



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดจาก
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นชนิดปรับปรุง

**Preparation and Its Properties of Packaging film for a longer shelf-life of fresh
produce from modified linear low density polyethylene**

นางสุภารัตน์ รักชลธี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การเตรียมและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตสดจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นชนิดปรับปรุง
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์
ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555
หัวหน้าโครงการวิจัย
นางสุภารัตน์ รักษลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ให้มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำดีขึ้น ด้วยการใส่สารตัวเติมซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ซึ่งมีขั้วสูงและมีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดี โดยมีการผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม เนื่องจาก EVA สามารถเข้ากันได้ดีกับ LLDPE และมีส่วนที่มีขั้ว (ไวนิลอะซิเตต, VA) ช่วยให้ผสมกับซีโอไลต์เอได้ดีขึ้น โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/EVA ตั้งแต่ 100/0 ถึง 75/25 ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม พบว่า EVA มีการกระจายตัวดีในทุกสูตรฟิล์ม LLDPE/EVA การใช้ EVA ทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและยังมอดูลัสของฟิล์ม LLDPE/EVA ลดลงและสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้ซีโอไลต์เอ (0-25% โดยน้ำหนัก) ในสูตร LL80E20 พบว่าซีโอไลต์เอมีการกระจายตัวอยู่ในวิภาคของ EVA และความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น ส่วนการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ 25% (LL80E20Ze25) มีค่าเท่ากับ $741 \text{ g}\cdot\mu\text{m}^2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ซึ่ง สูงกว่าฟิล์ม LL80E20 ประมาณ 68% และสูงกว่าฟิล์ม LLDPE ถึง 167% สรุปได้ว่า ฟิล์มสูตร LL80E20Ze25 มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำสูงและมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เพียงเล็กน้อย จึงเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุผลผลิตสดได้

คำสำคัญ : แอลแอลดีพีอี, อีวีเอ, ซีโอไลต์, สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ

Research Title: Preparation and Its Properties of Packaging film for a longer shelf-life of fresh produce from modified linear low density polyethylene

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

This research studied the preparation of linear low density polyethylene (LLDPE) film modified with a zeolite A filler to increase water vapor permeability (WVP) of the film. Zeolite A is a high polar and porous filler which can absorb water well. Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) was incorporated in the film in order to improve zeolite A dispersion in the film. This is because EVA is compatible with LLDPE and has a polar part (vinyl acetate group, VA) which can be well mixed with zeolite A. The studied LLDPE/EVA blend ratios were varied from 100/0 to 75/25. It was found that EVA were a dispersed phase and all the blend films showed good dispersion of EVA. The use of EVA reduced tensile strength at yield and Young's modulus of LLDPE/EVA films and both properties were decreased with increasing EVA content. An addition of zeolite A upto 25% (by weight) in to the LL80E20 film did not significantly affect tensile strength at yield of the film. Also it was found that most zeolite A could disperse well and stayed in the EVA phase. WVP of the film with a high zeolite A content (LL80E20Ze25) was $741 \text{ g}\cdot\mu\text{m}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ which was higher than those of LL80E20 and LLDPE about 68% and 167%, respectively. This can be concluded that the LL80E20Ze25 film has a higher WVP and a slightly lower tensile property than LLDPE film. Therefore, the LL80E20Ze25 film could be developed to be packaging for a longer shelf-life of fresh produce.

Keywords: LLDPE, EVA, Zeolite, Water Vapor Permeability (WVP)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การเตรียมและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นชนิดปรับปรุง (Preparation and Its Properties of Packaging film for a longer shelf-life of fresh produce from modified linear low density polyethylene) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากทุนวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี งบประมาณ ๒๕๕๔

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวณัฐริกา ใจสมบุญรณ์ นักศึกษาปริญญาโท นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวกและช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธี

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การรักษาผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว.....	4
2.2 บรรจุภัณฑ์สำหรับรักษาคุณภาพพืช.....	6
2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ.....	7
2.2.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ.....	7
2.2.3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค.....	8
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	8
2.4 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์.....	10
2.5 ซีโอไลต์เอ.....	11
2.6 กระบวนการผลิตฟิล์ม.....	13
2.6.1 การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า.....	13
2.6.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 การทดลอง.....	17
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	19
3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอหรือแคลเซียมคาร์บอเนต.....	19
3.3.2.1 สูตรเข้มข้นของ EVA/ซีโอไลต์เอ หรือ EVA/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	19
3.3.2.2 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอหรือแคลเซียมคาร์บอเนต.....	20
3.4 การเตรียมฟิล์ม.....	21
3.4.1 การเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่า.....	21
3.4.2 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด.....	21
3.5 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน.....	22
3.5.1 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก.....	22
3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์ม.....	22
3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	22
3.6.1 การกระจายตัวของ EVA.....	22
3.6.2 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	23
3.7 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	23
3.7.1 ความหนาของฟิล์ม.....	23
3.7.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	23
3.8 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	25
4.1 การศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA.....	25
4.1.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ในฟิล์ม LLDPE/ EVA.....	25
4.1.2 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/ EVA.....	26
4.1.3 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/ EVA.....	27
4.1.4 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/ EVA.....	29
4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/EVA.....	30
4.2.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	31
4.2.2 การศึกษาการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	31
4.2.3 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	34
4.2.5 การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ประวัตินักวิจัย.....	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ.....	8
3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE.....	17
3.2 สมบัติบางประการของ EVA.....	17
3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A.....	17
3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA (โดยน้ำหนัก).....	19
3.5 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ.....	20
4.1 สูตรและความหนาของฟิล์มตัวอย่าง.....	25
4.2 T_m , T_c และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/EVA.....	27
4.3 ปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	31
4.4 T_m , T_c และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite.....	34

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงแนวโน้มราคา LDPE และ LLDPE ตั้งแต่ปี 2007-2012.....	1
2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน.....	5
2.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE).....	9
2.3 โครงสร้างของ LDPE และ LLDPE.....	10
2.4 โครงสร้างของ EVA.....	10
2.5 Frame work ของซีไอไลต์เอ.....	12
3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	23
4.1 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/ EVA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EVA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า)	26
4.2 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA.....	29
4.3 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA.....	30
4.4 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/ EVA/Zeolite (กำลังขยาย 3500 เท่า).....	32
4.5 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/ EVA/Zeolite ที่มีการสกัดEVA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า).....	33
4.6 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/Zeolite ที่มีซีไอไลต์เอในปริมาณต่างๆ.....	36
4.7 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/Zeolite ที่มีซีไอไลต์เอในปริมาณต่างๆ...37	37

บทที่ 1

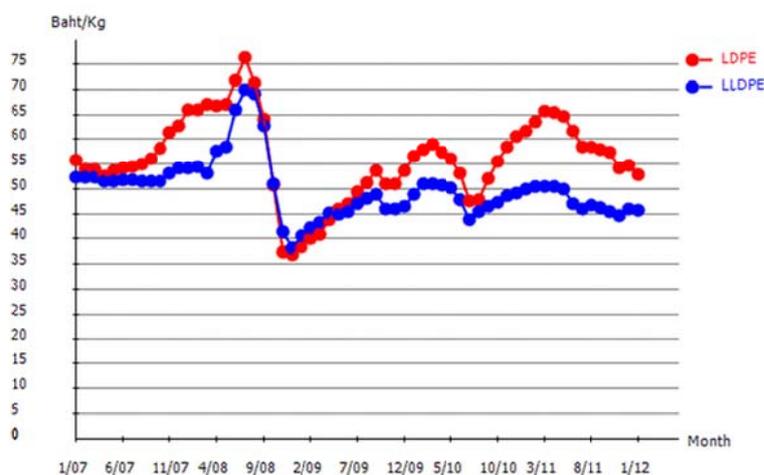
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ฟิล์มพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มมีหลากหลายชนิดตามสมบัติและประเภทของการนำไปใช้งาน ตัวอย่างฟิล์มที่นิยมกันในปัจจุบัน เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ ราคาถูก ทนต่อกรดและด่างได้ดี และปลอดภัยกับอาหาร ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีใช้ตามท้องตลาดในรูปแบบถุงบรรจุมีหลายชนิด เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) และฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) ฟิล์มพอลิเอทิลีนในรูปแบบถุงบรรจุที่นำมาใช้ในงานเกษตรกรรมเพื่อบรรจุผักและผลไม้สด จำเป็นต้องมีสมบัติบางประการที่เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อการบรรจุผลิตผลสด ทั้งนี้เพราะผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวยังคงมีกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เกิดขึ้น เช่น การหายใจ การคายความร้อน การคายน้ำ การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาต่างๆ [1] ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่จะนำมาใช้บรรจุต้องมีประสิทธิภาพที่จะช่วยลดกระบวนการดังกล่าวให้ช้าลง โดยที่บรรจุภัณฑ์ควรสามารถระบายอากาศได้อย่างเพียงพอสามารถระบายไอน้ำและก๊าซที่เกิดจากการหายใจได้อย่างรวดเร็ว และทนกับอัตราการหายใจของผลิตผลสดเหล่านั้น เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตผลเกิดการเน่าเสียได้ ซึ่งฟิล์ม PE ที่ใช้ในการบรรจุผลิตผลสดนั้นส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นฟิล์ม LDPE และ LLDPE ที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงดี อย่างไรก็ตามการมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำเพราะความเป็นผลึก และความไม่มีขั้วของฟิล์มเป็นข้อเสียในการบรรจุผลิตผลทางการเกษตร บางครั้งจึงมีการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยระบายไอน้ำที่เกิดจากการหายใจของผักและผลไม้สด แต่การเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์ทำให้ความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ลดลง ขาดความสวยงามและอาจเกิดการปนเปื้อนของผลิตผลสดเหล่านั้นได้ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำโดยปราศจากการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์ [2]

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เพื่อบรรจุผลิตผลทางการเกษตร โดยเลือกใช้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์มในงานบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติคล้ายกันกับ LDPE คือ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ทำให้มีความปลอดภัยในใช้การบรรจุอาหาร แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากแนวโน้มราคาต่ำกว่า LDPE [3] การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำทำได้โดยการเติมซีโอโลดต์เอ ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง มีรูพรุนและมีสมบัติการดูดซับน้ำได้ดี โดยนำมาผสมกับ LLDPE จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเติมซีโอโลดต์เอลงในฟิล์ม LDPE เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ แต่เกิดปัญหาการกระจายที่ตัวไม่ดีของซีโอโลดต์เอ และไม่สามารถใส่ซีโอโลดต์ได้ในปริมาณมากนัก เนื่องจากความ

แตกต่างระหว่างผิวของฟิล์ม LDPE กับซีโอไลต์เอ จึงทำการปรับปรุงซีโอไลต์เอด้วยการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เพื่อช่วยการกระจายของซีโอไลต์ในฟิล์ม LDPE ให้ดีขึ้น สมบัติเชิงกลดีขึ้นแต่ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) ของฟิล์มลดลง เนื่องจากกรดสเตียริกเป็นกรดไขมัน เมื่อนำมาเคลือบผิวซีโอไลต์เอทำให้ซีโอไลต์เอมีสมบัติการชอบน้ำลดลงและทำหน้าที่เหมือนตัวกั้นทำให้ไอน้ำซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ยากขึ้น [4] และจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้ซีโอไลต์เอและแคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำฟิล์ม EVA (ปริมาณไวนิลอะซีเตต (VA) 27.5%) ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีโอไลต์เอมีค่าสูงกว่า มีลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์เอที่ดีกว่า และมีสมบัติเชิงกลดีกว่าฟิล์ม EVA ที่ถูกปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต [5] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติของฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณ VA ต่างๆ กัน (VA 3.5-70%) พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น [6] การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE กับ EVA (VA 9%) ที่อัตราส่วน LLDPE/EVA เป็น 100/0, 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 และพบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันได้ดี จากผลการทดลองที่พบว่าอุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของ LLDPE ลดลงเนื่องจากผลการละลายเข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองและการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นจากการตกผลึกร่วมของ LLDPE กับ EVA [7]



