ต้องการของผู้ใช้งานซึ่งต่างกันไปในส่วนของความกว้างและความหนา ความกว้างของฟิล์มที่แตกต่างกันจากอัตราส่วนการเป่าทำให้มีผลต่อสมบัติฟิล์มเนื่องจากเป็นสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนการเป่าต่อสมบัติฟิล์มจึงเป็นสิ่งสำคัญในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิด LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 และผลของอัตราส่วนการเป่าต่อการจัดเรียงโมเลกุลและสมบัติฟิล์ม เพื่ออธิบายสมบัติฟิล์มที่เป่าขึ้นกับชนิดเม็ดพลาสติกและอัตราส่วนการเป่าของฟิล์มเป่าซึ่งได้ขยายระดับการศึกษาจากระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการศึกษาในระดับอุตสาหกรรม โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าอัดรีดแบบ 3 สกรู

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาผลของความยาวกิ่งก้านของ LLDPE C4 และ LLDPE C8 ต่อสมบัติฟิล์มเป่า
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนการเป่าที่มีต่อการจัดเรียงโมเลกุลและสมบัติฟิล์ม LLDPE

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลของอัตราส่วนการเป่าต่อสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนการเป่าต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่าและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์
3. ขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์มแบบ 3 ชั้น LLDPE สูตร C4 (LLDPE-C4) และ LLDPE สูตร C8 (LLDPE-C8) รวมทั้งหมด 10 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นส่วนที่ 1: ศึกษาผลของความยาวกิ่งก้านของ LLDPE C4 และ LLDPE C8 ต่อสมบัติฟิล์ม โดยการเป่าฟิล์มที่มีความกว้างแผ่นเรียบ (Layflat) 1110 มม. (อัตราส่วนการเป่า 2.0) และ 1350 มม. (อัตราส่วนการเป่า 2.5)

ส่วนที่ 2: ศึกษา ก) ผลของอัตราส่วนการเป่า (1.7, 2.0, 2.1, 2.5, 2.8) ต่อสมบัติฟิล์มโดยการเป่าฟิล์มที่มีความกว้างแผ่นเรียบ 905 , 1110, 1160, 1350 และ 1520 มม. สำหรับสูตร LLDPE C4 และ ข) ผลของอัตราส่วนการเป่า (1.8, 2.0, 2.3, 2.5, 2.7) ต่อสมบัติฟิล์มโดยการเป่าฟิล์มที่มีความกว้างแผ่นเรียบ 990, 1110, 1270, 1350 และ 1470 มม. สำหรับสูตร LLDPE C8

4. ตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

- ตรวจสอบการจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิคการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบมุมเล็ก (Small Angle X-ray Scattering, SAXS)
- ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)
- ตรวจสอบสมบัติความทนแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882
- ตรวจสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D1922
- ตรวจสอบปริมาณผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ตามมาตรฐาน ASTM D3418
- ตรวจสอบค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) ตามมาตรฐาน ASTM F1249
- ตรวจสอบค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR)

5. วิเคราะห์ข้อมูลสรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

สามารถอธิบายผลของชนิด LLDPE และอัตราส่วนการเป่าต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า

บทที่ 2

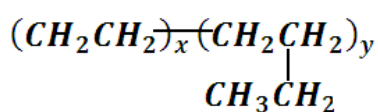
วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น: (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) [3]

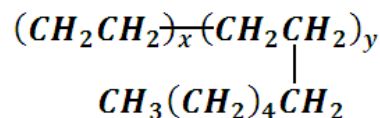
LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาแทน LDPE เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่าง เช่น ความเหนียว ความทนแรงดึง ให้ดีขึ้น โครงสร้างของ LLDPE มีกิ่งก้านสั้นสม่ำเสมอและมีความเป็นระเบียบมากกว่า LDPE โดยกิ่งสั้นในโครงสร้างได้มาจากการเติมโคมอนอเมอร์ประเภท 1-แอลคีน เช่น 1-บิวทีน 1-เฮกซีน หรือ 1-ออกทีน เข้าไปในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน

LLDPE มีความหนาแน่นอยู่ช่วง $0.915-0.930 \text{ g/cm}^3$ โดยทั่วไปประกอบด้วย 1-แอลคีน 2-7% (w/w) หรือ 1- 2% mol/mol สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหลาย site (multisite catalysts) ได้แก่ Ziegler-Natta สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งในวัฏภาคแก๊ส และ slurry process สำหรับการสังเคราะห์ LLDPE ที่มีมอนอเมอร์ร่วมเป็น 1-ออกทีน ไม่นิยมสังเคราะห์ในวัฏภาคแก๊ส เนื่องจาก 1-ออกทีนมีจุดเดือดสูง จึงนิยมใช้วัฏภาคกึ่งของเหลว (slurry phase) สมบัติของ LLDPE อยู่ระหว่าง LDPE กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) LLDPE มีอุณหภูมิหลอมผลึกช่วง 115-125 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) โดยกิ่งสั้นที่เกาะกับสายโซ่ทำให้ระดับความเป็นผลึกลดลงกว่า HDPE ในการขึ้นรูปใช้ภาวะทางความร้อนคล้ายกับ HDPE เมื่อผ่านหัวตายขึ้นรูปมาแล้วสมบัติของ LLDPE คล้าย LDPE มีความเหนียว ความยืดหยุ่นและเนื้อสัมผัสดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ LDPE แล้ว สมบัติการขึ้นรูปต่ำกว่า LDPE เนื่องจาก LLDPE มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้ความแข็งแรงขณะหลอม (melt strength) ของ LLDPE ต่ำกว่า LDPE ดังนั้นในการขึ้นรูป LLDPE จำเป็นต้องเติม LDPE เข้าไป 10-20% เพื่อช่วยให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่ายขึ้น [3]

จุดเด่นของ LLDPE คือ มีความเหนียว ทนแรงดึงและแรงฉีกได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นแผ่นพลาสติก พลาสติก สำหรับบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร สามารถลดความหนาของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากที่ระดับความหนาของฟิล์มเดียวกัน LLDPE ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า LDPE โดยเกรดที่ใช้งานทั่วไปมี 2 เกรด คือ LLDPE ที่มี 1-บิวทีน เป็นมอนอเมอร์ร่วม (LLDPE C4) (รูปที่ 2.1a) และ LLDPE ที่มี 1-ออกทีน เป็นมอนอเมอร์ร่วม (LLDPE C8) (รูปที่ 2.1b)



(a)

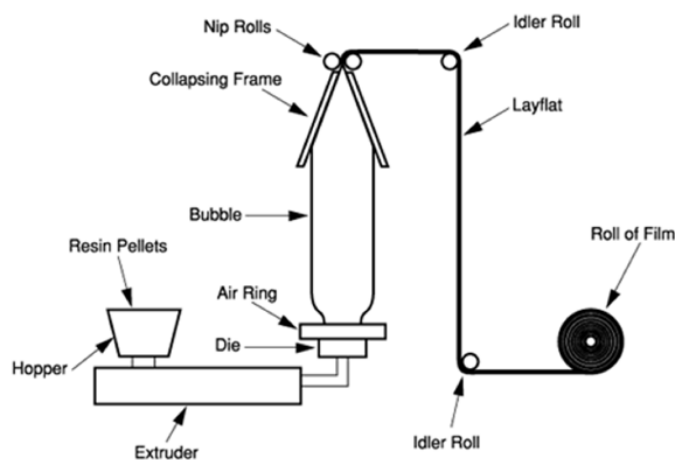


(b)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) LLDPE C4 และ (b) LLDPE C8

2.2 การเป่าฟิล์ม [3-5]

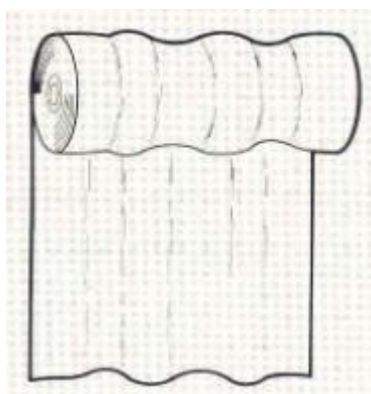
การเป่าเป็นวิธีขึ้นรูปที่ได้รับความนิยมมากที่สุดใน การขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากขั้นตอนไม่ซับซ้อน (รูปที่ 2.2) สามารถผลิตฟิล์มจากพลาสติกหลายชนิด สามารถกำหนดความกว้างและความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน การขึ้นรูปเริ่มต้นด้วยการป้อนเม็ดพลาสติกลงในกรวยเครื่องอัดรีดจากนั้นให้ความร้อนและแรงเฉือนทำให้เม็ดพลาสติกหลอมละลายและพลาสติกหลอมถูกดันผ่านหัวตายรูปวงแหวนใช้ลมเป่าออกจากท่อทำให้พองออกเกิดเป็นรูปลูกโป่ง ฟิล์มที่ได้ถูกหล่อเย็นโดยใช้ลม จากนั้นถูกรีดให้แบนเข้าหากันโดยลูกกลิ้งสองลูกที่เรียกว่า “ลูกกลิ้งหนีบ” เนื่องจากฟิล์มที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปวิธีนี้มีลักษณะคล้ายท่อ บางครั้งจึงเรียกว่า “ฟิล์มแบบท่อ” ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปตัดและผนึกติดเป็นถุงได้โดยไม่ต้องมีตะเข็บข้าง นอกจากนี้กรณีที่ต้องการฟิล์มเป็นแผ่นไร้ตะเข็บ สามารถติดตั้งชุดใบมีดเพื่อใช้ในการตัดตะเข็บข้างเพิ่มเข้าไปในขั้นตอนก่อนม้วนเก็บ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบเป่าฟิล์ม [4]

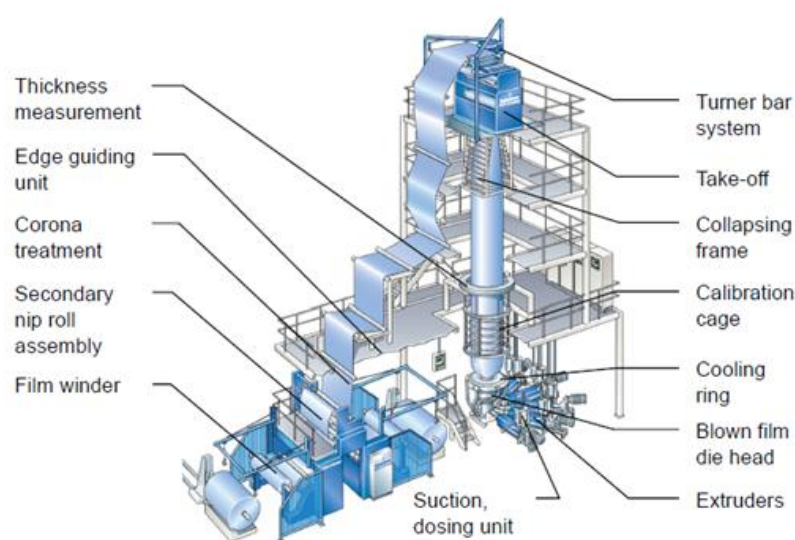
ลมเย็นภายนอกที่ใช้ในการหล่อเย็นลูกโป่งพอลิเมอร์หลอมให้เย็นลงมาต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก ระยะเส้นหมอกเป็นจุดที่บ่งชี้การเกิดผลึก ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนจากสถานะของเหลวเป็นสถานะของแข็ง ส่งผลถึงความใสของฟิล์ม สิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมคือ อัตราเร็วในการหล่อเย็น การหล่อเย็นด้วยอัตราเร็วช้าทำให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ ส่งผลให้สูญเสียความใสและความเงาที่ผิว เครื่องอัดรีดบางเครื่องมีระบบการหล่อเย็นภายในเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ลมภายนอกและลมภายในโดยทั่วไปทำให้ควบคุมสมบัติฟิล์มได้ดีขึ้น [5]

การจัดเรียงโมเลกุลในทิศทางขนานเครื่อง (Machine direction, MD) เกิดขึ้นจากการดึงของฟิล์มในแนวความยาวโดยการดึงของลูกกลิ้งหนีบหลังจากออกจากหัวตาย ความหนาฟิล์มควบคุมโดยช่องหัวตายและการดึงฟิล์ม การจัดเรียงตัวในสองทิศทางเกิดขึ้นในขั้นตอนที่พอลิเมอร์ยังหลอมอยู่ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องควบคุมความสมมาตรของลูกโป่ง เพื่อให้พื้นที่ผิวของลูกโป่งฟิล์มในสองข้างของเส้นศูนย์กลางลูกโป่งเท่ากัน หากลูกโป่งไม่สมมาตรไม่เพียงแต่การเย็นตัวของพอลิเมอร์ไม่เท่ากันเท่านั้น แต่ยังส่งผลถึงความหนาที่ไม่สมมาตรกันด้วย บริเวณที่เย็นตัวช้า พอลิเมอร์สามารถยึดตัวได้มากกว่าบริเวณที่เย็นตัวเร็ว ดังนั้นความหนาฟิล์มบริเวณที่หล่อเย็นช้าจะบางกว่าบริเวณที่เย็นตัวเร็วกว่า ดังนั้นความหนาของฟิล์มจึงไม่สม่ำเสมอในทิศทางตั้งฉากเครื่อง (Transverse direction, TD) หากนำม้วนแก้วบริเวณที่ฟิล์มหนาเกิดการซ้อนทับกันจะเกิดเป็นสัน ในขณะที่บริเวณฟิล์มบางเกิดเป็นร่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จึงจำเป็นต้องใช้ชุดอุปกรณ์ลูกกลิ้งหนีบหมุน มาช่วยในการบิดหมุนลูกโป่งเพื่อกระจายความหนาของฟิล์มในแต่ละจุดเลื่อนตำแหน่งไป ไม่ให้เกิดการซ้อนทับกัน [3, 5]



รูปที่ 2.3 ลักษณะการซ้อนทับของฟิล์มที่ไม่มีระบบบิดเกลี่ยความหนา [4]

การขยายตัวของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติกอ่อนตัว (Flexible packaging) ทำให้เกิดการแข่งขันของผู้ผลิตฟิล์ม ในการออกแบบและผลิตฟิล์มเพื่อให้ได้มาซึ่งฟิล์มที่มีสมบัติตามความต้องการของผู้บริโภค ภายใต้การแข่งขันทางการตลาดที่สูง ปัจจุบันเทคโนโลยีการเป่าฟิล์มจึงได้มีการพัฒนาส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.4 เพื่อช่วยให้การเป่าฟิล์มมีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค โดยหน้าที่ของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนของเครื่องเป่า แสดงไว้ในตารางที่ 2.1



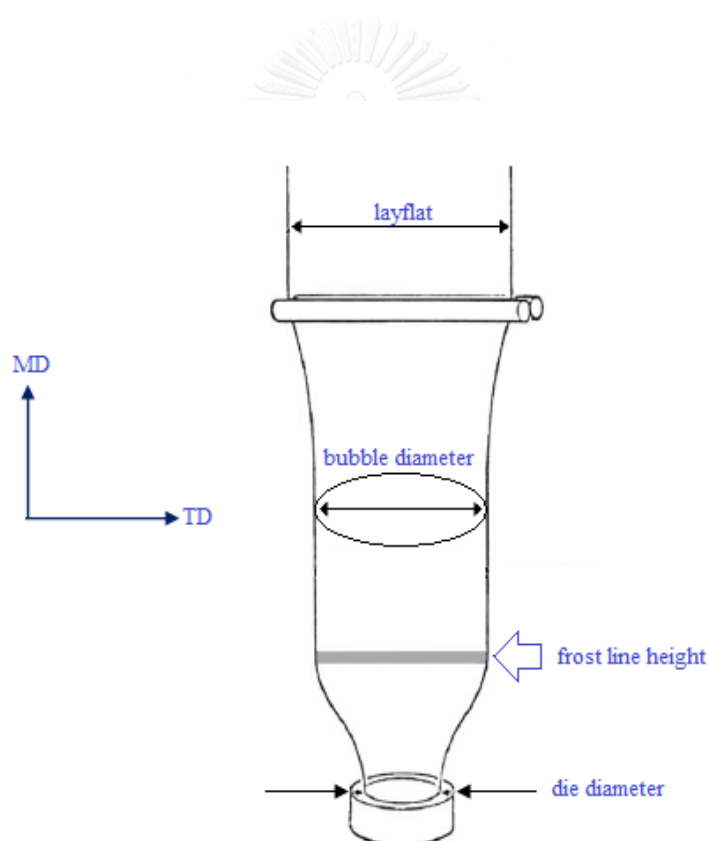
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของเครื่องเป่าฟิล์ม [5]

ตารางที่ 2.1 ชุดอุปกรณ์และหน้าที่ของเครื่องเป่าฟิล์ม [5]

อุปกรณ์	หน้าที่
Thickness measurement	ตรวจวัดความหนาของฟิล์มหลังจากการเย็นตัวของพอลิเมอร์
Edge guiding	ตรวจจับระยะขอบฟิล์ม
Corona treatment	ให้ประจุไฟฟ้าไปยังผิวฟิล์มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบริเวณผิวฟิล์ม เพื่อช่วยให้ผิวฟิล์มสามารถเกาะติดสีและกาวได้ดี
Secondary nip rolls assembly	ให้ความเย็นแก่ฟิล์มก่อนเข้าสู่ชั้นตอนม้วนเก็บ
Film winder	ม้วนเก็บแผ่นฟิล์ม
Turner bar system	ชุดลูกกลิ้งลมหมุนระบายความร้อนในแผ่นฟิล์ม
Take off	ชุดลูกกลิ้งดึงท่อฟิล์มหลังจากผ่านกระจงมหนีบ
Collapsing frame	รีดอากาศออกจากลูกโป่งฟิล์มก่อนเข้าสู่ลูกกลิ้งหนีบ
Calibration cage	กรงประคองลูกโป่งฟิล์มให้อยู่ในระนาบเครื่อง
Cooling ring	ปล่อยลมเย็นเพื่อใช้ในการหล่อเย็นลูกโป่งร้อนที่ออกมาจากหัวตาย
Blow film die head	ช่องปล่อยเนื้อพลาสติกหลอมออกมาเป็นท่อ เพื่อเป่าลมขึ้นรูปเป็นลูกโป่ง
Extruder	ให้ความร้อนแก่พลาสติกเพื่อหลอมและลำเลียงพลาสติกสู่หัวตายขึ้นรูปโดยอาศัยการหมุนของสกรู
Suction dosing unit	ดูดเม็ดพลาสติกจากถังตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นปล่อยเม็ดเข้าสกรูอัดรีด

ในการเป่าฟิล์มมีการให้แรงกับลูกโป่งฟิล์ม 2 ทิศทาง คือ ทิศทาง MD จากแรงดึงม้วนเก็บ และทิศทาง TD จากการดันของอากาศภายในลูกโป่ง ดังรูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของลูกโป่งฟิล์ม

พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวใน 2 ทิศทาง คือ ทิศทาง MD และทิศทาง TD โดยการจัดเรียงตัวในแต่ละทิศทางนั้นขึ้นกับชนิดเม็ดพลาสติกและภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป สำหรับการเป่าฟิล์มในเชิงพาณิชย์นั้น ทางผู้ผลิตจะเป่าตามความต้องการของผู้ใช้งาน แตกต่างกันไปทั้งในส่วนของคุณสมบัติพอลิเมอร์ ความกว้าง และความหนา โดยความกว้างและความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกันในการผลิตแต่ละครั้งนั้นส่งผลต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ สัณฐานวิทยาของฟิล์ม ทำให้สมบัติฟิล์มแตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของลูกโป่งฟิล์ม [4]

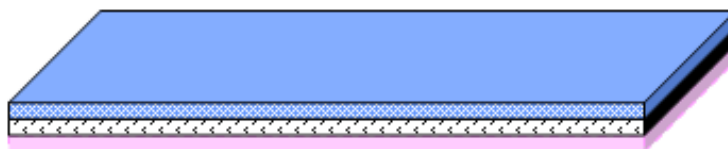
องค์ประกอบของลูกโป่งฟิล์ม

- ความกว้างแผ่นเรียบ (Layflat): ความกว้างของฟิล์มหลังจากผ่านการรีดเป็นแผ่นเรียบ
- ระยะเส้นหมอก (Frost line height): ระดับที่พอลิเมอร์หลอมเริ่มเปลี่ยนเป็นของแข็ง
- อัตราส่วนการเป่า (Blow-up ratio): อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางลูกโป่งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวตายขึ้นรูป
- อัตราส่วนการดึง (Draw down ratio): อัตราส่วนระหว่างช่องหัวตายขึ้นรูปต่อผลคูณของความหนาฟิล์มกับอัตราส่วนการเป่า
- ทิศทาง MD (Machine direction) : ทิศทางขนานกับแรงดึงเครื่อง
- ทิศทาง TD (Transverse direction) : ทิศทางตั้งฉากกับแรงดึงเครื่อง

2.3 เทคโนโลยีเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น (Co-extrusion blown film technology) [5]

เทคโนโลยีการเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น คือ การเป่าฟิล์มผ่านหัวตายหัวเดียวด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันหรือหลายชนิด ในหัวตายขึ้นรูปจะมีการรวมเอาพอลิเมอร์หลอมจากแต่ละสกรูมาติดกันเป็นฟิล์มแผ่นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.6

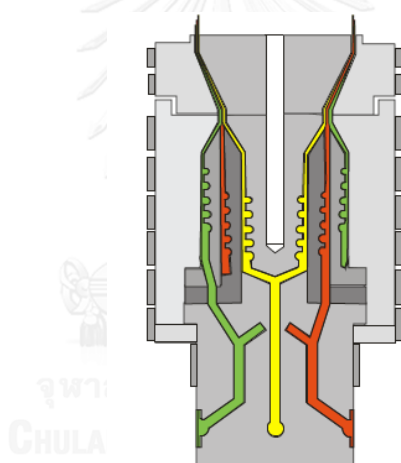
จุดประสงค์ของการเป่าฟิล์มแบบหลายชั้นคือ รวบรวมจุดเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิด แต่ละสกรูมาอยู่ในฟิล์มแผ่นเดียวกัน เช่น แข็งแรง ต้านทานต่อออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ มีสี (Dual color) ทนต่อความร้อน ตัดกาได้ดี ต้นทุนต่ำ โดยทั่วไปนิยมนำมาใช้ในกลุ่มบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ได้แก่ เนื้อสัตว์ เนยแข็ง อาหารสำเร็จรูป รวมถึงผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ทาง การแพทย์ และชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.6 แบบจำลองฟิล์มที่ได้จากการเป่าแบบหลายชั้น [5]

เทคโนโลยีเป่าฟิล์มแบบหลายชั้นเพิ่มต้นทุนการผลิตและความซับซ้อนในการเป่าฟิล์ม เนื่องจากต้องอาศัยซอฟต์แวร์ และเพิ่มทักษะของพนักงานในการควบคุมระบบเครื่องเป่า อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นทำให้เทคโนโลยีเป่าแบบหลายชั้นสามารถสร้างกำไรให้ผู้ผลิตได้

ปัจจัยสำคัญของเทคโนโลยีเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น คือ การออกแบบหัวตายเพื่อให้พอลิเมอร์ไหลผ่าน (รูปที่ 2.7) โดยทั่วไปในการไหลของพอลิเมอร์ควรมีเวลาในหัวตายน้อย เพื่อลดการสลายตัวของพอลิเมอร์ เกิดความดันลด (Pressure drop) น้อย นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงระยะทางการไหลภายในหัวตายหลังจากพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ไหลมาบรรจบกัน พอลิเมอร์หลายชนิดไม่สามารถไหลด้วยกันเป็นระยะทางไกลเนื่องจากการแทรกเข้าหากันบริเวณผิวที่สัมผัสกัน หรืออาจเกิดการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุที่ให้ความร้อนมากกว่าไปยังวัสดุที่มีความร้อนน้อยกว่า



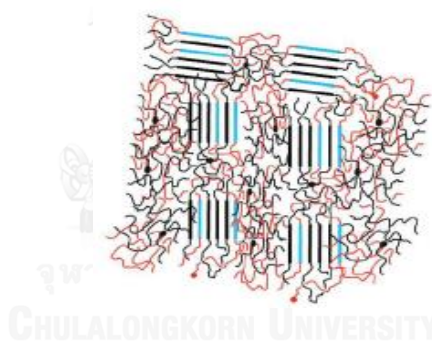
รูปที่ 2.7 หัวตายสำหรับการเป่าฟิล์มแบบ 3 ชั้น [5]

2.4 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [6, 7]

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดผลึกของพอลิเมอร์มี 2 ทฤษฎี คือ แบบจำลองผลึกฟริงก์ไมเซลล์ (Fringed micelle model) และแบบจำลองสายโซ่พับ (Fold chain model)

แบบจำลองผลึกฟริงก์ไมเซลล์

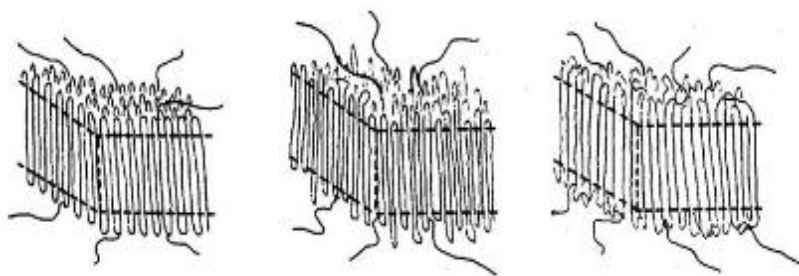
แบบจำลองผลึกฟริงก์ไมเซลล์ เป็นแบบจำลองอย่างง่ายของโครงสร้างกิ่งผลึกของพอลิเมอร์ แบบจำลองนี้อธิบายว่า โครงสร้างกิ่งผลึกของพอลิเมอร์ประกอบด้วย 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคผลึก และภูมิภาคอสัณฐาน โดยภูมิภาคผลึกมีการสร้างของสายโซ่ที่จัดเรียงโมเลกุลขนานกัน ในขณะที่ภูมิภาคอสัณฐานประกอบด้วยการเรียงตัวอย่างสุ่ม (รูปที่ 2.8) สามารถอธิบายสมบัติเชิงกลโดยการอาศัยสายโซ่เชื่อมโยง (Physical linkage) ระหว่าง 2 บริเวณ แต่ไม่สามารถอธิบายลักษณะทางสัณฐานวิทยา เช่น การเกิดผลึกแบบทรงกลมภายใต้ภาวะของพอลิเมอร์หลอมได้ ดังนั้นจึงได้มีการอธิบายด้วยแบบจำลองสายโซ่พับ



รูปที่ 2.8 แบบจำลองผลึกฟริงก์ไมเซลล์ [6]

แบบจำลองสายโซ่พับ

เป็นแบบจำลองที่เกิดจากงานวิจัยเกี่ยวกับผลึกของพอลิเมอร์อธิบายว่า ผลึกในพอลิเมอร์เกิดจากการพับตัวของหนึ่งสายโซ่โมเลกุล ด้วยระยะประมาณ 10 นาโนเมตร เกิดเป็นชั้นผลึก (Lamellae) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก และพบวาระหว่างชั้นผลึกของพอลิเมอร์ยังคงมีส่วนของโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบหรืออสัณฐานปนอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองสายโซ่แบบพับ [7]

การพิสูจน์เพื่ออธิบายว่าการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ในทฤษฎีใดถูกต้องนั้นทำได้ยาก เนื่องจากผลการศึกษาเกี่ยวกับผลึกของพอลิเมอร์สอดคล้องกับทั้งสองทฤษฎี เช่น การเกิดผลึกในพอลิเมอร์ทำให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งสูงขึ้น ทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองจากหลายงานวิจัยสอดคล้องกับแบบจำลองสายโซ่พับมีมากกว่าแบบจำลองแบบฟริงไมเซลล์

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ มีดังต่อไปนี้

- ความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล (Complexity): ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น พอลิเอทิลีน ซึ่งไม่มีหมู่แทนที่ที่เกะกะหรือกลุ่มอะตอม ซึ่งอาจจะกีดขวางการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate): เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงตัวมากขึ้น โอกาสเกิดเป็นผลึกจึงมากขึ้น
- การให้ความร้อน (Annealing): การให้ความร้อนกับพอลิเมอร์โครงสร้างอสัณฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย สามารถกระตุ้นให้โมเลกุลจัดเรียงตัวใหม่ อย่างเป็นระเบียบและเกิดเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น
- ระดับของพอลิเมอไรเซชัน (Degree of Polymerization): พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวมากจะมีโอกาสเกิดเป็นผลึกได้ยากกว่า
- การเสียรูป (Deformation): การเสียรูปในกรณี เหนียวนำไปให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้เกิดผลึกได้มากขึ้น เช่น การให้แรงดึง

2.5 การเกิดผลึกจากการเหนี่ยวนำของการไหล (Flow-Induced Crystallization) [6, 8, 9]

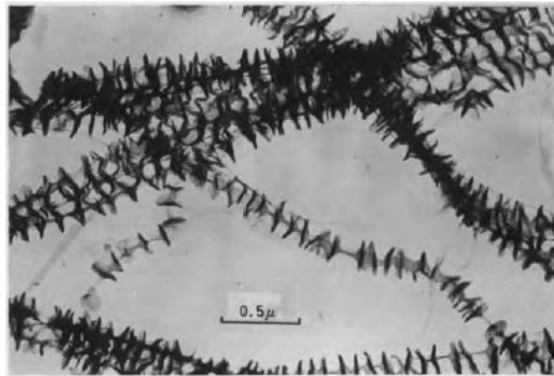
ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การฉีดเข้าแม่พิมพ์ การอัดรีด การปั่นเส้นใย หรือการเป่าฟิล์ม พอลิเมอร์มีการไหลภายใต้ภาวะของแรงเฉือน แรงดึงยืด ฯลฯ การเกิดผลึกเกิดขึ้นได้ทั้งในขั้นตอนการไหลและหลังจากเกิดการไหล แต่สถานะของกระบวนการและโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของแต่ละชนิดพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสัณฐานวิทยา โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ภายใต้ภาวะการไหล มี 2 แบบ คือ

- 1) โครงสร้างผลึกแบบทรงกลม (Spherulites; point-like nuclei)
- 2) โครงสร้างผลึกแบบชิชเคบับส์ (Shish-kebabs: thread-like nuclei)

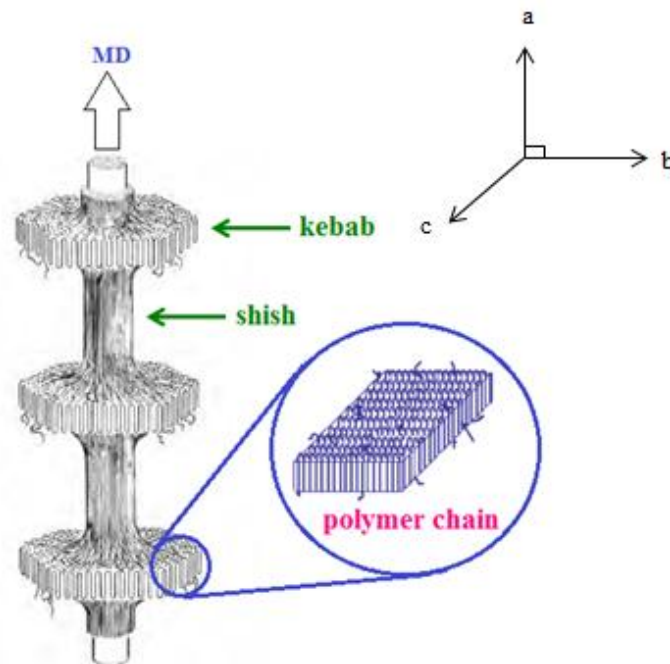
การเกิดผลึกและโครงสร้างของผลึกขึ้นกับการจัดเรียงโมเลกุลซึ่งเป็นผลมาจากการไหลเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ อัตราการเฉือน และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดผลึกจากการเหนี่ยวนำของการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์หลอม พบว่าผลของการไหลเพิ่มการสร้างนิวเคลียส ส่งผลให้นิวเคลียสจัดเรียงโมเลกุลขนานกับทิศทางการไหล นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลส่งผลให้อัตราการโตของผลึกเพิ่มขึ้น [8]

โครงสร้างผลึกแบบชิชเคบับส์

โครงสร้างผลึกแบบชิชเคบับส์ ถูกค้นพบจากการทดลองของ Penning ซึ่งได้ทำการตกตะกอนพอลิเอทิลีนจากสารละลายของพอลิเอทิลีนภายใต้แรงเหวี่ยง ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของการทดลองครั้งนี้พบว่า ผิวสัมผัส (Texture) ของพอลิเอทิลีนที่ได้เป็นแบบผสม “fibre platelet shish-kebab” ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยโครงสร้างชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแกน (Fibrous) เกิดจากสายโซ่โมเลกุลที่ถูกยืดออกเนื่องจากการไหล และมีสายโซ่โมเลกุลที่ไม่ได้ถูกยืดหรือถูกยืดน้อย สร้างชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐาน ล้อมรอบแกนและโตออกในทิศทางตั้งฉากกับแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 สัณฐานวิทยาที่ผิวของโครงสร้างแบบชิชเคบับส์ที่ได้จากการทดลองของ Penning [9]



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของโครงสร้างผลึกแบบชิชเคบับส์ [7]

ความสามารถในการยึดของโมเลกุลพอลิเอทิลีนภายใต้ภาวะการไหลถูกกำหนดด้วยน้ำหนักโมเลกุล พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถยึดออกได้มาก ดังนั้นในระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง สายโซ่ที่มีความยาวมากจะทำหน้าที่เป็นแกน ขณะที่โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยสร้างชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐานขนานกันในทิศทางการไหล

การศึกษาเกี่ยวกับผลของการไหลต่อการสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลส่งผลให้ขนาดของผลึกลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้จำนวนของนิวเคลียสผลึก (Nuclei) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลของการไหลทำให้โครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถว มีการจัดเรียงในทิศทาง MD ขนานกับการไหล และเหนี่ยวนำให้เกิดการโตของชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐานในทิศทาง TD ซึ่งตั้งฉากกับการไหล

แบบจำลองทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถวที่เป็นที่ยอมรับและถูกนำมาอ้างอิงในหลายงานวิจัย คือ แบบจำลองสัณฐานวิทยาของ Keller แบบจำลองดังกล่าวได้แบ่งสัณฐานวิทยาโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถวออกเป็น 2 แบบ คือ สัณฐานวิทยาของนิวเคลียสแถวที่ระดับความเค้นต่ำ (Keller I model) และสัณฐานวิทยาของนิวเคลียสแถวที่ระดับความเค้นสูง (Keller II model) โดย Keller ได้อธิบายว่าภายใต้ภาวะที่ไม่มีความเค้นเข้ามากระทำ พอลิเมอร์เริ่มสร้างผลึกจากจุดกำเนิดผลึกและค่อยๆ ขยายออกด้วยการบิดของชั้นผลึกจนเป็นโครงสร้างคล้ายทรงกลม (Spherulites) แต่เมื่อมีความเค้นเข้ามากระทำ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

1) Keller I model

ที่ระดับความเค้นในระบบต่ำ ไม่เพียงพอที่จะหยุดการบิดเกลียวของชั้นผลึก แต่สามารถที่จะสร้างแถวนิวเคลียสขึ้นได้ ชั้นผลึกที่เกิดขึ้นบางส่วนมีการบิดเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 2.13a

2) Keller II model

ความเค้นในระบบมากพอที่จะสร้างแถวของนิวเคลียสให้เพิ่มขึ้น แต่ยังคงผลโครงสร้างผลึกมีขนาดเล็กลง การเกิดผลึกภายใต้ภาวะที่มีความเค้นสูง สายโซ่ถูกพับและจัดเรียงโมเลกุลเป็นชั้นในทิศทางเดียวกับความเค้น ดังนั้นชั้นผลึกจะถูกป้องกันไม่ให้เกิดการบิดเกลียวขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13b



รูปที่ 2.13 สันฐานวิทยาของ LDPE ที่ได้จากการทดลองของ Keller a) Keller I model และ b) Keller II model [9]

2.6 การจัดเรียงโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxial orientation) [5, 6, 10]

ในกระบวนการเป่าฟิล์มพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวใน 2 ทิศทาง การดึงของลูกกลิ้งในทิศทางขนานเครื่องทำให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD ขณะเดียวกันการขยายตัวภายในของลูกโป่งก่อให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง TD โดยการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดขึ้นก่อนที่พอลิเมอร์หลอมจะเย็นตัวลง การยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์สามารถอธิบายได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

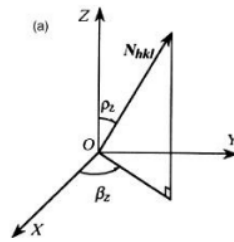
- 1) Static extension: สายโซ่ถูกยืดและคงไว้ในสภาวะเดิมจนกระทั่งเกิดเป็นผลึกขึ้น ก่อนการเกิดผลึกคือ มีการจัดเรียงตัวสายโซ่ โดยปกติสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่เกิด stress relaxation ในขั้นตอนสร้างผลึก
- 2) Dynamic extension: สายโซ่ถูกยืดและเกิดผลึกโดยการเหนี่ยวนำของการไหลสามารถเกิดขึ้นได้ในภาวะหลอมและภาวะสารละลายที่มีความเร็วการไหลไม่คงที่ตลอดทิศทางการไหล (Elongation flow)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการจัดเรียงโมเลกุลแบบ 2 ทิศทาง ได้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เช่น XRD, WAXS, SAXS ในการอธิบาย โดยทั่วไปการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง จะใช้การอธิบายด้วยระบบระนาบผลึก (Crystallographic plane) ดังรูปที่ 2.14 เมื่อ

ทิศทางที่ 1 OX = MD ทิศทาง MD

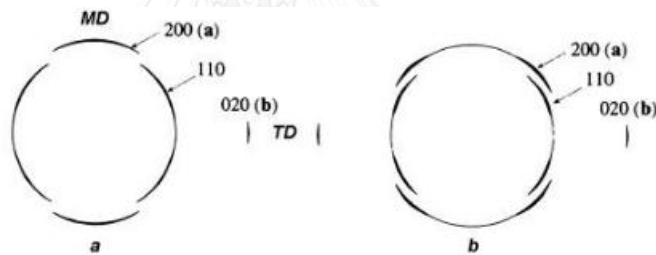
ทิศทางที่ 2 OY = TD ทิศทาง TD

ทิศทางที่ 3 OZ = ND ทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบฟิล์ม



รูปที่ 2.14 ระบบระนาบผลึกของ LLDPE [7]

หลักฐานจากเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างผลึกของพอลิเอทิลีน ประกอบด้วย 3 ระนาบ คือ 110 200 และ 020 โดยความเข้มของพีค 020 ที่ได้จากเทคนิคจะน้อยสุด มองเห็นได้ยาก ในขณะที่พีคของ 110 และ 200 สามารถมองเห็นได้ชัด ในทางปฏิบัติเมื่ออัตราส่วนการเป่าเข้าใกล้ 1 ในหลายงานวิจัยพบว่าส่วนโค้งของระนาบ 200 ในภาพ 2D จากเทคนิค XRD กว้าง แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นส่วนโค้งของระนาบ 200 แคบลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 XRD pattern of LDPE Film (a) Draw ratio = 9.8 (b) Draw ratio = 23.8 [7]

งานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ของฟิล์มที่ได้จากการเป่ามีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD ในกรณีที่ต้องการให้มีการจัดเรียงโมเลกุลแนวโน้มเข้าสู่ equibiaxial สามารถทำได้โดย

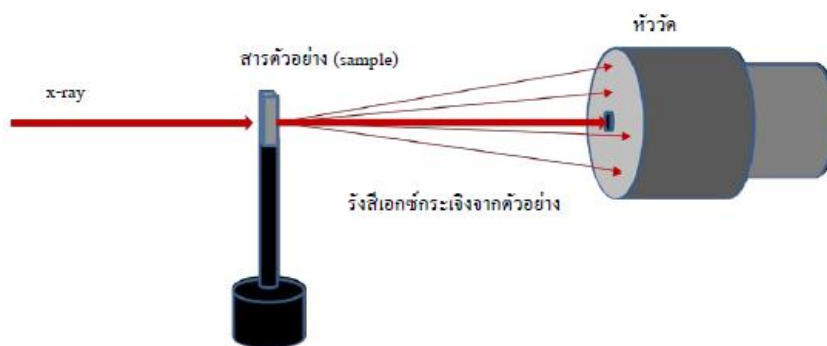
- 1) เพิ่มอัตราส่วนการเป่า
- 2) เพิ่มระยะเส้นหมอก
- 3) ลดอัตราส่วนการดึง

ในระดับอุตสาหกรรมอัตราส่วนการเป่าส่วนใหญ่จะถูกจำกัดที่ไม่เกิน 4 ดังนั้นหากต้องการให้มีการจัดเรียงตัวแบบ equibiaxial จำเป็นต้องลดอัตราส่วนการดึง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนการเป่าส่งผลให้อัตราส่วนการดึงลดลงอยู่แล้ว เนื่องจากความหนาของฟิล์มคงที่

2.7 การวิเคราะห์การจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิค SAXS [11]

