



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ต่อ
สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
**Effect of Ethylene Ethyl Acrylate Copolymer on
Properties of High Density Polyethylene Film**

นางสุภารัตน์ รักชลธี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ ผลของเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิด

ความหนาแน่นสูง

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) โดยศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 65/35 และ 0/100 ทำการผสมสูตรโดยใช้เครื่องผสมระบบปิดที่ 180°C ด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เครื่องทดสอบมุมสัมผัส เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ และทดสอบการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อพริกขี้หนูสดที่ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เป็นเวลา 20 วัน จากการศึกษาพบว่า HDPE/EEA จัดเป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) โดย EEA เป็นวัฏภาคกระจายที่มีการกระจายตัวดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร โดยขนาดของวัฏภาคกระจายใหญ่ขึ้นตามปริมาณ EEA และ EEA ไม่รบกวนการเกิดผลึกของ HDPE ดังนั้นเมื่อ EEA มีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความเป็นอสัณฐาน และยังมีข้อเพิ่มขึ้นด้วยยืนยันได้จากการวัดปริมาณหมู่ฟังก์ชัน แสดงโดยค่าดัชนีคาร์บอนที่สูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EEA อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของ EEA ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EEA มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก EEA มีโครงสร้างยืดหยุ่น ความนิ่ม และความเป็นอสัณฐานที่มากกว่า HDPE และเมื่อนำฟิล์ม HDPE/EEA มาทดสอบการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่มี EEA (HD100E0) และสูตรที่มี EEA มาก (H70E30) พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์สูตร H70E30 มีมวลไอน้ำที่สามารถซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ได้มากกว่าและมีมวลไอน้ำกักเก็บที่คงเหลือในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่า ดังนั้นการใช้ฟิล์มสูตรที่มี EEA มาก จึงลดโอกาสในการเน่าเสียของพริกขี้หนูสดจากไอน้ำที่เกิดจากการหายใจ ช่วยให้สามารถยืด

อายุการเก็บรักษาพริกชี้หูสดได้นานขึ้น ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบกับฟิล์มในท้องตลาดที่มีการซึมผ่านดี (High permeation film) พบว่าฟิล์ม HD70E30 มีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (730 g.µm/m²/day) ซึ่งสูงกว่าฟิล์มในท้องตลาด ดังนั้นฟิล์ม HD70E30 จึงสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

คำสำคัญ : ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ พอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคลพอลิเมอร์

Research Title: Effect of ethylene ethyl acrylate copolymer on properties of high density polyethylene film

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

This research attempted to improve water vapor permeability of high density polyethylene (HDPE) film by blending with ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA). The HDPE/EEA weight ratios at 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 65/35 and 0/100 were studied. The polymer compounds were prepared using an internal mixer at 180°C with 60 rpm rotational speed for 20 min and the films were shaped using a blown film process. The films were characterized and property tested using scanning electron microscope, Fourier transform infrared spectrometer, differentially scanning calorimeter, universal testing machine, contact angle tester and water vapor permeation analyzer. In addition, the films were hot sealed to be packages for testing shelf-life performance of Bird's eye chili at 4°C, 40% relative humidity for 20 days. According to the studies, it was found that HDPE/EEA was immiscible blend having well dispersed EEA phase in all the blend films. The higher the EEA content the bigger the dispersed size. HDPE crystallinity was independent on EEA content. Thus, an increase in EEA content resulted in higher fraction of amorphous region. Greater film polarity was also gained as seen from the higher carbonyl Index values in the functional group measurement when increasing EEA loading. This agreed with lowering water contact angle of polymer specimen surface. This resulted in higher water vapor transmission rate with increasing EEA. However, tensile and tear strengths of HDPE/EEA films showed decreasing trends because EEA provided greater flexibility, softness and amorphous morphology as compared with HDPE. When using HDPE/EEA film as a packaging and comparing between the film with a high EEA content (H70E30) and without EEA (HD100E0), it was found that the packaging film from H70E30 showed higher permeated water vapor mass and less condensed water vapor mass. Therefore, the film with a high EEA content could provide the decrease in spoilage of Bird's eye chili from water vapor produced in respiratory and so extend the shelf-life of Bird's eye chili. Moreover, the water vapor permeability of H70E30 film was 730 $\text{g}\cdot\mu\text{m}^2/\text{day}$ which is higher than that of the high permeation film. Thus, the H70E30 film has a potential for commercial use.

Keywords : Water vapor permeability, polymer blend, High Density Polyethylene, Packaging film,
Ethylene Ethyl Acrylate copolymer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของเอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Effect of ethylene ethyl acrylate copolymer on properties of high density polyethylene film) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี งบประมาณ 2561 (สัญญาเลขที่ 2561-01-05-44) ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวศิริขวัญภา บุญสุข, นายศุภชัย มั่นนึ่ง และนางสาวสุทธิกานต์ วงษ์จันทร์เพ็ญ นักศึกษาปริญญาตรี นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว	5
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช	6
2.1.1.1 การหายใจ	6
2.1.1.2 การคายน้ำ	11
2.1.1.3 การสุกของผลไม้	12
2.2 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้	13
2.2.1 การซึมผ่านก๊าซ	13
2.2.2 สมการการแพร่และการดูดซับ	14
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก	15
2.2.4 สมบัติการแพร่	18
2.2.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	19
2.2.6 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค	21
2.2.7 การซึมผ่านของฟิล์ม	23
2.3 พอลิเอทิลีน	23
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน	24
2.3.2 การใช้งานของ PE	26
2.3.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 พอลิเมอร์ร่วมเอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (EEA)	28
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ EEA	28
2.4.2 สมบัติบางประการของ EEA	29
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน	29
2.5 พอลิเมอร์ผสม	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	36
3.1 สารเคมี	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	38
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์	38
3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม	39
3.3.3 ความหนาของฟิล์ม	39
3.3.4 การตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม	40
3.3.5 การศึกษาพื้นฐานวิทยา	40
3.3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และ ปริมาณผลึก (X_c)	40
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล	41
3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง	41
3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงนิกษาด	42
3.3.8 การทดสอบมุมสัมผัส	42
3.3.9 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ	43
3.3.9.1 สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C	43
3.3.9.2 สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 38°C	44
3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	46
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA	46
4.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EEA	46
4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัว EEA ในฟิล์ม HDPE/EEA	48
4.1.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม HDPE/EEA	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EEA	52
4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ	56
4.1.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	57
4.2 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก	71
ภาคผนวก ข	75
ภาคผนวก ค	76
ภาคผนวก ง	80
ภาคผนวก จ	87
ภาคผนวก ฉ	91
ภาคผนวก ช	92
ประวัตินักวิจัย	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EMA และ EEA	3
2.1	ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก	8
2.2	อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Climacteric	9
2.3	อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non-climacteric	9
2.4	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ	14
2.5	ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน	16
2.6	ผลของการจัดระเบียบโมเลกุลต่อค่า $P_m (O_2)$ ของพลาสติก	16
2.7	ผลของร้อยละความเป็นผลึกต่อค่า $P_m (O_2)$ ของพลาสติก	17
2.8	ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	18
2.9	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) การละลาย (S) และค่าอัตราการซึมผ่าน (P_m) ของก๊าซ CO_2 , O_2 และ N_2 ของ LDPE ที่ $25^\circ C$	18
2.10	ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ	21
2.11	สมบัติของฟิล์มพลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก	22
3.1	สมบัติบางประการของ HDPE	36
3.2	สมบัติบางประการของ EEA	36
3.3	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร HDPE/EEA	38
4.1	สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA และความหนาของฟิล์ม	46
4.2	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์เป็นผลึก (X_c) ของฟิล์ม HDPE/EEA (First run)	51
4.3	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์เป็นผลึก (X_c) ของฟิล์ม HDPE/EEA (Second run)	51
ข.1	ค่า Solubility parameter ของ Polymer	75
ข.2	ค่า Solubility parameter ของ Solvent	75
ง.1	ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะทดสอบ $25^\circ C$	86
ง.2	ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะทดสอบ $38^\circ C$	86
จ.1	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์ม HD100E0	88

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
จ.2	น้ำหนักรวมของฟิล์ม HD100E0 และค่าเฉลี่ยปริมาณ ไออน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์	88
จ.3	ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์ม HD70E30	89
จ.4	น้ำหนักรวมของฟิล์ม HD70E30 และค่าเฉลี่ยปริมาณ ไออน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์	89
ฉ.1	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม (มอก. 711-2530)	91

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขปทั้งแบบใช้ก๊าซ O ₂ และไม่ใช่ก๊าซ O ₂	7
2.2 พันธะในโครงสร้างของ PE ที่เกิดแรงแวลเดอรัวาลส์	24
2.3 โครงสร้างของ HDPE และ LDPE	24
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติ ทางกายภาพ	25
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล	26
2.6 ปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์	28
2.7 โครงสร้างของ EEA	29
2.8 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้	31
2.9 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้	32
3.1 บริเวณที่มีการวัดความหนาของฟิล์ม	39
3.2 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง	41
3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาดแบบ Die C	42
3.4 เซลล์เมมเบรน	43
3.5 แผนภาพการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ	44
4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR	47
4.2 ค่าครรชนีการบอณิลของฟิล์ม HDPE/EEA	48
4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EEA ที่สกัดวัฏภาคของ EEA ออกจาก ชิ้นงาน (กำลังขยาย 2000 เท่า) (H— 2 μm)	49
4.4 การกระจายขนาดของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมวิเคราะห์จากภาพ SEM ในภาพที่ 4.3	50
4.5 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว MD	53
4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EEA	54
4.7 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD100E0 ในแนว MD และแนว TD	55
4.8 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD80E20 ในแนว MD และแนว TD	55
4.9 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EEA	56
4.10 ค่ามุ่มสัมผัสน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA	57
4.11 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA เมื่อมี EEA ในปริมาณต่าง ๆ	59
4.12 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะทดสอบอุณหภูมิ 38°C	60

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40%	61
4.14 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน	62
4.15 ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการหายใจต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม	63
ก.1 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD100E0	71
ก.2 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD90E10	72
ก.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD80E20	72
ก.4 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD70E30	73
ก.5 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD65E35	73
ก.6 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EEA	74
ค.1 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว TD	76
ค.2 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว MD	76
ค.3 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD100E0 ในแนว MD และแนว TD	77
ค.4 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD90E10 ในแนว MD และแนว TD	77
ค.5 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD80E20 ในแนว MD และแนว TD	78
ค.6 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD70E30 ในแนว MD และแนว TD	78
ค.7 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD65E35 ในแนว MD และแนว TD	79
ค.8 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม EEA ในแนว MD และแนว TD	79
ง.1 โครมาโทแกรมไอน้ำมาตรฐาน	80
ง.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD100E0	80
ง.3 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD90E10	81
ง.4 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD80E20	81
ง.5 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD70E30	82
ง.6 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD65E35	82
ง.7 โครมาโทแกรมของฟิล์ม EEA	83
จ.1 ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40%.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยส่งออกผักและผลไม้เป็นรายใหญ่ของโลก ผลผลิตเหล่านี้สามารถสร้างรายได้ให้กับประชากรภายในประเทศเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีสิ่งที่จะต้องมีการใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่ง โดยเฉพาะภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ยังมีการหายใจ การคายน้ำอยู่ หากเลือกบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ น้ำที่คายออกมาจากผักและผลไม้ถูกสะสมไว้ในบรรจุภัณฑ์ หากมีน้ำในปริมาณมากส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น บรรจุภัณฑ์ที่ดีควรมีความสามารถในการควบคุมอัตราการหายใจ ป้องกันการสูญเสียน้ำ มีการถ่ายเทไอน้ำและอากาศที่เพียงพอ เพื่อรักษาความสดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการเก็บรักษานานยิ่งขึ้น

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ในท้องตลาดมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน หากผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักและปริมาณมาก ควรเลือกใช้เป็นตะกร้าพลาสติกเพื่อเสริมความแข็งแรง เพิ่มความปลอดภัยให้กับผลิตภัณฑ์และสามารถนำมาใช้ได้อีกในภายหลัง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักและปริมาณน้อย ควรเลือกใช้เป็นถาดรองสินค้า ถุงพลาสติกหรือการใช้ฟิล์มหัด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride))

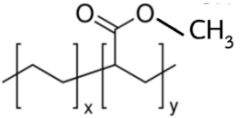
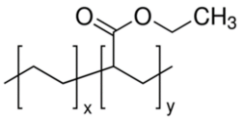
พอลิเอทิลีน มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ ทนต่อกรดและด่างได้ดีจึงเหมาะต่อการนำการทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร แต่โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนมีการซึมผ่านไอน้ำได้ต่ำเพราะมีความเป็นผลึกและไม่มีขั้ว จึงไม่เหมาะในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุผักและผลไม้สด โดยบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันมักใช้วิธีการเจาะรูเพื่อช่วยระบายไอน้ำที่ได้จากการหายใจของพืช แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม มีโอกาสเกิดการฉีกขาดได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำให้จุลินทรีย์จากสภาพแวดล้อมภายนอกสัมผัสกับผักและผลไม้ได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของบรรจุภัณฑ์โดยทำเป็นภาชนะปิดที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของ

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ได้ฟิล์มพอลิเอทิลีน ที่มี การซึมผ่านไอน้ำได้ดี โดยนันทวรรณ ม่วงมี [1] และณัฐริกา ใจสมบูรณ์ [2] ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) และฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) ตามลำดับ การปรับปรุงด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer,

EVA) ผสมกับซีโอไลต์เอ พบว่า EVA สามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE และ LLDPE และเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และซีโอไลต์เอ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความชอบน้ำสูง และการมีวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EVA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วยเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) และซีโอไลต์เอ [3] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความมีขั้วที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของน้ำที่มีค่าลดลง และศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการเปรียบเทียบ คือ EMA, EVA และ EEA (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) พบว่าเมื่อควบคุมให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน สมบัติเชิงกลของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน และจากงานวิจัยที่ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA [4] ศึกษาผลของอัตราส่วนของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดีและฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างสัณฐานวิทยาและความมีขั้วของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ EVOH มีขั้วสูงกว่า EVA แต่ EVOH มีพันธะไฮโดรเจนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้ เมื่อมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการซึมผ่านไอน้ำจะผ่านวัฏภาคอสัณฐานเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้นแม้ว่าความมีขั้วจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ไม่ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเพื่อเพิ่มอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม ต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานสูงและมีขั้ว

ในการใช้งานบรรจุภัณฑ์ที่ต้องรับน้ำหนักมาก ต้องเลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงได้ดี และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาพอลิเมอร์ผสม พบว่า EMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี [3] จึงนำมาสู่งานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE ด้วย EMA [5] พบว่า EMA มีการกระจายตัวดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และปริมาณผลึก HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ EMA ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EMA มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์ม HDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EMA ส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EMA และ EEA

สมบัติ	EMA	EEA
หมู่แทนที่/ปริมาณ ในโคพอลิเมอร์ (% wt)	MA/24.0	EA/18.5
ครรชนิกการไหล 190°C/2.16 kg (g/10 min)	2.0	6.0
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.944	0.930
จุดหลอมเหลว (°C)	91.0	97.8
มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	83	28-52
ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	11	11-14
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%)	740	700-750
ร้อยละความเป็นผลึก (%) [3]	18	13
โครงสร้างทางเคมี		

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EMA [6] และ EEA [7] พบว่า โครงสร้างของ EEA มีความเป็นอสัณฐานที่ดีกว่า เนื่องจาก EEA เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีหมู่ข้างเคียง (Side group) ขนาดใหญ่ที่มีความกะกะมากกว่า EMA

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ EEA เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับผลิตผลทางการเกษตร โดยเตรียมฟิล์มจากเทคนิคการเป่าฟิล์ม เพื่อให้มีความต่อเนื่องและอัตราการผลิตสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ที่มีการซึมผ่านของไอน้ำมาก
2. สามารถเข้าใจถึงปัจจัยอัตราส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม HDPE:EEA ในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 65:35 และ 0:100 โดยน้ำหนัก
2. ขึ้นรูปฟิล์มผสมสูตรต่าง ๆ จากกระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process)

3. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงนิกขาดของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
5. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
6. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
7. ศึกษาสมบัติความมีขี้ด้วยการทดสอบมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส
8. ศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มด้วยเซลล์เพอร์มิเอชัน (Permeation cell)
9. ศึกษาทดลองการยี่อายุสำหรับการเก็บรักษาพริกขี้หนูสดโดยทำเป็นบรรจุภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีมาใช้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผลิตผลสด เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดให้นานขึ้นและนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคพืชผลทางการเกษตรรายใหญ่ ดังนั้นเมื่อผลิตมากกว่าความต้องการจึงจำเป็นต้องรักษาสภาพความสดของผลิตผลให้ยาวนานขึ้น การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวสามารถช่วยรักษาคุณภาพที่ดีของผักและผลไม้สดไว้ ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วนั้นผลิตผลจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากรากแต่การสูญเสียน้ำสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลยังมีการหายใจและคายน้ำอยู่การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักของผลิตผลลดลง ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนแปลงไปและทำให้รสชาติและคุณภาพผลิตผลนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นการป้องกันการสูญเสียน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การสูญเสียน้ำออกจากพืชขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้ผันแปรไปตามสภาพแวดล้อมและขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิภายหลังการเก็บเกี่ยวควรมีวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาที่ดีนั้นเป็นวิธีการสำคัญที่จะช่วยยืดอายุของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวให้สามารถใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดนั้นเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [8]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศโดยปกติจะมีอยู่ในระดับต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว คือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงมีโอกาที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมากส่วนผักและผลไม้ นั้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ทำให้ความดันไอน้ำในผลไม้ค่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิดไอน้ำรอบ ๆ เซลล์อยู่สมดุลกับไอน้ำภายในเซลล์ ส่งผลให้มีความดันไอน้ำภายในการผลิตผลเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับความชื้นของบรรยากาศภายนอกว่ามีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่มีความชื้นบรรยากาศรอบ ๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% น้ำยังมีโอกาสสูญเสียดังกล่าวให้กับบรรยากาศภายนอกได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งมีชีวิตมีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบ ๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายเทอากาศ เนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความ

จำเป็นต่อการหายใจของผลิตผลคือ ก๊าซออกซิเจน ฉะนั้นสภาพของการเก็บรักษาที่ดีจะต้องมีการถ่ายเทของอากาศที่ดี

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับความชื้นและการสูญเสียน้ำอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซสามารถเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสที่โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากผักและผลไม้จึงเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามความชื้นไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วยเพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิม แต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาณเหมือนในผักและผลไม้ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความชื้นไอน้ำภายในผลิตผลกับภายนอกจึงเพิ่มสูงมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้นลงอยู่เสมอผลิตผลจะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิสูงจนกระทั่งอากาศรอบ ๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ หากอุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อย ๆ ทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำไปมาก

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของพืช

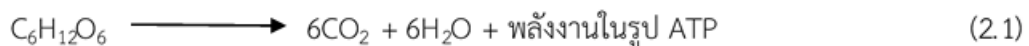
ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิตอยู่ กระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เหมือนกับที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไป โดยการดูดก๊าซออกซิเจน (O_2) และคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับความร้อนออกมา มีการคายน้ำและสูญเสียน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพืชหลังการเก็บเกี่ยวคือ

2.1.1.1 การหายใจ

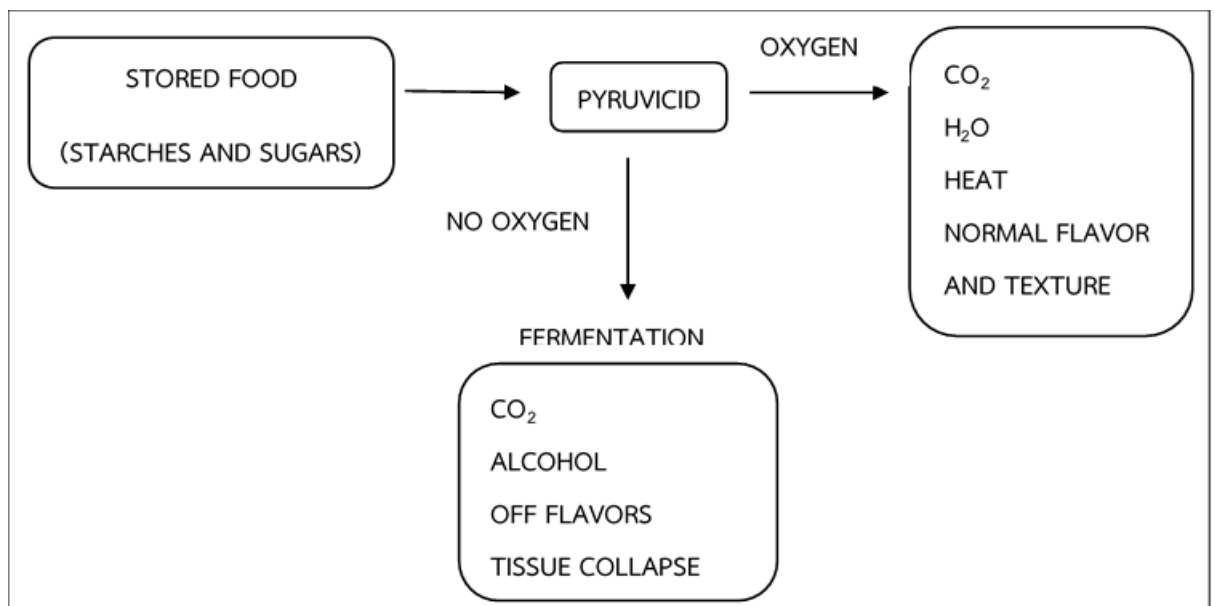
กระบวนการหายใจ (Respiration) ของผักและผลไม้เป็นการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งและน้ำตาลให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นการใช้พลังงานจากอาหารสะสมในกระบวนการนี้ ผักและผลไม้จะคายความร้อนออกมา ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึม เรียกว่า Vital heat ซึ่งผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงหลังการเก็บเกี่ยวมักเสียเร็วกว่าผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทางคุณภาพ อายุการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการปฏิบัติต่อผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ผลิตผลมีความสมดุลในการรักษาสภาพหรือลดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีให้น้อยที่สุดที่ทำให้ผลิตผลมีคุณภาพการเก็บรักษาได้นานที่สุด [9]

- การหายใจในธรรมชาติ (Natural of respiration) ผลิตผลสดที่ยังมีชีวิตอยู่มีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการหายใจของผลิตผลสดนั้นมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุล (Polysaccharides) ให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharides)
2. ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) โดยปฏิกิริยา EMP (Emden myerhof parnas pathway)
3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) และกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงาน ซึ่งเกิดใน Mitochondria โดยขบวนการ Tricarboxylic acid cycle (TCA cycle) ในการหายใจของพืชและผลไม้หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ สรุปได้เป็นสมการอย่างง่ายคือ



โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O_2 สมบูรณ์ได้ปริมาณ ATP (Adenosine triphosphate) ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซ O_2 น้อยหรือไม่มีก๊าซ O_2



ภาพที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขปทั้งแบบใช้ก๊าซ O_2 และไม่ใช่ก๊าซ O_2 [9]

รูปแบบการหายใจของพืช แต่ละชนิดมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งผลิตผลบางชนิดอาจถูกเก็บเกี่ยวมาตั้งแต่ยังไม่สุก และเมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้ว สามารถทำให้ผลิตผลนั้นสุกหรือมีพัฒนาการขั้นต่อไปที่ปกติได้ เช่น มะม่วง กุ้ง ทุเรียน เป็นต้น แต่ผลไม้บางอย่าง เช่น ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย จำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลไม่เหล่านี้อาจมีการสุกตั้งแต่อยู่บนต้น หากเก็บเกี่ยวมาก่อนผลิตผลเหล่านั้นอาจมีพัฒนาการที่ผิดปกติไป ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืช [8] ได้ดังต่อไปนี้

1. Climacteric เมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วและเข้าสู่ระยะการสุก จะมีการเพิ่มของอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มของอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละครุด กกล้วย ทูเรียน

2. Non-climacteric เมื่อถูกเก็บเกี่ยวแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกจนกระทั่งผลิตผลนั้นตายไป ผลิตผลเหล่านี้อาจมีการเก็บสะสมอาหารในรูปแบบของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ผลิตผลเหล่านี้ไม่สามารถนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้เช่นเดียวกับผลิตผลประเภท Climacteric ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกแล้วเท่านั้น ผลิตผลพวก Non-climacteric อาจมีการสร้างก๊าซเอทิลีนในเนื้อเนื้อ ในอัตราปริมาณที่ต่ำทำให้ขบวนการสุกเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แดงกวาง

ตารางที่ 2.1 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก [10]

ประเภท Climacteric	ประเภท Non - climacteric
แอปเปิ้ล	เชอร์รี่
สาลี่	แดงกวาง
อโวคาโด	มะเดื่อฝรั่ง
กล้วย	องุ่น
น้อยหน่า	ส้ม
มะม่วง	มะนาว
มะละกอ	ส้มโอ
ท้อ	แดงโม
สาลี่	สับปะรด
พลับ	สตรอเบอร์รี่
ละครุด	เงาะ
มะเขือเทศ	ลิ้นจี่
ทูเรียน	ลำไย

ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (ml/CO ₂ /kg/hr)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
แอปเปิ้ล	Barnley seeding	23	10	16
อโวคาโด	Fuerte	20	35	155
กล้วย	Gros michel	20	20	60
มะเดื่อ	Mission	20	22	40
มะม่วง	Kent	20	15	22
ท้อ	Alberta	20	25	35
สาลี่	Bartlett	20	8	23
มะเขือเทศ	Grand rapids	18	8	20

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non-climacteric [11]

ผลไม้	พันธุ์	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการหายใจ (ml/CO ₂ /kg/hr)
			Non-climacteric ตลอดเวลาการแก่และการสุก
องุ่น	Vi 5061	20	15
มะนาว	Eureka	20	5
ส้ม	Valencia	21	13
สับปะรด	Caynne	15	21

ปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ [12]

- ปัจจัยภายใน

1. อายุของการเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจมีอยู่ในช่วงเวลา ระหว่างการพัฒนาส่วนต่าง ๆ ของพืช ผลไม้ที่ยังมีขนาดเล็กมีอัตราการหายใจสูง แต่เมื่อผลไม้มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีอัตราการหายใจลดลง สำหรับผลไม้ประเภท Climacteric มีอัตราการหายใจต่ำสุดขณะที่ผลกำลังแก่ และมีอัตราการหายใจค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่างหนึ่งหลังการเก็บเกี่ยว เมื่อผลไม้เริ่มสุกมีอัตราการหายใจสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด แล้วค่อยค่อยลดลงอย่างช้า ๆ ส่วนผลไม้ประเภท Non-climacteric หลังจากการเก็บเกี่ยวจากต้นแล้วอัตราการหายใจจะลดลงตลอดเวลา

2. ขนาดของพีช หัวมันฝรั่งขนาดเล็กมีอัตราการหายใจมากกว่าพวกมันฝรั่งขนาดใหญ่ พีชที่มีขนาดเล็กมีเนื้อเยื่อสัมผัสกับอากาศมากขึ้น ทำให้ออกซิเจนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้มาก

3. สารธรรมชาติที่เคลือบผิว ผักและผลไม้ที่มีผิวเคลือบด้วยไขเป็นอย่างดี และมีระเบียบเป็นตัวจำกัดในการแลกเปลี่ยนก๊าซ ทำให้อัตราการหายใจน้อย

4. ชนิดของเนื้อเยื่อ พวกเนื้อเยื่อที่ยังมีอายุน้อยและกำลังเจริญเติบโตมีอัตราการหายใจมากกว่าเนื้อเยื่อที่หยุดการเจริญเติบโตและอยู่ในระยะพักตัว นอกจากนี้ อัตราการหายใจแตกต่างกันภายในอวัยวะของพีช เช่น อัตราการหายใจของเปลือก เนื้อ และเมล็ดในผลมะม่วงไม่เท่ากัน

- ปัจจัยภายนอก

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิระหว่าง 32 ถึง 95 องศาฟาเรนไฮต์ (°F) ทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้เพิ่มขึ้น 2-2.5 เท่าสำหรับทุก ๆ 18°F ที่เพิ่มขึ้น อัตราการหายใจจะลดลงที่อุณหภูมิ 95°F เนื่องจากการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในระยะแรกที่เกิดขึ้นย้ายผักและผลไม้จากอุณหภูมิต่ำไปอุณหภูมิสูง เช่น จาก 75°F ไปเป็น 100°F อัตราการหายใจของผักและผลไม้ในระยะแรกเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจมีการทำงานมากขึ้น แต่ในระยะต่อมาอัตราการหายใจจะลดลงจนศูนย์ การลดลงของอัตราการหายใจนี้เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจสูญเสียสมบัติเดิมเพราะอุณหภูมิสูง (Denaturation) อย่างไรก็ตามการลดอัตราการหายใจอาจจะแสดงถึง

- ออกซิเจนไม่ได้ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่ออย่างเพียงพอ
- คาร์บอนไดออกไซด์สะสมในเซลล์จนกระทั่งสูงสุดเพื่อยับยั้งการหายใจ
- อาหารสะสมที่ใช้สำหรับการหายใจมีไม่เพียงพอ

2. เอทิลีน การใช้เอทิลีนกับผักและผลไม้จะมีผลต่อช่วงระยะเวลาที่มีอัตราการหายใจสูงสุด (Climacteric peak) เอทิลีนจะย่นเวลาของการเกิด Climacteric peak ในผลไม้ประเภท Climacteric ให้เกิดเร็วขึ้นแต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจ (Respiratory curve) เอทิลีนสามารถกระตุ้นให้ผลไม้ประเภท Non-climacteric เกิดการหายใจเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน การหายใจที่เพิ่มขึ้นจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ได้รับเอทิลีน ยิ่งความเข้มข้นของเอทิลีนที่ให้มามาก อัตราการหายใจจะยิ่งมีมากขึ้น การใช้เอทิลีนกับผลไม้ประเภท Climacteric จะได้ผลเร็วเมื่อใช้กับผลไม้ที่อยู่ในช่วง Preclimacteric stage และที่อุณหภูมิสูง

3. ออกซิเจน ผักบางอย่างพบว่าอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นเมื่อออกซิเจนมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เช่น แครอท อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วเมื่อออกซิเจนมีความเข้มข้นมากกว่า 21% จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการหายใจเพียงเล็กน้อย แต่ความเข้มข้นออกซิเจนที่ต่ำกว่า 21% ทำให้อัตรา

การหายใจลดลงผลไม้ประเภท Climacteric มี Climacteric peak เกิดขึ้นช้าหรือไม่เกิดขึ้นเลย ถ้าความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำมาก ๆ หรือใกล้ 0%

4. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยปกติแล้ว CO₂ ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.03% จะทำให้อัตราส่วนการหายใจของผักและผลไม้ลดลง บางครั้งพบว่าความเข้มข้นของ CO₂ ที่มากกว่า 10% กระตุ้นอัตราการหายใจของผลมะนาวให้มากขึ้น

5. สารควบคุมการเจริญเติบโต (Growth regulator) สารควบคุมการเจริญเติบโต บางชนิดสามารถกระตุ้นหรือยับยั้งการหายใจ เช่น สารเคมีที่จัดอยู่ในกลุ่มของ auxin เช่น 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) และ 2-Naphthaleneacetic acid (NAA) สามารถกระตุ้นการหายใจพืช สารเคมีที่จัดอยู่ในกลุ่มของ Cytokinin เช่น 6-Benzyladenine (BA) และ 6-Benzylaminopurine (6-BAP) สามารถการหายใจของพืช

6. การเกิดบาดแผล เนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืชที่เกิดบาดแผล ไม่ว่าจะการกระทำที่เกิดขึ้นโดยคน สัตว์ หรือธรรมชาติ ทำให้มีการหายใจเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและความรุนแรงของการเกิดบาดแผล

2.1.1.2 การคายน้ำ

ผักและผลไม้สดจะมีการคายน้ำ (Transpiration) ตลอดเวลาระหว่างการเก็บรักษา ทำให้มีน้ำหนักความเหี่ยวเฉา ความกรอบและคุณภาพของเนื้อสัมผัสลดลง การสูญเสียน้ำหนักจากการคายน้ำมีค่าประมาณร้อยละ 3-10 ของน้ำหนัก จะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ปัจจัยที่มีผลต่อการคายน้ำของผักและผลไม้ [13-14] มีดังนี้

- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการคายน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช โดยทั่วไปควรเก็บผักและผลไม้ในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง ๆ และที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องระวังการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ซึ่งทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตง่าย ผักและผลไม้เน่าเสียเร็วขึ้น ผลผลิตส่วนใหญ่มีปริมาณน้ำสูงประมาณ 90-95% จำเป็นต้องเก็บรักษาไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้สูญเสียน้ำหนักหรือเกิดการเหี่ยวเร็ว โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมประมาณ 85-95%

- อุณหภูมิ ความร้อนจากสภาวะแวดล้อม และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของพืชจะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช ดังนั้นควรจัดเก็บผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้กระบวนการเกิดเมตาบอลิซึมต่าง ๆ เกิดขึ้นช้าลง อัตราเสื่อมสลายช้าลง การคายน้ำช้าลง การทำลายจุลินทรีย์ต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ช้าลง ทำให้เพิ่มอายุการเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผักที่มีอัตราการหายใจสูง เช่น บรอกโคลี ปวยเล้ง ข้าวโพดหวาน เห็ดต่าง ๆ คะน้า และถั่วลันเตา

- สารเคลือบผิว ผักและผลไม้สดหลายชนิดจะมีไขเป็นสารเคลือบผิวตามธรรมชาติช่วยลดการคายน้ำได้ ทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น มะนาว องุ่น แอปเปิ้ล ส้ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามไขธรรมชาติเหล่านี้มักถูกทำลายไปบ้างระหว่างการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษา พืชบางชนิดมีไขน้อยมากทำให้อัตราการคายน้ำของพืชยังสูงอยู่ จึงมีการใช้สารเคลือบหรือการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก หรือฟิล์มตามธรรมชาติกับพืชที่ต้องเก็บไว้นาน ๆ
- รอยขีด เกิดขึ้นจากแรงกระทำต่าง ๆ เช่น แรงบีบ แรงกด แรงกระแทก เป็นต้น หรือเกิดจากการตัดหรือหั่น จะเร่งการอัตราการคายน้ำ
- สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สด อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ผักใบทั่วไปจึงเหี่ยวเฉาได้ง่ายกว่าผลไม้และพืชหัว

2.1.1.3 การสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้ นอกจากเกิดขึ้นได้หลังจากเก็บเกี่ยวจากต้น และสามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นด้วยเอทิลีนแล้วยังประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงหลาย ๆ อย่างเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน หรือใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถรวบรวมได้ดังนี้ [15]

1. การหายใจเพิ่มมากขึ้นแล้วลดลง
2. ความเข้มข้นของเอทิลีนภายในผลและการผลิตเอทิลีนมากขึ้น
3. ตอบสนองเอทิลีนได้ง่ายขึ้น
4. องค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น สารประกอบพวกเพกทินเปลี่ยนไปทำให้ผลไม้อ่อนตัว
5. การควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่าง ๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ลดน้อยลง
6. โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่าง ๆ ถูกสร้างขึ้น
7. RNA และ DNA เปลี่ยนไปจากเดิม
8. กลอโรฟิลล์เสื่อมสลาย
9. แอนโทไซยานิน และแคโรทีนอยด์ถูกสร้างขึ้น
10. โมเลกุลคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนแปลงไป เช่น แป้งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือน้ำตาลชนิดหนึ่งเปลี่ยนเป็นอีกชนิดหนึ่ง
11. กรดอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบเปลี่ยนไป
12. สารระเหยที่ให้กลิ่นและรสชาติถูกสร้างขึ้นมา
13. สารพวกแทนนินรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่
14. เกิดการสะสมไขมันบนผิวของผลไม้
15. เมล็ดพัฒนาเข้าสู่ความสมบูรณ์
16. เกิดการหลุดร่วง

การสุกของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เกิดขึ้นมาก การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เร่งให้เกิดขึ้นได้ด้วยการใช้เอทิลีนหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตและการทำงานของเอทิลีน เป็นการพัฒนาเข้าสู่ระยะร่วงโรย

2.2 บรรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้

ฟิล์มสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ ที่ใช้ในการบรรจุในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่าง ๆ กัน ฟิล์มที่นิยมใช้มีหลายชนิด [12, 14] เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านและป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้

- พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) มีลักษณะโปร่งใสกว่าพวกฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) นิยมทำเป็นถุงและทำถาด สามารถใช้ความร้อนในการปิดผนึกได้

- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ฟิล์มประเภทนี้ยอมให้ไอน้ำและก๊าซซึมผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลิตผลสด แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง

- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิดอาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุงมีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อนยอมให้ความชื้นผ่านได้

- Rubber Hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ใช้เป็นถุงบรรจุผักและผลไม้สดที่มีน้ำหนักมาก ๆ อากาศและความชื้นผ่านไปได้ยาก ถ้าใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น

ภาชนะบรรจุพลาสติกสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสได้สูงกว่าภาชนะแก้วและโลหะมาก ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ก๊าซ ไอน้ำ และสารประกอบโมเลกุลเล็ก ๆ ระหว่างผลิตภัณฑ์กับพลาสติกหรือกับสภาพแวดล้อม การถ่ายเทมวลสารเป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญทั้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

2.2.1 การซึมผ่านก๊าซ

การซึมผ่านก๊าซ (Gas permeation) หมายถึง กระบวนการแพร่โมเลกุลของก๊าซ ไอหรือของเหลวผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรนนั้น ๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeant และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรนหรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeability [13-14]

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซ เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ

ออกซิเจนไม่เกิน 20–30 cc/m².atm.day สำหรับผักและผลไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตั้งแต่ 2,000 cc/m².atm.day ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [16]

ชนิดของพลาสติก	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (cc.25µm/m ² .atm.day)	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (cc.25 µm/m ² .atm.day)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	52–130	180–390
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	620–2,248	4,263–8,138
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	3,900–13,000	7,000–77,000
พอลิพรอพิลีน (PP)	1,300–6,400	7,700–21,000
พอลิสไตรีน (PS)	10,000–260,000	2,600–7,700

2.2.2 สมการการแพร่และการดูดซับ

อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของโมเลกุลต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวหรือ Permeability coefficient หรือนิยมเรียกว่า Permeability เขียนด้วยสัญลักษณ์ P_m (บางครั้งใช้ P) P_m นี้เป็นผลลัพท์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient หรือ D) กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient หรือ S) [14] ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$P_m = D \times S \quad (2.2)$$

- D เป็นค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านเมมเบรน จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และ D ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลที่แพร่
- S เป็นค่าที่แสดงปริมาณของโมเลกุลของสารที่ละลายในเมมเบรนที่สภาวะสมดุล

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก [14]

ก. โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกมีผลต่อทั้งค่า D และค่า S นั่นคือผลโดยตรงต่อค่า P_m ของพลาสติกนั้น ๆ ตารางที่ 2.5 แสดงผลต่อโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าการซึมผ่านของออกซิเจนโดย X เป็นโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพลาสติก ค่าอัตราการซึมผ่านนี้เป็นค่าสัมพัทธ์ที่เปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกที่มี X เป็นหมู่ (-OH)

ข. สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of plastic)

สัณฐานวิทยาของพลาสติก หมายถึง โครงสร้างทางกายภาพของพลาสติกที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline region) อยู่ด้วยกันโดยการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้มาจากการจัดเรียงโมเลกุล ความสำคัญสัณฐานวิทยาต่อการซึมผ่านของพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นสำคัญคือ

1. สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ มีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึกพลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีสมมาตรหรือมีสมมาตรน้อยกว่า นั่นคืออัตราการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำกว่าด้วย ตัวอย่าง PE มีโครงสร้างสมมาตรกว่ายาง ค่าอัตราการซึมผ่านของ PE จึงต่ำกว่ายาง

2. การจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีร้อยละความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายลดลง นั่นคืออัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย เนื่องจากโครงสร้างผลึกขัดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่เข้ามาทำให้โมเลกุลนี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางคด (Tortuous path) เป็นผลให้การแพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลามากขึ้น

ตารางที่ 2.5 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน [14]

Structure	X	Relative P _m (O ₂)
$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{X} \end{array} \right]_n$	OH	1 ^a
	CN	4
	Cl	800
	F	1500
	COOCH ₃	1,700
	CH ₃	15,00
	C ₆ H ₅	42,000
	H	48,000

หมายเหตุ ^aP_m (O₂) เมื่อ x หมายถึง -OH มีค่าเท่ากับ 0.038 cc.mm/m².atm.day ที่ 23°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

ตารางที่ 2.6 ผลของการจัดระเบียบ โมเลกุลต่อค่า P_m (O₂) ของพลาสติก [14]

Structure	Degree of orientation	P _m (O ₂) (cc.mm/m ² .atm.day ที่ 23°C)
PP	0	57
	300%	30
PS	0	160
	300%	114
PET	0	3.8
	500%	1.9

ตัวอย่างฟิล์ม PET ที่ผ่านการจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุลที่ 90°C และ 115°C มีความเป็นผลึกร้อยละ 22 และ 31 ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์ม PET ตัวอย่างแรกมีค่าเป็น 4 เท่าตัวของตัวอย่างที่สอง ผลของการจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซแสดงได้ในตารางที่ 2.6

3. ความหนาแน่น (Density) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นของพลาสติกนั้น ขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน กระบวนการแปรรูป โดยเฉพาะขณะที่ทำให้เย็นและกระบวนการจัดเรียงระเบียบโมเลกุล อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกแปรผันตรงกับร้อยละความเป็นผลึก ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของร้อยละความเป็นผลึกต่อค่า $P_m(O_2)$ ของพลาสติก [14]

Polymer	Crystallinity (%)	$P_m(O_2)$ (cc.mm/m ² .atm.day ที่ 23°C)
LDPE	50	182
HDPE	80	42
Nylon 66 (Soaked)	20	3
Nylon 66 (Annealed)	40	0.6

ค. วัตถุประสงค์เติมแต่งในพลาสติก (Plastic additive)

1. พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงไป ในพลาสติกโดยทั่วไปจะทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซของพลาสติกนั้นสูงขึ้น แต่อาจมีข้อยกเว้นสำหรับพลาสติกไซเซออร์บางประเภท เช่น การเติมยางใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไซเซออร์ใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นนิยมเรียก Hydrophilic plastic เช่น Nylon และ Ethylene vinyl alcohol (EVOH) เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูงจะดูดซับเข้าไปในพลาสติกได้ น้ำส่วนนี้ทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซออร์ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2. สารตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอนินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรต่อรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเทาแคม มีผลทำให้อัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาด และรูปร่างของสาร แต่สารตัวเติมส่วนใหญ่ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

3. สารคู่ควบ (Coupling agent) ใช้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับสารตัวเติม เช่น ทิทาเนต (Titanate) และซิลเลน (Silane) จะทำให้การซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำลดลงได้

2.2.4 สมบัติการแพร่

ขนาด รูปร่าง และสภาพผิวของสารแพร่มีผลต่อการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก ซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กแพร่ได้เร็วกว่าสารแพร่ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.8 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ มีขนาดโมเลกุลที่มีผลต่อการแพร่แต่ไม่มีผลกับการละลาย จากตารางที่ 2.9 พบว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าก๊าซอื่นมากทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซสูงกว่าก๊าซอื่นไปด้วย

ตารางที่ 2.8 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซใน ไตรเจน (N₂) ออกซิเจน (O₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) [14]

Gas	Molecular diameter, Å	P _m (X) : P _m (O ₂)
N ₂	3.0	0.25
O ₂	3.1	1
CO ₂	3.4	6

ตารางที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) การละลาย (S) และค่าอัตราการซึมผ่าน (P_m) ของก๊าซ CO₂, O₂ และ N₂ ของ LDPE ที่ 25°C [14]

Gas	D x 10 ⁶ MI(STP)/ml.atm	S x 10 ² MI(STP)/ml.atm	P _m x 10 ¹⁰ MI(STP)/ml.atm
CO ₂	0.37	25.8	12.6
O ₂	0.46	4.78	2.88
N ₂	0.32	2.31	1.969

สารแพร่ที่มีโมเลกุลเส้นตรงแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลเป็นวงหรือเป็นกิ่งก้าน และแพร่ผ่านแผ่นพลาสติกที่มีขี้ได้ดี โมเลกุลที่ไม่มีขี้แพร่ผ่านพลาสติกที่ไม่มีขี้ได้ดีกว่าพลาสติกที่มีขี้

- อุณหภูมิ

ค่าการซึมผ่าน การแพร่ และการละลายจะขึ้นตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius' equation) ดังนี้คือ

$$P_m = P_{m_0} \exp \left(-\frac{EP}{RT} \right) \quad (2.3)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (2.4)$$

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right) \quad (2.5)$$

P_{m_0} , D_0 , S_0 หมายถึง ค่าคงที่ของการซึมผ่าน การแพร่ และการละลาย ตามลำดับ

E_p , E_D , E_s หมายถึง พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของการซึมผ่าน การแพร่และการละลาย ตามลำดับ

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

การใช้สมการอาร์เรเนียสอธิบายผลของอุณหภูมิต่อการซึมผ่านมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงของอุณหภูมิ โดยใช้สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างและไม่อยู่ในช่วงเดียวกับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพลาสติกนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g พลาสติกจะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายยาง (Rubbery state) โมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้มาก ทำให้การแพร่ การซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้นได้ง่าย ค่า E_p และ E_D จึงต่ำ ทำให้ค่า P_m มีค่าสูง ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของพลาสติก จะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายแก้ว (Glassy state) การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพลาสติกเกิดขึ้นได้ยากขึ้น และมีค่า E_p และ E_D สูง ทำให้มีค่า P_m ลดลง

- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พลาสติกบางชนิดสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย เช่น EVOH และ Nylon ความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้มากขึ้น การซึมผ่านของก๊าซจึงสูงขึ้น โดยน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮดรอฟบิก ทำให้ค่า E_p ลดลง ค่า P_m สูงขึ้น พลาสติกพวกนี้เมื่ออยู่ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง การซึมผ่านของก๊าซจะสูงขึ้น สำหรับพลาสติกไม่ดูดน้ำหรือความชื้น (Hydrophobic plastic) เช่น LDPE, PP และพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ (PVDC) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ

2.2.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุและปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำในภาชนะและในทางกลับกัน

วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้อิอน้ำผ่านได้มักจะเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติก หรือการเจาะรูเล็ก ๆ เพื่อระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ [13]

การตรวจวัดการซึมผ่าน (Permeation measurement) การแพร่และการละลายของสารสำหรับพลาสติก อาศัยหลักการตรวจวัดการถ่ายเทมวลของสารนั้นผ่านพลาสติก ซึ่งอาจใช้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอื่นที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถ่ายเทผ่านพลาสติกมา [14]

การแสดงค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation) มีดังนี้

- Water vapor transmission rate (WVTR)

$$WVTR = \frac{\text{weight of water vapor}}{\text{area} \times \text{time}} \quad (2.6)$$

$$WVTR = \frac{Q}{A \times T} \quad (2.7)$$

WVTR นิยมแสดงเป็นหน่วย $g/m^2 \cdot day$

- Water vapor permeation (WVP)

$$WVP = WVTR \times \frac{1}{\Delta P} \quad (2.8)$$

$$WVP = \frac{Q}{A \times T} \times \frac{1}{\Delta P} \quad (2.9)$$

WVP แสดงเป็นหน่วย $g \cdot mm/m^2 \cdot day \cdot cm \cdot Hg$

- Permeance (WVP/1)

$$\text{Permeance} = \frac{WVTR}{\Delta P} \quad (2.10)$$

หน่วยของ Permeance นิยมใช้ $g/m^2 \cdot day \cdot cm \cdot Hg$

Q หมายถึง น้ำหนักของไอน้ำ

A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มที่มีการซึมผ่าน

T หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก

ΔP หมายถึง ผลต่างของความดันก๊าซทดสอบกับความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก

ตารางที่ 2.10 ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ [17]

ชนิดของพลาสติก	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ($g \cdot 25 \mu m / m^2 \cdot atm \cdot day$ ที่ $38^\circ C, 90\% RH$)
PET	16–20
PVC	80–500
HDPE	4.7
LDPE	16–24
PP	11

2.2.6 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

ผลิตภัณฑ์จะเก็บรักษาได้ดีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90–95% การเก็บรักษาในภาชนะบรรจุที่ใช้แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติก จะเกิดการสะสมความชื้นเพิ่มขึ้นอาจสูงถึง 100% จึงต้องเจาะรูถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ระบายออกไป เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม ดังนั้นการเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน [13]