ภาพที่ 1.1 กราฟแสดงแนวโน้มราคา LDPE และ LLDPE ตั้งแต่ปี 2007-2012 [3]

งานวิจัยนี้จึงเลือก LLDPE ที่นิยมใช้ในงานบรรจุภัณฑ์และมีแนวโน้มราคาลดลง มาใช้เตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี และเลือกใช้ EVA ซึ่งมีหมู่ไวนิลอะซีเตตที่มีขั้วมาผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างผิวของ LLDPE กับซีโอไลต์เอ และเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกับเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตและซีโอไลต์เอที่มีการซึมผ่านของไอน้ำมาก
2. สามารถเข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม เช่น อัตราส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต และปริมาณซีโอไลต์เอ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. การเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE:EVA ในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 โดยน้ำหนักและมีซีโอไลต์เอเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก
2. ขึ้นรูปฟิล์มจากกระบวนการเป่าและกดอัด
3. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มและความแข็งแรงลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA)
5. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
6. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น และนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้แม้ว่าจะเก็บเกี่ยวออกจากต้นแล้วยังคงเป็นสิ่งมีชีวิต กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลา ได้แก่ การหายใจ การคายน้ำ การสุก ดังนั้นการเก็บรักษาให้ผลิตผลอยู่ได้นานจึงเป็นการปฏิบัติด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อชะลอเมแทบอลิซึมของผลิตผล ซึ่งได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ องค์ประกอบของบรรยากาศ และปัจจัยอื่นๆ รอบๆ ผลิตผลให้เหมาะสมนั่นเอง

- อุณหภูมิ เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เพราะอุณหภูมิมิมีอิทธิพลต่อกระบวนการต่างๆ ภายในผลิตผลทุกอย่าง และมีผลต่อปัจจัยอื่นๆ ภายนอกด้วย ในด้านของผลิตผล อุณหภูมิจะเร่งปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ให้เกิดเร็วขึ้น ดังนั้นการหายใจและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอื่นๆ จะเกิดขึ้นเร็ว ทำให้ผลิตผลเสียหายง่าย

- ความชื้น ปริมาณไอน้ำในอากาศนอกจากจะเป็นตัวกำหนดอัตราการสูญเสียน้ำของผลิตผลแล้ว ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ อีกด้วย เช่น ในสภาพที่ความชื้นสูงจะช่วยกระตุ้นให้เกิดการงอกในหอมและกระเทียม นอกจากนั้นเชื้อราบนผิวของผลิตผล สามารถเจริญเติบโตได้ดี ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นในพอเหมาะ ไม่ให้มีการสูญเสียน้ำจากพืชมากเกินไป

- องค์ประกอบของบรรยากาศ ในบรรยากาศปกติมีก๊าซออกซิเจน (O_2) อยู่ประมาณ 21% ซึ่งจำเป็นสำหรับการหายใจของผลิตผลในการเก็บรักษา ถ้ามีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำจะช่วยลดอัตราการหายใจและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้ แต่ถ้าก๊าซออกซิเจนน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน (Anaerobic) ทำให้ผลิตผลเสียหายได้ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการหายใจ หากมีการสะสมในการเก็บรักษามากเกินไป อาจทำให้เกิดการผิดปกติในการหายใจและทำให้ผลิตผลเสียหายได้ นอกจากนี้ยังมีก๊าซเอทิลีน ซึ่งอาจเกิดจากการผลิตของผลิตผลเองจะกระตุ้นให้เกิดการสุกหรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ได้

การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช เนื่องจากผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่างๆ ทั้งทางกายภาพและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้น ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่

1. การหายใจ เป็นกระบวนการชีวเคมีที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการดำรงชีวิตอยู่ของสิ่งมีชีวิต เป็นกระบวนการที่พืชใช้พลังงานที่สะสมไว้ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไปใช้ในการเจริญเติบโตหรือดำรงชีวิตเอาไว้ และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมา ดังนั้นการหายใจจึงเป็นการดึงเอาอาหารสะสมออกไปจากผลิตผลตลอดเวลา คุณค่าทางอาหารของผลิตผลต่อผู้บริโภคจึงลดลงเรื่อยๆ [8]

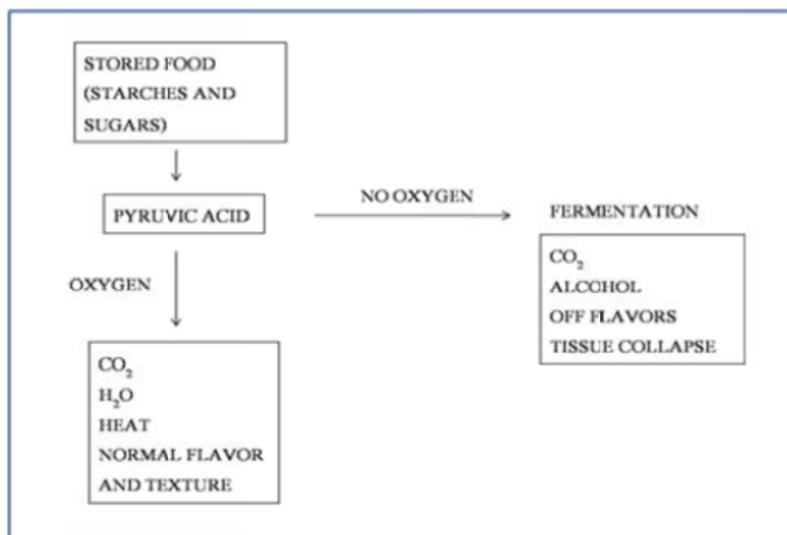
การหายใจของผลิตผลสดนั้นมี 3 ขั้นตอน คือ

- การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็น โมเลกุลเดี่ยว
- ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
- ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ

สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนน้อยหรือไม่มีก๊าซออกซิเจน [9]



ภาพที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [9]

2. การคายน้ำ พืชและผลิตผลสดต่างๆ ต้องคายน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการหายใจ ในขณะที่เดียวกันปริมาณความชื้นภายในผลิตผลมักมีอยู่สูงกว่าความชื้นของอากาศภายนอก น้ำภายในผลิตผลจึงสามารถที่จะสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ผลิตผลจะมีเนื้อเยื่อโครงสร้างต่างๆ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ได้แก่ ชั้นของ Epidermis รวมทั้งไข (Wax) ที่เคลือบผิวอยู่ แต่ผลิตผลจำเป็นต้องมีช่องเปิดต่างๆ เช่น ปากใบ เพื่อถ่ายเทอากาศนำเอาก๊าซออกซิเจนเข้าไปสำหรับการหายใจและระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา การสูญเสียน้ำจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ การสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลนอกจากจะทำให้น้ำหนักที่ขายได้ลดลงแล้ว ยังทำให้รสชาติของผลิตผลเปลี่ยนแปลงด้วย โดยเฉพาะในแง่ของเนื้อสัมผัส (Texture) [8]

3. การสุก เป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงของผลไม้สุกที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดจากขั้ว อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื้อนิ่มลงและมีการสร้างสารให้กลิ่นรส [10]

2.2 บรรจุภัณฑ์สำหรับรักษาคุณภาพพืช

ฟิล์มสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ ที่ใช้ในการบรรจุในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่างๆ กัน ที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำและก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลิตผลสด แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง
- พอลิพรอพิลีน (Propylene, PP) มีลักษณะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุงได้และใช้ทำถาด สามารถใช้ความร้อนปิดผนึกได้
- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุง มีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อน ยอมให้ความชื้นผ่านได้
- Rubber Hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดี ใช้เป็นถุงบรรจุผักและผลไม้สดที่มีน้ำหนักมากๆ อากาศ ความชื้น ผ่านไปได้ยากมาก ถ้าใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น [11]

ในปัจจุบันมีการใช้แผ่นพลาสติกห่อผลิตผลกันมากขึ้น โดยแผ่นพลาสติกจะช่วยในการป้องกันและรักษาผลิตผลให้อยู่ได้นาน โดยทั่วไปแผ่นพลาสติกจะช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมรอบๆ ผลิตผล (Microclimate) เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสมบัติด้านการซึมผ่าน

สมบัติการซึมผ่านของฟิล์ม ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง ถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) ฟิล์ม เป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง [12]

2.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ [1]

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ $20-30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะมีค่าตั้งแต่ $2000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

2.2.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะ และในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักจะทำให้เกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเติมสาร

ป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ [1]

ตารางที่ 2.1 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [13]

ชนิดของพลาสติก	อัตราการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน (cc/25 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ 23°C, 50%RH)	อัตราการซึมผ่านของ ไอน้ำ (g/25 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ 38°C, 90%RH)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	47-94	16-20
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80-9000	80-500
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	2100-2900	4.7
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	7100-7800	16-24
พอลิพรอพิลีน (PP)	2400-3800	11

2.2.3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

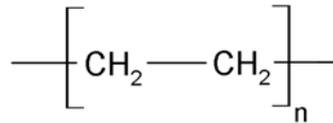
ผลิตภัณฑ์จะเก็บรักษาได้ดีที่ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 90 – 95% การเก็บรักษาในภาชนะบรรจุที่ใช้แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติก จะเกิดการสะสมความชื้นเพิ่มขึ้นอาจสูงถึง 100% จึงต้องเจาะรูถุงพลาสติก เพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ระบายออกไป เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม ดังนั้นการเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้ขึ้นควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตภัณฑ์จะไม่ขาดก๊าซออกซิเจน และไม่เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (Modified atmosphere) ขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ หรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น [1]

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [14]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene; LLDPE) จัดเป็นพอลิโอลิฟินชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการทำพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ของ

เอทิลีนร่วมกับบิวทีน (C₄) หรือเฮกซีน (C₆) หรือออกทีน (C₈) ที่มีความหนาแน่นเช่นเดียวกันกับ LDPE โดยเป็นพอลิเอทิลีนชนิดที่มีโซ่กิ่งน้อยและสั้นๆ



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE)

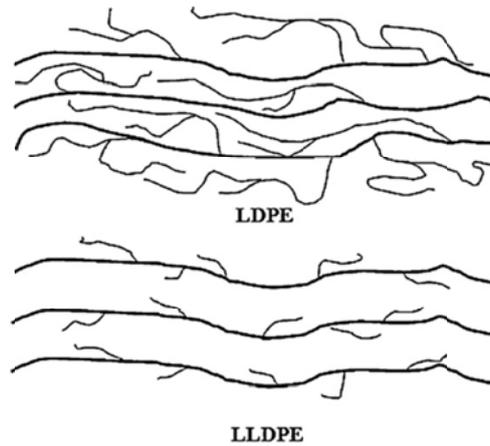
กระบวนการผลิต LLDPE ในปัจจุบันมีกระบวนการผลิต 3 กระบวนการ คือ

- 1) กระบวนการแบบสถานะก๊าซ (Gas phase process)
- 2) กระบวนการแบบสารละลาย (Solution process)
- 3) กระบวนการแบบสารแขวนลอย (Slurry process)

สภาวะของกระบวนการผลิตมีดังนี้

- ความดันที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่ำประมาณ 6–20 บรรยากาศ (100–300 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยกว่า 100°C

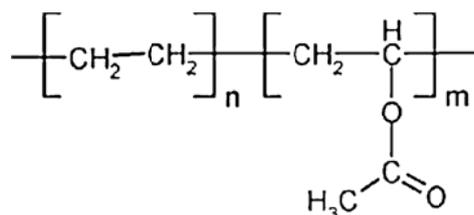
ลักษณะทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผลิตโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมโครงสร้างโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการที่ใช้ความดันสูง ทำให้ลักษณะโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ค่อนข้างเป็นระเบียบ กล่าวคือโครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านภายในโมเลกุลมากแต่สั้นกระจายตลอดความยาวของเส้นตรง และมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ และเนื่องจากการที่ LLDPE มีกิ่งก้านสาขาของโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้มีจุดหลอมเหลวและความสามารถในการคงรูป การดึงยืด และการเชื่อมด้วยความร้อนที่สูงกว่า LDPE รวมทั้งยังมีความสามารถในการต้านแรงกระแทกสูง นอกจากนั้นสมบัติของ LLDPE ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้ด้วย