หลักการวัดของเทคนิค SAXS

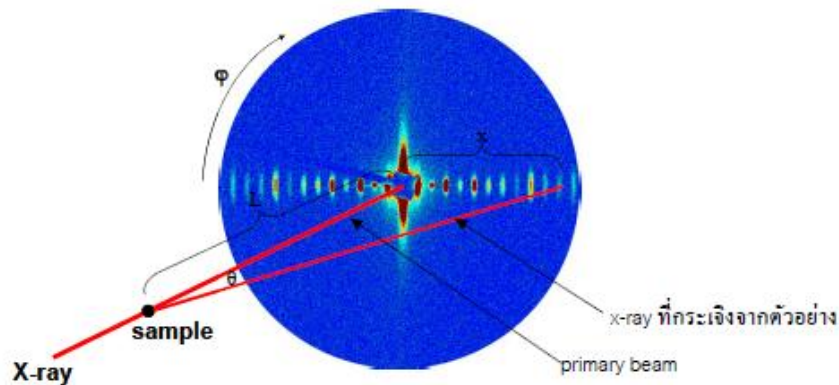
การวัด SAXS ทำได้โดยการให้รังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเดี่ยวทะลุผ่านชิ้นตัวอย่างและวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงไปที่มุมต่างๆ โดยหัววัดที่ใช้เป็นหัววัด 2 มิติ รังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากตัวอย่างจะทำให้เกิดภาพแผนผังการกระเจิง (Scattering pattern) ซึ่งสามารถนำมาแปลความหมายเป็นลักษณะโครงสร้างโมเลกุลได้



รูปที่ 2.16 หลักการของเทคนิค SAXS [10]

หัววัดประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความเข้มรังสีเอกซ์จำนวนมาก เรียกว่าพิกเซล (Pixel) โดยสำหรับกล้อง CCD ที่สถานีทดลอง BL1.3W ประกอบด้วยพิกเซลจำนวน 4,194,304 พิกเซล (วางเรียงกันเป็น matrix ขนาด 2048×2048) แต่ละพิกเซลมีขนาด 79.59×10^{-3} มม. เมื่อรังสีเอกซ์กระเจิงจากตัวอย่างมาตกกระทบหัววัด แต่ละพิกเซลในหัววัดจะวัดค่าความเข้มของ รังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบ ดังนั้นภาพแผนผังการกระเจิงที่ได้จากการวัด จึงเป็นค่าตัวเลขความเข้มรังสีเอกซ์จำนวน 4,194,304 ค่า บรรจุอยู่ในไฟล์ภาพแผนผังการกระเจิง ซึ่งเราสามารถอ่านค่า หรือทำกระบวนการต่างๆ กับตัวเลขเหล่านี้ได้ด้วยโปรแกรมจัดการแผนผังการกระเจิง เช่น การแปลงแผนผังการกระเจิงมาเป็นกราฟค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่มุมกระเจิงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ตำแหน่งของแต่ละพิกเซลในหัววัด สามารถถูกเปลี่ยนเป็นค่ามุมกระเจิงได้ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างภาพ 2 มิติ ที่ได้จากเทคนิค SAXS [10]

มุมการกระเจิงของฟิสิกเซลที่มีระยะห่าง x จากตำแหน่งศูนย์กลาง คือ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{L} \right) \quad (2.1)$$

โดย L เป็นระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างถึงหัววัด (ระยะ sample-detector) และโดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของ detector นั้น เราหมายถึงตำแหน่งฟิสิกเซลบน detector ที่ลำรังสีเอกซ์หลักที่ทะลุตัวอย่างมา (เรียกว่า primary beam) ตกกระทบ หมายเหตุในที่นี้ว่ามุมกระเจิง θ ในที่นี้ เป็นสิ่งเดียวกับมุม 2θ ในแวดวงของ รังสีเอกซ์ Diffraction โดยค่ามุม azimuth (มุม φ ในรูป) จะเป็นตัวบอกทิศทางการเรียงตัวของโครงสร้างในตัวอย่าง เช่น กรณีโครงสร้างเป็นแบบ random แผนผังที่ได้ก็จะเป็นวงกลม ไม่ขึ้นกับมุม φ หรือหากโครงสร้างมีความเป็นระเบียบในแนวนอน แผนผังที่ได้ก็จะปรากฏความเป็นระเบียบอยู่ในแนวนอน (คือ ที่มุม $\varphi=0$ ดังตัวอย่างแผนผังในรูปที่ 2.16) จากแผนผังการกระเจิงที่ได้ จึงสามารถแปลงเป็นกราฟระหว่างค่ามุมกระเจิง θ กับค่าความเข้มรังสีเอกซ์ ในทิศมุม azimuth ต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างในทิศทางต่างๆ ภายในตัวอย่างต่อไปได้

สำหรับการวัด SAXS นั้น นิยมเปลี่ยนค่ามุมกระเจิงเป็นค่าเวกเตอร์การกระเจิง (scattering vector) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ q

$$\text{โดยที่} \quad q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.2)$$

โดย λ เป็นค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบตัวอย่าง จะเกิดการกระเจิงจากอิเล็กตรอนภายในตัวอย่าง ดังนั้นลักษณะการกระเจิงของรังสีเอกซ์จึงขึ้นกับลักษณะความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่บริเวณต่างๆภายในตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสิ่งเดียวกันกับความหนาแน่นโมเลกุลภายในตัวอย่างนั่นเอง ดังนั้นภาพการกระเจิงรังสีเอกซ์ที่ได้ จึงบอกลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลในตัวอย่าง เช่น หากภายในตัวอย่างมีบริเวณที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่ด้วยความหนาแน่นสูงสลับกับบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ รังสีเอกซ์ก็จะกระเจิงจากทั้งสองบริเวณต่างกัน และหากตัวอย่างมีโครงสร้างที่มีบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงสลับกับความหนาแน่นต่ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ อย่างเป็นระเบียบ ก็จะทำให้เกิดการแทรกสอดของรังสีเอกซ์เกิดเป็นแผนผังการกระเจิงที่มีลักษณะเฉพาะ เราจึงสามารถนำแผนผังการกระเจิงนี้ไปแปลผลเป็นโครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวอย่างที่วัดได้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Donatella และคณะ [1] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติฟิล์มผสมของ LDPE และ m-LLDPE พบว่าสมบัติกายภาพที่มีผลต่อการใช้งานของฟิล์มเช่น การซึมผ่านของน้ำ การซึมผ่านของออกซิเจน ความแข็งแรง ความเหนียว สัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุล โครงสร้างผลึก และโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม โดยเฉพาะความหนาแน่นขั้นพื้นฐานในชั้นผลึก ความหนาแน่นขั้นผลึก การบิดของผลึก ปริมาณและชนิดของกิ่งก้านของพอลิเมอร์

Gupta และคณะ [2] ศึกษาผลของมอนอเมอร์ร่วม 1-บิวทีน 1-เฮกซีน และ 1-ออกทีน ใน LLDPE เพื่อศึกษาผลของความยาวกิ่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่าผลจากการทดสอบการดึงฟิล์มที่อัตราเร็วการดึงต่ำไม่แสดงผลที่ชัดเจนมากนัก ในขณะที่เมื่อดึงฟิล์มที่อัตราเร็วสูง พบว่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามความยาวกิ่งก้านของ LLDPE ผลจากเทคนิค DSC พบว่าฟิล์มที่ผลิตจากมอนอเมอร์ร่วม 1-เฮกซีน 1-ออกทีน สมบัติเชิงความร้อนแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ 1-บิวทีน นอกจากนี้ยังพบว่าความทนต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของกิ่งเพิ่มขึ้น

Krishnaswamy และคณะ [11] ศึกษาผลของการจัดเรียงโมเลกุล LLDPE ฟิล์มเป่าต่อค่าความทนแรงฉีกขาดด้วยแบบจำลองโครงสร้างแบบแถว (Row structure) พบว่าความทนแรงฉีกขาดในแนวทิศทาง MD มีค่าสูงขึ้นเมื่อส่วนออสัญฐานมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองแนวเท่ากัน ขณะที่ความทนต่อแรงฉีกขาดในแนวทิศทาง TD มีค่าสูงขึ้นเมื่อชั้นผลึกเดี่ยวแบบชิดกัน และ

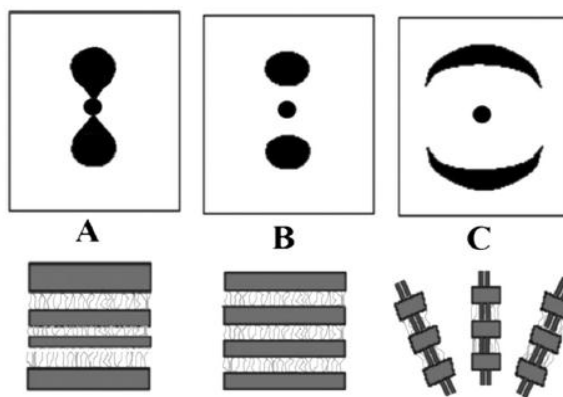
การจัดเรียงชนิดกันในแนวทิศทาง TD แสดงให้เห็นว่าการเสียรูปในบริเวณชั้นผลึกและการส่งผ่านแรงระหว่างแกนของชั้นผลึก มีบทบาทสำคัญต่อความทนแรงฉีกขาดในแนวทิศทาง MD และทิศทาง TD

Zhang และคณะ [12] ศึกษาผลของอัตราเร็วการดึงต่อโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงโมเลกุลของฟิล์มเป่า 3 ชนิด คือ LDPE LLDPE และ HDPE ด้วยการใช้อ่งจุลทรรศน์ พบว่าที่อัตราเร็วการดึงระดับกลาง HDPE แสดงสัญญาณวิทยาชนิดนิวเคลียสแถว (Row nucleated) โดยไม่มีการบิดของชั้นผลึก LDPE แสดงสัญญาณวิทยาแบบคล้ายแท่ง (Rod-like crystalline) ในทางกลับกันพบว่าใน LDPE เกิดโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถวและมีการบิดของผลึกที่ระดับอัตราการดึงสูง สำหรับ LLDPE แสดงโครงสร้างแบบทรงกลมในทุกภาวะการผลิต ดังนั้นสัญญาณวิทยาและการจัดเรียงตัวในโครงสร้างสำหรับ LDPE LLDPE และ HDPE สัมพันธ์กับอัตราส่วนการดึงและลักษณะเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกขึ้นระหว่างการผลิต ซึ่งเป็นสิ่งกำหนดปริมาณนิวเคลียสเส้นใย (Fibrillar nuclei) ดังนั้นสัญญาณวิทยาของผลึกชั้นท้ายสุดมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความทนแรงฉีกขาดและความทนแรงดึงมีค่าแตกต่างกัน

Godshall และคณะ [13] ศึกษาผลของระยะเส้นหมอก (Frost line height) และอัตราส่วนการดึงต่อสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE 2 น้ำหนักโมเลกุล การเปลี่ยนระยะเส้นหมอกสัมพันธ์กับการขยายของลูกโป่งในแนวทิศทาง TD มีผลต่อจำนวนของชั้นผลึกที่ซ้อนกันทั้งในแนวตั้งฉากและขนานกับทิศทาง MD ผลนี้พบว่าสัมพันธ์กับพฤติกรรมรีแลกซ์เซชันของพอลิเมอร์และรูปร่างลูกโป่ง ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนการเป่า สัญญาณวิทยาของฟิล์มสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลอย่างเห็นได้ชัด ค่าความทนแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นในทิศทาง MD แต่ลดลงในทิศทาง TD เมื่อเพิ่มระยะเส้นหมอก ในขณะที่ค่าความทนแรงกระแทกเป็นที่น่าแปลกใจว่า 1 ใน 2 ชนิดเม็ดพลาสติกให้ค่าความทนแรงกระแทกมากขึ้นเมื่อความหนาลดลง

Heeley และคณะ [14] ศึกษาผลของความเร็วยอลออฟ (Haul off) ต่อผลึกสัญญาณวิทยาและการจัดเรียงตัวขณะร้อนระหว่างการขึ้นรูปของ LDPE จากการใช้เทคนิคการกระเจิงรังสีเอ็กซ์แบบมุมเล็ก (Small Angle X-ray Scattering: SAXS) พบว่าการเพิ่มความเร็วยอลออฟทำให้เพิ่มการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ ส่วนมากผลึกมีโครงสร้างแบบชิช-เคบับ (Shish-Kebab) และพบว่า

กึ่งก้านที่สั้นของพอลิเมอร์เป็นจุดบกพร่องจำกัดการโตของผลึก แบบจำลองรูปภาพจากเทคนิค SAXS กับลักษณะโครงสร้างผลึกได้แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองรูปภาพที่ได้จากเทคนิค SAXS กับลักษณะโครงสร้างผลึก [14]

Jalil และคณะ [15] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟิล์มเป่าที่ขึ้นรูปด้วยภาวะต่างๆกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสม (0.05 มม.) ของ LLDPE และ LDPE ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE / LDPE (25-75% LDPE) อัตราส่วนการเป่า (1.5-2.5) อุณหภูมิหลอมเหลว (215-235°C) และระยะเส้นหมอก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาดทั้งในแนวทิศทาง MD และทิศทาง TD ความทนแรงกระแทก และสมบัติทางแสง เช่น ความขุ่น พบว่าค่า R^2 (ค่าบ่งบอกระดับความสอดคล้องกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองซึ่งรวบรวมผลของปัจจัยต่างๆไว้) ของทั้งหมดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่ามากกว่า 0.85 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองเป็นอย่างดี สามารถนำไปสร้างเป็นกราฟและสมการเพื่อใช้ในการทำนายสมบัติฟิล์ม ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อทำนายสมบัติฟิล์มชนิดต่างๆ

Petrie และ Ann [16] ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE โดยทำการเปลี่ยนขนาดหัวตายขึ้นรูป อัตราการไหลของมวล ระยะเส้นหมอก และอัตราส่วนการเป่า โดยกำหนดให้ความหนาของฟิล์มคงที่ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงในทิศทาง TD และความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงในทิศทาง MD ลดลง และความทนแรงฉีกขาดในทิศทาง MD ลดลง

Ogah และ Afiukwa [17] ศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/LLDPE โดยศึกษาผลของการเติม LLDPE ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม พบว่า LLDPE ทำหน้าที่เสมือนสารเสริมแรง (Reinforcing additive) ทำให้ดรรชนีการไหล ความทนแรงดึง และความทนแรงฉีกเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการเติม LLDPE 10% พบว่าค่าความทนแรงฉีกทิศทาง TD เพิ่มขึ้น 33% ในขณะที่ความทนแรงกระแทก ความทนจุดสูงสุด และมอดุลัสของยังลดลง



บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุดิบ

ตารางที่ 3.1 วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุดิบ	เกรด	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ดรรชนีการไหล (g/10min)	ผู้ผลิต
LLDPE-C4	7410A	0.920	1.0	PTTGC
	7410D	0.920	1.0	PTTGC
	7410D1	0.920	1.0	PTTGC
LLDPE-C8	5401G	0.918	1.0	DOW Chemical
LDPE	1902FA	0.919	2.0	SCG
Processing aid	PA17L	0.920	2.1	Ampacet
Slip agent	Slip90	0.550	9.7	Ampacet

3.2 เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ	รุ่น	ผู้ผลิต
เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Universal Tensile Tester)	LF	LLOYD
เครื่องทดสอบความแรงฉีก (Tear Tester)	Protear	Thwing Albert
เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning calorimeter)	DSC8000	Perkin Elmer
เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water permeation instrument)	3/33	Mocon
เครื่องวัดการกระเจิงอิเล็กตรอนแบบมุมเล็ก (Small Angle x-ray Scattering)		
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope)	JSM-7001F	JSM
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)	TECNAI 20	Philips

3.3 การขึ้นรูป

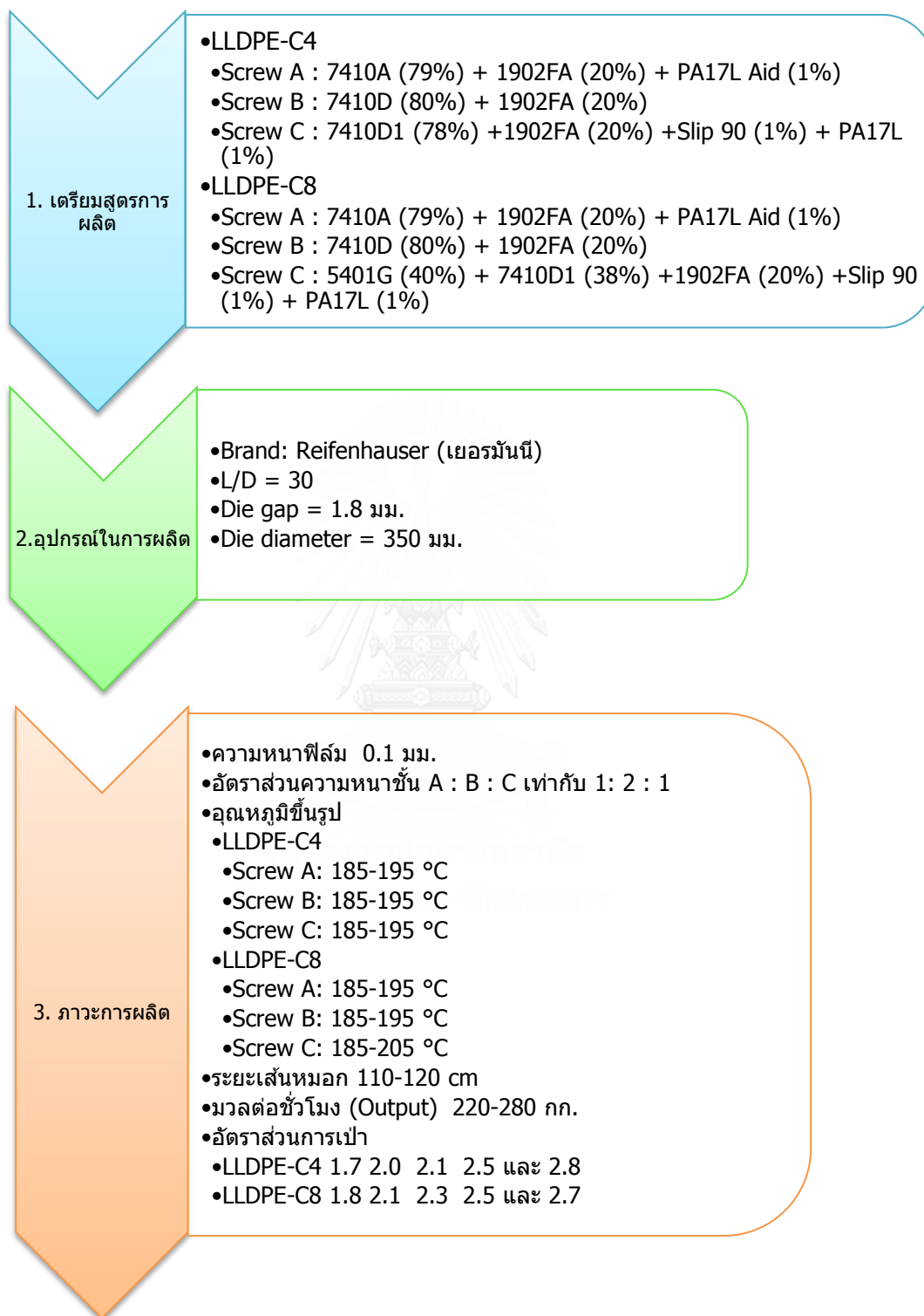
การขึ้นรูปฟิล์มเป่าเริ่มจากการจัดเตรียมวัตถุดิบจากแหล่งผลิต ดังแสดงในตาราง 3.1 จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนา 0.1 มม. ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม Reifenhauser (เยอรมันนี) ซึ่งเป็นเครื่องเป่าฟิล์มแบบอัดรีด 3 สกรู อัตราส่วนความยาวสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 30 โดยสัดส่วนความหนาชั้นฟิล์มเท่ากับ 1:2:1 ในการขึ้นรูปใช้หัวตายและช่องว่างหัวตาย เท่ากับ 350 และ 1.8 มม. ตามลำดับ ใช้ระบบ Dosing suction ในการส่งเม็ดพลาสติกเข้าไปหลอมในสกรู

อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสำหรับฟิล์มเป่าสูตร LLDPE-C4 จากโชนป้อนเม็ดไปยังโชนหัวตายของสกรู A, B และ C เท่ากับ 185-195 องศาเซลเซียส สำหรับสูตร LLDPE-C8 สกรู A และ B ใช้อุณหภูมิจากโชนป้อนเม็ดไปยังโชนหัวตายเท่ากับ 185-195 องศาเซลเซียส ขณะที่สกรู C ใช้อุณหภูมิ 185-205 องศาเซลเซียส