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้นควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2–4 รู ขนาด $1/4$ – $1/8$ นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตภัณฑ์จะไม่ขาดก๊าซออกซิเจนและไม่เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ (Modified atmosphere) ขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติหรือมีรสชาติแอลกอฮอล์เกิดขึ้น [13] สมบัติของฟิล์มพลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู (Continuous films) และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก (Microperforation) ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สมบัติของฟิล์มพลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรู ขนาดเล็ก [18-19]

สมบัติ	ฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีการเจาะรู	ฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรู ขนาดเล็ก
อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซ	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์และ ผ่านทางรูที่ถูกเจาะ
ความสามารถในการซึมผ่าน	CO ₂ มากกว่า O ₂ 2-8 เท่า	CO ₂ มากกว่า O ₂ 0.77 เท่า
อุณหภูมิ	ความสามารถในการซึมผ่าน ก๊าซ CO ₂ และ O ₂ เพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น	ความสามารถในการซึมผ่าน ก๊าซ CO ₂ และ O ₂ ไม่มีผลเมื่อมี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์	มาก, ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ และปริมาณการเจาะรู

เนื่องจากผลิตผลแต่ละชนิดมีอัตราการหายใจแตกต่างกัน ผลิตผลที่มีอัตราหายใจสูงมักมีอายุการเก็บรักษาสั้น การยืดอายุและการรักษาคุณภาพผลิตผลสดส่วนใหญ่ต้องอาศัยสมบัติของวัสดุที่นำมาเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของฟิล์มพลาสติก ดังนั้นฟิล์มพลาสติกเพื่อการบรรจุผลิตผลสด จึงเป็นฟิล์มที่ควรมีสมบัติยอมให้ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทิลีนและความชื้นแพร่ผ่านด้วยอัตราที่เหมาะสม โดยสามารถดัดแปลงบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ (Modified atmosphere, MA)

สภาวะบรรยากาศดัดแปลงในภาชนะบรรจุ ส่งผลต่อการชะลอการหายใจ การคายน้ำลดการเสื่อมสภาพ ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตผลได้ ซึ่งความสามารถในการเลือกก๊าซแต่ละชนิดให้แพร่ผ่านด้วยอัตราที่แตกต่างกันของฟิล์ม MA เป็นผลมาจากการควบคุมโครงสร้างของพอลิเมอร์ ได้แก่ การควบคุมการกระจายตัวของสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับแต่งโครงสร้างหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาค ซึ่งมีผลต่อการผ่านของก๊าซในฟิล์มที่ยอมให้ผ่านได้สูงและมีผลต่อสมบัติการควบคุมความสามารถในการเลือกผ่านของก๊าซ (Perm-selectivity, P)

หลักการและความแตกต่างในการดัดแปลงสภาวะบรรยากาศ เมื่อเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกพบว่า สภาวะบรรยากาศในฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรู (Perforated film) จะไม่เกิดการดัดแปลงจึงไม่เหมาะสมในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผล คือ มีการซึมผ่านของทั้งก๊าซ CO₂ และ

O₂ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสภาวะบรรยากาศในฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซผ่านน้อย (Barrier films) จะเกิดสภาวะบรรยากาศดัดแปลง แต่มีปริมาณ O₂ ต่ำเกินไปและมีปริมาณ CO₂ สูงเกินไป อาจเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O₂ ผลผลิตมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติได้ สำหรับบรรยากาศในฟิล์ม MA ค่าความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มสามารถปรับให้เข้ากับอัตราการหายใจของผลผลิต ส่งผลต่อการควบคุมสัดส่วนของก๊าซภายในภาชนะบรรจุ โดยสามารถดัดแปลงสภาวะบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของ CO₂ ได้มากกว่า O₂ ซึ่งสามารถชะลออัตราการหายใจและการเสื่อมสภาพ ทำให้รักษาคุณภาพผลผลิตและยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งสัดส่วนของ O₂ และ CO₂ ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิต อุณหภูมิการเก็บรักษา และลักษณะการบรรจุด้วย

2.2.7 การซึมผ่านของฟิล์ม

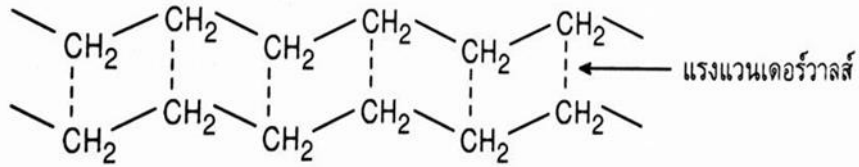
ฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร [20] และยังมีสมบัติหลากหลาย ขึ้นขึ้นกับพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ในส่วนของสายโซ่ พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมรับให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำกว่าสถานะคล้ายแก้ว การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัดปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างอิสระมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้จะมี ความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุ

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซพอลิเมอร์ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์ [21]

2.3 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน มีค่า $T_g = -120$ ถึง -80°C โครงสร้างของ PE เกิดจากการต่อกันของหมู่เมทิลีน ไม่มีหมู่แทนที่ในโครงสร้างหลัก จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นแรงกระทำระหว่างโมเลกุลสายโซ่เกิดจากหมู่เมทิลีน ซึ่งเป็นแรงกระทำแบบแวนเดอร์วาลส์ โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าไม่เท่ากันทั้งโมเลกุลสายโซ่ ยังผลทำให้เกิดสภาพขั้วแบบอ่อนๆ และก่อให้เกิดแรงกระทำระหว่างแวนเดอร์วาลส์ขึ้น



ภาพที่ 2.2 พันธะในโครงสร้างของ PE ที่เกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ [22]

ดังนั้น PE จึงใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยในการทำลายแรงกระทำระหว่างสายโซ่แวนเดอร์วาลส์ในบริเวณอสัณฐาน เพื่อให้พอลิเมอร์มีปริมาตรอิสระมากขึ้นและยังใช้พลังงานน้อยกว่ากับมันต์ของการหมุน (ΔE_R) ในการหมุนเคลื่อนตัวของสายโซ่สั้น ๆ ไม่สูงมาก เพื่อเกิดการเปลี่ยนจากสภาวะคล้ายขาง ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นขึ้น ด้วยเหตุที่หมู่เมทิลีนเป็นหมู่ขนาดเล็กไม่มีขั้ว จึงใช้พลังงานไม่มากที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง [22]

พอลิเอทิลีนแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามค่าความหนาแน่น คือ [23]

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)
ความหนาแน่น $0.910\text{--}0.925\text{ g/cm}^3$
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene, MDPE)
ความหนาแน่น $0.926\text{--}0.940\text{ g/cm}^3$
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)
ความหนาแน่น $0.941\text{--}0.965\text{ g/cm}^3$



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ HDPE และ LDPE [24]

2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [25]

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่มีการพิจารณาอยู่ 3 ประการ คือ

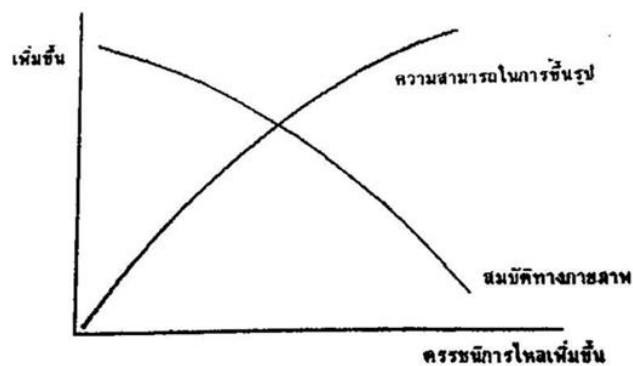
1. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของพลาสติก หมายถึง น้ำหนักของพลาสติกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ASTM ใช้หน่วยของความหนาแน่นเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

พอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกที่แตกต่างกันกัน ปัจจัยที่มีผลมาก คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากทำให้ได้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งมากจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อยแสงทะลุผ่านง่าย จึงมีความใสแต่มีความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะ โมเลกุลอยู่อย่างเป็นระเบียบและใกล้กัน มีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านได้ยาก จึงเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า ส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นระเบียบเรียกว่า ส่วนที่เป็นอสัณฐาน

2. ดรรชนีการไหล (Melt index)

ดรรชนีการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าดรรชนีการไหล หรือเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “ดรรชนีการไหล” หมายถึง การวัดการไหลของพลาสติกขณะหลว โดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและน้ำหนักมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพเทอร์โมพลาสติก คำที่ใช้ในงานต่างกันดรรชนีการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้ที่จะมีปัญหาด้านการปรับเครื่อง เม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานต่างกันมีค่าดรรชนีการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าดรรชนีการไหลสามารถแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพดี การที่ค่าดรรชนีการไหลสามารถแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลได้ เพราะถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ การเคลื่อนไหวเคลื่อนตัวต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานที่เท่ากันในการทดสอบการไหล ขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า ในด้านความสัมพันธ์ของดรรชนีการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

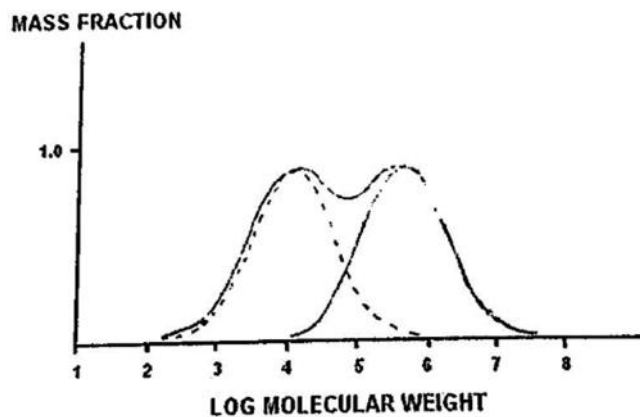


ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกายภาพ [5]

3. การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution)

การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล เป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการทั้งการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย มีการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็กที่เรียกว่ามอนอเมอร์พันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลมีจำนวนไม่เท่ากัน ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากเรียกว่าการกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ซึ่งพออธิบายได้คร่าว ๆ จากกราฟต่อไปนี้

ผลกระทบที่เด่น ๆ ในเรื่องการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ ความยากง่ายในการไหลตัวของพลาสติกในเครื่องอัดรีด ถ้าการกระจายของขนาดโมเลกุลกว้างจะช่วยให้การไหลตัวง่ายขึ้นในค่าดรรชนีการไหลที่เท่ากัน



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล [5]

2.3.2 การใช้งานของ PE

ปริมาณ 1 ใน 5 ของพลาสติกพอลิเอทิลีน ที่จะใช้เป็น HDPE โดยส่วนใหญ่เป่าเป็นขวดเนื่องจากความหนาแน่นสูงทำให้ HDPE มีความเหนียวและทนต่อการซึมผ่านได้ดีกว่า PE ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน แต่ยังไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านก๊าซได้ดีนัก จากการใช้ HDPE มาแทน LDPE น้ำหนักของขวดลดลงได้มากกว่า 40% เนื่องจากได้ขวดที่มีผนังที่บางกว่า นอกจากขวดแล้ว HDPE ยังสามารถใช้เป่าเป็นฟิล์มหรือทำถาดที่ไม่ต้องการความใสมากนัก [26]

ตัวอย่างการใช้งาน PE ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1. ใช้ผลิตเป็นถุงร้อน (HDPE) และถุงเย็น (LDPE) สำหรับการใช้งานทั่วไป สามารถซื้อได้ง่ายจากท้องตลาดทั่วไป ข้อสังเกตถุงร้อนที่ผลิตจาก HDPE จะมีสีขาวขุ่น

2. ใช้ห่อหรือบรรจุอาหารได้เกือบทุกชนิดโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภค แต่ไม่ควรใช้ LDPE ในการบรรจุร้อน
3. นิยมใช้ทำถุงขนมปัง เนื่องจาก PE ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจึงช่วยป้องกันขนมปังแห้ง เนื่องจากการสูญเสียความชื้นออกไป นอกจากนี้ราคาของ PE ไม่สูงเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของขนมปัง
4. นิยมใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้สด เนื่องจาก PE ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี ทำให้มีก๊าซออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาเพียงพอให้พืชหายใจ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมาสามารถซึมผ่านออกไปได้ง่าย ในบางกรณีจำเป็นต้องเจาะรูถุงเพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชคายน้ำออกมา
5. นิยมใช้ LDPE เป็นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องจากกระดาษและแผ่นพลาสติกอะลูมิเนียมซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นถุงหรือซองบรรจุอาหาร ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้จึงนิยม LDPE มาประกบติดกับวัสดุต่าง ๆ เหล่านี้ โดยให้ LDPE อยู่ชั้นในสุด และทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับปิดผนึกด้วยความร้อน เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป แผ่นปิดด้วยโยเกิร์ต กล่องนมยูเอชที เป็นต้น
6. फिल्म PE ชนิดยืดตัว (Stretch film) นิยมใช้ห่ออาหารสดพร้อมปรุง เนื้อสด และอาหารทั่วไป รูปแบบที่นิยมใช้คือ ใช้ถาดรองอาหารแล้วห่อด้วยฟิล์มยืดตัวได้
7. PE ไม่นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุภาชนะบรรจุอาหารที่ไขมันสูง เช่น เนย ถั่วทอด ขนมขบเคี้ยว

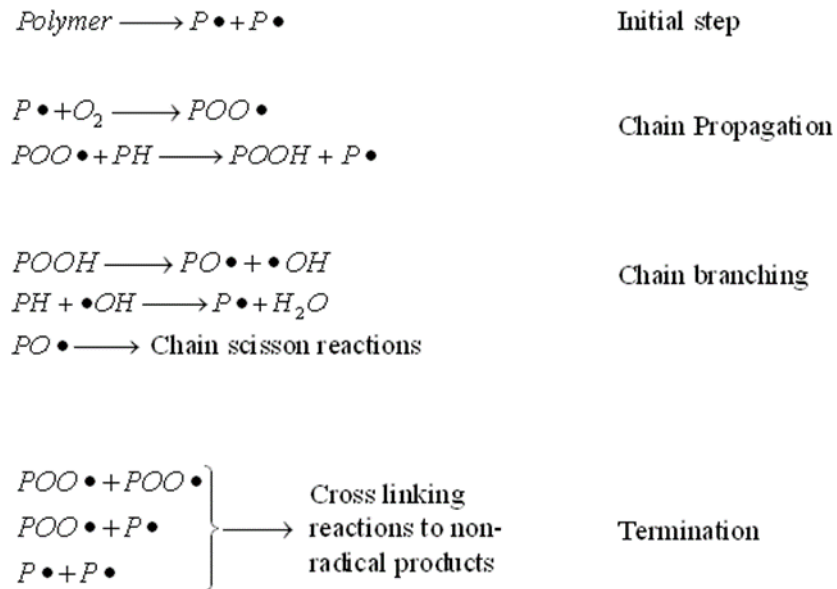
2.3.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

โครงสร้างทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีความเป็นผลึกสูง (มากกว่า 90%) มีสายโซ่ข้างน้อยกว่า 200 อะตอมคาร์บอนในสายโซ่หลัก มีอุณหภูมิหลอม 127°C (โดยทั่วไปประมาณ 135°C) และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.941–0.965 g/cm³

HDPE สามารถผลิตได้หลายวิธี รวมถึงการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (Radical polymerization) ของเอทิลีนที่ความดันสูง การเกิดพอลิเมอร์แบบโคออดิเนชัน (Coordination polymerization) ของเอทิลีน และการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับตัวเร่งที่เป็นโลหะออกไซด์ [27]

ในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง HDPE อาจสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (Oxidation reaction) เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ จากนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เกิดการสลายตัวต่อไปโดยแบ่งสายโซ่ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่สองได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิด

การสลายตัวต่อไป ทำให้ความยาวของโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลง เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง และสมบัติการทนแรงแรงกระแทก ซึ่งจะแสดงปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์ตามภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ [28]

สมบัติทั่วไปของ HDPE [29-30]

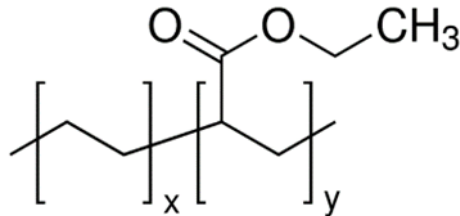
Tensile Strength	:	0.20-0.40 N/mm ²
Notched Impact Strength	:	no break
Thermal Coefficient of Expansion	:	100-220 x 10 ⁻⁶
Max. Continued Use Temperature	:	65°C (149°F)
Water absorption	:	Slight (%)
Hardness (type D)	:	67
Solubility parameter	:	7.90 (cal/cm ³) ^{1/2}