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ LDPE และ LLDPE [15]

2.4 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ [16]

เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymers, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซีเตต (Vinyl Acetate, VA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซีเตต โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulphates มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซีเตตเป็นหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของ EVA [17]

สมบัติของ EVA

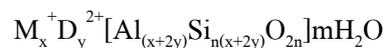
- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.950
- สามารถละลายได้ในสารอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง

- จุดเปราะ (Brittle point) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60-80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า T_g ตั้งแต่ 20°C (ของโพลิเมอร์) จนถึง -20°C และมี Second transition บริเวณ -125°C
- มีค่า Dielectric strength เท่ากับ 21 kV/mm
- มีค่า Dielectric constant ณ 1 MHz เท่ากับ 2.8
- ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D เท่ากับ $90-95$
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ $2.9-19.6 \text{ MPa}$
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at break) เท่ากับ $500-700\%$
- มีความโค้งงอที่อุณหภูมิสูง
- มีความยืดหยุ่น และ โค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์ ส่วน EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ นอกจากนี้ยังใช้ในงานการผลิตรองเท้า และเบาะรองนั่ง

2.5 ซีโอไลต์เอ [18-20]

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปทรงแบบสามมิติและมีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรเคมีของซีโอไลต์เป็นดังนี้

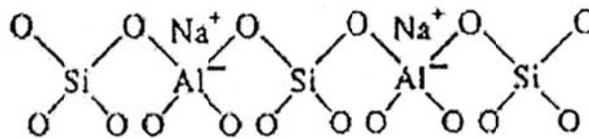


โดยที่ $M_x^+ D_y^{2+}$ คือ ประจุบวกสมดุล (Charge balance cation)

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากคือ ประมาณ $600-1000$ ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ลักษณะของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2 อังสตรอม

การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ทำโดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับซีโอไลต์อื่นๆ ทั่วไปโดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจล ซึ่งสารละลายเหล่านั้น ได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขี้ เมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $70\text{-}300^\circ\text{C}$ จะได้ผลึกของซีโอไลต์เอที่อยู่ในรูปแบบของโซเดียมไอออน (Na^+)



ภาพที่ 2.5 Frame work ของซีโอไลต์เอ [19]

สมบัติของซีโอไลต์เอ

- สารดูดน้ำ (Desiccants) เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม เท่ากับ 1 ซึ่งมีความเป็นขี้สูง จึงสามารถดูดซับสารที่มีขี้ได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี
- การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchangers) ซีโอไลต์เอมีขี้ทำให้ดูดซับน้ำได้ น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกระงับในโครงสร้างซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลาดังสมการ



ไฮโดรเนียมไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆ ที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

- การคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves) เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่าง

ความเป็นซ้ำของซีโอดี และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอดีที่มีซ้ำสูง (มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) ซีโอดีจึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

ซีโอดีเอ เป็นซีโอดีที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบซูเปอร์เจจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-specific catalysis) พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมีมากในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโมเลกุลที่จะเข้าออก นอกจากนี้ยังใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสารและแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอดีเอมีความเป็นซ้ำสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำได้ดี

2.6 กระบวนการผลิตฟิล์ม

กระบวนการผลิตฟิล์มมีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการเป่า (Blown Film Extrusion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นพวกถุง การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหล่อ (Cast film extrusion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นฟิล์มหัด ฟิล์มยืด เป็นต้น

2.6.1 การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า [21]

หลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขั้ว (Extruder) พร้อมกับมีการให้ความร้อนเพื่อทำการหลอม พลาสติกหลอมเหลวถูกขับออกผ่านหัวคาย (Die head) รูปร่างแหวน พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวคายจะถูกเป่าให้เป็นท่อกวางโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของฟิล์มติดกันและลดแรงดึงภายในเนื้อฟิล์ม ท่อพอลิเมอร์จะถูกดึงให้เกิดการยืดตัวตามแนวยาวและมีการเป่าให้เกิดการขยายตัวออกในแนวขวาง และถูกม้วนเก็บเพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือทำเป็นถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนาของฟิล์ม ทั้งนี้ความสม่ำเสมอของความดันจะช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (Surging) ของฟิล์มด้วย ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและคาย ความกว้างของรูเปิดคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในคายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วยเพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ ส่วนอัตราการหล่อเย็นตรงที่ฟองถูกทำให้เย็นมีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกั้น (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up rolls) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำกว่าอากาศที่มีความดันสูง

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร, MD และทิศทางตามแนวขวาง, TD) โดยใช้วิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf) ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส-ความขุ่น ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทาง MD และ TD) การจัดเรียงตัว เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เป็นต้น ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม อัตราส่วนการดึงลง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (Frost line height) (ระยะทางเหนือคานที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกผลึกในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลง ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม) โดยพบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวจะลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกจะลดลง

การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าเหมาะสมในการขึ้นรูปถุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นท่อที่ไม่มีตะเข็บข้าง และสามารถทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ มีความสม่ำเสมอทั้งในทิศทาง MD และ TD แต่ข้อเสียคือฟิล์มที่ได้จะมีความหนาที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีความใสน้อยกว่าวิธีขึ้นรูปแบบหล่อ (Cast film extrusion)

2.6.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด [22]

เทคนิคการอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันยังมีการใช้เทคนิคการอัดพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตและยาง นอกจากนี้ยังเป็นที่นิยมใช้กับเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นได้ยาก

วิธีการขึ้นรูปทำได้โดยนำวัสดุผสมเข้าไปในแม่พิมพ์ และให้ความร้อนขณะทำการอัด จากนั้นใช้ระบบหล่อเย็นโดยใช้น้ำไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการกดอัดต้องใช้ให้น้อยที่สุดแต่เพียงพอที่ทำให้พลาสติกไหลเต็มช่องว่างของแม่พิมพ์ แต่ไม่สูงจนทำให้พลาสติกรั่วไหลออกจากรอยแยกของแม่พิมพ์ ซึ่งระดับความดันที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Devallencourt และคณะ [6] ทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านน้ำของฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซีเตต (VA) ตั้งแต่ 4.5, 19, 33, 50 และ 70 % โดยน้ำหนัก เตรียมฟิล์มด้วยการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) พบว่าความสามารถในการซึมผ่านน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อ VA ในฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากวัฏภาคอสัณฐานของ EVA ที่มากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของหมู่ที่มีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์

S. A. Mousavi และคณะ [23] ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และก๊าซ CO_2 ของฟิล์ม PE และฟิล์ม EVA ที่มี VA 18% และ 28% โดยทำการขึ้นรูปฟิล์ม PE ด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าและขึ้นรูปฟิล์ม EVA ด้วยการหล่อแบบสารละลาย (Casting solution) พบว่ามีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ CO_2 ของฟิล์ม PE ลดลง เมื่อมีการควบคุมความหนาของฟิล์มให้เพิ่มขึ้นด้วยความดันอากาศที่ใช้ในการทำให้ท่อฟิล์มพอง (Bubble pressure) และความเร็วในการดึง (Take-off speed) ในกระบวนการเป่า การลดลงของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดในฟิล์ม PE เป็นผลมาจากการลดลงของวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) และการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline phase) เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และพบว่าในฟิล์ม EVA ที่มี VA 28% มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 ได้ดีกว่าฟิล์ม EVA ที่มี VA 18% และฟิล์ม PE ที่มีความหนาของฟิล์มใกล้เคียงกัน (ประมาณ 90-95 μm) การเพิ่มขึ้นของ VA ในพอลิเมอร์ ทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออันตรกิริยากับโมเลกุลของก๊าซ CO_2 ที่มีความเป็นขั้ว แต่การเพิ่มขึ้นของ VA ไม่ส่งผลกับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

S. Marais และคณะ [24] ทำการศึกษาการผ่านของไอน้ำของฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 19, 50 และ 70 % โดยน้ำหนัก โดยใช้วิธีการหล่อแบบสารละลายในการเตรียมฟิล์ม พบว่าเมื่อปริมาณ VA มากขึ้น สัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficients) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการผ่านของไอน้ำที่ลดลง เนื่องจากการมีหมู่ที่มีขั้ว (Carboxyl group) เพิ่มขึ้น

C. Li และคณะ [7] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง EVA (VA 9%) และ LLDPE โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ LLDPE/EVA เป็น 100:0, 80:20, 40:60, 60:40, 20:80 และ 0:100 พบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันได้ดี อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของ LLDPE ลดลงเนื่องจากผลการละลายเข้ากันของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด และการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นจากการตกผลึกร่วมของ LLDPE กับ EVA

M. Sadeghi และคณะ [25] ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์ม EVA (VA 28%) ผสมกับซิลิการ้อยละ 6 และ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย พบว่าการเติมซิลิกาลงไป 6% โดยน้ำหนักของฟิล์ม ได้ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ส่วนที่เป็นผลึกของฟิล์มลดลง และมีส่วนของอสัณฐานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์และภานินี เต๋ตี่ [5] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม EVA (VA 18%) ที่ผสมซีโอไลต์เอ เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ 10 % โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม ส่วนสมบัติการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติม

เนื่องจากไอน้ำสามารถผ่านรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ EVA กับสารตัวเติม และมีค่าเพิ่มขึ้นมากในสารตัวเติมที่เป็นซีโอล์เอ เนื่องจากไอน้ำสามารถผ่านรูพรุนของซีโอล์เอ

นันทวรรณ ม่วงมี [26] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอล์เอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 100/0, 85/15, 80/20 และ 75/25 ใช้ซีโอล์เอ 0-25% โดยน้ำหนัก สูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่า พบว่าการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอล์เอ ทำให้ความสามารถในการเข้ากันและกระจายตัวได้ดีกว่าการผสม LDPE, EVA และซีโอล์เอพร้อมกัน จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EVA มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีปริมาณซีโอล์เอมากขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA มีค่าสูงขึ้นเมื่อ EVA เพิ่มขึ้น และค่ายังสูงขึ้นในสูตรฟิล์มที่มีการเติมซีโอล์เอเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า EVA ซึ่งมีหมู่'ไวโนลอะซีเตต'ที่มีขั้ว สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น ซีโอล์เอได้ดี และยังมีความเข้ากันได้กับ PE จึงนำ EVA มาผสมเพื่อเพิ่มความเป็นขั้วให้กับฟิล์ม LLDPE และช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีโอล์เอซึ่งมีขั้วสูงในฟิล์ม LLDPE เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำให้กับฟิล์ม LLDPE

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) เกรด PE 1220G1 จากบริษัท ดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE*

สมบัติ	PE 1220G1	หน่วย
อัตราการไหล (Melt flow rate)	2	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm ³

2. เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เกรด UL 00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA*

สมบัติ	UL 00728CC	หน่วย
ไวนิลอะซีเตต (Vinyl acetate)	27.5	%wt
อัตราการไหล (Melt flow rate)	7	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.952	g/cm ³

3. ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A*

สมบัติ	Zeolite A	หน่วย
ลักษณะ	ผงละเอียด	-
สี	ขาว	-
ความเป็นผลึก	99	%
ค่า pH ที่ 1% การกระจายตัว	10.1-11.5	-
ความหนาแน่น (Bulk density)	366	g/cm ³
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	2-5 และ <10 (90%)	µm
ความแข็ง	4-5	Mohs