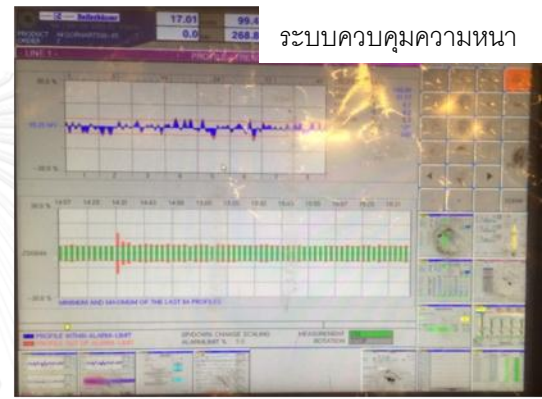
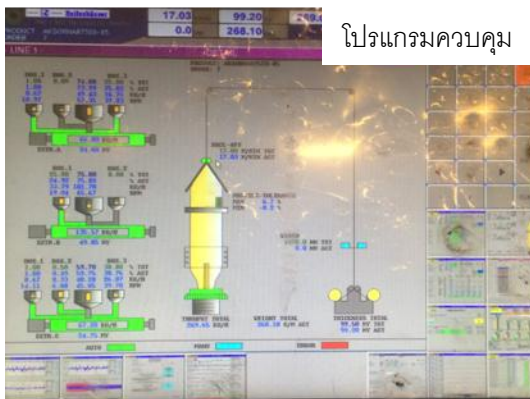
ฟิล์มทั้งหมดขึ้นรูปที่ระยะเส้นหมอกของลูกโป่งฟิล์มช่วง 110-120 ซม. โดยการเป่าฟิล์มสูตร LLDPE-C4 กำหนดความกว้างแผ่นเรียบที่ 905, 1110, 1160, 1350 และ 1520 มม. ในขณะที่การเป่าฟิล์มสูตร LLDPE-C8 กำหนดความกว้างแผ่นเรียบที่ 990, 1110, 1270, 1350 และ 1470 มม. อัตราการไหลของลมหล่อเย็นในระบบ 90% อัตราการไหลของมวล 220-280 กก.ต่อชม. ใช้ระบบลมภายใน (Internal bubble cooling, IBC) และลมภายนอก (Air ring) ในการควบคุมความหนา โดยมีหัววัด (Sensor) ตรวจวัดความหนาบริเวณเส้นหมอก ลูกโป่งฟิล์มมีกรงโลหะ (Bubble cage) ช่วยในการประคอง จากนั้นค่อยๆถูกบีบด้วยกระโجمลูกกลิ้งและผ่านลูกกลิ้งหนีบ มีระบบ Haul off ช่วยในการบิดเกลี่ยความหนา ท่อลูกโป่งถูกร้อยผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น และแผงไฟฟ้า (Corona charging) เพื่อทำการปรับสภาพผิวฟิล์ม ผ่านชุดใบมีดผ่า (Slitting blade) เพื่อตัดขอบท่อฟิล์มแยกให้ฟิล์มออกเป็นแผ่น และเข้าสู่ขั้นตอนการม้วนเก็บ

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8

วัตถุดิบ	ปริมาณวัตถุดิบในแต่ละสกรู (%)	
	ฟิล์มเป่า LLDPE-C4	ฟิล์มเป่า LLDPE-C8
สกรู A		
LLDPE-C4 (7410A)	79	79
LDPE (1902FA)	20	20
Processing aid	1	1
สกรู B		
LLDPE-C4 (7410D)	80	80
LDPE (1902FA)	20	20
สกรู C		
LLDPE-C4 (7410D1)	78	38
LLDPE-C8 (5401G)	-	40
LDPE (1902FA)	20	20
Processing aid (PA17L)	1	1
Slip agent (Slip 90)	1	1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

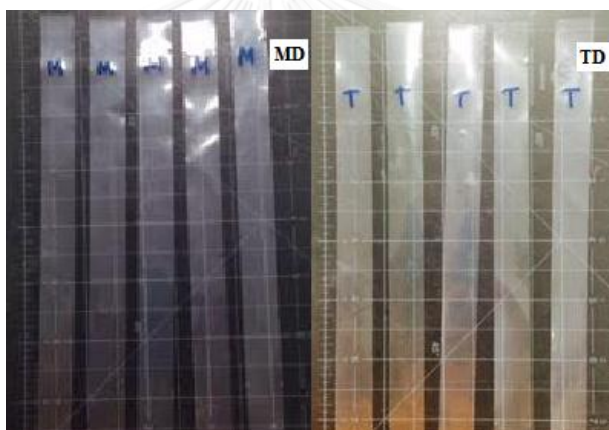


รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดเป่าฟิล์มแบบ 3 สกรู

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การทดสอบความทนแรงดึง

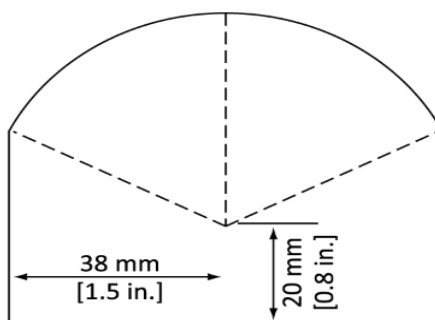
การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าตามมาตรฐาน ASTM D638 ตัดแผ่นฟิล์มที่ได้จากกระบวนการเป่าแบบเป็นชิ้นทดสอบขนาด $15 \times 150 \times 0.001$ มม. (รูปที่ 3.3) ในแนวทิศทาง MD และทิศทาง TD อย่างน้อย 10 ชิ้น และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลรุ่น LLOYD LF เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) โดยมีระยะดึง (Gauge length) เท่ากับ 50 มม. ขนาด load cell เท่ากับ 1 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 50 มม./นาที ที่อุณหภูมิห้อง รายงานค่าเฉลี่ยในแต่ละแนวจากจำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงดึง

3.4.2 การทดสอบความทนแรงฉีก

การทดสอบหาค่าความทนแรงฉีก ตามมาตรฐาน ASTM D1922 ตัดแผ่นฟิล์มที่ได้จากการเป่าให้เป็นรูปชิ้นงานรัศมีคงที่ (รูปที่ 3.4) ในแนวทิศทาง MD และทิศทาง TD อย่างน้อย 10 ชิ้น นำชิ้นทดสอบหนีบและใช้มีดบาก จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงฉีก โดยใช้น้ำหนักตุ้มเหวี่ยง 1600 ก. รายงานค่าเฉลี่ยในแต่ละแนวจากจำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น



รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีก

3.4.3 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ใสฟิล์ม เป่าประมาณ 5 มก. ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนภายใต้ภาวะการทดสอบดังนี้

- เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 150 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก 50 องศาเซลเซียส จนถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที

นำเทอร์โมแกรม (Thermogram) ที่ได้ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) เอนทัลปีการหลอมเหลว (Melting enthalpy, ΔH_M) โดยคำนวณระดับการเกิดผลึก (Degree of crystallinity, X_C) ได้จากสมการที่ (1)

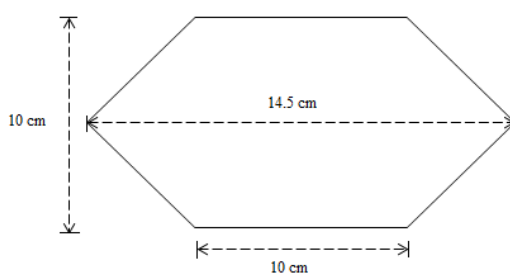
$$X_C(\%) = \frac{\Delta H}{\Delta H_M} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ΔH_M = เอนทัลปีของการหลอมเหลว

$$\Delta H_M^\circ = \text{เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนที่เกิดผลึก 100\%} = 289 \text{ J/g [18]}$$

3.4.4 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM F1249 ตัดชิ้นงานเป็นรูปหกเหลี่ยมขนาด ดังรูปที่ 3.5 นำชิ้นทดสอบไปประกบด้วยด้วยแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งทาจาระบีกันความชื้น จากนั้นนำเข้าประกบเข้ากับเครื่องทดสอบ (รูปที่ 3.6) ที่ภาวะ 38 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90% มีแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวนำความชื้นผ่านแผ่นฟิล์มซึ่งมีพื้นที่สัมผัส 50 ตร.ซม. โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดไอน้ำนำค่าที่วัดได้คำนวณเป็นอัตราการซึมผ่านไอน้ำ



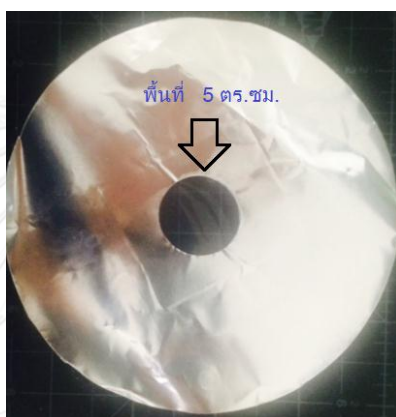
รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

3.4.5 การทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

การทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 3 x 3 ตร.ซม. นำไปประกบด้วยฟิล์ม PET ความหนา 20 μm ขนาด 5 x 5 ตร.ซม. ประกบทับอีกครั้งด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมซึ่งมีการเจาะรูเป็นวงกลม พื้นที่ 5 ตร.ซม. ดังรูปที่ 3.7 นำชิ้นทดสอบประกบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งทาจาระบีกันการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน จากนั้นนำเข้าประกบเข้ากับเครื่องทดสอบ ที่ภาวะ 23 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 99.7% มีแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวนำแก๊สออกซิเจน โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดออกซิเจนนำค่าที่วัดได้คำนวณเป็นอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน



รูปที่ 3.7 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

3.4.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

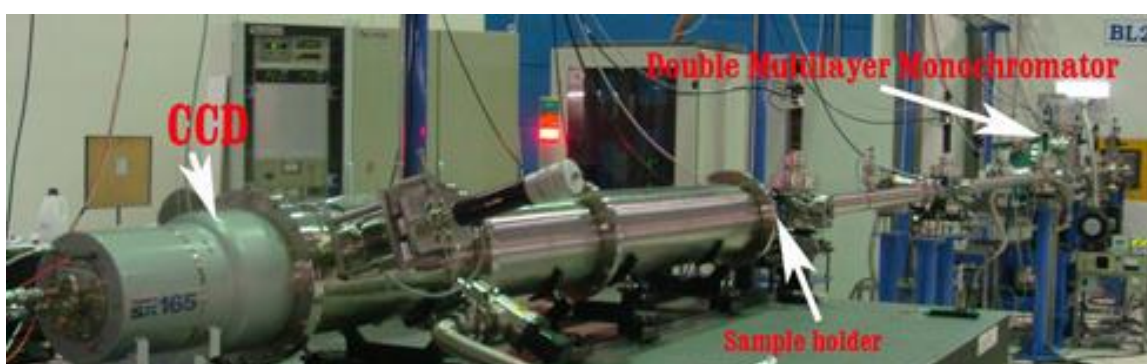
การตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณด้านชั้น C ของผิวชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการเคลือบทองบนพื้นผิวฟิล์มก่อนทำการตรวจสอบ และดำเนินการที่ 5 kV กำลังขยาย 3000 เท่า

3.4.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณหน้าตัดของฟิล์ม (ขนานกับทิศทาง TD) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เตรียมตัวอย่างด้วยการแช่ในสารละลาย 1 เปอร์เซ็นต์ของออสเมียมเตตระออกไซด์ จากนั้นฝังลงบนพลาสติกยึดและเครื่องตัดอัลตราไมโครโทม ก่อนทำการตรวจสอบ และดำเนินการที่ 75 kV กำลังขยาย 55000 เท่า

3.4.8 การตรวจสอบการจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมเล็ก (SAXS)

การตรวจสอบการจัดเรียงโมเลกุลของฟิล์มเป่า เตรียมตัวอย่างขนาด 1×1.5 ซม. ติดกับอุปกรณ์จับยึดของเครื่องทดสอบ (รูปที่ 3.8) วางฟิล์มเป่าให้ทิศทาง MD ชี้ขึ้นด้านบน จากนั้นทำการทดสอบที่ระยะ 3281 มม. จากอุปกรณ์วัดความละเอียด 2048×2048 พิกเซล รูปการจัดเรียงโมเลกุลได้จากการพลอตของข้อมูลการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ 100 ข้อมูล



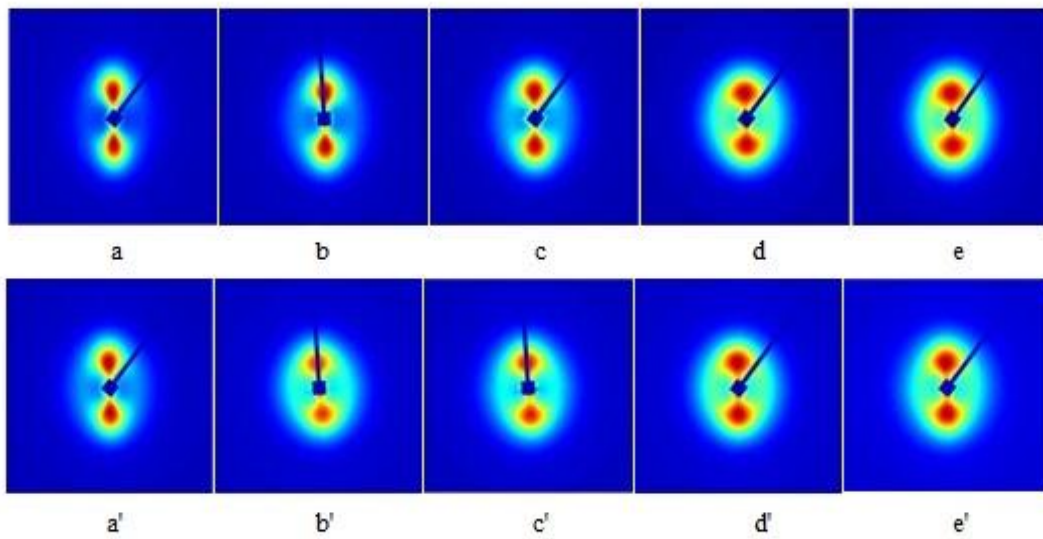
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การจัดเรียงโมเลกุลด้วยเทคนิค SAXS [10]

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สันฐานวิทยาของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

4.1.1 การวิเคราะห์การจัดเรียงผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค SAXS



รูปที่ 4.1 ภาพ 2 มิติจากเทคนิค SAXS ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4; (a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5 (e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0 (c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7

ภาพ 2 มิติจากเทคนิค SAXS ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ได้จากการบันทึกข้อมูลความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงมากระทบหัววัด (Detector) 2 มิติ การกระเจิงรังสีเอ็กซ์ในทุกทิศทางถูกบันทึกพร้อมกัน ในกรณีที่โครงสร้างของวัสดุมีการเรียงตัวเป็นระเบียบในทิศทางเฉพาะ ลักษณะการจัดเรียงตัวจึงปรากฏในแผนผังการกระเจิงที่เกิดขึ้น สามารถใช้ในการศึกษาทิศทางการจัดเรียงผลึกของโครงสร้างของวัสดุที่มีการจัดเรียงโมเลกุลแบบ 2 ทิศทางได้ สำหรับภาพ 2 มิติของ

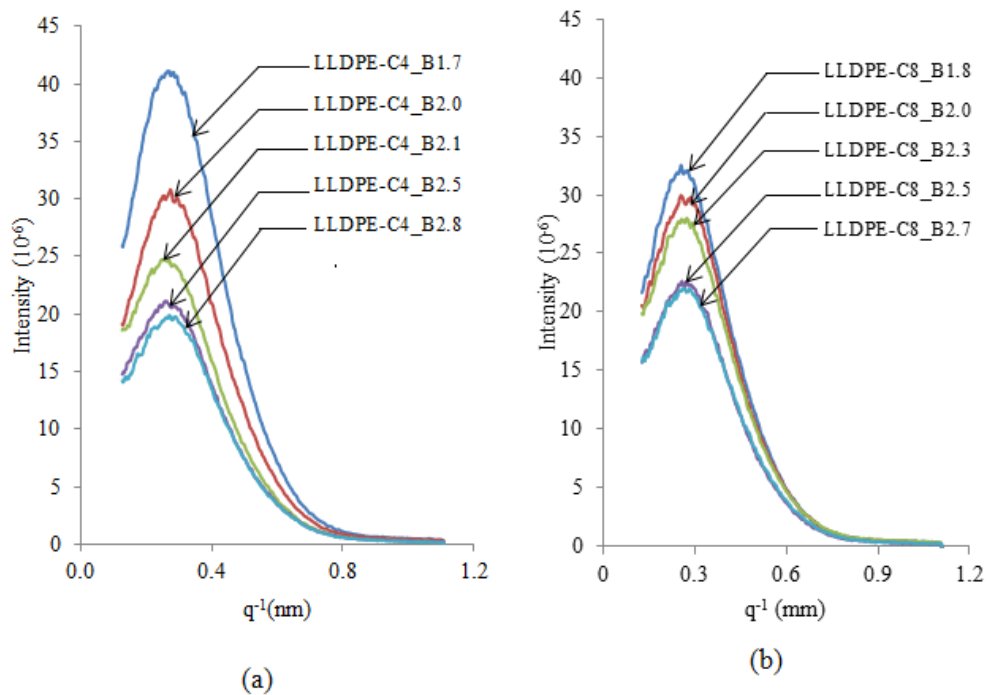
ฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.1a-4.1e และ 4.1a'-4.1e' ตามลำดับ

สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่ทุกอัตราส่วนการเป่ามีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD อย่างไรก็ตามภาพ 2 มิติจากเทคนิค SAXS แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น ผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE มีการจัดเรียงในทิศทาง MD ลดลง แต่มีการจัดเรียงผลึกในทิศทาง TD มากขึ้น พิจารณารูปที่ 4.1a และ 4.1e (BUR 1.7 และ 2.8) ค่ามุม φ ของรูปที่ 4.1a (72°) มีค่ามากกว่ารูปที่ 4.1e (46°) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.0 และ LLDPE-C8_B2.0 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (รูปที่ 4.1b กับ 4.1b') ฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.5 และ LLDPE-C8_B2.5 (รูปที่ 4.1d และ 4.1d') พบว่าภาพ 2 มิติของฟิล์มเป่าทั้งสองไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าความยาวของกิ่ง LLDPE-C8 ไม่มีผลต่อการจัดเรียงผลึกเมื่อเทียบกับ LLDPE-C4

จากรูปที่ 4.1 ภาพ 2 มิติจากเทคนิค SAXS ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่ทุกอัตราส่วนการเป่ามีลักษณะแบบหยดน้ำ (Tear drop shape) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE ประกอบด้วยชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐานที่มีความหนาชั้นผลึกและชั้นอสัณฐานไม่เท่ากัน มีการกระจายของความหนาชั้นผลึกและชั้นอสัณฐาน (รูปที่ 2.18) และพบว่าเมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นลักษณะของหยดน้ำในภาพ 2 มิติ ค่อยๆเปลี่ยนไปในลักษณะทรงกลม (Lobes shape) ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำสุด (BUR 1.7 และ 1.8) ดังรูปที่ 4.1a และ 4.1a' สำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B1.7 และ LLDPE-C8_B1.8 ตามลำดับ พบว่าภาพ 2 มิติที่ได้มีลักษณะคล้ายหยดน้ำอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นผลึกกับชั้นอสัณฐานในแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.1e และ 4.1e' เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าสำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.8 และ LLDPE-C8_B2.7 ตามลำดับ พบว่าภาพ 2 มิติ มีลักษณะคล้ายทรงกลมมากขึ้น ซึ่งเห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการเป่าทำให้ความหนาของชั้นผลึกกับชั้นอสัณฐานมีใกล้เคียงกันมากขึ้น [14, 19, 20]

รูปที่ 4.2a และ 4.2b แสดงความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเทคนิค SAXS ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น พบว่าความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ลดลง เป็นหลักฐานที่ยืนยันว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าพบว่าจำนวนแกนของโครงสร้างนิวเคลียสแถวลดลง เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกันพบว่า ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ (BUR 2.0) ฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.0 มีค่า

ความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์มากกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8_B2.0 เล็กน้อย แต่ที่อัตราส่วนการเป่าสูงขึ้น (BUR 2.5) ความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.5 และ LLDPE-C8_B2.5 ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ ฟิล์มเป่า LLDPE-C4 สามารถจัดเรียงผลึกได้ดีกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เนื่องจากความยาวกิ่งของ LLDPE-C4 สั้นกว่า LLDPE-C8 แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าสูงขึ้น ปริมาณผลึกของฟิล์มเป่าลดลง ประกอบกับมีการจัดเรียงของผลึกในทิศทาง TD มากขึ้น ทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเป่าทั้งสองได้ [1, 10, 14, 19]