2.4 พอลิเมอร์ร่วมเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ EEA [31]

เอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate, EA) โดยทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระ (Free-radical

polymerization) ในเครื่องปฏิกรณ์พอลิเอทิลีนความดันสูง (High pressure polyethylene reactor) โดย EA เป็นส่วนที่ให้ความมีขี้และความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณ EA จะทำให้ EEA มีขี้ ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความหยุ่นตัว (Resilience) ที่มากขึ้น ซึ่งความมีขี้ที่มากขึ้นของ EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดและการรับหมึกของพื้นผิว



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของ EEA [32]

2.4.2 สมบัติบางประการของ EEA [7]

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	:	0.93 g/cm ₃
มอดูลัสยืดหยุ่น	:	28-52 MPa
ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	:	11-14 MPa
ความต้านทานแรงกดอัด	:	21-25 MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด	:	700-750%
ค่าความแข็งแรงกด (Shore D)	:	27-38
ค่าการดูดซึมน้ำ	:	0.04% โดยน้ำหนัก
ความเป็นผลึก	:	22.8%
อุณหภูมิการเกิดผลึก	:	70–80°C
จุดหลอมเหลว	:	92–112°C
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	:	-33°C

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

EEA คือ พอลิเอทิลีนที่เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถยึดติดกับวัสดุประเภท Metallic และ Nonmetallic ได้ดี เพราะการมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลและไฮดรอกซิลที่ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับพวกอะลูมิเนียมฟอยล์ที่สามารถทำเป็นชั้นส่วนประกบหลายชั้นได้ด้วยกระบวนการอัดรีด-เคลือบแบบหลายชั้น (Multilayer extrusion-laminate)

EEA โดยทั่วไปประกอบด้วยเอทิลอะครีเลต 15–30% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นดี เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด การฉีดขึ้นรูป การเป่าขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก EEA จะมีสมบัติการทนทานต่อสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมได้ดี มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -65°C

EEA ได้รับความนิยมใกล้เคียงกันกับ LDPE และ PVC ที่มีพลาสติกไซเซออร์ (PPVC) โดยที่อุณหภูมิห้อง EEA มีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ LDPE และ PPVC อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงของ EEA จะต่ำกว่า การทำโคพอลิเมอร์เป็นการทำให้มีสมบัติคล้ายที่มีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า -100°C โดยไม่ต้องใส่พลาสติกไซเซออร์ แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำสามารถเสียรูปได้ง่ายกว่า PVC

เมื่อ EEA ถูกผสมเข้ากับพอลิโอฟีน ปริมาณที่ผสมเข้าไปจะทำให้มีขั้วเพิ่มขึ้น การมี EEA ส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัตินุ่ม ยืดหยุ่นได้ดีและมีสมบัติในการยึดติดที่ดี การผสม EEA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติการทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้นในพอลิเอไมด์และพอลิเอสเตอร์ได้ [33]

2.5 พอลิเมอร์ผสม

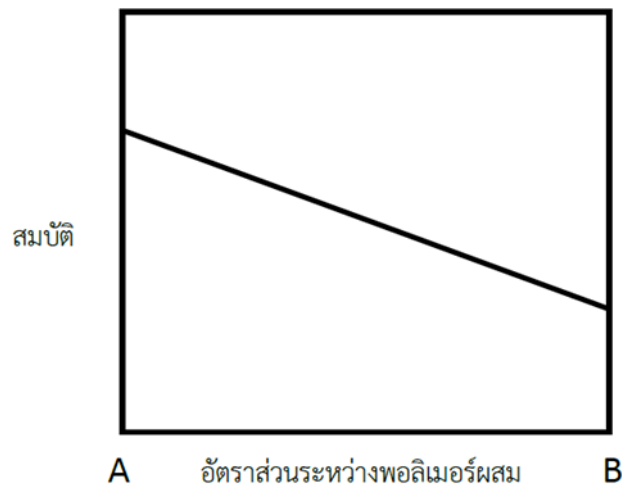
พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์เพื่อเตรียมวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะ ได้จากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติซึ่งไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการผสม [34-35]

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันของการผสมเป็นหลัก ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกันอย่างชัดเจน โดยแต่ละวัฏภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่น ๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว

ถ้าพอลิเมอร์ผสมซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลและเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสมำเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ [34]

2. พอลิเมอร์ที่ไม่เข้ากัน (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.11)$$

เมื่อ ΔG_{mix} คือ พลังงานอิสระกิบส์ในการผสม

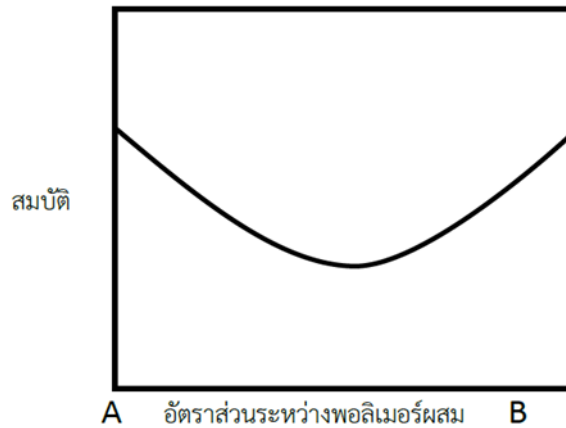
ΔH_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าบวก ทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ภูมิภาค คือ พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า ภูมิภาคหลัก (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า ภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดไม่ผสมเข้ากันและแยกออกเป็นแต่ภูมิภาค โดยระหว่างภูมิภาคอาจมีการดึงดูดระหว่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเสียหายได้ แม้ในกรณีที่ความเค้นต่ำมาก ๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจจะลดต่ำมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ [34]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. John. และคณะ [36] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนผสม ความเข้ากันและการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดไดนามิกสวิตคาโนเซชันที่มีต่อการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA โดยศึกษาอัตราส่วน HDPE:EVA เป็น 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด จากการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมพบว่า EVA กระจายตัวได้ดีในวัฏภาคหลักของ HDPE ตามปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้น โดยในสูตร 30:70 พบว่าวัฏภาคของ HDPE และ EVA เกิดการรวมวัฏภาคต่อเนื่อง เนื่องจาก EVA มีปริมาณมากจึงเป็นพอลิเมอร์วัฏภาคหลัก และจากปริมาณของ EVA ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ N_2 มากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซจะแพร่ผ่านวัฏภาคที่เป็นออสถฐาน เมื่อมีปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีวัฏภาคของความเป็นผลึกลดลง นอกจากนี้ค่าการซึมผ่านของก๊าซ O_2 มากกว่าก๊าซ N_2 เนื่องจากฟิล์มมีสภาพขรุขระมากกว่า

T. Chatterjee. และคณะ [37] ได้ทำการศึกษา HDPE ที่มีความแตกต่างกัน 3 ชนิด เกรดที่ 1 มีความหนาแน่น 0.961 g/cc ครรชนิกการไหล 0.85 dg/min น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 113 kg/mol อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน 5.7 T_m 132°C, ΔH_f 226.6 J/g เกรดที่ 2 มีความหนาแน่น 0.963 g/cc ครรชนิกการไหล 1.00 dg/min น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 112 kg/mol อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน 6.3 T_m 134.6°C, ΔH_f 230.3 J/g เกรดที่ 3 มีความหนาแน่น 0.949 g/cc ครรชนิกการไหล 0.08 dg/min น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 230 kg/mol อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน 22.1 T_m 129.9°C, ΔH_f 200.5 J/g โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม จากงานวิจัยพบว่าการดึงชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งส่วนที่เป็นผลึกและออสถฐาน สำหรับแนวโน้มของอัตราการซึม

ผ่านไอน้ำก่อนการดึงยืด พิล์มมีผลึกเป็นทรงกลมที่มีการเรียงตัวกันอย่างสุ่มการซึมผ่านไอน้ำต่ำ ในขณะที่ฟิล์มยืดตัวตามแนวแกน C หรือตามแนวแกนสายโซ่ มีแนวขนานกับทิศทางการดึง ส่งผลให้ความยากในการแพร่ลดลง อัตราการซึมผ่านจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่วนของสายโซ่ที่เป็นอสัณฐานถูกจัดเรียงเนื่องจากการดึงส่วนที่เป็นอสัณฐานทั้งหมดของสายโซ่ลดลง ดังนั้นการดูดซับและการแพร่ของโมเลกุลก๊าซเกิดขึ้นผ่านพื้นที่ที่ไม่เป็นรูปแบบกระจาย ดังนั้นเหนือจุดวิกฤตของการดึง WVTR ลดลง เมื่อมีการดึงเพิ่มขึ้น

Y. Chen. และคณะ [38] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE/EVA เนื่องด้วย HDPE มีสมบัติเด่นคือ การมีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อโอโซน และต้านทานสารเคมี แต่ HDPE ทนต่อความเค้นแตกหักต่ำ ในทางตรงข้ามกัน EVA มีสมบัติการทนแรงกระแทก ทนต่อความเค้นแตกหัก ทนต่อรอยขีดข่วน มีความใส สามารถซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจน คุณความชื้นสูง มีความต้านทานไฟฟ้าสูง จึงได้ทำการผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ HDPE:EVA (100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหลอมเหลว โดยใช้การกดอัด และผลจากการดูผลึกด้วย XRD ของ HDPE:EVA มีหน่วยเซลล์แบบออร์ทอโรมบิก และหลังจากการผสมโครงสร้างผลึกของ HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความเป็นผลึกลดลง

K. G. Gravalos และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม Polyethylene terephthalate (PET) และ EEA ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของหมู่อะคริเลตเอสเทอร์ (Acrylate ester group) ของ EEA กับหมู่ฟังก์ชัน -OH และ -COOH ของ PET ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองนำไปสู่การต่อกิ่ง (Grafting) ที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PET/EEA ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าสภาวะในการผสมที่อุณหภูมิ 290°C เวลาในการผสม 25 นาที ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาผลของอัตราส่วน PET/EEA ที่ 100/0, 95/5, 15/85, 25/75, 50/50, 75/25 และ 0/100 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จะทำให้ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นและอัตราส่วน PET/EEA ที่ 85/15 จะให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด การดึงยืด ณ จุดขาด สูงที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า T_m ของ PET มีค่าลดลง เนื่องจากการเติม EEA เป็นการรบกวนการเกิดผลึกของ PET และพบว่า T_m ของ EEA มีค่าสูงขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่าการเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างรอยต่อของวัฏภาค PET กับ EEA

นันทวรรณ ม่วงมี [1] ได้ปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 100/0, 90/10, 80/20 และ 75/25 และมีการใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม 0–25% โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่า จากการศึกษาผลของกระบวนการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอไลต์เอ พบว่าอนุภาคของซีโอไลต์เอมีการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ EVA และมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE, EVA และซีโอไลต์เอพร้อมกัน และจากการศึกษาผลของ

อัตราส่วน LDPE/EVA ที่มีต่อฟิล์ม LDPE/EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมาก ทั้งนี้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น เนื่องจากการซีโอไลต์เอเป็นส่วนที่เพิ่มปริมาณของแข็งให้แก่ชิ้นงาน และแรงกระทำระหว่างซีโอไลต์เอกับวัฏภาค EVA เป็นแรงกระทำระหว่างขั้วที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเท่านั้น จึงทำให้การยึดเกาะไม่ดี เมื่อมีแรงกระทำแก่ชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่างระหว่างซีโอไลต์เอกับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้สมบัติการรับแรงดึงลดลงและขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติมซีโอไลต์เอและ EVA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeation, WVP) เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความ มีขั้วของซีโอไลต์เอทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของไอน้ำได้ดี และไอน้ำสามารถซึมผ่านวัฏภาค อัดแน่นของ EVA ได้ดีกว่าวัฏภาคอัดแน่นของ LDPE นอกจากนี้ค่า WVP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น โดยในฟิล์มอัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 80/20 โดยน้ำหนัก LE(80/20) มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโอไลต์เอ 25% โดยน้ำหนักในฟิล์มสูตร LE(80/20)Z25 จึงมีค่า WVP สูงกว่าฟิล์ม (LE(80/20)) 60% และสูงกว่าฟิล์ม LDPE 106% และจากการทดสอบการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุมะเขือเทศ พบว่าสูตร LE(80/20)Z25 มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย จึงสามารถเก็บรักษามะเขือเทศได้นานขึ้น

จิตินันท์ สิริจันทน์ [3] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EMA และซีโอไลต์เอ โดยการศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ กดอัด พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี โดยค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ค่ามอดุลัสมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น WVP ของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการเปรียบเทียบ คือ EMA, EEA และ EVA พบว่าเมื่อควบคุมให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกัน สมบัติเชิงกลของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน ฟิล์มสูตร L80M20Z20 มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่ามากกว่าฟิล์มสูตร L80M20 83% จากการทดสอบการเก็บรักษาพริกชี้ฟ้าสดที่ 5°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าบรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม L80M20Z20 มีไอน้ำกักเก็บที่คงเหลือในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มวัฏภาคอัดแน่นที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ทำให้ค่า WVP เพิ่มขึ้น

จิตรา ศักดาพิสุทธ์ และคณะ [4] ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีนไวน์แอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA ศึกษาผลของอัตราส่วน ของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดีและฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่

แตกต่างกัน เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างสัณฐานวิทยาและความมีขั้วของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ EVOH มีขั้วสูงกว่า EVA เมื่อมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVOH มีพันธะไฮโดรเจนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้ โดยการซึมผ่านไอน้ำจะผ่านวฏภาคอสัณฐานเป็นหลัก เมื่อมีปริมาณ EVOH เพิ่มขึ้นจึงไม่ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การใช้ EVA ให้สภาพขั้วที่ต่ำกว่า แต่มีความเป็นอสัณฐานมากกว่า ดังนั้นพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ LDPE เพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำให้มากขึ้นต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว มีความเป็นอสัณฐานสูง และไม่มีพันธะที่ทำให้เกิดผลึก

บุญนารักษ์ โคสุก และคณะ [5] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE ด้วย EMA โดยการศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EMA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 65/35 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่า พบว่าการมี EMA เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของ EMA ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของ HDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมี EMA เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ EMA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ยังมอดูลัส และความแข็งแรงลักษณะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม HDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EMA เพิ่มขึ้น แสดงด้วยค่าดัชนีการบอนด์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง และสอดคล้องกับค่าการซึมผ่านไอน้ำที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ EMA เนื่องจาก EMA ช่วยเพิ่มวฏภาคอสัณฐานและความมีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และเมื่อใช้ฟิล์ม HDPE/EMA ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีปริมาณ EMA สูง (HD65M35) มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมน้อย จึงลดโอกาสในการเน่าเสียจากไอน้ำที่ได้จากการหายใจทำให้สามารถคงคุณภาพของพริกขี้หนูสดได้นานขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พบว่าสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน มีความเป็นอสัณฐานสูงและมีขั้ว ทำให้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น จึงนำ EEA มาผสมกับ HDPE ที่มีความเป็นผลึกทำให้ไอน้ำซึมผ่านได้ยาก เนื่องจาก EEA ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วจะช่วยให้โพลิเมอร์กระจายตัวได้ดีใน HDPE และส่วนที่มีขั้วจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำส่งผลให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้นานขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เกรดเป่าฟิล์ม HD7000F PTT Global Chemical Public Co., Ltd.
2. เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate colymer, EEA) เกรด AMPLIFY™ EA 101 Dow Chemical (Thailand) Co., Ltd.
3. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า Lab Systems Co., Ltd.
4. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂) Linde (Thailand) Public Co., Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE*

สมบัติ	HD7000F	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	0.04	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.956	g/cm ³
จุดหลอมเหลว (Melting point)	129	°C
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	300	kg/cm ³
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	820	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EEA*

สมบัติ	EEA	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	6.00	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.931	g/cm ³
จุดหลอมเหลว (Melting point)	97.8	°C
หมู่ Ethyl acrylate/ปริมาณ ในโคพอลิเมอร์	18.5	%wt
ค่าความแข็งแรงกด (Shore D)	31	-

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) CHAROEN TUT Co., Ltd. รุ่น MX500-D75L90
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) Bosco Engineering Co., Ltd. รุ่น Bosco A600
3. เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า SPL machinery Co., Ltd. รุ่น SPL 25G-LAB
4. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว SPL machinery Co., Ltd. รุ่น SPL 35 G REC-LAB
5. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก Dongguan Tianjie Transmit Equipment Co., Ltd.