หมายเหตุ * ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)
5. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) บริษัท Intro Engineering จำกัด รุ่น PL-200
2. เครื่องเป่าฟิล์มพลาสติก (Film blowing tower) บริษัท Labtech Engineering จำกัด รุ่น LF-400 ที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) บริษัท Thermo Haake จำกัด รุ่น Polydrive
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM.) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410LV
6. เครื่อง Differential scanning calorimeter บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น DSC 7
7. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น Pyris 1
8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeation tester; Lyssy L80-4000J)
9. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) บริษัท Labtech Engineering จำกัด รุ่น LP 20
10. เครื่องบีบลม บริษัท ฮิตาชิ จำกัด รุ่น BEBICON 400
11. ตู้อบความร้อน
12. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 g
13. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนีย
14. เครื่องปั๊มสุญญากาศ
15. แผ่นให้ความร้อน พร้อมแท่งกวนแม่เหล็ก
16. กระจบอกใส่ไนโตรเจนเหลว
17. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
18. เดซิเตเตอร์
19. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า

3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA ให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA (โดยน้ำหนัก)

อัตราส่วน LLDPE/EVA	LLDPE	EVA
100/0	100	0
90/10	90	10
85/15	85	15
80/20	80	20
75/25	75	25

นำเม็ดพอลิเมอร์ใส่ลงไปในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone 160°C
- Metering zone 170°C
- Compression zone 180°C
- Die zone 190°C
- Screw speed 10 rpm

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดและผสมผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้ง โดยใช้สภาวะของเครื่องเท่าเดิม จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า

3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอโลดต์เอ

3.3.2.1 สูตรเข้มข้นของ EVA/ซีโอโลดต์เอ

การเตรียมสูตรเข้มข้น เตรียมโดยนำซีโอโลดต์เอหรือแคลเซียมคาร์บอเนตไปอบเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชม. แล้วนำมาผสมกับ EVA ที่อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone 130°C
- Metering zone 140°C
- Compression zone 150°C

- Die zone 160°C
- Screw speed 10 rpm

นำสูตรเข้มข้นที่ได้มาบดและผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้ง โดยใช้สภาวะเครื่องเช่นเดิม จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ด เพื่อเตรียมสำหรับผสมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

3.3.2.2 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอจากสูตรเข้มข้น ทำได้โดยเตรียม LLDPE, EVA และสูตรเข้มข้นของ EVA/ซีโอไลต์ ให้ได้สัดส่วนของพอลิเมอร์ระหว่าง LLDPE/EVA เป็น 80/20 ให้มีปริมาณซีโอไลต์เอเป็น 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

Filler	Content (%wt)	LL80E20 (โดยน้ำหนัก)	
		LLDPE	EVA
-	-	80	20
Zeolite A	10	72	18
	15	68	17
	20	64	16
	25	60	15

นำเม็ดพอลิเมอร์ใส่ลงไปในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone 160°C
- Metering zone 170°C
- Compression zone 180°C
- Die zone 190°C
- Screw speed 10 rpm

พอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดและผสมผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้ง โดยใช้สภาวะเครื่องเช่นเดิม และจากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอสำหรับกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบกดอัด

3.4 การเตรียมฟิล์ม

3.4.1 การเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่า

นำพอลิเมอร์ผสมที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบความร้อนไปที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film) โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้อยู่ในช่วง 25-35 μm

สถานะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว

- Feed zone	180°C
- Compression zone	190°C
- Metering zone	200°C
- Screw speed	10 rpm

สถานะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (ใช้ตายประเภทวงแหวน (Annular die))

- Blowing zone	200°C
- Upper zone	200°C
- Lower zone	200°C
- ขนาดปั๊มลมที่ใช้	5 bar
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1	1.0-1.6 rpm
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2	1.0-1.6 rpm

3.4.2 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด

ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มสูตรที่มีซีโอไลต์เอหรือแคลเซียมคาร์บอเนต โดยนำพอลิเมอร์ผสมที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบความร้อนไปที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยการกดอัด (Compression molding) โดยใช้พอลิเมอร์ผสมประมาณ 2-4 กรัม เพื่อควบคุมความหนาฟิล์มให้อยู่ในช่วง 50-60 μm โดยใช้สถานะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์	20 x 20 x 1 cm^3
- ความดันในการกดอัด	1800 psi
- อุณหภูมิในการกดอัด	200°C
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์	5 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม	5 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน	5 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น	12°C
- เวลาในการกดอัดเย็น	5 นาที

3.5 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน

3.5.1 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกด้วยเครื่อง DSC โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในช่วง 25–160°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน-ความเย็น 10°C ต่อนาที ในบรรยากาศไนโตรเจน (N_2) น้ำหนักตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ตามมาตรฐาน ASTM E794 [27] นำค่า Heat of fusion (ΔH_f) มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{(\% \text{ โดยน้ำหนักของ PE ที่มีอยู่จริง})} \quad (3.2)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่เป็นผลึก 100% มีค่า 293 J/g [28]

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอนฟิล์ม

หาปริมาณซีโอไลต์เอทีที่มีอยู่ในฟิล์ม โดยใช้เครื่อง TGA ซึ่งกำหนดสภาวะที่ทดสอบตามด้านล่าง แล้วนำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณซีโอไลต์เอทีที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM E1131 [29]

น้ำหนักของฟิล์มที่ใช้	7-10 mg
อุณหภูมิ	30-550°C
อัตราการให้ความร้อน	20°C/min
ภายใต้สภาวะบรรยากาศ	O_2

3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา

3.6.1 การกระจายตัวของ EVA

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด 1x3 cm² แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที หักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเย็น จากนั้นนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างแช่ในตัวทำละลายไซลีน ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 50°C และเขย่าเป็นเวลา 6 ชม. เพื่อสกัด EVA ออกจากชิ้นงาน จากนั้นนำมาอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EVA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.6.2 การกระจายตัวของซีโอดีเอ

ศึกษาการกระจายตัวของซีโอดีเอในแผ่นฟิล์มตัวอย่าง โดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที หักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเย็น จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของซีโอดีเอด้วย SEM

3.7 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

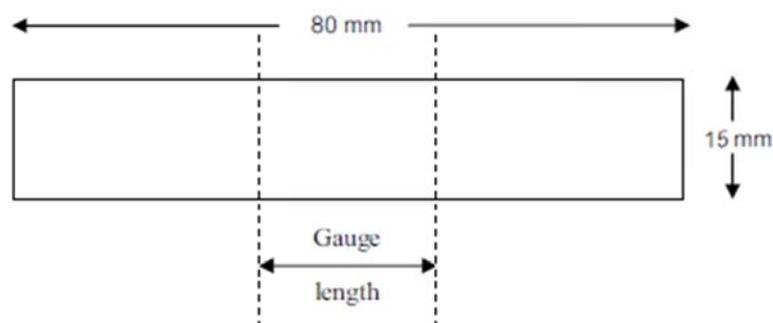
3.7.1 ความหนาของฟิล์ม

นำฟิล์มที่ผลิตได้มาวัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.7.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบสมบัติการรับแรงดึงที่ทำการศึกษาได้แก่ ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ยั่งมอดุลัส (Young's Modulus) และการดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 [30] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งจะทำการตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเป่าตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) ให้มีขนาด $15 \times 80 \text{ mm}^2$ และฟิล์มที่ได้จากกระบวนการกดอัด ทำการตัดให้มีขนาด $15 \times 80 \text{ mm}^2$ โดยใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

โหลดเซลล์ (Load cell)	100 N
ความเร็วในการดึง (Test speed)	100 mm/min
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	25 mm



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$\text{ยังมอดูลัส (Young's Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.4)$$

$$\text{การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)} = \left[\frac{l-l_0}{l_0} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	F	=	แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดคราก
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่างเริ่มต้น (mm^2)
	l	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึง ณ จุดคราก
	l_0	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length)

หมายเหตุ ค่ายังมอดูลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 2 และ 3 % การดึงยืด)

3.8 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ

ตัดฟิล์มให้มีขนาด $11 \times 11 \text{ cm}^2$ ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติกในระยะเวลาที่กำหนด และภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ ที่อุณหภูมิ 38°C ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่อง Lyssy water permeability เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 15106-1 : 2003 (E) [31]

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกทำการศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม และส่วนที่ 2 ทำการเลือกสูตร LLDPE/EVA 1 สูตรเพื่อทำการศึกษาผลการใช้ซีไอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม

4.1 การศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ EVA

ในการทดลองการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE กับ EVA ใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรและความหนาของฟิล์มตัวอย่าง

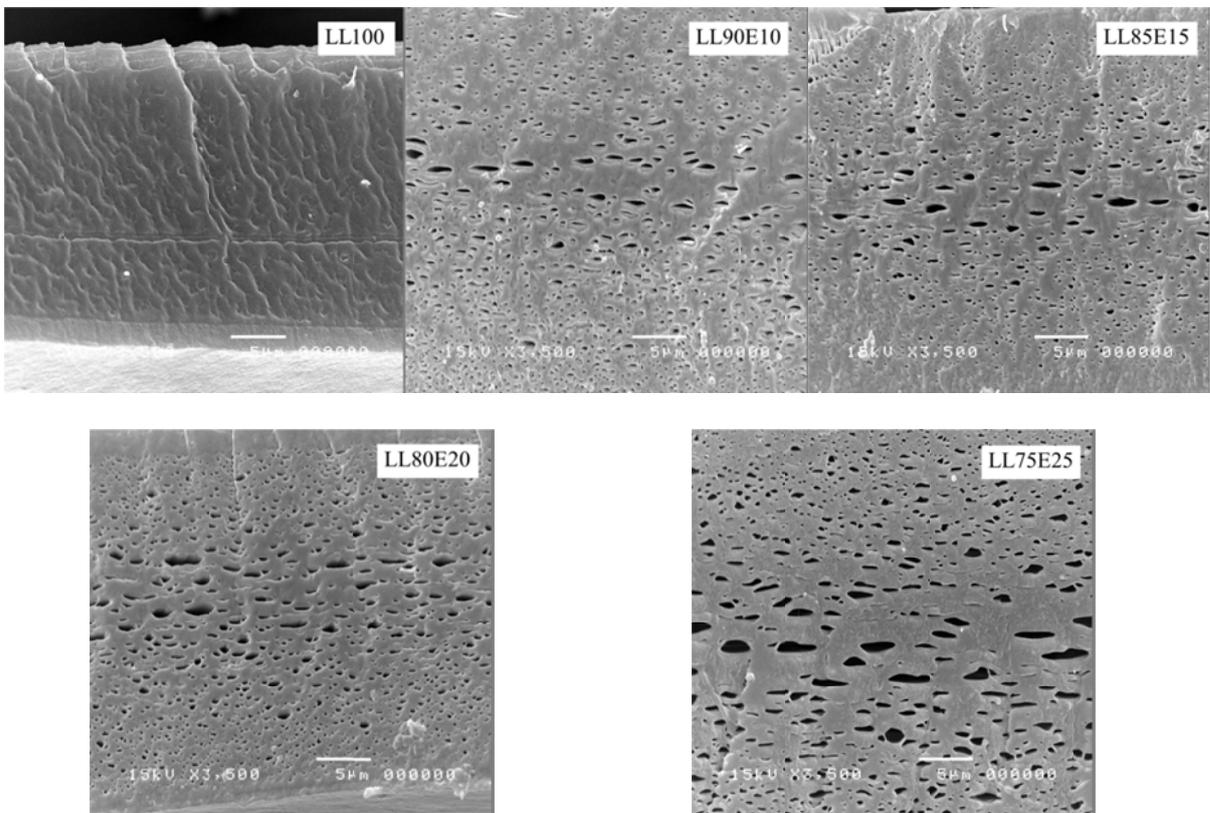
สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมโดยน้ำหนัก		ความหนาเฉลี่ย (μm)
	LLDPE	EVA	
LL100	100	0	29.33 ± 3.01
LL90E10	90	10	27.73 ± 2.59
LL85E15	85	15	26.97 ± 2.43
LL80E20	80	20	27.98 ± 3.19
LL75E25	75	25	32.23 ± 2.79

จากการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA ทั้งหมด 5 สูตร จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพบว่าความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 25-35 ไมครอน