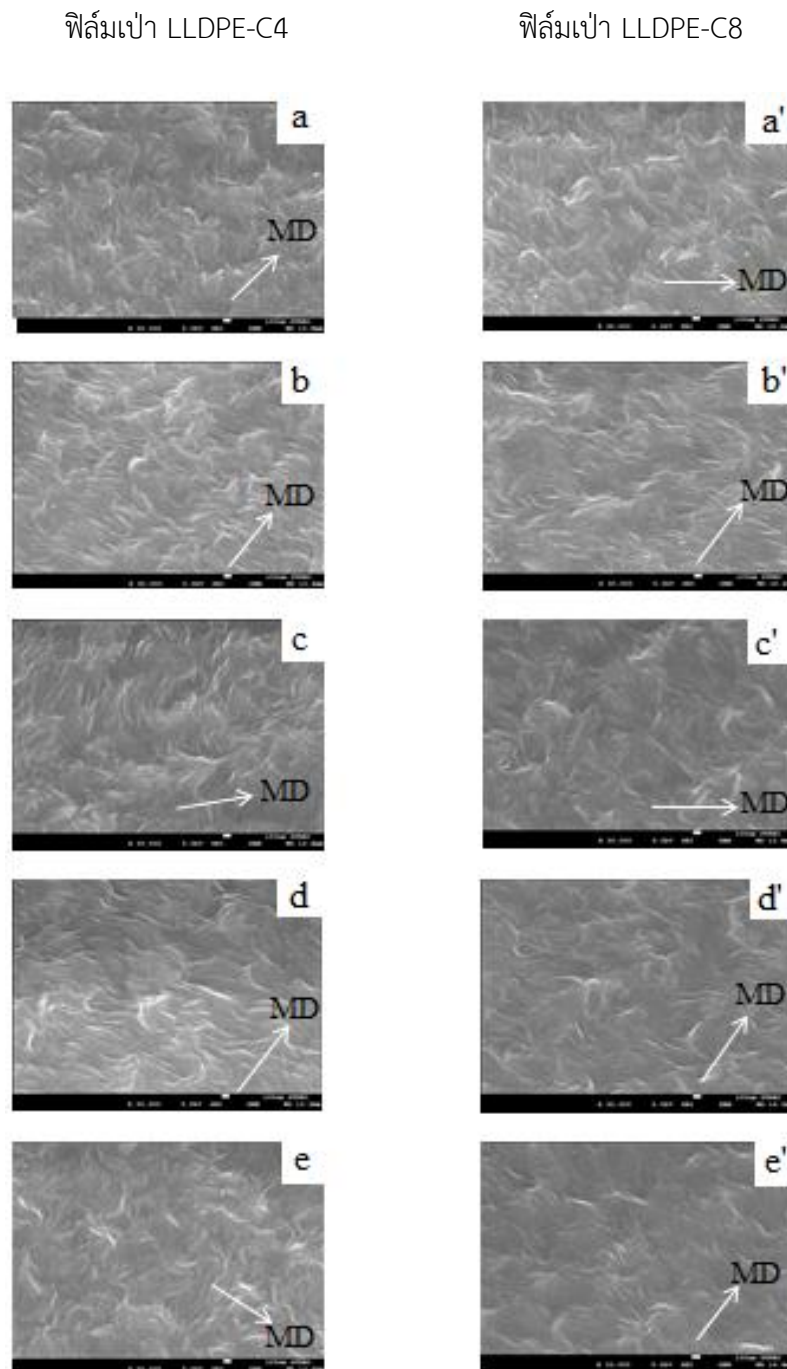
รูปที่ 4.2 ความเข้มการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเป่า (a) LLDPE-C4 (b) LLDPE-C8

4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ผิวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค FE-SEM

สัณฐานวิทยาที่ผิวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FE-SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.3a และ 4.3a' พบว่าที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ ทั้งฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 มีการจัดเรียงของชั้นผลึกที่เป็นระเบียบและสามารถมองเห็นชั้นผลึกได้ชัดเจน แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.3e และ 4.3e') พบว่าการจัดเรียงของผลึกมีความเป็นระเบียบลดลง และมองเห็นผลึกได้ไม่ชัดเจนเท่าที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.5 และ LLDPE-C8_B2.5 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (BUR 2.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.3d และ 4.3d' พบว่า สัณฐานวิทยาที่ผิวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.5 แสดงการจัดเรียงผลึกและมองเห็นได้ชัดเจนกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8_B2.5

ผลจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 สอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิค SAXS พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE ประกอบด้วยชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐานในทิศทาง MD และมีการโตของชั้นผลึกในทิศตั้งฉากกับทิศทาง MD โดยที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ (รูปที่ 4.3a และ 4.3a') โครงสร้างนิวเคลียสแฉกมีการจัดเรียงในทิศทาง MD อย่างเป็นระเบียบ ทำให้สามารถมองเห็นชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐานได้ชัด แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าสูงขึ้น แกนของโครงสร้างนิวเคลียสแฉกมีการจัดเรียงในทิศทาง TD เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นผลึกบางส่วนมีการจัดเรียงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง TD ประกอบกับการลดลงของผลึกเนื่องมาจากการเย็นตัวที่เร็วขึ้น ทำให้มองเห็นสัณฐานวิทยาที่ผิวของฟิล์มเป่าที่ขึ้นรูปอัตราส่วนการเป่าสูง ได้ชัดเจนน้อยกว่าการเป่าฟิล์มที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ [12, 13, 21]

เมื่อพิจารณาฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (BUR 2.0 และ 2.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.3a กับ 4.3a' และ 4.3e กับ 4.3e' พบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4 สามารถจัดเรียงผลึกได้ดีกว่า LLDPE-C8 แสดงให้เห็นว่าความยาวของกิ่งในโครงสร้างของ LLDPE มีผลต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง อย่างไรก็ตามผลจาก FE-SEM เป็นเพียงการยืนยันด้วยสายตาว่าชั้นผลึกของ LLDPE มีลักษณะเป็นชั้นผลึกแบบ orthogonal ไม่สามารถแปลผลเป็นข้อมูลในเชิงปริมาณได้ [13]

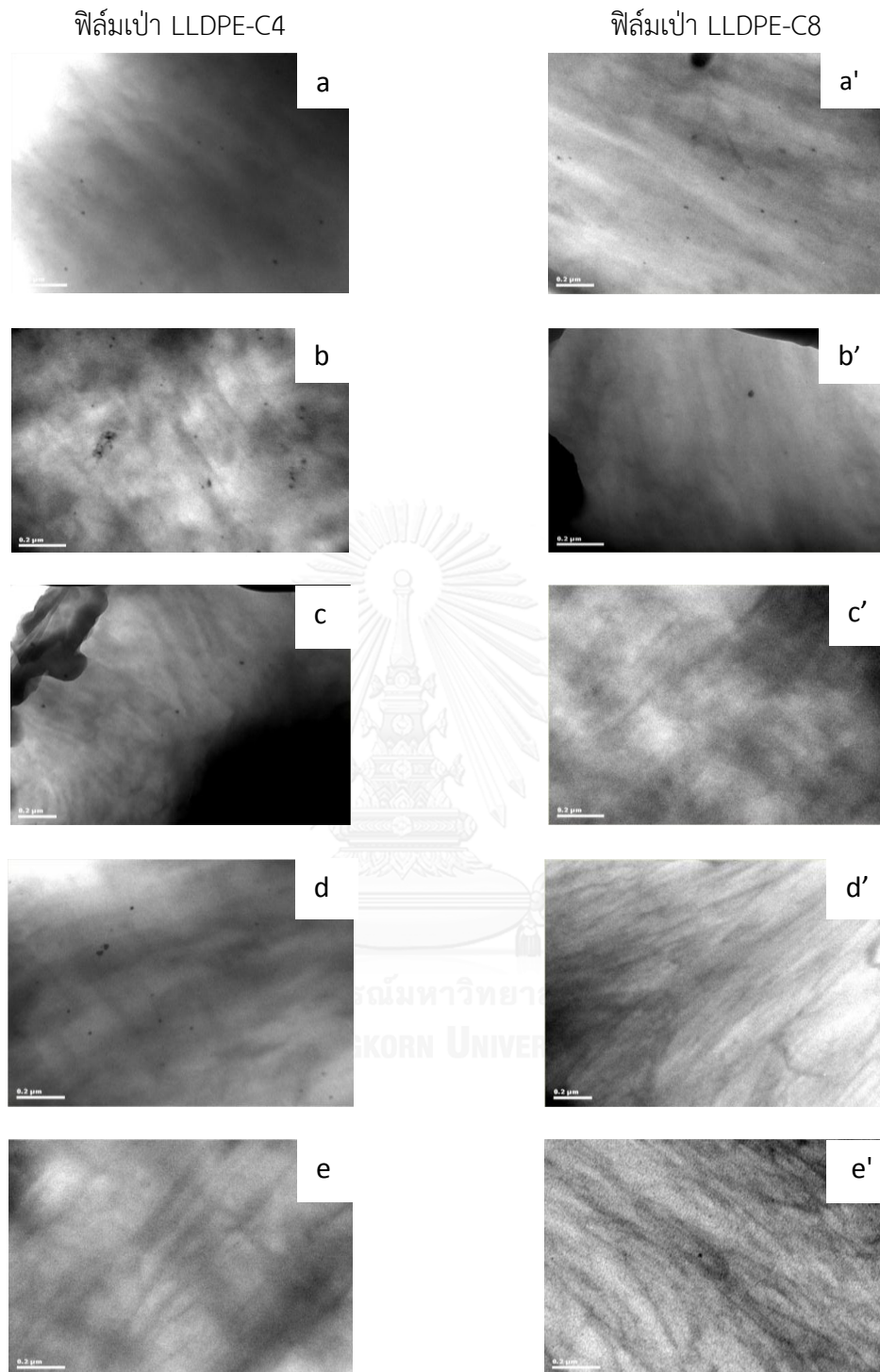


รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาที่ผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4; (a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5 (e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0 (c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7

4.1.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวาง (ระนาบ ND-MD) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ด้วยเทคนิค TEM

สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4a และ 4.4a' พบว่าที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ ทั้งฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B1.7 และ LLDPE-C8_B1.8 ค่อนข้างเรียบไม่แสดงเส้น Fibril nuclei ให้เห็น แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.4e และ 4.4e') LLDPE-C4_B2.8 และ LLDPE-C8_B2.7 สามารถมองเห็นลายเส้นของ Fibril nuclei ได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 พบว่าที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ (BUR = 2.0) ดังแสดงในรูปที่ 4.4b และ 4.4b' ฟิล์มเป่าทั้งสองไม่ปรากฏลายเส้นของ Fibril nuclei ให้เห็นความแตกต่าง แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการเป่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4d และ 4.4d' พบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8_B2.5 สามารถมองเห็น Fibril nuclei ได้ชัดกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.5

สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 แสดงการจัดเรียงผลึกและมองเห็นได้ชัดเจนกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4 อาจเนื่องมาจากฟิล์มเป่า LLDPE-C8 มีแกนของโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถวในโครงสร้างมากกว่า อย่างไรก็ตามข้อมูลจากเทคนิค TEM เป็นเพียงข้อมูลที่ช่วยยืนยันการมีโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถวในโครงสร้างของฟิล์มเป่าเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณผลึกในโครงสร้างฟิล์มมีปริมาณน้อย ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณได้ [13, 20]



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางจากเทคนิค TEM ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4; (a) LLDPE-C4_B1.7 (b) LLDPE-C4_B2.0 (c) LLDPE-C4_B2.1 (d) LLDPE-C4_B2.5 (e) LLDPE-C4_B2.8 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8 (a') LLDPE-C8_B1.8 (b') LLDPE-C8_B2.0 (c') LLDPE-C8_B2.3 (d') LLDPE-C8_B2.5 (e') LLDPE-C8_B2.7

4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

4.2.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

กราฟ Stress-strain curve ของฟิล์มเป่า LLDPE ทุกอัตราส่วนการเป่าทั้งสิ้น LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 แสดงพฤติกรรมแบบ Soft and Tough ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากกราฟ Stress-strain curve ของฟิล์มเป่า LLDPE พบว่าแรงดึงสูงสุดที่จุดขาดของฟิล์มทั้งในทิศทาง MD และ TD ใกล้เคียงกัน (ประมาณ 25 - 27 MPa) เมื่อดึงฟิล์มออกที่ระยะยืดเดียวกัน ทิศทาง MD ของฟิล์มสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าทิศทาง TD ขณะที่ระยะยืดที่จุดขาดในทิศทาง MD น้อยกว่าทิศทาง TD

ในช่วงแรกของกราฟทั้งในทิศทาง MD และ TD ก่อนถึงจุดยอดของกราฟ ฟิล์มแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติก (หากนำแรงออกสามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้) เนื่องจากการตอบสนองต่อแรงของส่วนอสัณฐาน ไม่มีส่วนผลึกตอบสนองต่อแรงในช่วงนี้ เมื่อให้แรงต่อไปส่วนอสัณฐานเกิดการยืดออกทำให้เกิด “Stress softening” ขณะที่ส่วนผลึกยังไม่มีการตอบสนองในช่วงนี้ จุดแรงที่วัดได้มากที่สุดในช่วงนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point) ใช้ในการคำนวณความทนแรงดึงหลังจากจุดยอดฟิล์มเกิดเป็นคอคอด (Necking) ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อแรงของส่วนผลึกซึ่งเกิดจากการเคลื่อนผ่านกันของบริเวณสายโซ่พับ (Fold chain structure) การมีระยะคอคอดยาวแสดงให้เห็นว่าผลึกมีการจัดเรียงในทิศทางที่ดึง หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการขึ้นรูปส่งผลให้เกิดการจัดเรียงผลึกที่ดี บริเวณสุดท้ายของกราฟเกิดจากการแสดงพฤติกรรมแบบ “Stress hardening” ของฟิล์ม การเสียรูปที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการคลายออกของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลอีกครั้งทำให้รับแรงได้มากขึ้น การตอบสนองต่อแรงในลักษณะนี้เกิดขึ้นจนในที่สุดสายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันจนกระทั่งเกิดการขาดของฟิล์ม [22]

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่า ด้านความความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาด แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

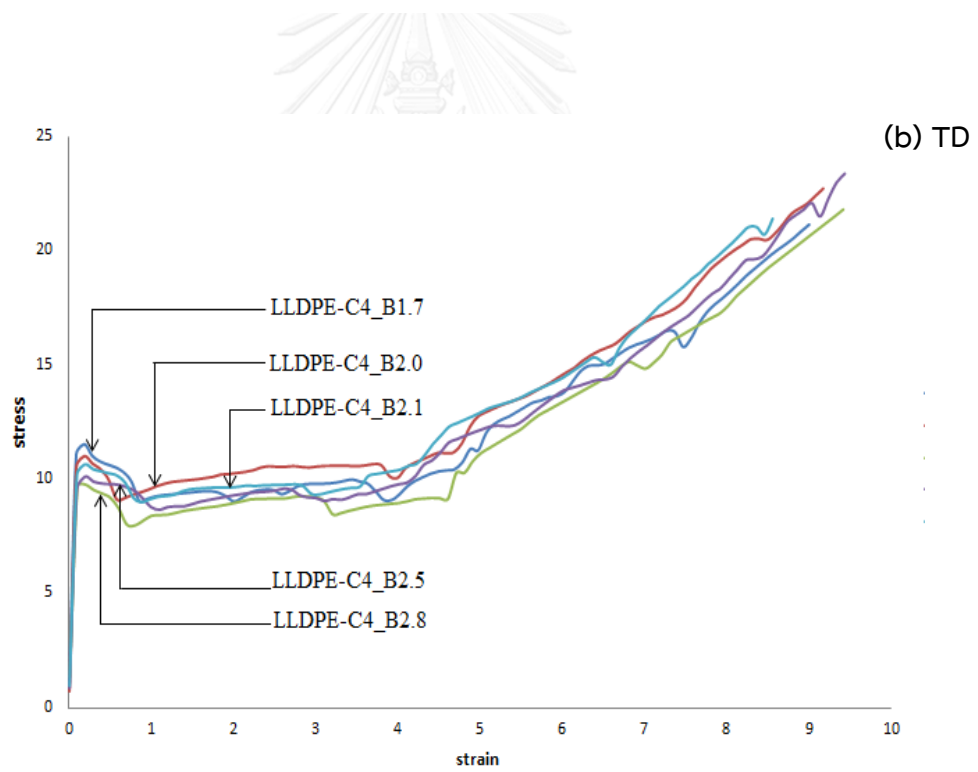
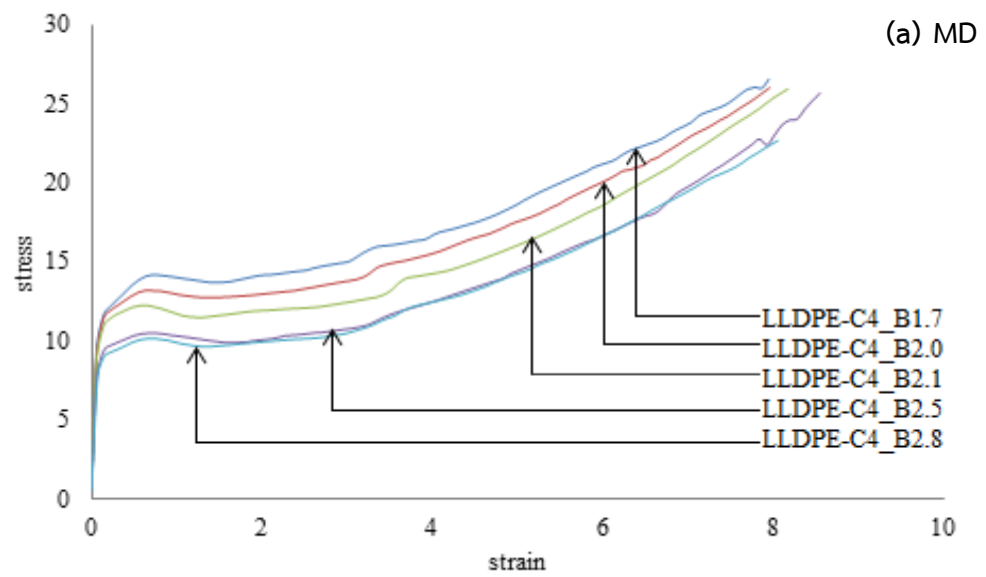
ตารางที่ 4.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และฟิล์มเป่า LLDPE-C8

Sample	TS		ME		EB	
	MD	TD	MD	TD	MD	TD
LLDPE-C4_B1.7	27.8 ± 0.7	21.2 ± 1.0	192.1 ± 6.1	205.2 ± 7.8	778.9 ± 13.7	919.7 ± 9.8
LLDPE-C4_B2.0	26.3 ± 0.7	23.2 ± 0.6	183.7 ± 4.0	196.5 ± 3.2	800.2 ± 9.1	948.8 ± 11.2
LLDPE-C4_B2.1	24.6 ± 0.8	24.3 ± 1.0	150.0 ± 2.7	181.4 ± 7.1	812.9 ± 17.6	980.3 ± 30.5
LLDPE-C4_B2.5	25.2 ± 0.6	25.0 ± 0.8	143.8 ± 6.6	169.2 ± 3.0	872.4 ± 8.0	1004.9 ± 31.1
LLDPE-C4_B2.8	23.9 ± 0.8	27.0 ± 0.8	143.0 ± 2.9	162.3 ± 4.6	839.5 ± 28.5	873.3 ± 15.4
LLDPE-C8_B1.8	27.8 ± 0.6	22.8 ± 0.4	176.3 ± 6.6	201.8 ± 8.1	793.3 ± 23.7	895.2 ± 10.8
LLDPE-C8_B2.0	25.9 ± 1.0	23.5 ± 0.4	171.8 ± 5.8	195.1 ± 6.7	801.2 ± 8.2	944.8 ± 19.8
LLDPE-C8_B2.3	25.8 ± 0.7	25.6 ± 0.4	159.7 ± 6.1	181.3 ± 4.4	821.7 ± 20.2	944.5 ± 10.5
LLDPE-C8_B2.5	24.9 ± 0.9	26.1 ± 1.4	150.2 ± 6.1	180.9 ± 3.8	842.3 ± 16.2	969.1 ± 22.9
LLDPE-C8_B2.7	23.9 ± 0.8	26.5 ± 0.7	141.2 ± 4.3	174.3 ± 6.9	864.3 ± 20.9	988.2 ± 44.4