รุ่น TJD90-L4

6. เครื่องปั๊มลม Hitachi Co., Ltd. รุ่น BEBICON 400
7. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) Labtech Engineering Co., Ltd. รุ่น LP20
8. เครื่องคิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

NETZSCH Co., Ltd. รุ่น DSC 204 F1 Phoenix®

9. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) Bara Scientific Co., Ltd. รุ่น IRTracer-100

10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) LLOYD

Instrument Co., Ltd. รุ่น LR 5K

11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) Carl Zeiss Co., Ltd. รุ่น EVO MA 10

12. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle system) Dataphysics Co., Ltd. รุ่น OCA20

13. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (เครื่องประกอบ Home-made)

14. เครื่องโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) FORTUNE SCIENTIFIC Co., Ltd.

รุ่น TCDZ-NIFED

15. เครื่องวัดอัตราการผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeation Analyzer) Illinois Instrument, Inc. รุ่น 7002

16. เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า Labtech Engineering Co., Ltd. รุ่น LE-400

17. ตู้อบความร้อน

18. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 กรัม

19. ไมโครมิเตอร์

20. กระบอกใส่ไนโตรเจนเหลว (Dewar)

21. หลอดทดลอง

22. อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) Densplyneytech Co., Ltd. รุ่น 136H

23. เครื่องพ่นกึ่งพลาสติก

24. แท่งแก้ว

25. ปีกเกอร์, กระจกนาฬิกา, คีม

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตร HDPE/EEA

สูตร	อัตราส่วน HDPE/EEA	HDPE (%wt)	EEA (%wt)
HD100E0	100/0	100	0
HD90E10	90/10	90	10
HD80E20	80/20	80	20
HD70E30	70/30	70	30
HD65E35	65/35	65	35
EEA	0/100	0	100

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 ทำโดยชั่งส่วนผสม HDPE และ EEA ให้ได้ตามตาราง ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 300 กรัม เขย่าและผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมมาเทใส่ในเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 180°C
- ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อตัดเม็ด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- Feed zone 165°C
- Metering zone 170°C
- Compression zone 175°C
- Die zone 180°C
- Screw speed 45-50 rpm

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อระเหยไอน้ำออก

3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม

นำพอลิเมอร์ที่ตัดเป็นเม็ดแล้วมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า ที่มีเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวที่ต่อกับเครื่องขึ้นรูปฟิล์มที่ใช้หัวตายประเภทวงแหวน (Annular die) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm โดยตั้งสภาวะเพื่อควบคุมความหนาฟิล์ม 25-45 μm ดังนี้

- เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า SPL machinery Co.,Ltd. รุ่น SPL 25G-LAB (สำหรับฟิล์มสูตร HD100E0, HD90E10, HD80E20) ใช้อุณหภูมิ Die 180°C, Adaptor 175°C, Barrel 1 170°C, Barrel 2 170°C

- เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า SPL machinery Co.,Ltd. รุ่น SPL 25G-LAB (สำหรับฟิล์มสูตร HD70E30, HD65E35) ใช้อุณหภูมิ Die 170°C, Adaptor 165°C, Barrel 1 160°C, Barrel 2 160°C

- เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเป่า Labtech Engineering Co.,Ltd. รุ่น LE-400 ((สำหรับฟิล์มสูตร EEA) ใช้อุณหภูมิ Die 150°C, Adaptor 145°C, Barrel 1 140°C, Barrel 2 140°C

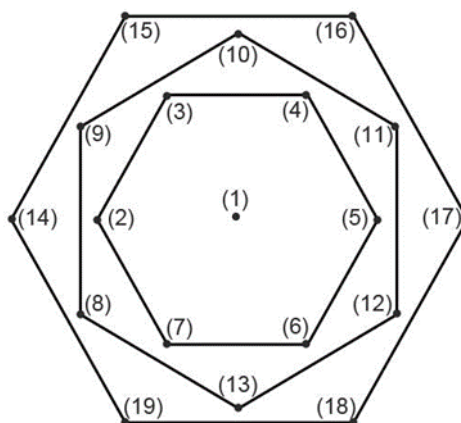
- Screw speed 70-90 rpm

- สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

ความดัน 60-70 psi, ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1 30-45 rpm, ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2 30-45 rpm

3.3.3 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกสูตรที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัด 19 จุด ดังภาพที่ 3.1 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.1 บริเวณที่มีการวัดความหนาของฟิล์ม

3.3.4 การตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้มาทำการตรวจหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR ในโหมด ทรานสมิชชัน ช่วงเลขคลื่น 700 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} เพื่อหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) โดยคำนวณจากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของพีค C=O Stretching ที่ 1734 cm^{-1} กับค่าการดูดกลืนแสงของพีค C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1}

3.3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา

นำพอลิเมอร์ผสมมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 2 mm ด้วยสภาวะดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด	200°C
- ความดันในการกดอัด	1800 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์	5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์	10 min
- เวลาในการกดอัด	15 min
- อุณหภูมิในการเย็นตัว	20°C
- เวลาในการเย็นตัว	15 min

นำชิ้นงานที่ได้มาตัดให้มีขนาด $1 \times 3\text{ cm}^2$ แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 40 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ และนำชิ้นงานที่หักได้ไปแช่ในหลอดทดลองที่มีโทลูอีน (Toluene) เป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EEA ออกจากชิ้นงานใน Ultrasonic bath ที่อุณหภูมิ 40-50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำแล้ววิเคราะห์จากพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อดูการกระจายตัวของ EEA ด้วย SEM

3.3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึก (X_c)

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC ชั่งน้ำหนักฟิล์มประมาณ 2-5 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25°C ด้วยอัตราในการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด 180°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น และให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งด้วยอัตราในการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับครั้งแรก แล้วนำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ($\%X_c$) ตามมาตรฐาน ASTM E794 [40]

การคำนวณหา Heat of fusion (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.4)$$

$$\text{ความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ} \quad (3.5)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [41]

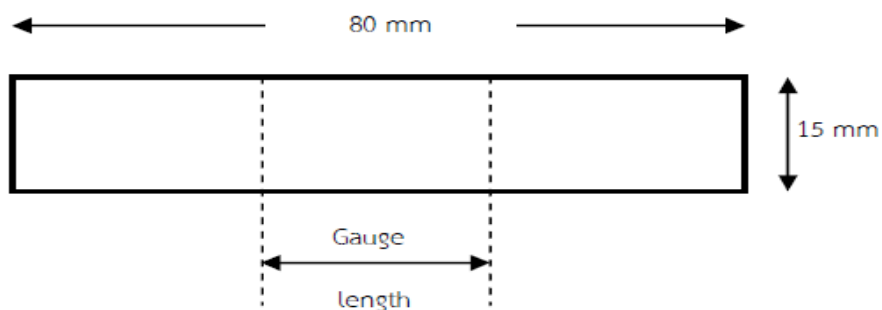
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.7.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึง ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break), ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 [34] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งทำการตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างตามแนวเครื่องจักร (Machine direction, MD) และตามแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction, TD) ให้มีขนาด $15 \times 80 \text{ mm}^2$

โดยใช้สภาวะทดสอบดังนี้

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



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ค่ายังมอดูลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\text{ยังมอดูลัส} = \frac{\Delta \text{ Stress}}{\Delta \text{ Strain}} \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด} = \left[\frac{(l_0 - l_0)}{l_0} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ	F	=	แรงดึงยืดชิ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานตัวอย่าง (mm ²)
	l	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l ₀	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่ามอดูลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1% และ 2% การดึงยืด)

3.3.7.2 สมบัติความแข็งแรงลึกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนกแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D1938 [42] ทดสอบด้วยเครื่องอเนกประสงค์โดยใช้ Load cell 100 N และความเร็วในการดึง 100 mm/min



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงลึกขาดแบบ Die C [43]

3.3.8 การทดสอบมุมสัมผัส

การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พื้นผิวของชิ้นงาน โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด และใช้แม่พิมพ์ขนาด 40×40×6 mm³ และสภาวะเครื่องกดอัดดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด 200°C
- ความดันในการกดอัด 1800 psi

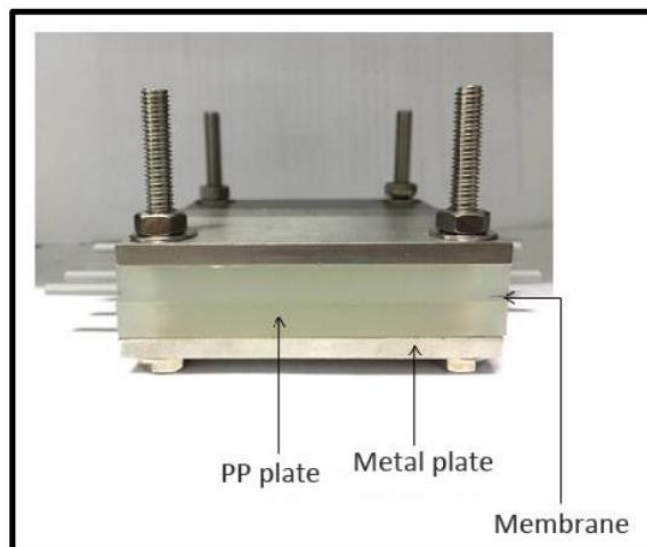
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์	5 min
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์	5 min
- เวลาในการกดอัด	10 min
- อุณหภูมิในการเย็นตัว	20°C
- เวลาในการเย็นตัว	10 min

หลังจากนั้นตัดชิ้นงานตามขวางเพื่อทำการทดสอบบริเวณผิวของพื้นที่ภาคตัดขวาง ใช้ปริมาตรหยดน้ำ 2 μL ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system OCA ตามมาตรฐาน ASTM D 5946-09 [44]

3.3.9 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

3.3.9.1 สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C

นำฟิล์มขนาด $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ใส่ในเซลล์เมมเบรนที่มีพื้นที่การซึมผ่านของก๊าซ $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติก 2 ชั้นประกบกัน และประกบแผ่นโลหะอีก 1 ชั้น ดังภาพที่ 3.4 โดยส่วนประกอบทั้งหมดถูกยึดไว้ด้วยสกรูที่มุมทั้ง 4 ซึ่งส่วนประกอบนี้เรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำทำตามลำดับขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 3.4 เซลล์เมมเบรน [45]

1. ปรับอัตราการไหลของก๊าซ

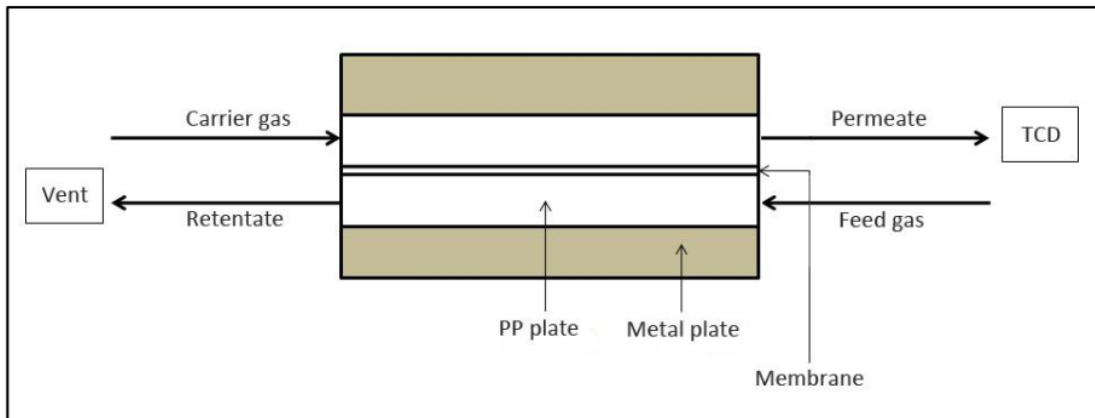
อัตราการไหล (Flow rate) ของสารป้อน (Feed, ไอน้ำ) ถูกควบคุมด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) และก๊าซพา (Carrier gas, ก๊าซฮีเลียม) ถูกควบคุมด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Mass flow controller) ให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 30 ml/min

2. ปรับความดันของก๊าซ

วัดความดันของก๊าซที่ไหลเข้าสู่เครื่อง TCD (Thermal conductivity detector) โดยตรง โดยไม่ผ่าน Cell membrane และผ่าน Cell membrane (ฝั่ง Permeate) ด้วย U-tube โดยวัดความแตกต่างของระดับน้ำเมื่อก๊าซไหลผ่าน โดยความดันของก๊าซที่ผ่านและไม่ผ่าน Cell membrane ต้องมีความดันเท่ากัน จากนั้นวัดความดันของก๊าซฝั่ง Feed และปรับ Needle valve ให้มีความแตกต่างของระดับน้ำใน U-tube ให้มีค่าเท่ากับฝั่ง Permeate เพื่อเป็นการปรับความดันขาเข้า-ออกให้เท่ากัน

3. การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

นำเซลล์เมมเบรนมาทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ โดยไอน้ำไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านล่าง ในขณะที่ก๊าซฮีเลียมไหลเข้าทางแผ่นพลาสติกด้านบนของเซลล์เมมเบรน ซึ่งทิศทางการไหลของสารป้อนและก๊าซพาไหลในทิศตรงข้ามกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เมื่อสารป้อนไหลผ่านฟิล์ม ก๊าซบางส่วนซึมผ่านฟิล์มในเซลล์เมมเบรนไปยังฝั่ง Permeate โดยมีก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซพาเข้าสู่เครื่อง TCD เพื่อตรวจวัดค่าการซึมผ่าน (Permeability) สำหรับก๊าซที่ไม่สามารถซึมผ่านไปได้อาจจะไหลสู่ช่องระบายทิ้ง (Vent) ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แผนภาพการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ [45]

3.3.9.2 สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 38°C

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่ มีหน่วยเป็น $\text{g/m}^2\cdot\text{day}$ ที่อุณหภูมิ 38°C ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM F1249

3.3.10 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

1. นำฟิล์มตัวอย่างขนาด $11 \times 11 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 แผ่นต่อถุงบรรจุภัณฑ์ มาผลิตเป็นถุงบรรจุภัณฑ์โดยการปิดผนึกร้อน โดยมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งบันทึกเป็นค่าน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ก่อนการเก็บรักษา

2. คัดเลือกพริกชี้หนูสดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นล้างพริกให้สะอาด และผึ่งให้แห้งจำนวนถุงละ 1 กรัม โดยประมาณ และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน บันทึกเป็นค่าน้ำหนักพริกเริ่มต้น

3. บรรจุพริกชี้หนูสดลงในบรรจุภัณฑ์แล้วจึงทำการปิดผนึกร้อนทั้ง 4 ด้าน ให้มีพื้นที่ภายใน $9 \times 9 \text{ cm}^2$ ปริมาตรภายในบรรจุภัณฑ์สูงสุดประมาณ 18 cm^3 แล้วทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ บันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ก่อนเก็บรักษา

4. เก็บรักษาถุงบรรจุภัณฑ์ในช่องแช่แข็งของตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% เป็นระยะเวลา 20 วัน [46] ในขณะที่เก็บรักษานั้นมีการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ทุก ๆ 2 วัน จนครบเวลา 20 วัน บันทึกเป็นน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์ทุก 2 วัน

5. เมื่อเก็บรักษาถุงบรรจุภัณฑ์จนครบ 20 วัน นำถุงบรรจุภัณฑ์นั้นมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา

6. จากนั้นตัดถุงบรรจุภัณฑ์และทำการซับไอน้ำภายในถุงบรรจุภัณฑ์และพื้นผิวของพริกออกเพื่อชั่งน้ำหนักของพริกและบรรจุภัณฑ์ แล้วบันทึกค่าน้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษา และน้ำหนักบรรจุภัณฑ์หลังการเก็บรักษา ตามลำดับ

7. นำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านบรรจุภัณฑ์ออกไปได้ และปริมาณไอน้ำกักเก็บที่เหลือในถุงบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักของพริก 1 กรัม ดังสมการ

$$\text{ปริมาณไอน้ำทั้งหมดที่พริกหายใจได้ทั้งหมด (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม} = A + B \quad (3.6)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากถุงบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน)

$$\text{ได้จาก } \frac{[(\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์}) - \text{น้ำหนักรวมในแต่ละวัน}] \times 1000}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