4.1.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ในฟิล์ม LLDPE/ EVA

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ทำการเลือก EVA มาช่วยการผสมระหว่าง LLDPE กับซีไอไลต์เอ เนื่องจาก EVA มีหมู่ไวนิลอะซีเตตที่มีขั้ว ซึ่งเข้ากันได้กับซีไอไลต์เอ จึงน่าจะช่วยให้ซีไอไลต์เอกระจายตัวในวัฏภาคของ LLDPE ดีขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [26] จึงทำการศึกษาการกระจายของ EVA ใน LLDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยทำการสกัด EVA ออกก่อนนำพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และแสดงผลการศึกษาดังภาพที่ 4.1

จากภาพที่ 4.1 พบว่า ช่องว่างหรือรูที่พบในภาพแสดงถึง EVA ที่ถูกสกัดออก โดย EVA เป็นวัฏภาคที่กระจาย (Dispersed phase) อยู่ใน LLDPE ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) และฟิล์มที่มีปริมาณของ EVA มากขึ้น พบว่าขนาดของวัฏภาค EVA ที่กระจายอยู่ใน LLDPE มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้สังเกตได้ว่าที่บริเวณใกล้ผิวฟิล์มทั้งด้านบนและด้านล่าง ขนาดของวัฏภาคกระจาย EVA หรือช่องว่างที่พบจะเล็กกว่าช่องว่างส่วนกลางของฟิล์ม ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากผิวทั้งสองด้านของฟิล์มสัมผัสกับอากาศและลมก่อน ที่ผิวฟิล์มจึงมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า เมื่อเครื่องจักรดึงฟิล์มไปเรื่อยๆ ส่วนบริเวณตรงกลางของฟิล์มจึงยังเคลื่อนที่ตามแรงดึงได้และทำให้เกิดการรวมตัวกันของวัฏภาคกระจาย EVA ตรงกลาง เช่นเดียวกับที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา [26]



ภาพที่ 4.1 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/EVA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EVA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า)

4.1.2 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/EVA

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/EVA โดยใช้เครื่อง DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 พบว่าสมบัติของ LLDPE ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการผสม EVA ในทุกสูตร ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดูได้จากค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการมี EVA ไม่ได้เข้ารบกวนหรือ

เร่งการเกิดผลึกของ LLDPE จึงทำให้ LLDPE ยังสามารถเกิดผลึกที่มีขนาดและปริมาณใกล้เคียงกับในกรณีที่ไม่มี EVA

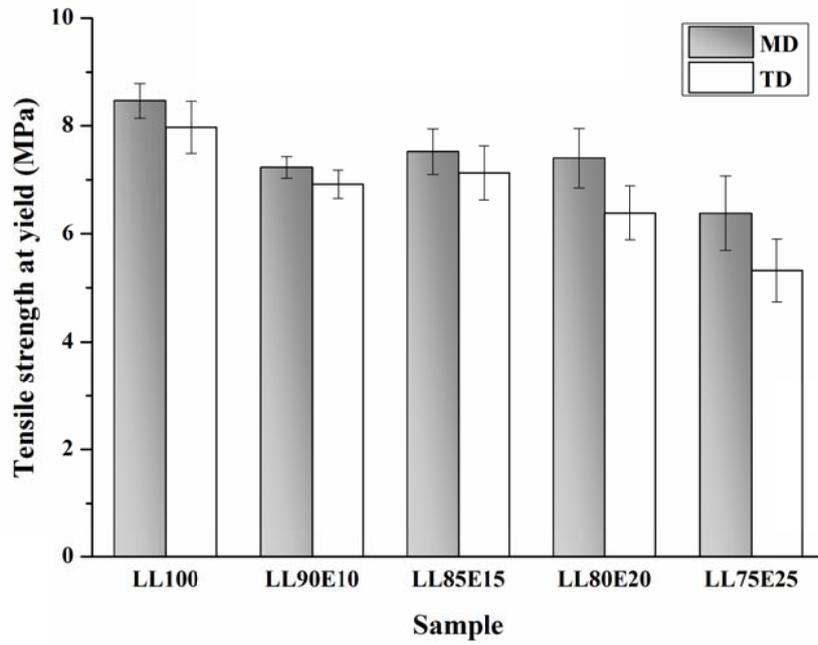
ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจาก EVA ที่ใช้มีปริมาณไวโนลอะซีเตต (VA) 27.5% ซึ่งแสดงควมมีขั้วที่สูง อาจทำให้การเข้ากันระหว่าง LLDPE ที่ไม่มีขั้วกับ EVA (VA 27.5%) ไม่ดีพอ ซึ่งพบผลการทดลองเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [26] อย่างไรก็ตาม มีการรายงานการเกิดการตกผลึกร่วม ระหว่าง LLDPE กับ EVA ในบางงานวิจัย [7] ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการใช้ EVA ที่มี VA 9% ควมมีขั้วต่ำจึงเข้ากันได้ดีกับ LLDPE

ตารางที่ 4.2 T_m , T_c และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/EVA

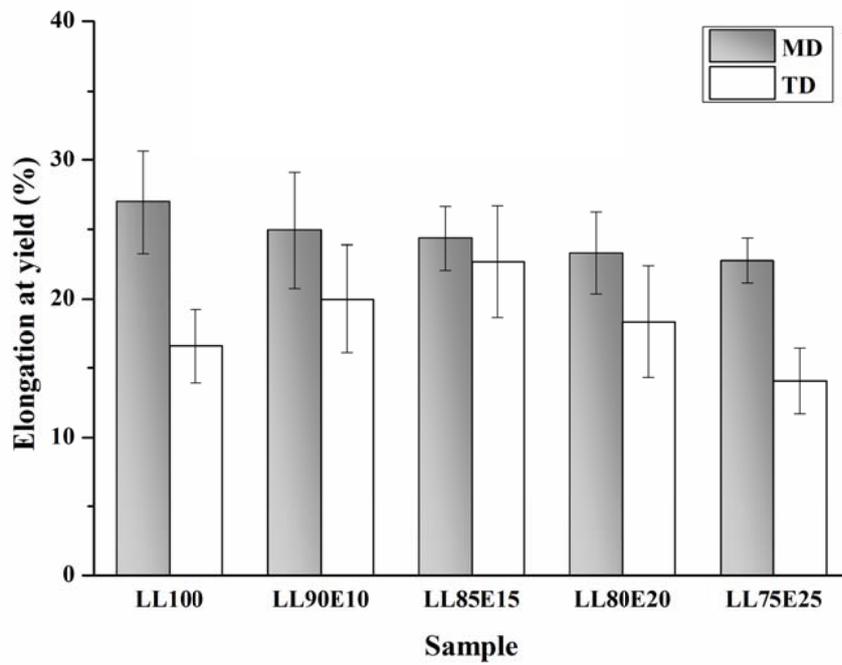
สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL100	119	105	24.2
LL90E10	118	105	22.5
LL85E15	118	105	26.6
LL80E20	113	104	23.0
LL75E25	119	105	23.7

4.1.3 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/ EVA

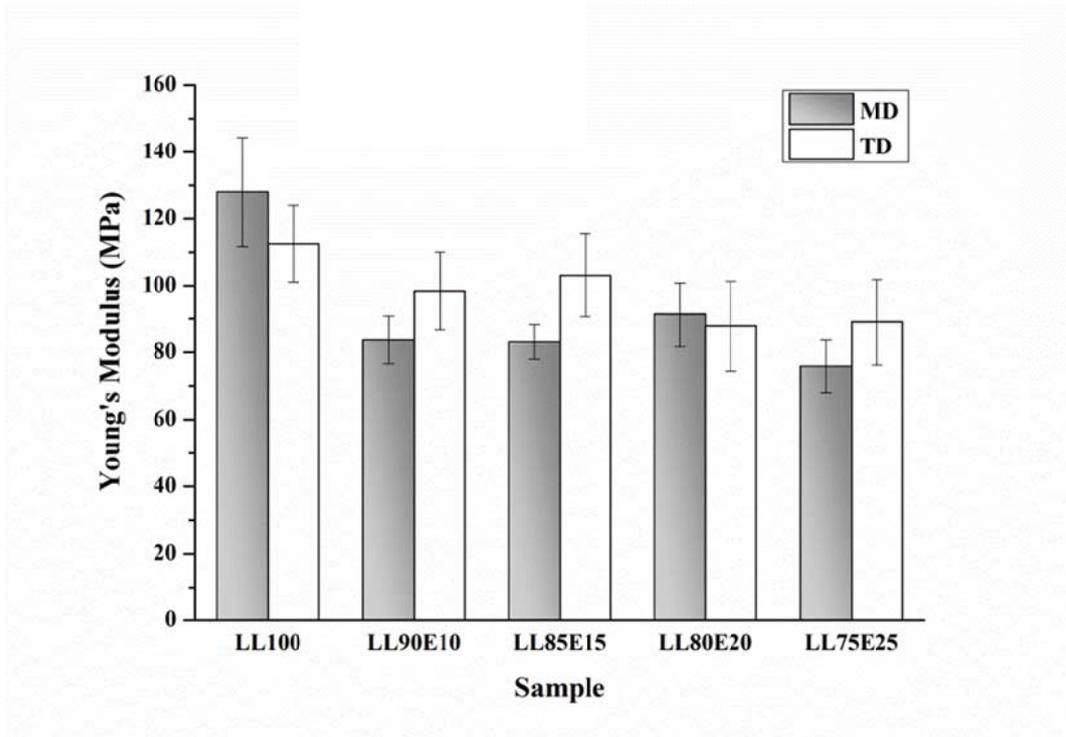
ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.2 โดยมีการทดสอบแผ่นฟิล์มทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD)



(ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์ม



(ข) การดึงยืด ณ จุดครากของฟิล์ม



(ค) ยังมอดุลัสของฟิล์ม

ภาพที่ 4.2 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA

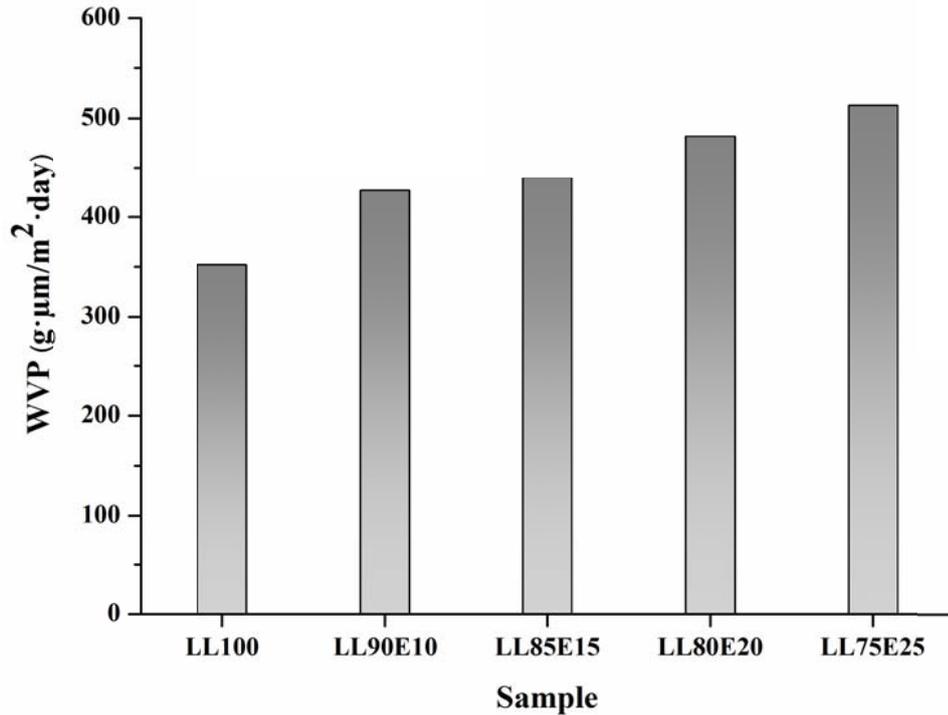
จากภาพที่ 4.2 พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) และยังมอดุลัส (Young's Modulus) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ LL100 โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยาง ให้ความยืดหยุ่นทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า LLDPE