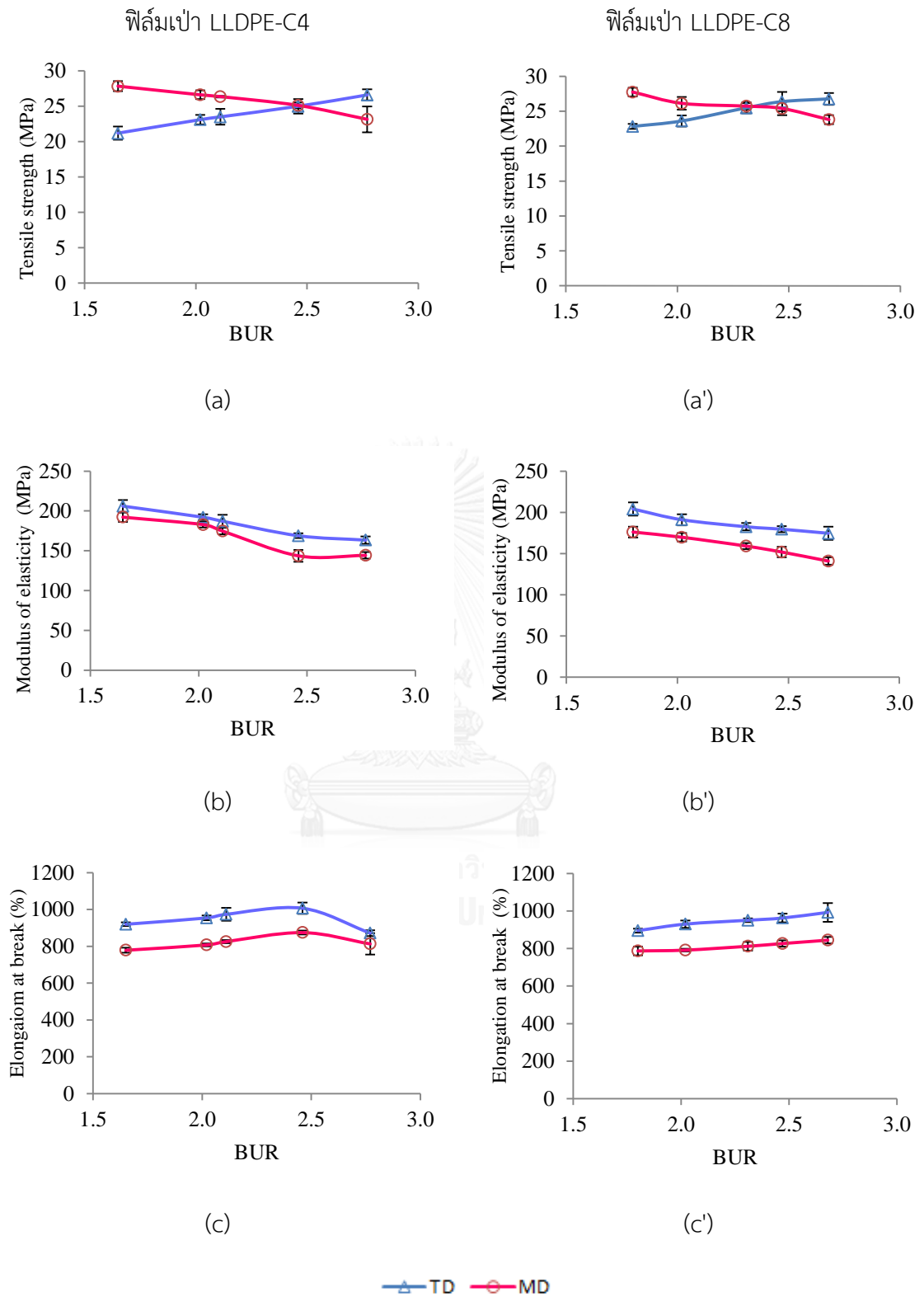
Tensile strength (TS): ความทนแรงดึง

Modulus of elasticity (ME): มอดุลัสความยืดหยุ่น

Elongation at break (EB): ระยะยืดที่จุดขาด



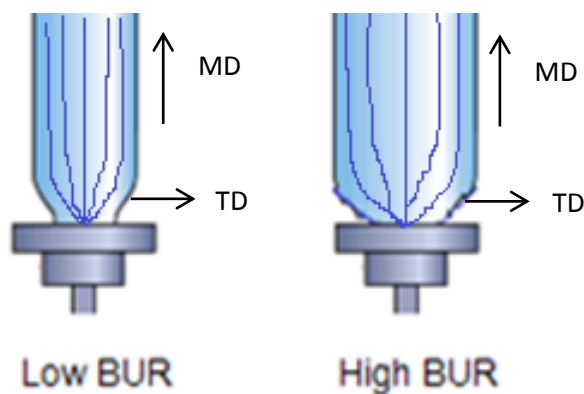
รูปที่ 4.5 Stress-strain ของฟิล์มเป่า LLDPE ในทิศทาง (a) MD และ (b) TD



รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

ผลของอัตราส่วนการเป่าต่อความหนาแน่นตั้งของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 แสดงในรูปที่ 4.6a และ 4.6a' ตามลำดับ สำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4 ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำสุด (BUR 1.7) ค่าความหนาแน่นตั้งของฟิล์มเป่าในทิศทาง MD สูงกว่าทิศทาง TD แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นตั้งในทิศทาง MD ลดลง ขณะที่ความหนาแน่นตั้งในทิศทาง TD เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่อัตราส่วนการเป่าเท่ากับ 2.5 พบว่า ฟิล์มเป่า LLDPE-C4 มีค่าความหนาแน่นตั้งในทิศทาง MD และทิศทาง TD เท่ากัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าขึ้นอีก พบว่าที่อัตราส่วนการเป่าสูงสุด (BUR 2.8) ค่าความหนาแน่นตั้งในทิศทาง TD มากกว่า MD เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนการเป่าต่อความหนาแน่นตั้งของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 พบว่ามีผลการทดลองที่คล้ายกับฟิล์มเป่า LLDPE-C4 โดยที่อัตราส่วนการเป่าเท่ากับ 2.3 ความหนาแน่นตั้งของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 ในทิศทาง MD เท่ากับทิศทาง TD (รูปที่ 4.6a')

การลดลงของความหนาแน่นตั้งในทิศทาง MD เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่า เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของพอลิเมอร์เพื่อให้คงความหนาไว้ที่ 0.1 มม. การเพิ่มอัตราการไหลทำให้พอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงโมเลกุลน้อยลง ส่งผลให้การจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD ลดลง ประกอบกับการเพิ่มอัตราส่วนการเป่าทำให้แรงวนเดอวาลส์ของสายโซ่ในทิศทาง MD ที่ลดลง ดังนั้นความหนาแน่นตั้งในทิศทาง MD จึงลดลง ในทางตรงข้ามการเพิ่มอัตราส่วนการเป่าทำให้มีการขยายตัวของลูกโป่งฟิล์มทำให้พอลิเมอร์มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง TD เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.7 ส่งผลให้ความหนาแน่นตั้งในทิศทาง TD เพิ่มขึ้น [15]



รูปที่ 4.7 การจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนการเป่าต่ำและอัตราส่วนการเป่าสูง [23]

จากรูปที่ 4.6b และ 4.6b' พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่า พิล์มเป่า LLDPE ทั้งสูตร LLDPE-C4 และสูตร LLDPE-C8 มีค่ามอดุลัสลดลง ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกันค่ามอดุลัสในทิศทาง MD ต่ำกว่าค่ามอดุลัสในทิศทาง TD และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 พบว่าค่ามอดุลัสไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับฟิล์มเป่าสูตร LLDPE-C4 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่า จาก 1.7 ไป 2.8 ค่ามอดุลัสในทิศทาง MD และ TD ลดลง 25.0 และ 20.9% ตามลำดับ ขณะที่ฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจาก 1.8 ไป 2.7 มอดุลัสในทิศทาง MD และ TD ลดลง 20.4 และ 14.7% ตามลำดับ

การลดลงของมอดุลัสของฟิล์มเป่า LLDPE อธิบายด้วยโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถว เมื่อฟิล์มเป่า LLDPE ถูกดึงในทิศทาง MD การตอบสนองต่อแรงเป็นไปแบบ “iso-stress pattern” ดังนั้นมอดุลัสของฟิล์มถูกกำหนดด้วยส่วนอสัณฐาน ในทางกลับกันเมื่อฟิล์มเป่า LLDPE ถูกดึงในทิศทาง TD การตอบสนองต่อแรงเป็นไปแบบ “iso-strain pattern” ค่ามอดุลัสของฟิล์มถูกกำหนดด้วยส่วนของผลึก ดังนั้นฟิล์มเป่า LLDPE ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD มากกว่า TD จึงมีค่ามอดุลัสในทิศทาง TD มากกว่าทิศทาง MD ที่ทุกอัตราส่วนการเป่า เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น ทำให้แกนของโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถวไม่สามารถจัดเรียงในทิศทาง MD ได้อย่างสมบูรณ์ มีการเบี่ยงเบนออกในทิศทาง TD อัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แกนของโครงสร้างผลึกแบบนิวเคลียสแถวเบี่ยงเบนเข้าหาทิศทาง TD เพิ่มขึ้น ดังนั้นมอดุลัสจึงลดลง [24]

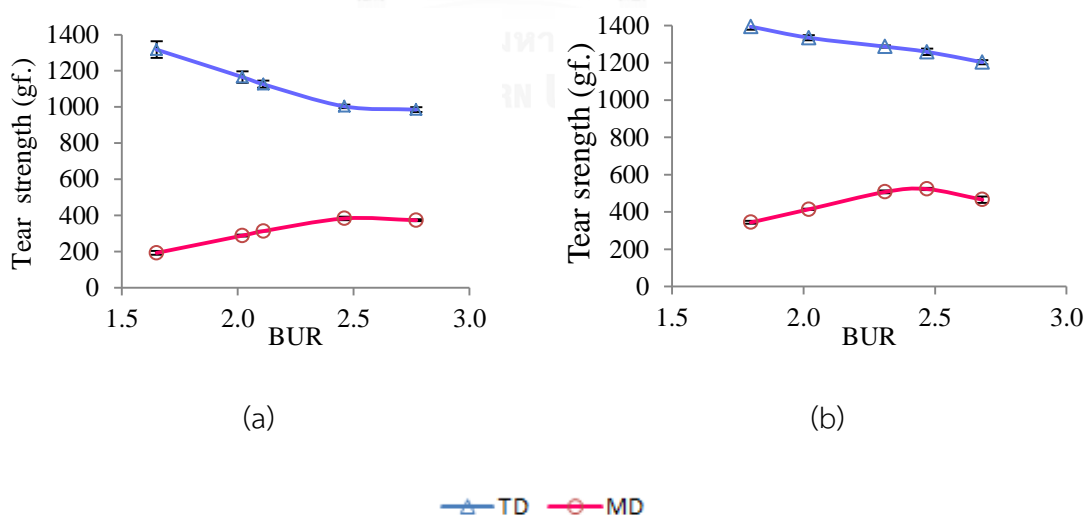
ระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 แสดงในรูปที่ 4.6c และ 4.6c' ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนการเป่าของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ระยะยืดที่จุดขาดในทิศทาง MD น้อยกว่าในทิศทาง TD เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้น หากพิจารณาที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกันของฟิล์มเป่า (BUR 2.0 และ 2.5) LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 มีค่าระยะยืดที่จุดขาดไม่แตกต่างกันมากนัก

เนื่องจากฟิล์มเป่า LLDPE มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD ดังนั้นเมื่อดึงฟิล์มในทิศทาง MD จึงยืดออกได้น้อยกว่าทิศทาง TD และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่า ทำให้ลูกโป่งฟิล์มขยายตัวมีพื้นที่ผิวมากขึ้นส่งผลให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น ปริมาณผลึกลดลง ส่งผลให้การยืดออกของฟิล์มทั้งในทิศทาง MD และ TD ลดลง [5, 25]

4.2.2 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

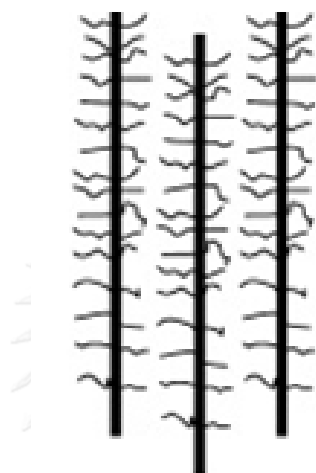
ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 แสดงในรูปที่ 4.8a และ 4.8b ตามลำดับ ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่าทุกอัตราการเป่า ในทิศทาง TD สูงกว่าในทิศทาง MD เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่า ทั้งฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 มีความทนแรงฉีกในทิศทาง MD เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงฉีกในทิศทาง TD ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (BUR 2.0 และ 2.5) พบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8 มีความทนแรงฉีกทั้งในทิศทาง MD และ TD สูงกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4

สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า LLDPE ประกอบด้วยแกนของโครงสร้างแบบนิวเคลียสแกนและชั้นผลึกสลับชั้นอสัณฐานสลับกันในทิศทาง MD ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากที่อัตราส่วนการเป่าต่ำ พอลิเมอร์มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD แกนของโครงสร้างแบบนิวเคลียสแกนมีการจัดเรียงขนานกับทิศทาง MD เมื่อให้แรงฉีกในทิศทาง MD รอยฉีกเกิดการโตในทิศทางขนานกับแกนของโครงสร้าง แรงที่ใช้ในการโตของรอยฉีก (Crack growth) จึงน้อยกว่าในกรณีที่รอยฉีกเกิดการโตในทิศทางตั้งฉากกับแกนโครงสร้าง ในการทดลองครั้งนี้ฟิล์มเป่า LLDPE มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD ดังนั้นความทนแรงฉีกในทิศทาง TD จึงมากกว่าทิศทาง MD ในทุกอัตราส่วนการเป่า [11, 26]

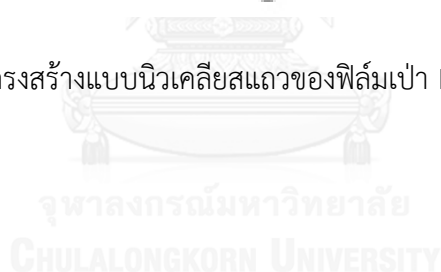


รูปที่ 4.8 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า (a) LLDPE-C4 และ (b) LLDPE-C8

จากรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าเท่ากัน (BUR 2.0 และ 2.5) พบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8 มีความหนาแน่นเชิงกลทั้งในทิศทาง MD และ TD มากกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4 แสดงให้เห็นความยาวของกิ่งในโครงสร้าง LLDPE มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกล โดยฟิล์มเป่า LLDPE-C8 ประกอบด้วยกิ่งในโครงสร้างที่ยาวกว่า LLDPE-C4 (รูปที่ 2.1) ทำให้สามารถส่งผ่านแรงได้ดีกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4 [2, 12]



รูปที่ 4.9 แบบจำลองโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถวของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 [12]



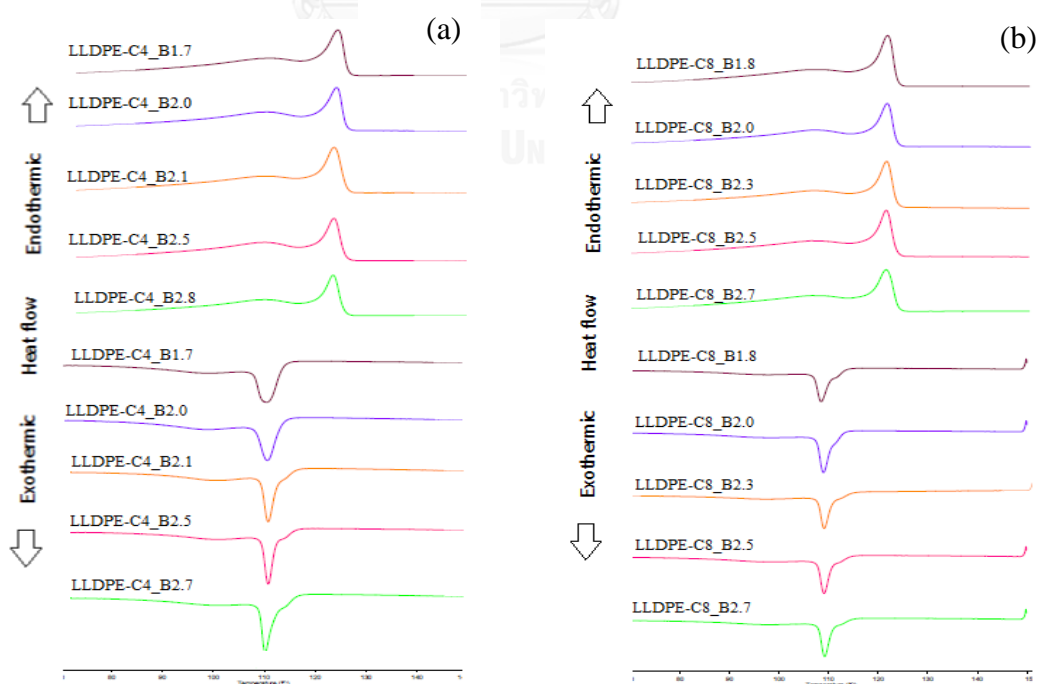
4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ได้รวบรวมไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ได้แก่ อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) เอนทัลปีการหลอมเหลว (ΔH_m) โดยสมบัติเหล่านี้อ่านได้จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ปรากฏในขั้นตอนให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating scan) (รูปที่ 4.10) ด้วยอัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ระดับความเป็นผลึก (X_c) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าอุณหภูมิหลอมผลึกและเอนทัลปีการหลอมของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 ไม่เปลี่ยนแปลง ขณะที่อุณหภูมิหลอมผลึกและเอนทัลปีการหลอมของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป่าที่มี LLDPE-C4 ในโครงสร้างหลักของฟิล์มเป่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจาก 1.7 (LLDPE-C4_B1.7) เป็น 2.8 (LLDPE-C4_B2.8) ปริมาณผลึกในโครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง ($X_c = 30.1 - 30.8\%$) ในขณะที่ฟิล์มเป่า LLDPE-C8 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจาก 1.8 (LLDPE-C8_B1.8) เป็น 2.7 (LLDPE-C8_B2.7) X_c เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (27.9-31.3%) แสดงให้เห็นว่าการมี LLDPE-C8 ในโครงสร้างฟิล์มเป่า LLDPE ส่งผลให้เกิดผลึกได้น้อยลงและมีขนาดของผลึกเล็กลง ซึ่งปรากฏให้เห็นได้โดยการเปลี่ยนแปลงของ T_m และ ΔH_m ในทิศทางที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นลูกโป่งขยายออก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอากาศมากขึ้น อัตราเร็วการเย็นตัวของลูกโป่งฟิล์มเพิ่มขึ้น (BUR = 1.8 - 2.7) ส่งผลให้เกิดผลึกได้น้อยลง ($X_c = 31.3 - 27.9\%$ สำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C8) และเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (อัตราส่วนการเป่า 2.0 และ 2.5) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B2.0 กับ LLDPE-C8_B2.0 และ LLDPE-C4_B2.5 กับ LLDPE-C8_B2.5 พบว่าทั้งสองอัตราส่วนการเป่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8 มี X_c น้อยกว่า LLDPE-C4 เนื่องจากความยาวกิ่งของ LLDPE-C8 ที่ยาวกว่าทำให้จัดเรียงโมเลกุลได้ยากกว่า LLDPE-C4 [2]

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC

Sample	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
LLDPE-C4_B1.7	110.8	122.0	89.1	30.8
LLDPE-C4_B2.0	110.6	121.8	87.8	30.4
LLDPE-C4_B2.1	109.1	121.3	87.8	30.4
LLDPE-C4_B2.5	109.1	121.2	87.4	30.3
LLDPE-C4_B2.8	108.5	121.1	87.1	30.1
LLDPE-C8_B1.8	109.2	121.7	90.6	31.3
LLDPE-C8_B2.0	109.1	121.6	86.3	29.9
LLDPE-C8_B2.3	109.1	121.5	86.5	29.9
LLDPE-C8_B2.5	109.0	121.4	84.9	29.4
LLDPE-C8_B2.7	108.5	121.4	80.6	27.9



รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC (a) ฟิล์มเป่า LLDPE-C4 (b) LLDPE-C8

4.4 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ถูกรายงานในเทอมของ Water vapor transmission rate (WVTR) และ Oxygen transmission rate (OTR) ตามลำดับ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 โดยภาพรวมพบว่าฟิล์มเป่า LLDPE สามารถต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี มีค่า WVTR อยู่ในช่วง 2.30-3.20 g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$) ทั้งนี้เนื่องจาก LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic polymer) จึงมีแรงดึงดูดกับไอน้ำน้อย เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่า WVTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 ไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ค่า WVTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนสอดคล้องกับค่า X_c ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC สำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4 พิจารณาที่อัตราส่วนการเป่า 1.7 (LLDPE-C4_B1.7) ค่า WVTR อยู่ที่ 2.30 g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$) แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.8 (LLDPE-C4_B2.8) พบว่าค่า WVTR อยู่ที่ 2.38 g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$) ในขณะที่ฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจาก 1.8 เป็น 2.7 พบว่าค่า WVTR เพิ่มขึ้นจาก 2.30 เป็น 3.20 g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$)

เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นปริมาณผลึกในโครงสร้างของฟิล์มเป่า LLDPE ลดลง ส่งผลให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านโครงสร้างของฟิล์มเป่าได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4 ซึ่งมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ในโครงสร้างหลัก 2 ชนิดที่เข้าได้ดี พบว่าอัตราส่วนการเป่ามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า WVTR เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ฟิล์มเป่า LLDPE-C8 ซึ่งมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ในโครงสร้างหลัก 3 ชนิด คือ LLDPE-C4, LLDPE-C8 และ LDPE กลับพบว่าค่า WVTR เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ที่อัตราส่วนการเป่าเดียวกัน (พิจารณา LLDPE-C4_B2.0 และ LLDPE-C8_B2.0) พบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4 มีการซึมผ่านของไอน้ำน้อยกว่า LLDPE-C8 อยู่ในช่วง 15-20% แสดงให้เห็นว่าความยาวของกิ่งโมเลกุลของ LLDPE มีผลต่อการจัดเรียงผลึกของฟิล์มเป่า โดย LLDPE-C8 ซึ่งมีความยาวของกิ่งโมเลกุลที่ยาวมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงโมเลกุลได้ยากขึ้น [1, 3, 5]

ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 โดยภาพรวมพบว่าฟิล์มเป่า LLDPE สามารถต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจนได้ไม่ดี มีค่า OTR อยู่ในช่วง 36.0 - 150.3 g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$) ทั้งนี้เนื่องจาก LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงมีแรงดึงดูดกับ

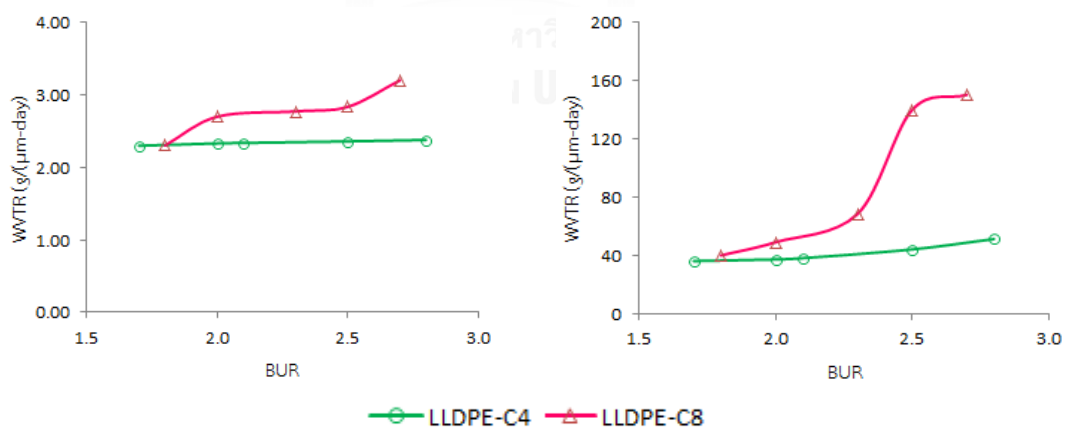
ออกซิเจนซึ่งเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non – polar molecules) ได้ดี เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่า OTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่า OTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนสอดคล้องกับค่า X_c ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC สำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4 พิจารณาที่อัตราส่วนการเป่า 1.7 (LLDPE-C4_B1.7) ค่า OTR อยู่ที่ 36.0 g/(μ m-day) แต่เมื่ออัตราส่วนการเป่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.8 (LLDPE-C4_B2.8) พบว่าค่า OTR อยู่ที่ 57.1 g/(μ m-day) ในขณะที่ฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเป่าจาก 1.8 (LLDPE-C8_B1.8) เป็น 2.7 (LLDPE-C8_B2.7) พบว่าค่า OTR เพิ่มขึ้นจาก 40.1 เป็น 150.3 g/(μ m-day)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการซึมผ่านของไอน้ำและการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนพบว่า ฟิล์ม LLDPE สามารถต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่าแก๊สออกซิเจน (รูปที่ 4.11) เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มเป่า LLDPE ได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดทางเคมีระหว่างฟิล์มกับโมเลกุลของแก๊ส ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเป่า จึงสามารถเห็นความแตกต่างการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ชัดเจนกว่าการซึมผ่านของไอน้ำ [27]

ตารางที่ 4.3 WVTR และ OTR ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

Sample	WVTR (g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$))	*OTR (g/($\mu\text{m}\cdot\text{day}$))
LLDPE-C4_B1.7	2.30	36.0
LLDPE-C4_B2.0	2.33	36.5
LLDPE-C4_B2.1	2.34	39.7
LLDPE-C4_B2.5	2.36	43.2
LLDPE-C4_B2.8	2.38	51.7
LLDPE-C8_B1.8	2.30	40.1
LLDPE-C8_B2.0	2.71	49.1
LLDPE-C8_B2.3	2.76	68.5
LLDPE-C8_B2.5	2.85	140.0
LLDPE-C8_B2.7	3.20	150.3

*ค่า OTR ได้จากการนำฟิล์ม PET 20 μm ประกบฟิล์มเป่า LLDPE



(a)

(b)

รูปที่ 4.11 ความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มเป่า LLDPE (a) การซึมผ่านของไอน้ำ และ (b) การซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนการเป่าต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเป่าแบบหลายชั้น ด้วยพอลิเมอร์ชนิด LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 พบว่า

1. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า LLDPE พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป่าประกอบด้วยโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถว ที่มีการจัดเรียงใน 2 ทิศทาง คือ ทิศทาง MD และทิศทาง TD เมื่ออัตราการเป่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้แกนของโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถวมีความเป็นระเบียบในการจัดเรียงในทิศทาง MD ลง และพบว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C8 มีการจัดเรียงโมเลกุลได้ยากกว่าฟิล์มเป่า LLDPE-C4

2. จากการศึกษสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า LLDPE พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มไม่เพียงขึ้นกับการจัดเรียงของผลึกเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับการจัดเรียงโมเลกุลในส่วนอสัณฐานด้วย โดยพบว่าเมื่ออัตราการเป่าเพิ่มขึ้นค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าในทิศทาง MD ลดลง ในขณะที่ความทนแรงดึงในทิศทาง TD เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มขึ้นกับการจัดเรียงแกนของโครงสร้างแบบนิวเคลียสแถว โดยค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มทั้งหมดในทิศทาง TD มีค่ามากกว่าทิศทาง MD ขณะที่ระยะยึดที่จุดขาดของฟิล์มเป่าขึ้นกับปริมาณของผลึกที่มีในโครงสร้างของฟิล์ม และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเป่าความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่าทิศทาง MD เพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงฉีกในทิศทาง TD ลดลง

3. จากการศึกษสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าพบว่าอัตราการเป่าไม่มีผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 แต่มีผลเล็กน้อยต่อฟิล์มเป่า LLDPE-C8 เนื่องจากความยาวของกิ่งในโครงสร้าง LLDPE-C8 ที่ยาวกว่า LLDPE-C4 ทำให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลได้ยากขึ้น

4. จากการศึกษาศามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเป่าพบว่าค่า WVTR และ OTR ของฟิล์มเป่าสัมพันธ์กับปริมาณผลึกในโครงสร้าง ในขณะที่อัตราการเป่ามีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำน้อยมากแต่มีผลต่อการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการขึ้นรูปฟิล์มเป่าการใช้วัตถุดิบ (ชนิดพอลิเมอร์) ที่มีความหลากหลาย เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น สามารถศึกษาผลของอัตราส่วนการเป่าที่มีต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2. ศึกษาผลของอัตราการไหลของมวล (Feed rate) ที่มีต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากการผลิตในอุตสาหกรรมเน้นกำลังการผลิตเป็นสำคัญ

3. ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของฟิล์มเป่าในอุตสาหกรรม เช่น ความสามารถในการซีลด้วยความร้อน (Heat sealing) เนื่องจาก LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 มีความแตกต่างของอุณหภูมิการหลอมผลึก



รายการอ้างอิง

- [1] Donatella, D., Amalia, M., Sossio, C., Clara, S., Finizia, A., Claudio, D.R., Beniamino, P., and Geoffrey, R.M. Structure–property relationships in polyethylene based films obtained by blow molding as model system of industrial relevance. European Polymer Journal. 62(2015): 97-107.
- [2] Gupta, P. Processing-Structure-Property Studies of: I) Submicron Polymeric Fibers Produced By Electrospinning and II) Films Of Linear Low Density Polyethylenes As Influenced By The Short Chain Branch Length In Copolymers Of Ethylene/1-Butene, Ethylene/1-Hexene & Ethylene/1-Octene Synthesized By A Single Site Metallocene Catalyst. 2004, Virginia Tech.
- [3] Abdel-Bary, E. Handbook of Plastic Films. 2003: Shrewsbury: Smithers Rapra.
- [4] How to solve blown film problem. [cited 2015 Oct 20]; Available from:
https://www.lyondellbasell.com/globalassets/documents/polymers-technical-literature/blown_film_problems.pdf?id=14252.
- [5] Cantor, K. Blown Film Extrusion. 2006: Munich: Hanser.
- [6] Spevacek, J.A. Fringed Micelles and Photoconductivity. 2009 November 01, 2011 [cited 2016 March 19]; Available from:
<http://www.rheothing.com/2011/11/fringed-micelles-and-photoconductivity.html>.
- [7] Piorkowska, E. Handbook of Polymer Crystallization. 2013: New Jersey: John Wiley & Sons.

- [8] Rajesh, H., Somani, L.Y., Lei, Z., and Benjamin, S. Flow-induced shish-kebab precursor structures in entangled polymer melts. Polymer. 46(2005): 8587–8623.
- [9] Keller, A., and Mackley, M.R. Chain orientation and crystallization, in Macromolecular chemistry. (1974): 195-224.
- [10] Rugmai, S., and Soontaranon, S. Manual for SAXS/WAXS data processing using SAXSIT. 3.66 ed. (2013): Synchrotron Light Research Institute (Public Organization): 56.
- [11] Krishnaswamy, R.K., and Sukhadia, A.M. Orientation characteristics of LLDPE blown films and their implications on Elmendorf tear performance. Polymer. 41(2000): 9205–9217.
- [12] Zhang, X.M., Elkoun, S., Ajji, A., and Huneault, M.A. Oriented structure and anisotropy properties of polymer blown films: HDPE, LLDPE and LDPE. Polymer. 45(2004): 217–229.
- [13] Godshall, D., Wilkes, G.L., Krishnaswamy, R.K., and Sukhadia, A.M. Processing-structure-property investigation of blown HDPE films containing both machine and transverse direction oriented lamellar stacks. Polymer. 44(18)(2003): 5397-5406.
- [14] Heeley, E.L., Gough, T., Hughes, D.J., Bras, W., Rieger, J., and Ryan, A.J. Effect of processing parameters on the morphology development during extrusion of polyethylene tape: An in-line small-angle X-ray scattering (SAXS) study. Polymer. 54(2013): 6580-6588.
- [15] Jalil, M., Rabbani, A., Ghasemi, I., and Ebrahimi, M. Investigation of LLDPE/LDPE Blown Films by Response Surface Methodology. IRANIAN POLYMER JOURNAL. 15(2)(2006): 155-162.

- [16] Christopher, P., and Ann, P. The influence of bubble mechanics on some properties of blown film. in Department of Engineering Mathematics. (1999): University of Newcastle: Newcastle upon Tyne.
- [17] Ogah, A.O., and Afiukwa, J. N. THE EFFECTS OF LINEAR LOW-DENSITY POLYETHYLENE (LLDPE) ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) FILM BLENDS. International Journal of Engineering and Management Science. 3(2)(2012): 85-90.
- [18] Fatahi, S., Ajji, A., and Lafleur, P.G. CORRELATION BETWEEN STRUCTURAL PARAMETERS AND PROPERTIES OF PE BLOWN FILMS. PLASTICS FILM & SHEETING. 21(2005): 281-305.
- [19] Afeworki, M., Brant, P., Lustiger, A., and Norman, A. Solid-state ¹³C NMR and synchrotron SAXS/WAXS studies of uniaxially-oriented polyethylene. Solid State Nuclear Magnetic Resonance. 72(2015): 27-40.
- [20] Zhou, H., and Wilkes, G.L. Comparison of lamellar thickness and its distribution determined from DSC, SAXS, TEM and AFM for high-density polyethylene films having a stacked lamellar morphology. Polymer. 38(23)(1997): 5735-5747.
- [21] Prasada, A., Shroffa, R., Raneb, S., and Beaucageb, G. Morphological study of HDPE blown Films by SAXS, SEM and TEM: a relationship between the melt elasticity parameter and lamellae orientation. Polymer. 42(2001): 3103-3113.
- [22] Arrighi, V.K.. Microstructures and Properties of Materials. [cited 2016 March 18]; Available from: <http://www.che.hw.ac.uk/teaching/B11MS1/Start%20Page.htm>.

- [23] Athavale, S. Multi Layer Composite Film. 2010 [cited 2016 July 1]; Available from: <http://www.slideshare.net/ashrikant58/02multi-layer-composite-films>.
- [24] Jianjun, L., Baiyi, Z., and Hung, J.S. Phase Structure Characterization and Processing-Structure-Property Relationships in Linear Low Density Polyethylene Blown Films, in SPE/ANTEC 1999 Proceedings. (1999): 1768-1772.
- [25] Johnston, A.D., McNally, G.M., and Clarke, A.H. Blown Film Processing Characteristics of Metallocene and Conventional Polyethylenes. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing. 12(2004): 53-66.
- [26] Krishnaswamy, R.K., and Sukhadia, A.M. The Relative Influences of Process and Resin Time-Scales on the MD Tear Strength of Polyethylene Blown Films A2 - Benedikt, George M, in Metallocene Technology in Commercial Applications. 1999, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 121-127.
- [27] Villaluenga, J.P.G., and Seoane, B. Influence of drawing on gas transport mechanism in LLDPE films. Polymer. 39(1998): 3955-3965.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. อัตราส่วนการเป่า (BUR)

$$\text{BUR} = \frac{\phi_{\text{bubble}}}{\phi_{\text{die diameter}}}$$

$$= \frac{2r}{\phi_{\text{die diameter}}} \quad \text{เมื่อ } r = \frac{\text{layflat}}{\pi}$$

$$= \frac{0.637 \times \text{Layflat}}{\phi_{\text{die diameter}}}$$

2. อัตราส่วนการดึง (DDR)

$$\text{DDR} = \frac{\text{Die gap}}{\text{Thickness} \times \text{BUR}}$$

3. การยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง MD (MD stretching)

$$\text{MD stretching} = \frac{(\text{Die gap} + (\text{Die swell} + \text{expansion}))/\text{BUR}}{\text{Thickness}}$$

*** Die swell + expansion = 15%

4. การยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ทั้งหมด (Total stretching)

$$\text{Total stretching} = \text{MD stretching} + \text{BUR}$$

5. ร้อยละการยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง MD (% Stretching in MD)

$$\% \text{ Stretching in MD} = \frac{\text{MD stretching}}{\text{Total stretching}} \times 100$$

6. ร้อยละการยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง TD (% Stretching in TD)

$$\% \text{ Stretching in TD} = 100 - \% \text{ Stretching in MD}$$

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับฟิล์มเป่า LLDPE-C4_B1.7

กำหนด

ความกว้างแผ่นเรียบ เท่ากับ 905 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางหัวด้าย เท่ากับ 350 มม.

ช่องว่างหัวด้าย เท่ากับ 1.8 มม. ความหนาฟิล์ม เท่ากับ 0.100 มม.

$$\text{อัตราส่วนการเป่า} = \frac{(2 \times 905) / 3.14}{350} = 1.65$$

$$\text{อัตราส่วนการดึง} = \frac{1.8}{0.1 \times 1.65} = 10.9$$

$$\text{การยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง MD} = \frac{(1.8 + (1.8 \times 0.15)) / 1.65}{0.1} = 12.55$$

$$\text{การยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ทั้งหมด} = 12.55 + 1.65 = 14.2$$

$$\text{ร้อยละการยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง MD} = \frac{12.55}{14.20} \times 100 = 88.4\%$$

$$\text{ร้อยละการยืดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทาง TD} = 100 - 88.38 = 11.6\%$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลภาวะในการขึ้นรูป

ตาราง ข-1 ข้อมูลภาวะในการขึ้นรูปของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8

Sample code	LF	\varnothing_d	Die gap	FLH	Q	H	BUR	DDR	%ST-MD	%ST-TD
LLDPE-C4_B1.7	905	350	1.8	108	230	23.0	1.6	10.9	87.9	12.1
LLDPE-C4_B2.0	1110	350	1.8	110	240	19.6	2.0	8.9	82.7	17.3
LLDPE-C4_B2.1	1160	350	1.8	110	240	18.7	2.1	8.5	81.4	18.6
LLDPE-C4_B2.5	1350	350	1.8	115	270	18.1	2.5	7.3	76.4	23.6
LLDPE-C4_B2.8	1520	350	1.8	118	280	16.7	2.8	6.5	71.8	28.2
LLDPE-C8_B1.8	990	350	1.8	105	230	21.0	1.8	10.0	85.7	14.3
LLDPE-C8_B2.0	1110	350	1.8	110	240	19.6	2.0	8.9	82.7	17.3
LLDPE-C8_B2.3	1280	350	1.8	113	260	18.4	2.3	7.7	78.2	21.8
LLDPE-C8_B2.5	1360	350	1.8	115	260	17.3	2.5	7.3	76.1	23.9
LLDPE-C8_B2.7	1470	350	1.8	120	270	16.6	2.7	6.7	73.2	26.8

LF: ความกว้างแผ่นเรียบ (มม.)

\varnothing_d : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตาย (มม.)

FLH: ระยะเส้นหมอก (มม.)

Q: อัตราการไหลของพอลิเมอร์ (กก./ชม.)

H: อัตราเร็วฮอลออฟ (ม./นาที)

BUR: อัตราส่วนการเป่า

DDR: อัตราส่วนการดึง

%ST-MD: % Stretching in MD

%ST-TD: % Stretching in TD

ภาคผนวก ค
ข้อมูลผลการทดสอบ

ตาราง ค-1 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ในทิศทาง MD

Sample code	ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE ในทิศทาง MD (g)					Ave.	S.D.
	1	2	3	4	5		
LLDPE-C4_B1.7	192.0	198.4	185.6	182.4	208.0	193.3	10.3
LLDPE-C4_B2.0	265.6	262.4	265.6	256.0	252.8	260.5	5.8
LLDPE-C4_B2.1	342.4	345.6	345.6	345.6	342.4	344.3	1.8
LLDPE-C4_B2.5	368.0	361.6	377.6	384.0	380.8	374.4	9.3
LLDPE-C4_B2.8	372.2	372.2	374.4	384.0	374.4	375.4	4.9
LLDPE-C8_B1.8	348.8	345.6	326.4	339.2	339.2	339.8	8.6
LLDPE-C8_B2.0	428.8	428.8	428.8	422.4	432.0	428.2	3.5
LLDPE-C8_B2.3	470.4	489.6	476.8	480.0	467.2	476.8	8.8
LLDPE-C8_B2.5	556.8	550.4	550.4	537.6	550.4	549.1	7.0
LLDPE-C8_B2.7	451.2	444.6	444.6	480.0	480.0	460.1	18.4

ตาราง ค-2 ความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 และ LLDPE-C8 ในทิศทาง TD

Sample code	ค่าความทนแรงฉีกของฟิล์มเป่า LLDPE ในทิศทาง TD (gr)					Ave.	S.D.
	1	2	3	4	5		
LLDPE-C4_B1.7	1350.4	1286.4	1353.6	1337.6	1248.0	1315.2	46.3
LLDPE-C4_B2.0	1158.4	1187.2	1222.4	1222.4	1238.4	1205.8	32.4
LLDPE-C4_B2.1	1084.8	1097.6	1068.8	1049.6	1091.2	1078.4	19.3
LLDPE-C4_B2.5	1011.0	1027.2	1024.0	1014.4	1001.0	1015.5	10.5
LLDPE-C4_B2.8	992.0	979.2	998.4	969.6	969.6	981.8	13.1
LLDPE-C8_B1.8	1417.6	1401.6	1372.0	1398.4	1379.2	1393.8	18.3
LLDPE-C8_B2.0	1318.4	1347.2	1318.2	1347.2	1324.8	1331.2	14.9
LLDPE-C8_B2.3	1292.8	1302.2	1283.2	1292.8	1292.8	1292.8	6.7
LLDPE-C8_B2.5	1264.0	1267.2	1264.0	1235.2	1228.0	1251.7	18.6
LLDPE-C8_B2.7	1219.0	1193.6	1219.2	1203.2	1193.6	1205.7	12.8

ตาราง ค-3 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C4 ในทิศทาง MD และ TD