เมื่อ B คือ ปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 10)

$$\text{ได้จาก } \frac{[\text{น้ำหนักรวมหลังเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักพริกหลังเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์})] \times 1000}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE ต่อ EEA เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 65/35, 0/100 ตามลำดับ และทดสอบสมบัติของฟิล์มก่อนเลือกบางสูตรของฟิล์มไปทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดต่อไป

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA

การศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE/EEA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูป โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมดังตารางที่ 4.1 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 26–43 μm จะเห็นได้ว่าค่าความหนาที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ มีการกระจายความหนาน้อย เพราะได้เลือกบริเวณที่ฟิล์มมีความหนาใกล้เคียงกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบ แต่ในกรณีของฟิล์มสูตร HD65E35 ลักษณะทางกายภาพที่พบคือ ผิวของฟิล์มไม่เรียบ ทำให้มีความหนาไม่สม่ำเสมอบางบริเวณ

ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA และความหนาของฟิล์ม

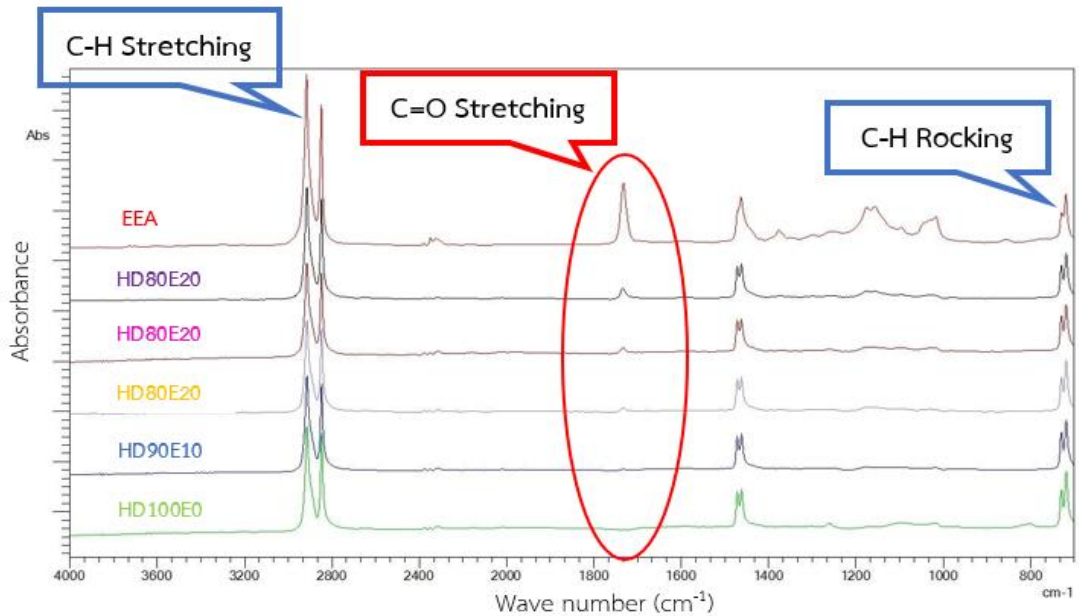
สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมโดยน้ำหนัก		ความหนาเฉลี่ย (μm)
	HDPE	EEA	
HD100E0	100	0	29 \pm 1
HD90E10	90	10	29 \pm 1
HD80E20	80	20	29 \pm 2
HD70E30	70	30	28 \pm 2
HD65E35	65	35	29 \pm 1
EEA	0	100	41 \pm 2

4.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EEA

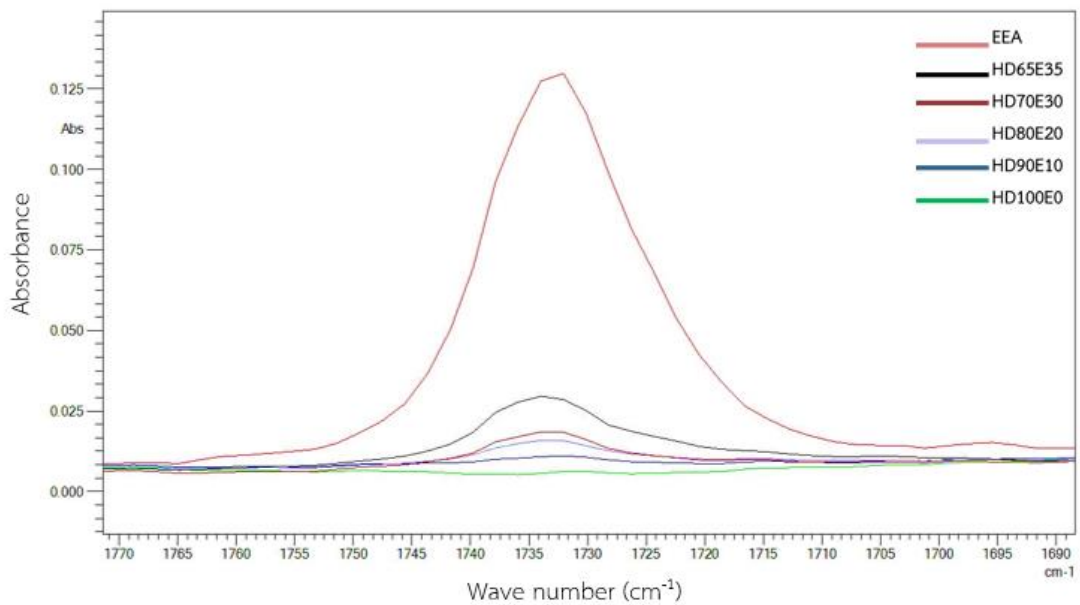
การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาจากเทคนิค FT-IR เพื่อแสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยคำนวณเชิงปริมาณได้จากค่าคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) จากค่าการดูดกลืนแสงของหมู่

C=O Stretching ที่ 1734 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีชื่อของหมู่เอสเทอร์ใน EEA เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1} ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่หลักของ HDPE และ EEA ดังสมการที่ 4.1

$$\text{ค่าดัชนีคาร์บอนิล} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ } 1734\text{ cm}^{-1}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ } 730\text{ cm}^{-1}} \quad (4.1)$$



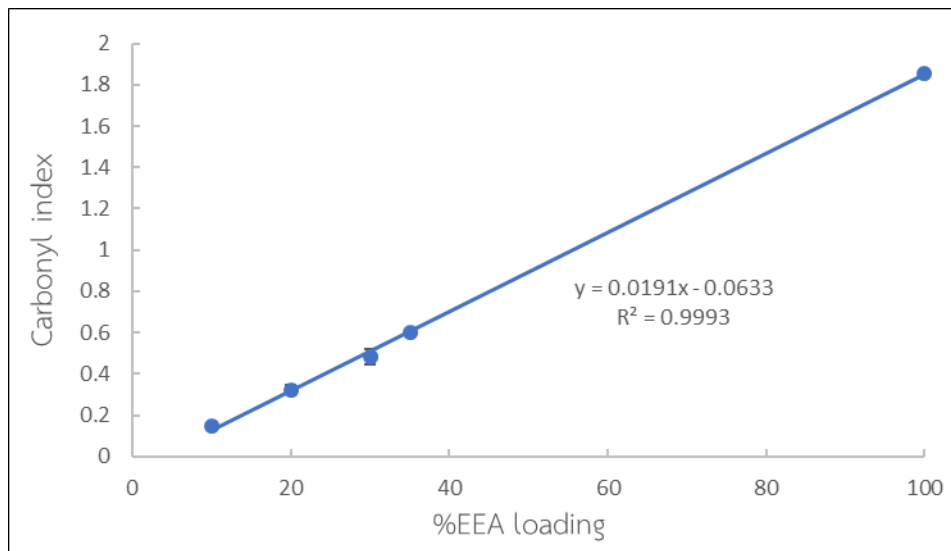
(a) ตำแหน่งของพีคที่ปรากฏในช่วง 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}



(b) ตำแหน่งของพีคของ C=O stretching ที่ 1734 cm^{-1}

ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม HDPE/EMA ด้วยเทคนิค FT-IR

โดยจากภาพที่ 4.1 (a) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร HD100E0 ปรากฏพีค C-H Stretching ที่ $\sim 3000\text{ cm}^{-1}$, C-C Stretching ที่ 1450 cm^{-1} , C-H Rocking ที่ 730 cm^{-1} เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ปรากฏพีค C=O stretching ที่ 1734 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมา ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของ EEA และเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C=O มีค่าสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.1 (b) โดยสามารถคำนวณหาค่าคาร์บอนิลได้จากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าดังภาพที่ 4.2

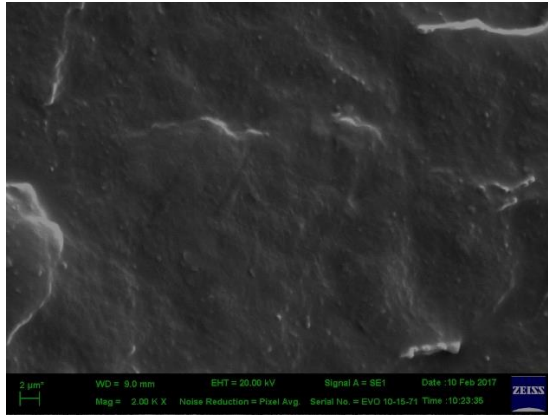


ภาพที่ 4.2 ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE/EEA

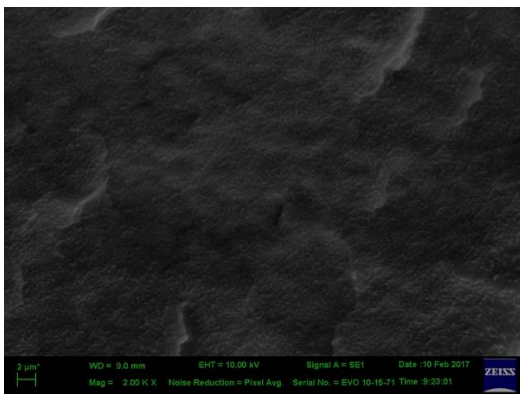
จากภาพที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ค่าดัชนีคาร์บอนิลมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณของ EEA ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้สัดส่วนตามที่ต้องการ ส่งผลให้ความมีขั้วของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่แทนที่ของ EEA ที่เพิ่มขึ้น

4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัว EEA ในฟิล์ม HDPE/EEA

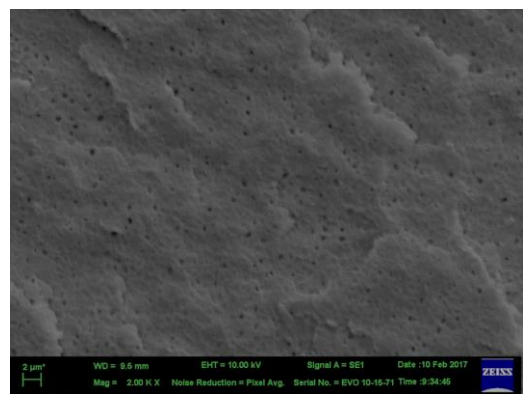
การศึกษาการกระจายตัวของ EEA ในฟิล์ม HDPE/EEA ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยทำการสกัด EEA ออกจากชิ้นงาน แล้วนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าพื้นที่ที่ตัดขวางของชิ้นงานมีความเรียบดี ไม่มีช่องว่าง ไม่พบรอยต่อระหว่างภูมิภาคกระจายและภูมิภาคต่อเนื่อง แสดงผลในภาพที่ 4.3



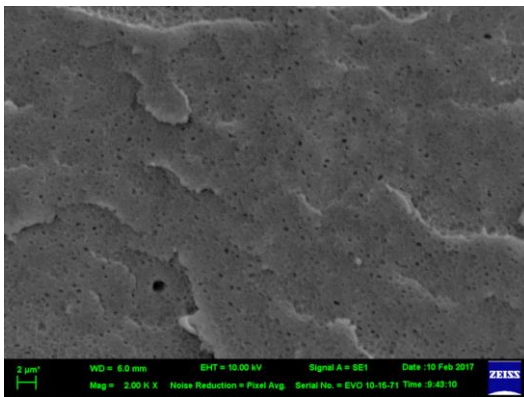
(a) HD100E0



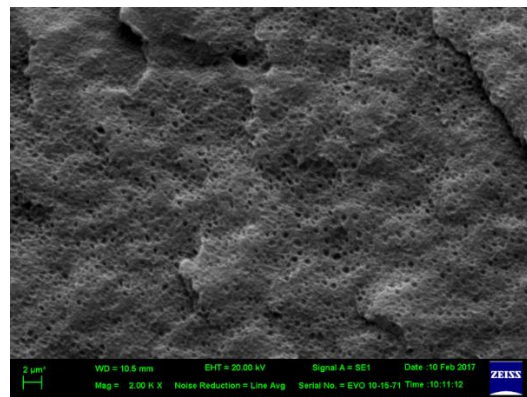
(b) HD90E10



(c) HD80E20

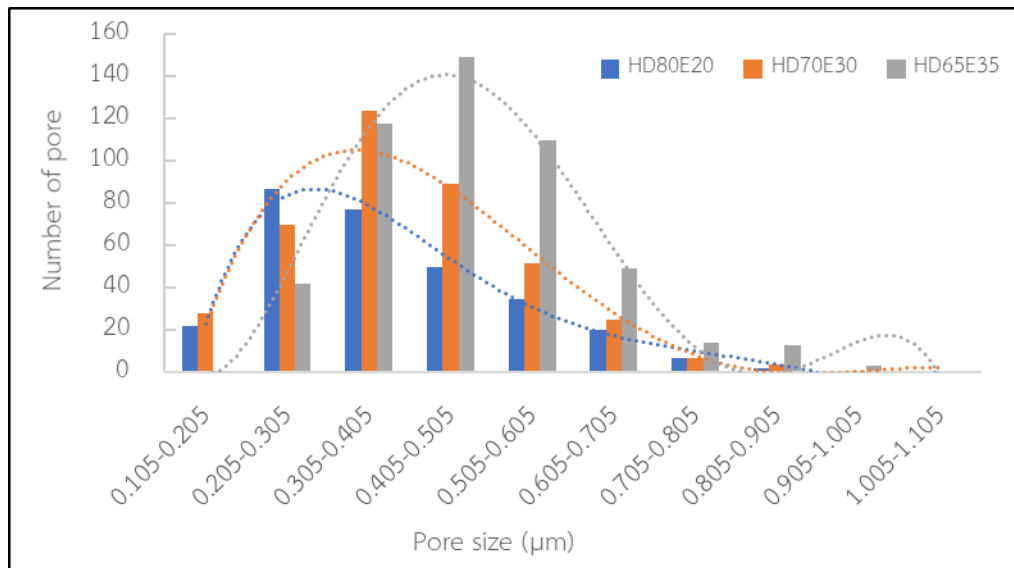


(d) HD70E30



(e) HD65E35

ภาพที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม HDPE/EEA ที่สกัดวัฏภาคของ EEA ออกจากชิ้นงาน (กำลังขยาย 2000 เท่า) (—| 2 μm)



ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของ EEA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมวิเคราะห์จากภาพ SEM ในภาพที่ 4.3

ภาพรูปที่ 4.3 (a) HD100E0 มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น เรียบ แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์และสถานะที่ใช้สกัดไม่สามารถสกัดวัฏภาค HDPE ได้ ส่วนภาพที่ 4.3 (b), (c), (d) และ (e) เป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มี EEA พบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นซึ่งเป็นบริเวณที่เคมี EEA อยู่ EEA เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) อยู่ใน HDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการแตกและกระจายตัว (Dispersion และ Distribution) ของ EEA ดี คาดว่าเป็นผลมาจากสถานะการผสมที่เหมาะสม (อุณหภูมิผสม 180°C, ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm และเวลา 20 นาที) ทั้งนี้ HDPE และ EEA มีค่า Solubility parameter เท่ากับ $7.90 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ [47] และ $9.5 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ [48] ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกันทำให้ HDPE และ EEA ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (จัดเป็น Immiscible blend) [35-36] HDPE และ EEA มีส่วนของไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นเอทิลีน (Ethylene) ช่วยให้ EEA สามารถกระจายตัวไปในวัฏภาคของ HDPE ได้ดี เมื่อใช้สถานะการผสมที่เหมาะสมและมีปริมาณ EEA ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เห็นช่องว่างในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมตามภาพที่ 4.3 (b), (c), (d) และ (e) มีเพิ่มขึ้นและมีโอกาสกระจายตัวซัดกันเพิ่มขึ้น จึงทำให้ขนาดวัฏภาคของ EEA ที่กระจายตัวใน HDPE มีขนาดใหญ่ขึ้นเห็นได้จากช่องว่างในชิ้นงานที่ถูกสกัดออกมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงผลโดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SemAfore 5.21 ดังภาพที่ 4.4 พบว่าในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร HD80E20, HD70E30 และ HD65E35 มีการกระจายขนาดรูส่วนใหญ่ที่ 0.205-0.305 μm, 0.305-0.405 μm และ 0.405-0.505 μm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้วัฏภาคของ EEA โดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ยังสามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมและไม่เกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration)