และจากผลการพิจารณาเปรียบเทียบแนวการทดสอบ พบว่าสมบัติการรับแรงดึงส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในทิศทางการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามขวางเครื่องจักร แสดงว่าในงานวิจัยนี้ การจัดเรียงสายโซ่ของพอลิเมอร์ (Polymer chain alignment) ระหว่างการผลิตฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Film blowing process) พอๆ กันทั้งสองทิศทาง

4.1.4 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/ EVA

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.3 โดยในการทดลองได้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) นำมาคำนวณเป็นค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Permeability, WVP) โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$WVP = WVTR \times \text{Film thickness} \quad (4.1)$$



ภาพที่ 4.3 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA

จากภาพที่ 4.3 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีหมู่ไวโนลอะซีเตต (27.5%) ใน EVA ทำให้ EVA มีสภาพขั้วสูง จึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดดึงดูดโมเลกุลของไอน้ำซึ่งมีขั้วได้ดี ไอน้ำจึงสามารถผ่านส่วนอสัณฐานของ EVA ได้ดีกว่าอสัณฐานของ LLDPE ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ EVA จึงเป็นการเพิ่มส่วนอสัณฐานที่มีขั้วในฟิล์ม LLDPE/EVA ส่งผลให้ WVP สูงขึ้น

4.2 การศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/EVA

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/EVA มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมี EVA มาก (ในสูตร LL75E25) เพื่อให้สมบัติการรับแรงดึงในเบื้องต้นใกล้เคียงกับฟิล์ม LLDPE (LL100) งานวิจัยนี้จึงเลือกเฉพาะสูตรพอลิเมอร์ผสม LL80E20 เพื่อศึกษาผลของการมีซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LLDPE/EVA และจากปัญหาในการขึ้นรูปฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ ซึ่งไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอได้ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Film blowing process) ในการทดลองส่วนนี้จึงเปลี่ยนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding process)

4.2.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

ปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์ในฟิล์มแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์ในฟิล์มส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ โดยปกติเมื่อเทพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์ลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พอลิเมอร์ผสมและซีโอไลต์จะมีรูปร่างและความหนาแน่นแตกต่างกัน จึงทำให้การเคลื่อนที่ตามแรงขับของสกรูต่างกัน และอาจมีอนุภาคของซีโอไลต์เอบางส่วนตกลงมาที่ส่วนล่างของ Hopper ทำให้ในขั้นตอนการผสมจะเหลือซีโอไลต์เอบางส่วนติดค้างอยู่ในร่องสกรู เพื่อชดเชยปริมาณซีโอไลต์ที่ติดค้างในสกรู ในขั้นตอนการผสมได้มีการเผื่อปริมาณซีโอไลต์เอบางส่วนไป ซึ่งมากกว่าปริมาณที่ต้องการจริง (ประมาณ 5%) ทำให้ปริมาณที่แท้จริงของซีโอไลต์เอบที่พบในฟิล์มใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ

ในการผลิตฟิล์มได้ควบคุมความหนาให้มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 50-60 μm ซึ่งหนากว่าฟิล์มที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ทั้งนี้หากฟิล์มที่ได้มีความหนาน้อยลงจะทำให้เกาะชิ้นงานออกจากแม่แบบได้ลำบาก เพราะฟิล์มบางเกิดการยึดเกาะที่ติดกับแผ่นรองรับในแม่แบบ และเนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำทำให้มีค่าน้อยลงได้ จึงต้องควบคุมความหนาให้พอๆ กัน และเพิ่มสูตร LL100 ซึ่งเป็นสูตรที่มีเฉพาะ LLDPE ใช้เป็นสูตรควบคุม

ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

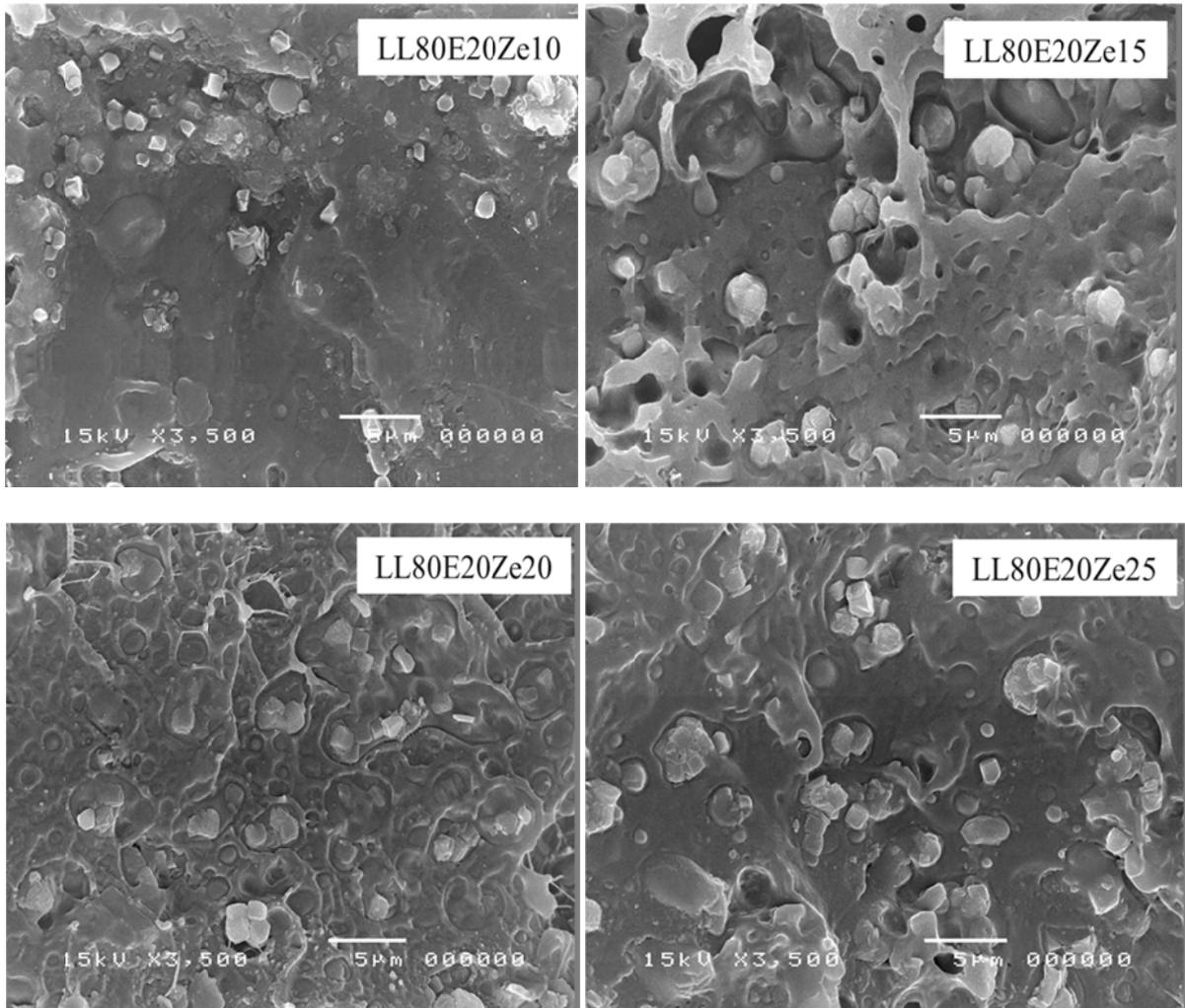
สูตร	น้ำหนักของพอลิเมอร์ ในสูตรLL80E20		ปริมาณซีโอไลต์ (% wt)		ความหนา ของฟิล์ม (μm)
	LLDPE	EVA	ที่ต้องการ	ที่พบ	
LL100*	100	0	0	0	53.45 \pm 3.70
LL80E20	80	20	0	0	51.28 \pm 3.32
LL80E20Ze10	72	18	10	12.94	51.23 \pm 4.13
LL80E20Ze15	68	17	15	17.40	52.88 \pm 4.71
LL80E20Ze20	64	16	20	20.67	53.18 \pm 3.87
LL80E20Ze25	60	15	25	23.32	52.46 \pm 4.75

หมายเหตุ LL100* ใช้เป็นสูตรควบคุม

4.2.2 การศึกษาการกระจายตัวซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

การศึกษาการกระจายตัวซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite โดยใช้เครื่อง SEM แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4.4 พบว่าการใช้ซีโอไลต์ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite ในปริมาณน้อย (10% โดยน้ำหนัก) อนุภาคของซีโอไลต์สามารถแตกกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดี (Good

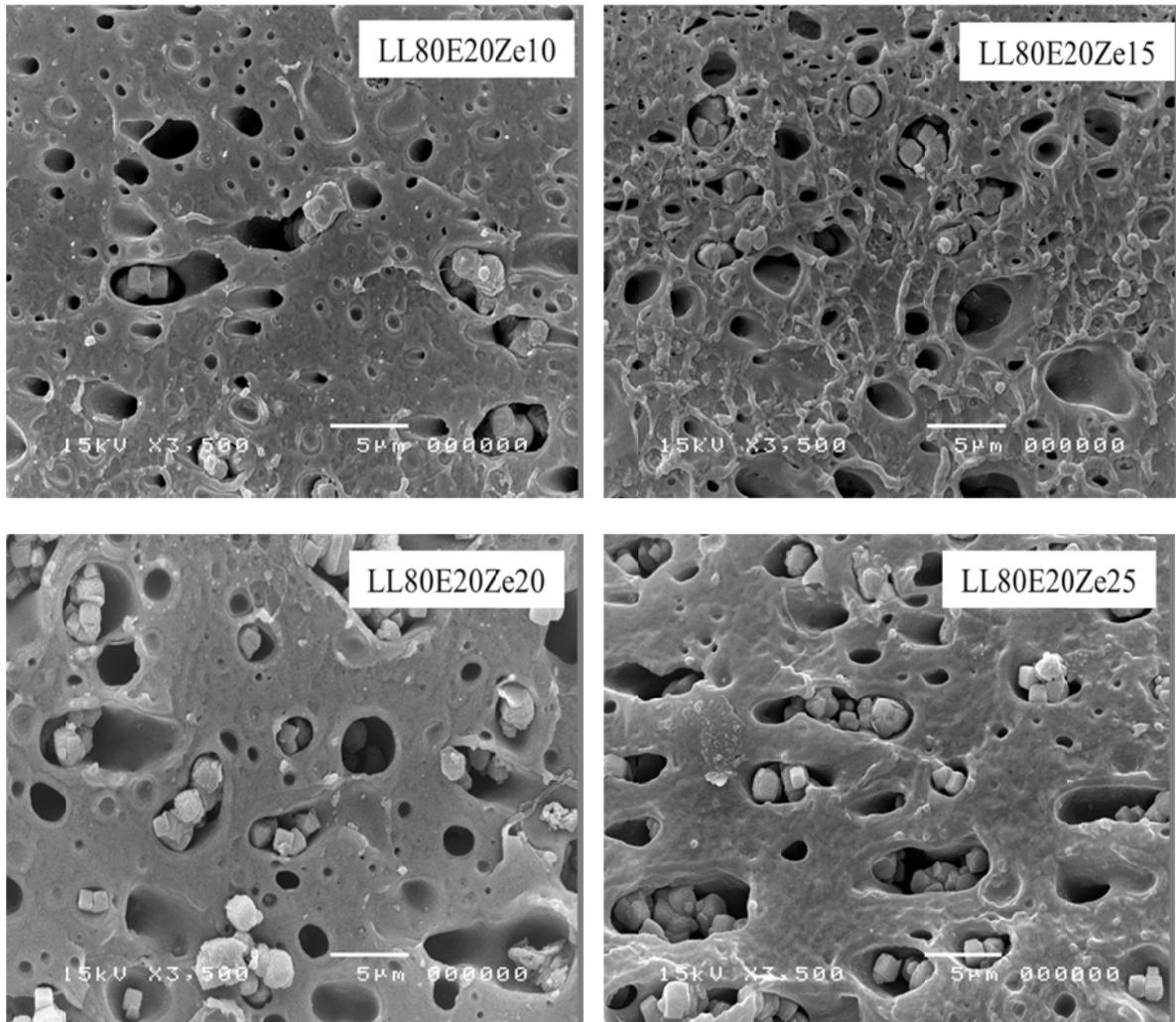
dispersion) อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการใช้ EVA เพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ จากภาพที่ 4.4 ยังคงพบว่า การเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้นจะพบทั้งอนุภาคเดี่ยวและกลุ่มก้อนของซีโอไลต์เอ ซึ่งสังเกตได้ในฟิล์ม LL80E20Ze15, LL80E20Ze20 และ LL80E20Ze25 ทั้งนี้เพราะธรรมชาติของสารที่มีสภาพขั้วแตกต่างกัน การเพิ่มซีโอไลต์เอทำให้อนุภาคของซีโอไลต์เอยิ่งจะเกาะกันเองแน่นขึ้น เพราะแต่ละอนุภาคมีสภาพขั้วสูงเหมือนกัน ซึ่งต่างจากพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั้วที่ต่ำกว่าซีโอไลต์เอ ทำให้การแตกกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์มยากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอ



ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/ EVA/Zeolite (กำลังขยาย 3500 เท่า)

ภาพที่ 4.5 เป็นภาพ SEM ของฟิล์มชนิดเดียวกันกับในภาพที่ 4.4 แต่ได้มีการสกัดวัฏภาคของ EVA ออกก่อน เช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.1 ช่องว่างที่พบในภาพที่ 4.5 แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EVA อยู่ พบว่า EVA เป็นวัฏภาคที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องของ LLDPE และมีการกระจายตัวดีในทุกสูตรฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ ทั้งนี้เพราะ EVA ที่มีทั้งส่วนที่มีและไม่มีขั้ว ส่วนที่ไม่มีขั้วของ EVA ทำให้ EVA แยกกระจายใน LLDPE ที่ไม่มีขั้วได้ดี และความมีขั้วของ EVA ทำให้ซีโอไลต์เอถูกดึงเข้ามาอยู่ใน

ช่องว่างที่อยู่ในภาพที่ 4.5 แสดงว่าซีโอไลต์ที่มีความเป็นขั้วสูงชอบที่จะอยู่กับ EVA ที่มีความเป็นขั้วบางส่วน มากกว่าที่จะไปอยู่ในวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว ของ LLDPE ด้วยเหตุนี้การกระจายตัว (Distribution) ของซีโอไลต์เอดีขึ้นเมื่ออยู่ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite เมื่อเทียบกับฟิล์ม PE/Zeolite อย่างไรก็ตาม ยังคงพบว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เอามากขึ้น ซีโอไลต์เอจะอยู่เป็นกลุ่มก้อนมากกว่าเป็นอนุภาคเดี่ยว (Poor dispersion) เช่นเดียวกับที่สังเกตได้ในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.5 ภาพ SEM ของพื้นผิวที่แตกหักของฟิล์ม LLDPE/ EVA/Zeolite ที่มีการสกัด EVA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า)

4.2.3 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite โดยใช้เครื่อง DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 พบว่าสมบัติของ LLDPE ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใช้ซีโอไลต์เอในปริมาณ 0-25% โดยน้ำหนัก โดยดูจากค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการมีซีโอไลต์เอไม่ได้เข้ารบกวนหรือ

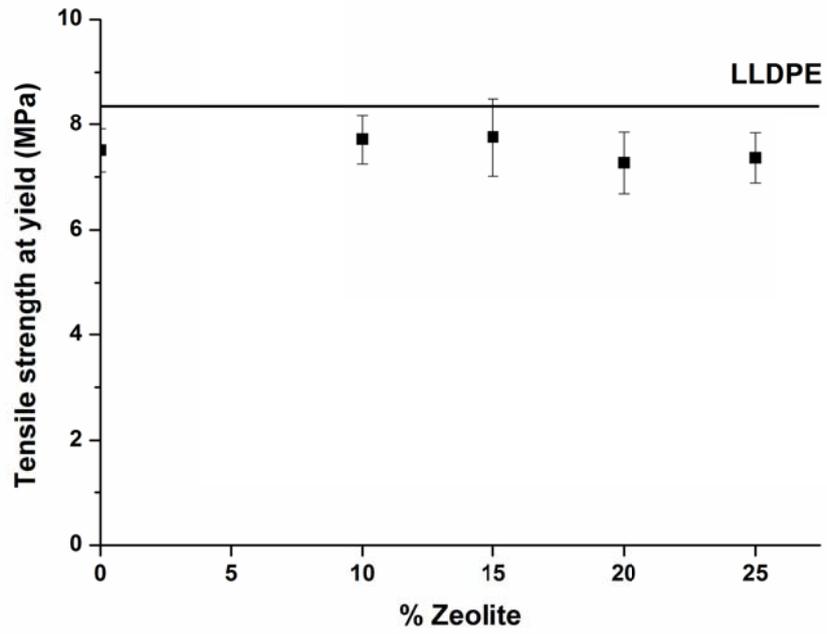
เร่งการเกิดผลึกของ LLDPE จึงทำให้ LLDPE ยังสามารถเกิดผลึกที่มีขนาดและปริมาณใกล้เคียงกับในกรณีที่ไม่มีซีโอไลต์เอ

ตารางที่ 4.4 T_m , T_c และความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

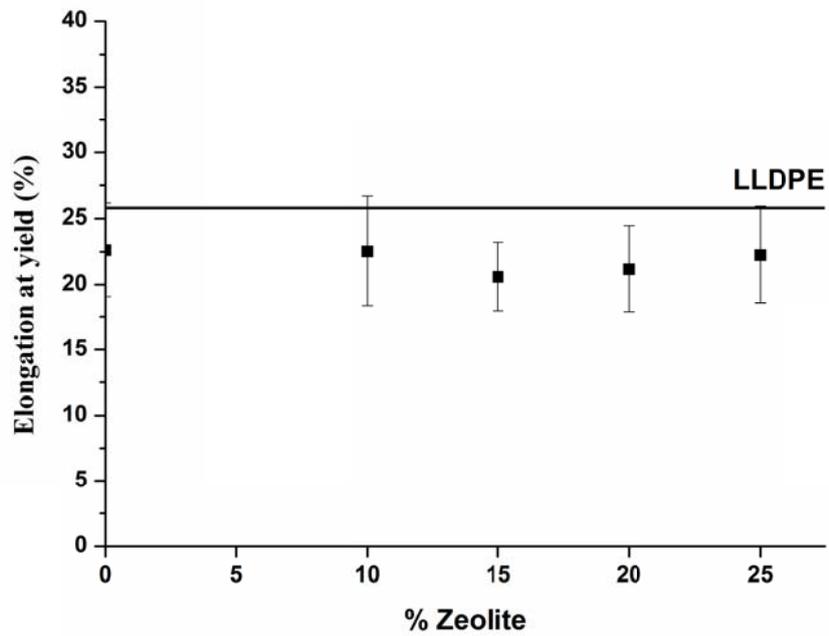
สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL100	121	103	20.1
LL80E20	117	104	20.2
LL80E20Ze10	118	104	21.3
LL80E20Ze15	119	106	25.5
LL80E20Ze20	115	106	23.2
LL80E20Ze25	117	105	24.0

4.2.4 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite

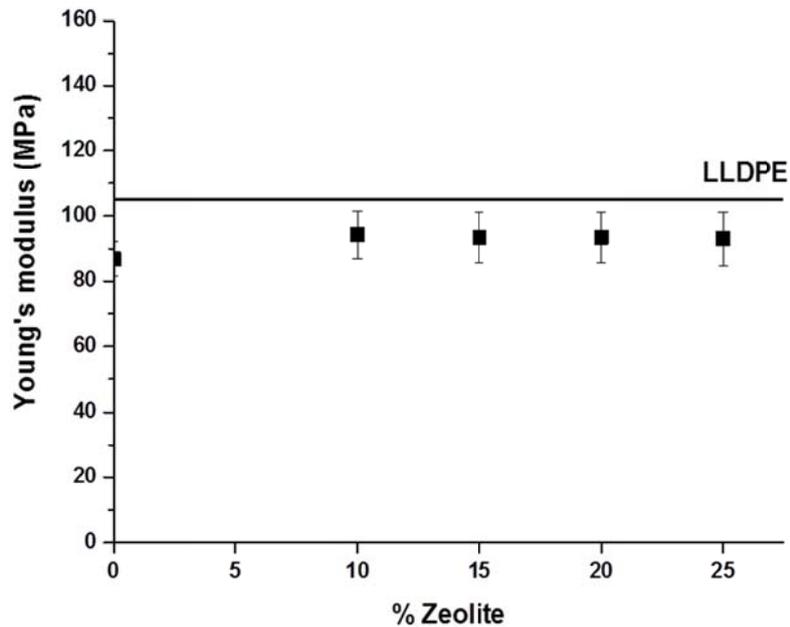
จากภาพที่ 4.6 พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield) และยังมีมอดูลัส (Young's Modulus) ของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite ที่มีปริมาณซีโอไลต์เอ ตั้งแต่ 0-25% โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นหมายถึงการใช้ซีโอไลต์เอในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อสมบัติการรับแรงดึง ณ จุดคราก อาจเนื่องมาจากการที่ซีโอไลต์เอส่วนใหญ่มีการกระจายตัวและเข้าไปแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคที่มีซีโอไลต์เอ มีความนิ่มและยืดหยุ่นของ EVA มากกว่าที่จะกระจายตัวในวัฏภาคที่ไม่มีซีโอไลต์เอของ LLDPE (ดังภาพที่ 4.5) การที่ซีโอไลต์เอกระจายตัวอยู่ในวัฏภาค EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัวในฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite และสูตรฟิล์มที่เลือกใช้มี EVA อยู่ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ทั้งหมด (LL80E20) นี้ เป็นผลทำให้สมบัติในการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite ทุกสูตรไม่แตกต่างกัน



(ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์ม



(ข) การดึงยืด ณ จุดครากของฟิล์ม

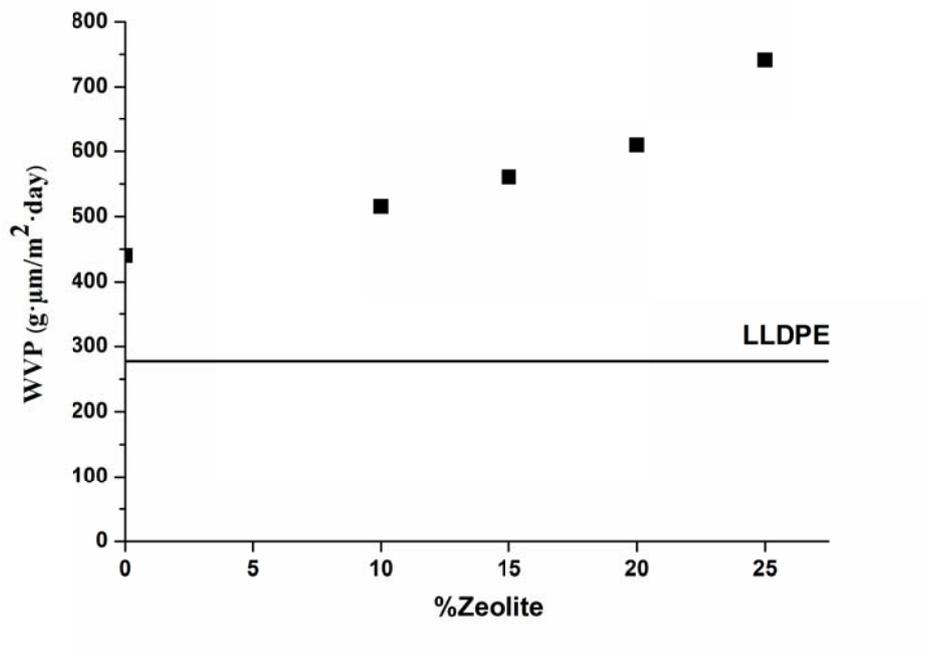


(ค) ย้งมอดุลลัษของฟิล์ม

ภาพที่ 4.6 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EVA/Zelite ที่มีซีโอไลต์เอในปริมาณต่างๆ