Sample Code	MD			TD			
	No	TS	ME	EB	TS	ME	EB
LLDPE-C4_B1.7	1	27.12	189.62	801.97	19.98	215.80	933.01
	2	27.95	187.42	776.91	21.30	205.37	926.33
	3	28.75	202.54	772.93	20.52	209.15	916.81
	4	28.08	192.24	776.93	22.39	196.73	908.64
	5	27.09	188.54	765.59	21.65	198.84	913.72
	Ave	<u>27.80</u>	<u>192.08</u>	<u>778.86</u>	<u>21.17</u>	<u>205.18</u>	<u>919.70</u>
	SD	<u>0.70</u>	<u>6.12</u>	<u>13.72</u>	<u>0.95</u>	<u>7.75</u>	<u>9.84</u>
LLDPE-C4_B2.0	1	26.26	181.58	802.87	23.84	198.95	953.32
	2	26.60	189.26	790.56	22.72	195.61	929.46
	3	27.16	185.83	790.90	22.53	199.31	953.56
	4	27.93	182.85	810.66	23.68	191.45	957.65
	5	26.41	179.05	805.91	23.30	197.10	950.17
	Ave	<u>26.87</u>	<u>183.71</u>	<u>800.18</u>	<u>23.22</u>	<u>196.48</u>	<u>948.83</u>
	SD	<u>0.68</u>	<u>3.95</u>	<u>9.06</u>	<u>0.58</u>	<u>3.18</u>	<u>11.15</u>
LLDPE-C4_B2.1	1	23.39	146.80	784.09	23.27	177.14	979.55
	2	24.50	148.96	822.77	24.78	184.22	1024.27
	3	24.54	146.35	819.84	22.04	171.29	938.29
	4	25.47	153.05	828.74	23.32	189.37	975.95
	5	25.24	149.78	809.19	23.80	184.90	983.67
	Ave	<u>24.63</u>	<u>148.99</u>	<u>812.93</u>	<u>23.44</u>	<u>181.38</u>	<u>980.34</u>
	SD	<u>0.81</u>	<u>2.69</u>	<u>17.61</u>	<u>0.99</u>	<u>7.14</u>	<u>30.53</u>
LLDPE-C4_B2.5	1	25.31	150.72	870.66	26.42	170.24	1047.23
	2	24.33	144.39	870.07	24.22	166.52	972.65
	3	25.85	144.95	861.14	24.62	168.30	981.36
	4	25.36	146.05	881.58	24.03	166.95	997.68
	5	25.04	132.81	878.32	25.74	173.81	1025.36
	Ave	<u>25.18</u>	<u>143.79</u>	<u>872.36</u>	<u>25.01</u>	<u>169.17</u>	<u>1004.86</u>
	SD	<u>0.55</u>	<u>6.62</u>	<u>7.98</u>	<u>1.03</u>	<u>2.97</u>	<u>31.05</u>
LLDPE-C4_B2.8	1	24.50	140.59	870.57	27.11	168.78	879.26
	2	24.45	145.75	836.85	27.56	162.06	892.17
	3	22.89	140.57	812.99	26.28	160.42	853.43
	4	24.51	146.43	866.52	26.05	156.37	862.14
	5	23.30	141.65	810.40	27.84	163.84	879.61
	Ave	<u>23.93</u>	<u>143.00</u>	<u>839.47</u>	<u>26.97</u>	<u>162.29</u>	<u>873.32</u>
	SD	<u>0.78</u>	<u>2.87</u>	<u>28.51</u>	<u>0.78</u>	<u>4.56</u>	<u>15.42</u>

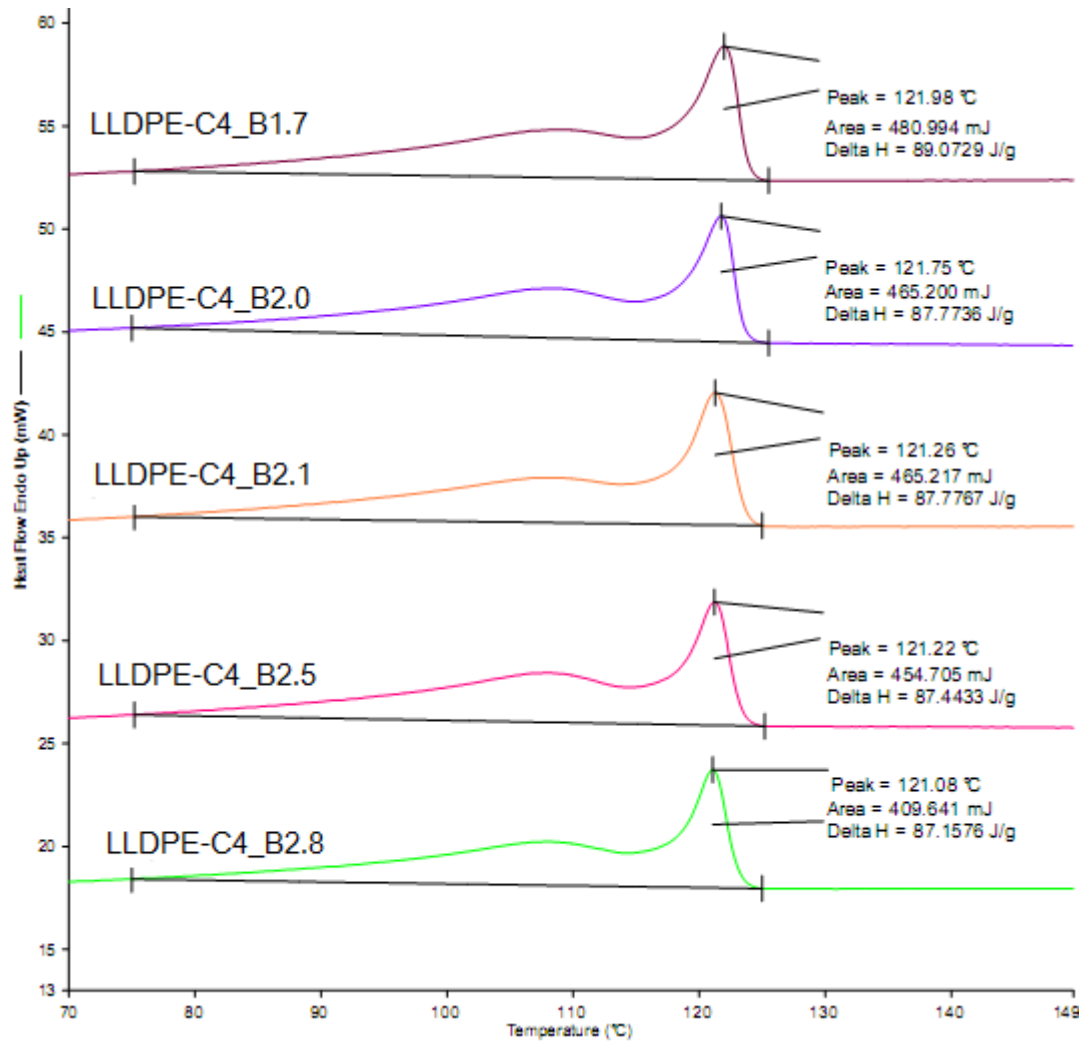
TS: ความทนแรงดึง, ME: มอดุลัสความยืดหยุ่น, EB: ระยะยืดที่จุดขาด

ตาราง ค-4 ความทนแรงดึง มอดุลัสความยืดหยุ่น และระยะยืดที่จุดขาดของฟิล์มเป่า LLDPE-C8 ในทิศทาง MD และ TD

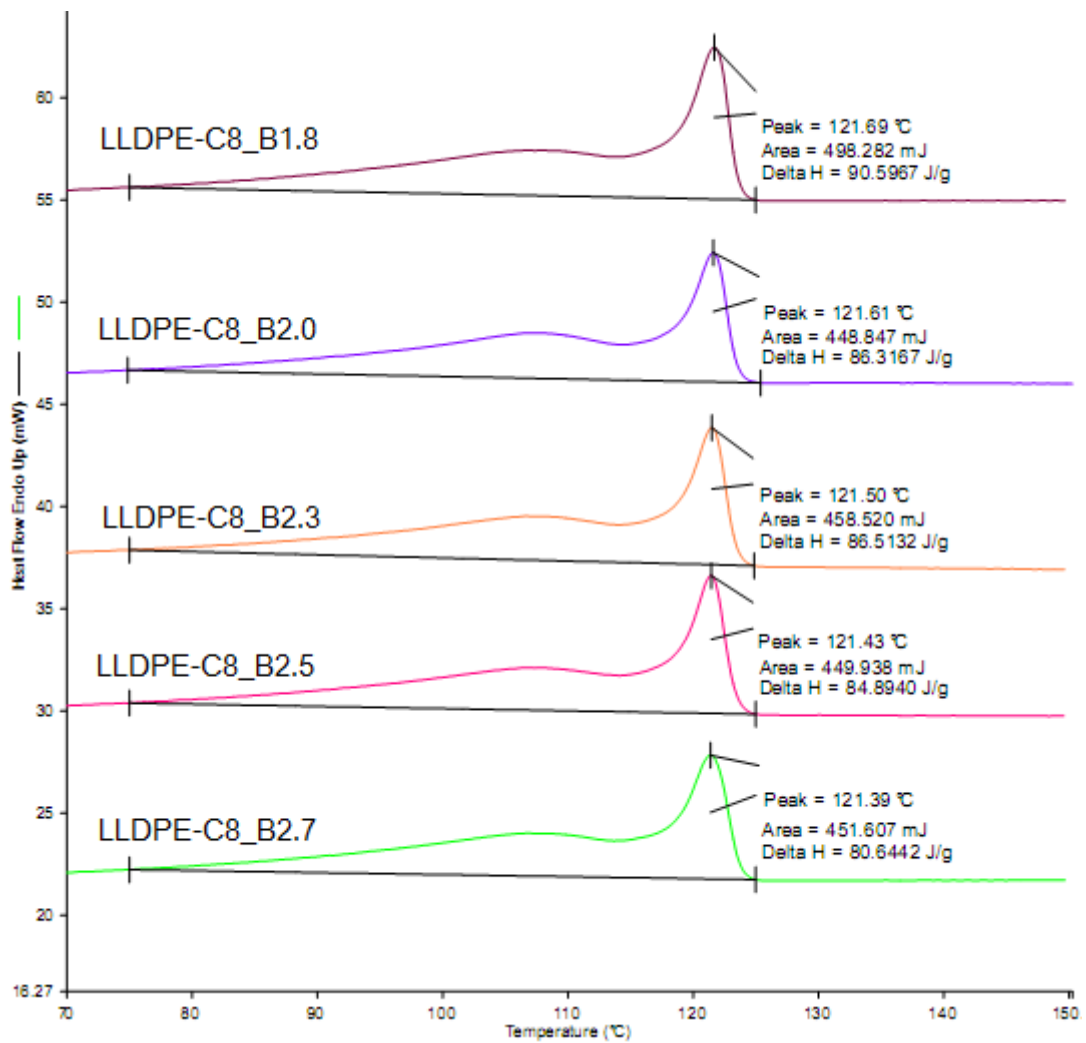
Sample Code	No	MD			TD		
		TS	ME	EB	TS	ME	EB
LLDPE-C8_B1.8	1	28.09	173.34	809.36	22.62	191.59	903.74
	2	28.30	172.28	827.21	22.80	207.09	894.56
	3	27.51	186.88	776.19	22.51	209.89	892.41
	4	28.25	178.55	778.66	23.41	205.54	906.42
	5	26.84	170.59	774.96	22.76	194.75	879.05
	Ave	<u>27.80</u>	<u>176.33</u>	<u>793.27</u>	<u>22.82</u>	<u>201.77</u>	<u>895.24</u>
	SD	<u>0.62</u>	<u>6.60</u>	<u>23.72</u>	<u>0.35</u>	<u>8.08</u>	<u>10.81</u>
LLDPE-C8_B2.0	1	25.06	164.74	813.53	22.90	184.88	920.86
	2	24.73	176.04	799.97	23.84	198.95	953.32
	3	26.58	179.38	797.51	23.68	191.45	927.65
	4	25.86	169.14	791.46	24.53	200.70	968.43
	5	27.15	169.80	803.32	22.53	199.31	953.56
	Ave	<u>25.88</u>	<u>171.82</u>	<u>801.16</u>	<u>23.50</u>	<u>195.06</u>	<u>944.76</u>
	SD	<u>1.01</u>	<u>5.84</u>	<u>8.16</u>	<u>0.79</u>	<u>6.74</u>	<u>19.84</u>
LLDPE-C8_B2.3	1	26.87	152.66	850.55	25.11	176.45	938.14
	2	26.16	168.80	824.76	25.88	185.24	939.55
	3	25.28	161.02	800.59	25.91	180.99	956.54
	4	25.31	155.96	804.45	26.03	177.64	933.26
	5	25.29	160.28	828.23	25.28	186.17	954.82
	Ave	<u>25.78</u>	<u>159.74</u>	<u>821.72</u>	<u>25.64</u>	<u>181.30</u>	<u>944.46</u>
	SD	<u>0.71</u>	<u>6.09</u>	<u>20.17</u>	<u>0.42</u>	<u>4.37</u>	<u>10.52</u>
LLDPE-C8_B2.5	1	24.98	147.80	828.34	26.24	179.74	951.34
	2	24.69	156.86	856.26	27.69	179.90	1001.78
	3	25.45	156.80	822.99	27.10	185.90	979.41
	4	23.61	146.38	845.23	24.23	175.91	968.55
	5	25.98	143.78	858.90	25.44	182.94	944.45
	Ave	<u>24.94</u>	<u>150.32</u>	<u>842.34</u>	<u>26.14</u>	<u>180.88</u>	<u>969.11</u>
	SD	<u>0.89</u>	<u>6.11</u>	<u>16.18</u>	<u>1.37</u>	<u>3.76</u>	<u>22.90</u>
LLDPE-C8_B2.7	1	25.24	143.53	898.29	26.97	164.08	1059.81
	2	23.39	136.26	856.01	26.50	173.11	1003.20
	3	23.16	138.70	852.06	25.77	175.40	961.66
	4	23.74	147.34	868.84	27.42	183.28	954.87
	5	23.81	140.21	845.45	25.77	175.40	961.66
	Ave	<u>23.87</u>	<u>141.21</u>	<u>864.13</u>	<u>26.49</u>	<u>174.25</u>	<u>988.24</u>
	SD	<u>0.81</u>	<u>4.32</u>	<u>20.91</u>	<u>0.73</u>	<u>6.87</u>	<u>44.36</u>

TS: ความทนแรงดึง, ME: มอดุลัสความยืดหยุ่น, EB: ระยะยืดที่จุดขาด

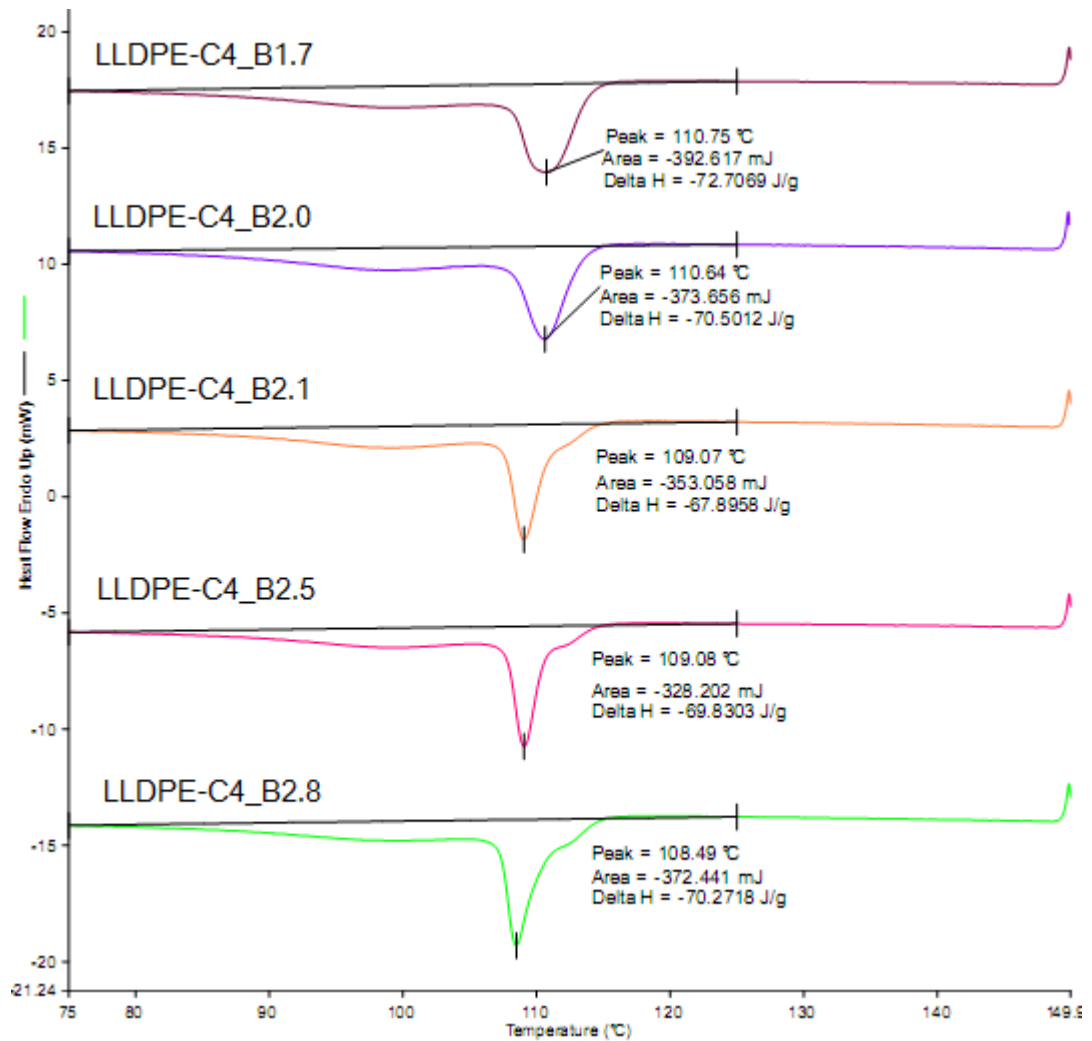
ภาคผนวก ง
ข้อมูลสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่า LLDPE



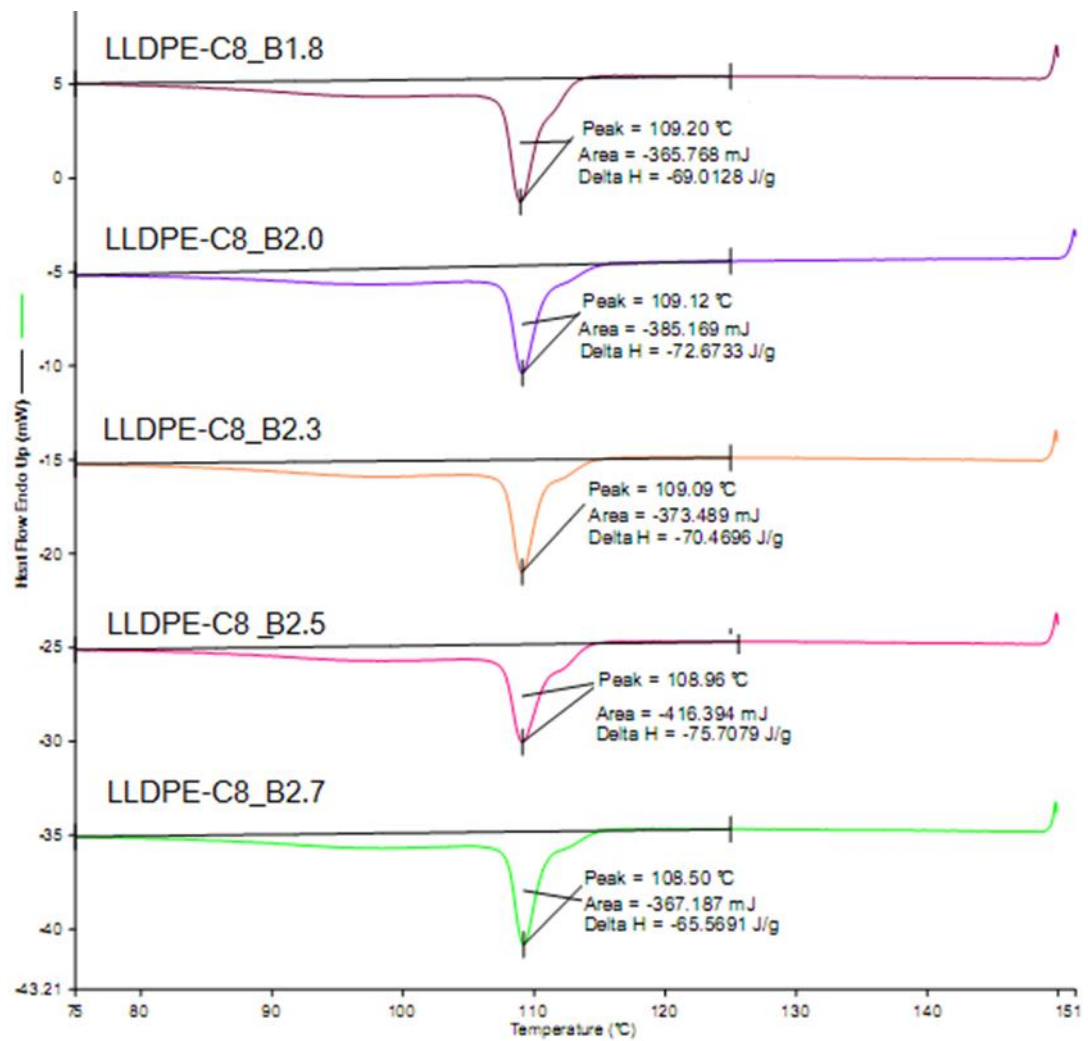
รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรม (Second heating) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4



รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรม (Second heating) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C8



รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรม (Exothermic) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C4



รูปที่ ง-4 เทอร์โมแกรม (Exothermic) ของฟิล์มเป่า LLDPE-C8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุธากาญจน์ อักษรกุล เกิดวันที่ 11 เมษายน พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2557 เข้าร่วมงานการประชุมทางวิชาการเสนอผลงานในงานสัมมนาวิชาการ The International Polymer Conference of Thailand : PCT-6 ชื่อบทความ "PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF MULTILAYER LLDPE BLOWN FILM" ณ โรงแรมปทุมวันปริ้นเซส วันที่ 30 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม 2559