4.2.5 การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zelite

จากภาพที่ 4.7 พบว่าการมีซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE/EVA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มสูงขึ้น และ WVP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น เห็นได้จากฟิล์ม LL80E20 (ไม่มีซีโอไลต์เอ) มีค่า WVP เท่ากับ 440 $\text{g} \cdot \mu\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ส่วนฟิล์ม LL80E20Ze25 (มีซีโอไลต์เอ 25% โดยน้ำหนัก) มีค่า WVP เท่ากับ 741 $\text{g} \cdot \mu\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งการมีซีโอไลต์เอ 25% ทำให้มีค่า WVP มากขึ้น 61% จะเห็นได้ว่าการมีซีโอไลต์เอในปริมาณสูง ช่วยเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอย่างมาก เนื่องจากไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ดีในวัฏภาคอสัณฐานของ EVA เพราะมีสมบัติขั้วเหมือนกัน และการมีซีโอไลต์เอที่มีโครงสร้างที่มีรูพรุนและมีความมีขั้วสูง จึงช่วยเสริมสมบัติในการดูดซับไอน้ำของฟิล์มได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.7 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA/Zeoilite ที่มีซีโอไลต์เอ ในปริมาณต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาพัฒนาความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยมีการผสมเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ลงไปเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เนื่องจาก EVA สามารถเข้ากันได้ดีกับ LLDPE และมีส่วนที่มีขี้ (ไวนิลอะซีเตต, VA) ซึ่งช่วยให้สามารถผสมกับซีโอไลต์เอได้ดีขึ้น จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของอัตราส่วน LLDPE/EVA (LL100, LL90E10, LL85E15, LL80E20, LL75E25) พบว่า สูตรที่มีการผสม EVA ให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและยังมอดูลัสน้อยกว่าฟิล์ม LLDPE และสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น

2. จากการศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอในสูตร LL80E20 พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น (0-25% โดยน้ำหนัก)

3. การเติมอีวีเอ (0-25%) และ/หรือการใส่ซีโอไลต์เอ (0-25%) โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE

4. EVA มีการกระจายตัวใน LLDPE ดีในทุกสูตรพอลิเมอร์ผสม ส่วนซีโอไลต์เอมีการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ EVA และอยู่เป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น

5. จากการศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่าเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอและ EVA ใน จะส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงด้วย เมื่อเติมซีโอไลต์เอ 25% (ฟิล์มสูตร LL80E20Ze25) มีค่า WVP สูงกว่าฟิล์ม LL80E20 68% และสูงกว่าฟิล์ม LLDPE (LL100) ถึง 167%

จากการศึกษาฟิล์มซึมผ่านไอน้ำจาก LLDPE/EVA และซีโอไลต์เอที่ปริมาณต่างๆ พบว่าสูตรที่มี EVA และซีโอไลต์เอสูง ได้แก่ สูตร LL80E20Ze25 จะมีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นและมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าฟิล์ม LLDPE เพียงเล็กน้อย จึงเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุผลิตผลสดในอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรผลิตฟิล์มที่มีความหนาใกล้เคียงกัน โดยปรับสภาวะการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสมบัติที่อาจเปลี่ยนแปลงไป เช่น สมบัติเชิงกล และสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด เพราะความหนาเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด

2. อาจเปลี่ยนแปลงชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม เพื่อเพิ่มความเป็นขี้และความสามารถในการเข้ากันได้กับซีโอไลต์เอ เช่น อาจใช้เป็นเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (EVOH) แทนเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA)

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดนัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนานนท์. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2535.
- [2] เนตรนภา ลามอ และเบญจวรรณ ตานนท์. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอ เอทีลินชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] Petroleum Institute of Thailand. “ราคาเม็ดพลาสติกในประเทศไทย” [online]. Available : <http://plastic.oie.go.th/> 2012.
- [4] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย “การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอครีดพอลิเอทีลิน ชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [5] พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต่ดี. “การเตรียมและทดสอบสมบัติของเอทีลินไนลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [6] C. Devallencourt, S. Marais , J.M. Saiter, M. Labbe’ and M. Me’tayer. “Study of transport of small molecules through ethylene-co-vinyl acetate copolymers films. Part A: Water molecules”. Polymer Testing 21 (2002) 253-262.
- [7] C. Li, Q. Kong, J. Zhao, D. Zhao, Q. Fan and Y. Xia. “Crystallization of partially miscible linear low-density polyethylene/poly(ethylene-co-vinylacetate) blends”. Material Letter 58 (2004) 3613-3617.
- [8] จรุงแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [9] E.B. Pantastico. “Postharvest Psysiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetables.” Westport CT : The AVI Publishing Company Inc.1975.

- [10] จิรา ณ หนองคาย. เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและดอกไม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แมสพลับลิชชิ่ง. 2534.
- [11] สายชล เกตุษา. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. นครปฐม : ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมแห่งชาติ. 2528.
- [12] รุ่งนภา วิสิษฐอุดรกร. “เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร.” ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [13] F.A. Paine and H.Y. Paine. **A Handbook of Food Packaging**. Glasgow : Chapman& Hall. 1992.
- [14] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครวิทยา. **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2545.
- [15] M. F. Omara, H. M. Akila and Z. A. Ahmada. “**Effect of molecular structures on dynamic compression properties of polyethylene**”. Materials Science and Engineering A 538 (2012) 125– 134
- [16] J.A. Brydson. **Plastics Materails**. 7th ed. Oxford : Butterworth Heinemann. 1999.
- [17] S. A. Mousavi, M. Sadeghib, M. Y. Motamed-Hashemia, M. Pourafshari Chenarc, R. Roosta- Azada and M. Sadeghid “**Study of gas separation properties of ethylene vinyl acetate (EVA) copolymer membranes prepared via phase inversion method**”. Separation and Purification Technology 62 (2008) 642–647
- [18] ตะวัน สุขน้อย. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาชีโอล์ดและสารประกอบที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [19] B.C. Gates. **Catalytic Chemistry**. New York : Wiley& Sons. 1992.
- [20] S. Tanyapanyachon. “**The Preparation of Zeolite A Composite membrane for Ethanol/ethylene/water separation**.” M.D. Thesis of Science in Petrochemicals and Hydrocarbon Chemistry School of Graduate studies King Mongkut’ s Institute of Technology Ladkrabang. 2001.
- [21] สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1**. กรุงเทพมหานคร : บุ๊คเน็ต. 2548.
- [22] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. “**การขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด**.” [online]. Available : archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0352pp_ch2.pdf. 2555.

- [23] S. A. Mousavi, M. Gholizadehb, S. Sedghia, M.P. Chenarc, M. Barmalad and A. Soltania
“Effects of preparation conditions on the morphology and gas permeation properties of polyethylene (PE) and ethylene vinyl acetate (EVA) films.” Chemical Engineering Research and Design 88 (2010) 1593-1598
- [24] S. Marais, E. Bureau, F. Gouanve, E.B. Salem, Y. Hirata, A. Andrio, C. Cabot and H. Atmani
“Transport of water and gases through EVA/PVC blend films-permeation and DSC investigations.” Polymer Testing 23 (2004) 475-486
- [25] M. Sadeghi, G. Khanbabaei, H. Amir and S. Khatt. **“Gas permeation properties of ethylene vinyl acetate–silica nanocomposite membranes.”** Membrane Science 322 (2008) 423-428
- [26] นันทวรรณ ม่วงมี. **“การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.”** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [27] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.”** ASTM E794. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2006.
- [28] F.W.Billmeyer. **“Textbook of Polymer Science.”** New York : John Wiley & Sons. 1984
- [29] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.”** ASTM E1131. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2008.
- [30] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.”** ASTM D882. Annual Book of ASTM standard 08.01., Philadelphia. 1998.
- [31] ISO 15106-1:2003 (E) **“Plastics-Film and sheeting-Determination of water vapor transmission rate-Part 1: Humidity detection sensor method.”** Geneva: International Organization for Standardization. 2003.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

ประวัติการศึกษา

ชื่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ. (เกียรตินิยม)	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2535
MSc	Polymer Science and Technology	Loughborough University	พ.ศ. 2537
PhD	Polymer Rheology	Loughborough University	พ.ศ. 2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
พ.ศ. 2536- 2541	ทุนเรียนปริญญาโท-เอก ณ สหราชอาณาจักร	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2543	ทุนวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมขนาดเล็ก	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
พ.ศ. 2547	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Understanding Elongational Flow Properties of Filled Polymer Melts for Plastics Blow Molding, *Food, Cosmetics and Drug Packaging*, **21(11)**, 213, 1998.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Extensional Flow Characterization and Extrusion Blow Molding of High Density Polyethylene Modified by Calcium Carbonate, *Plastics Rubber and Composites*, **28(8)**, 363, 1999.
3. Haworth, B. and Jumpa, S., Melt-State Elongational Rheometry of Mineral-Filled Polyethylene, *Polymer Testing*, **19(4)**, 459, 2000.
4. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ธนเรศ ประเสริฐวงศ์ และชราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, **9(4)**, 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธิ์ กังสาด บัวบุตรา ณ์ฐนิชาริ ศิริเจียรนัย และกัญญาวิริ์ สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, **30(4)**, 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ประมินทร์ ช้างเพชร และประภุญณี แสงทองอโณทัย, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. **12(1)**, 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธิ์ พงษ์ธร แซ่ฮุย ชีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุฒิ, ผลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. **12(2)**, 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ชีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุฒิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. **12(3)**, 50, 2547.
9. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Limpong, P., Properties of Calcium Carbonate- Filled Polyethylene Bottles Produced from Extrusion Blow Molding Process, *KMITL Science Journal*, **6(2b)**, 582, 2006.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, **51(7)**, 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17th –18th September 1996, Loughborough, UK.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Processing Behavior of Filled HDPE for Blow Molding, Advances in Blow Molding: New Materials and Processes, 30th June – 1st July 1998, Loughborough, UK
3. Haworth, B., Jumpa, S., and Miller, N.A., Proceeding International Conference “PPS-15”, S’Hertogenbosch, The Netherlands, 1999, Polymer Processing Society, Paper 132.
4. Jumpa, S and Haworth, B., Extrusion Blow Moulding of CaCO₃-Filled HDPE Compounds, PPS Symposium, Thailand, P-50, 1999.
5. Jangchud, I. and Rukchonlatee, S., Porous Water Pipe made from Ground Rubber Tire (GRT) and High Density Polyethylene (HDPE): Rheology and Water Irrigation, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 120, 2003.
6. Rukchonlatee, S., Water Vapor Permeability, Rheological and Mechanical Properties of Zeolite NaA –filled Linear Low Density Polyethylene, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 134, 2003.
7. Ochaikul, D., Rukchonlatee, S., Soisant, P., Aramruang, S., and Fapratanchai, T., Paper Production and Properties from Bacterial Cellulose *Acetobacter xylinum* TISTR 967, *The 1st KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระพี เจริญสุขเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุพห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอิน-สไตรีน) กับมอนตม์อริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICeE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุพห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICeE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รัชชลธิ นวลพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
12. Moungrmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
13. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
14. Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
15. Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
16. Moungrmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
17. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO₃-Filled HDPE Bottles, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. สุภารัตน์ จำปา, “เครื่อง Uniaxial Elongational Rheometer สำหรับศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 10(1), 8, 2543.

งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุขน้อย อธิพิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุพห์ เคมี่
หลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) สาร...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์
(ประเทศไทย) จำกัด 2549.
2. อธิพิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุพห์ จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรรณ
มงคลชัย ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า 2553.