4.1.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม HDPE/EEA

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม HDPE/EEA ด้วย DSC แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 เป็นค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์เป็นผลึก (X_c)

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์เป็นผลึก (X_c) ของฟิล์ม HDPE/EEA (First run)

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	X_c (%)
HD100E0	130.1	113.2	65
HD90E10	129.1	114.3	60
HD80E20	128.3	114.9	58
HD70E30	130.3	112.7	58
HD65E35	127.6	114.7	58
EEA	101.5	77.6	13

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์เป็นผลึก (X_c) ของฟิล์ม HDPE/EEA (Second run)

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	X_c (%)
HD100E0	134.2	113.9	70
HD90E10	132.5	114.2	66
HD80E20	132.1	115.7	64
HD70E30	133.8	112.7	65
HD65E35	129.4	115.8	65
EEA	99.4	77.6	14

จากข้อมูล DSC (ภาคผนวก ก) พบว่า HDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตร มี T_m ที่ประมาณ 127–135°C, T_c ที่ประมาณ 112–116°C และความเป็นผลึกที่ประมาณ 58–65% ใน First run และ 64–70% ใน Second run ส่วน EEA มีค่า T_m ประมาณ 100°C และ T_c ประมาณ 77°C แต่มีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำ (14%) เมื่อเทียบกับ HDPE เมื่อนำ HDPE และ EEA มาผสมขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะพบเฉพาะพิก T_m และ T_c ของ HDPE โดยสัดส่วนปริมาณของ HDPE ที่มีอยู่

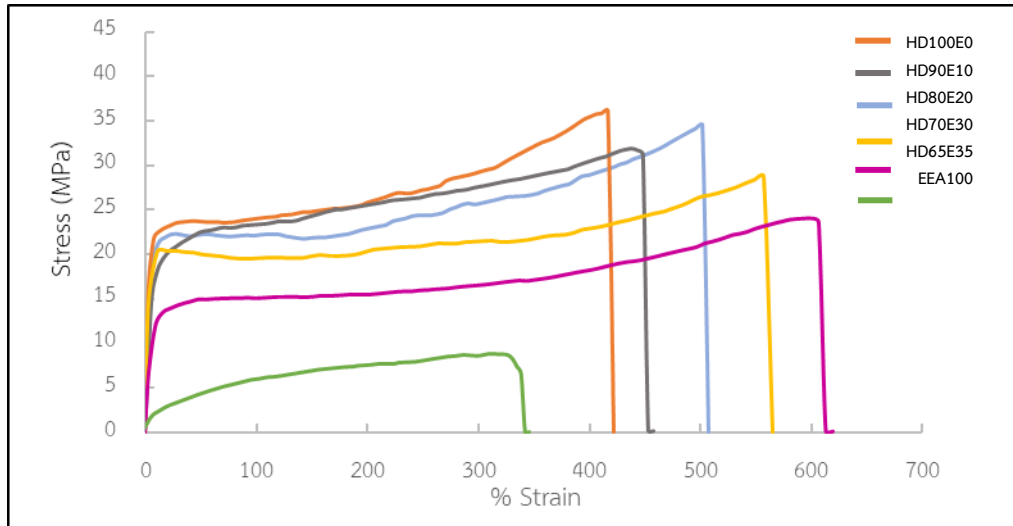
มาก ทำให้เกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วน EEA เป็นวัฏภาคกระจายจึงมีโอกาสเกิดผลึกได้น้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า EEA ไม่สามารถเกิดผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้

ดังนั้นองค์ประกอบหลักในการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์จึงมาจาก HDPE และสาเหตุที่ค่า T_m , T_c และ X_c ของ HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA เนื่องจาก HDPE และ EEA มีค่า Solubility parameter (ภาคผนวก ข) ที่แตกต่างกันจัดเป็น Immiscible blend ดังนั้น EEA ไม่ไปรบกวนการเกิดผลึกของ HDPE

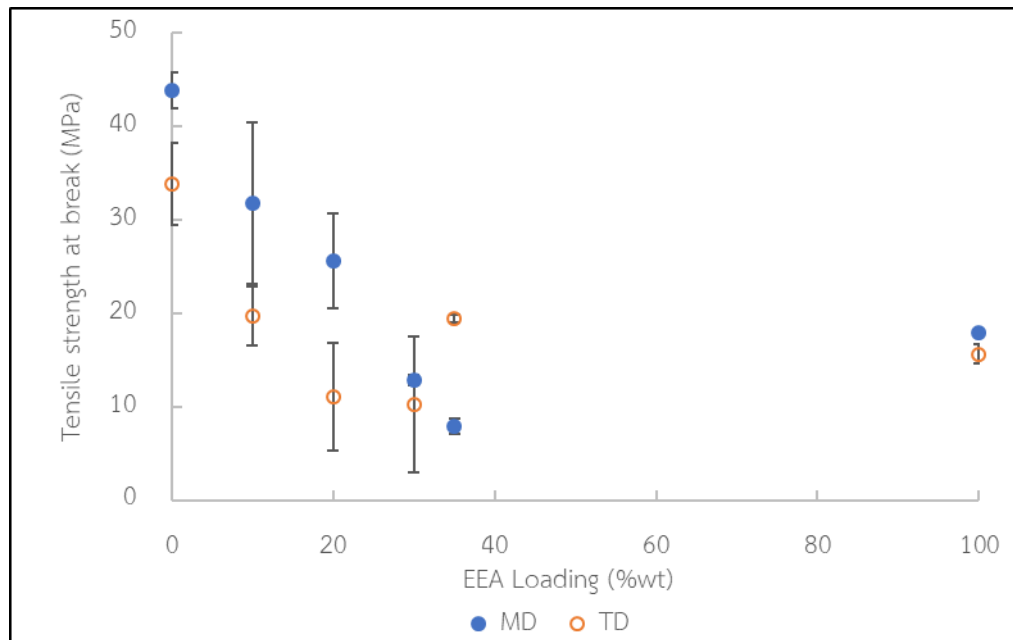
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EEA

ภาพที่ 4.5 แสดงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว MD พบว่า HD100E0 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ค่ายังมอดุลัส และค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มากกว่า EEA เนื่องจาก HDPE มีโครงสร้างสมมาตรและเป็นเส้นตรง สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้มากมีความแข็งแรง และยังสามารถในการยืดตัวสูง แต่ EEA เป็นโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเกะกะ ไม่สมมาตร ทำให้มีปริมาตรอิสระภายในโครงสร้าง (Free volume) มากจึงเกิดผลึกได้น้อย (ตารางที่ 4.2-4.3) จึงมีความยืดหยุ่นและเสียรูปได้ง่ายกว่า HDPE เมื่อปริมาณ EEA เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและค่ายังมอดุลัสลดลง ในขณะที่ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น (Flexible) และความนุ่มตัว (Softness) เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.6)

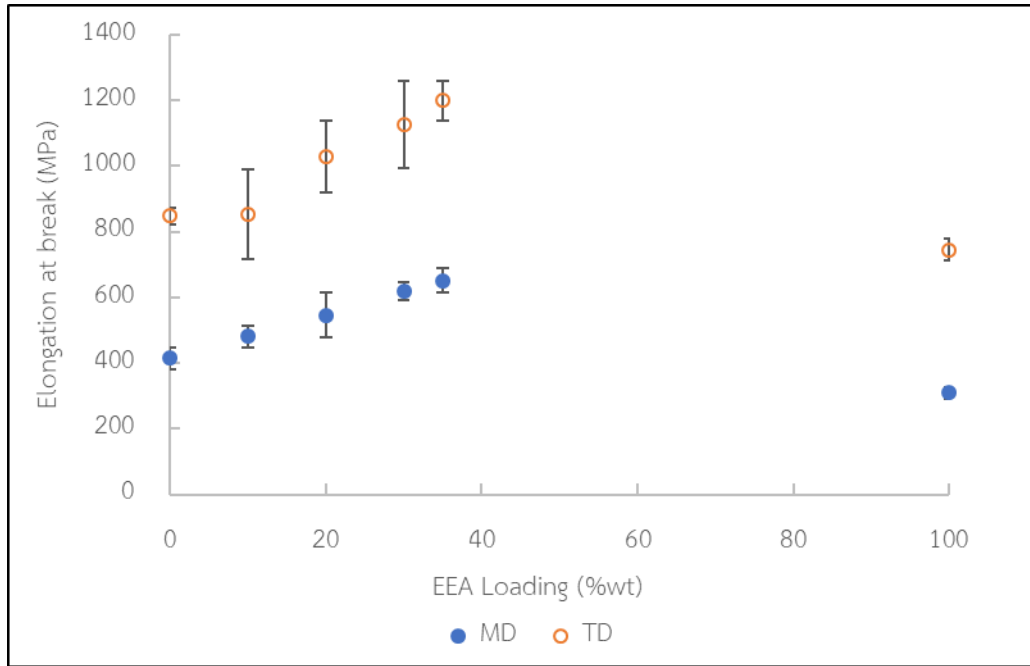
เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าส่งผลให้มีการจัดเรียงสายโซ่ (Chain orientation) ได้ 2 ทิศทาง จากงานวิจัยพบว่าการจัดเรียงในแนว MD มากกว่าแนว TD เห็นได้จากค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนว MD มากกว่าแนว TD และค่าการดึงยืด ณ จุดขาดในแนว TD มากกว่าแนว MD อย่างไรก็ตามค่ายังมอดุลัสในแนว MD มีค่าใกล้เคียงกับแนว TD คาดว่าพฤติกรรมช่วงต้นของฟิล์มเกิดจากความแข็งแรงของวัฏภาคหลัก HDPE เห็นได้จากตัวอย่างพฤติกรรมของฟิล์มในภาพที่ 4.7-4.8 ที่มีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงกันทั้งแนว MD และแนว TD



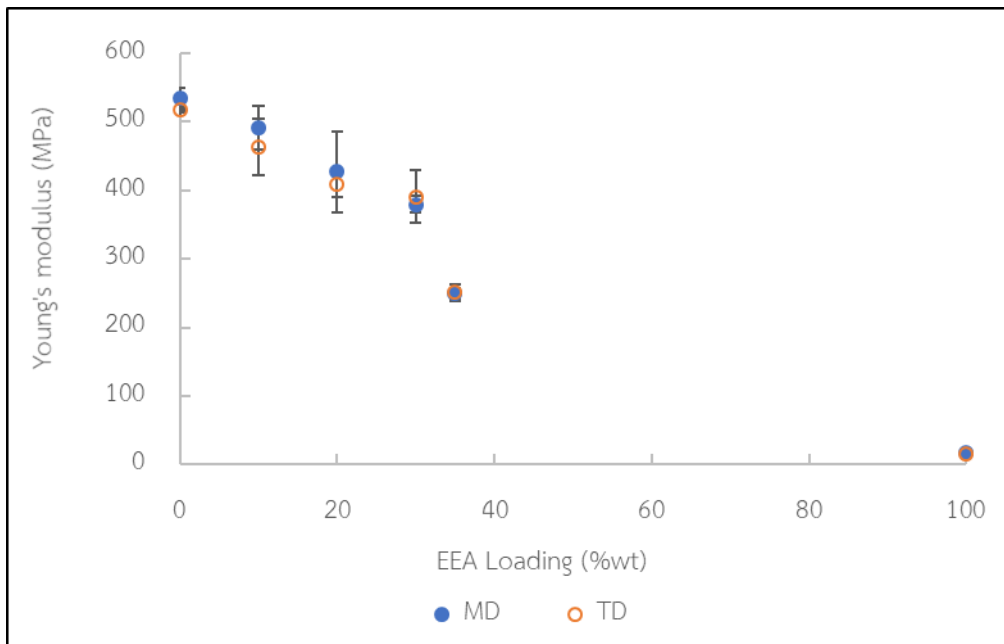
ภาพที่ 4.5 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว MD



(a) ความแข็งแรงถึง ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EEA

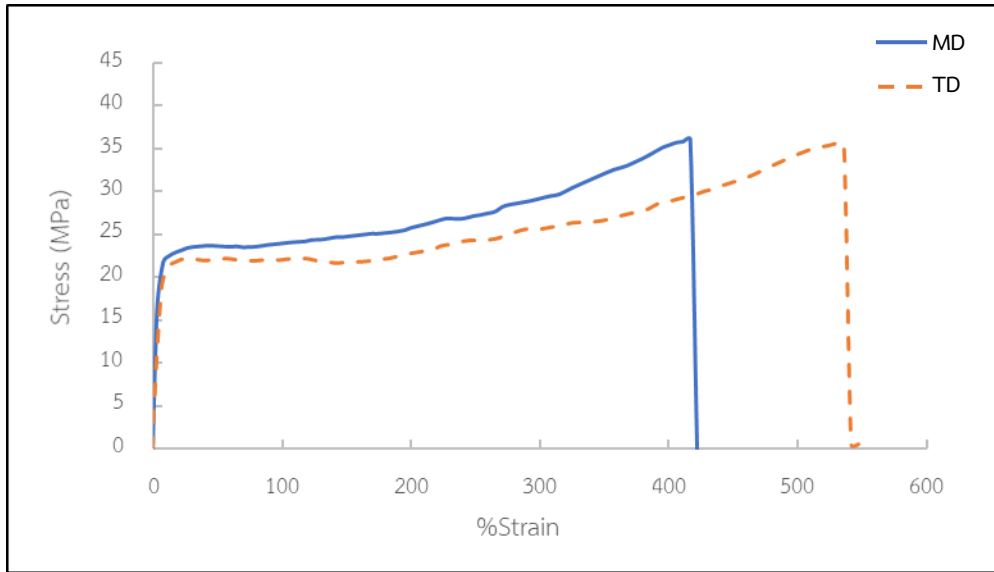


(b) การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม HDPE/EEA

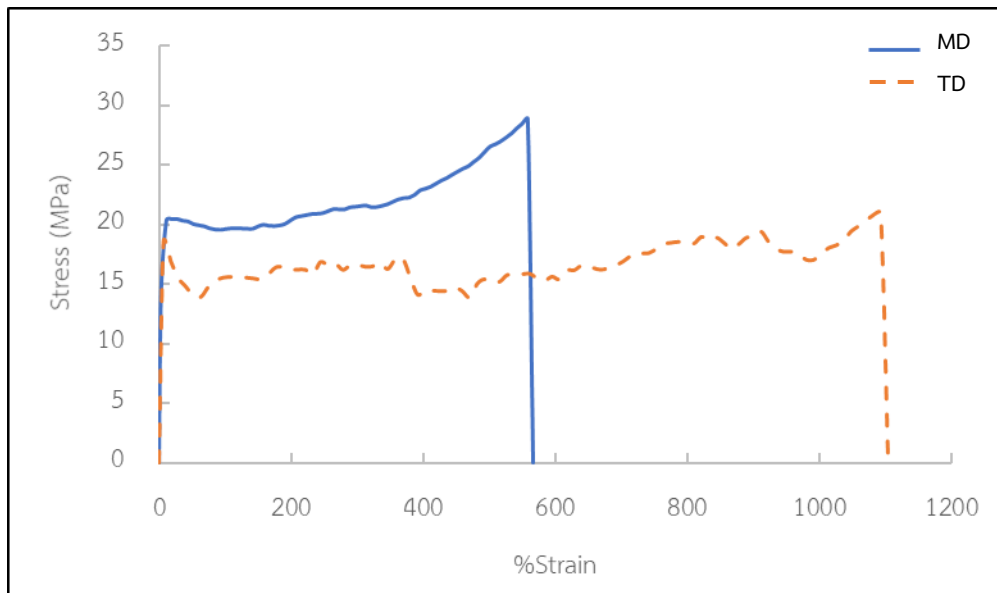


(c) ย้่งมอดุลัสของฟิล์ม HDPE/EEA

ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HDPE/EEA

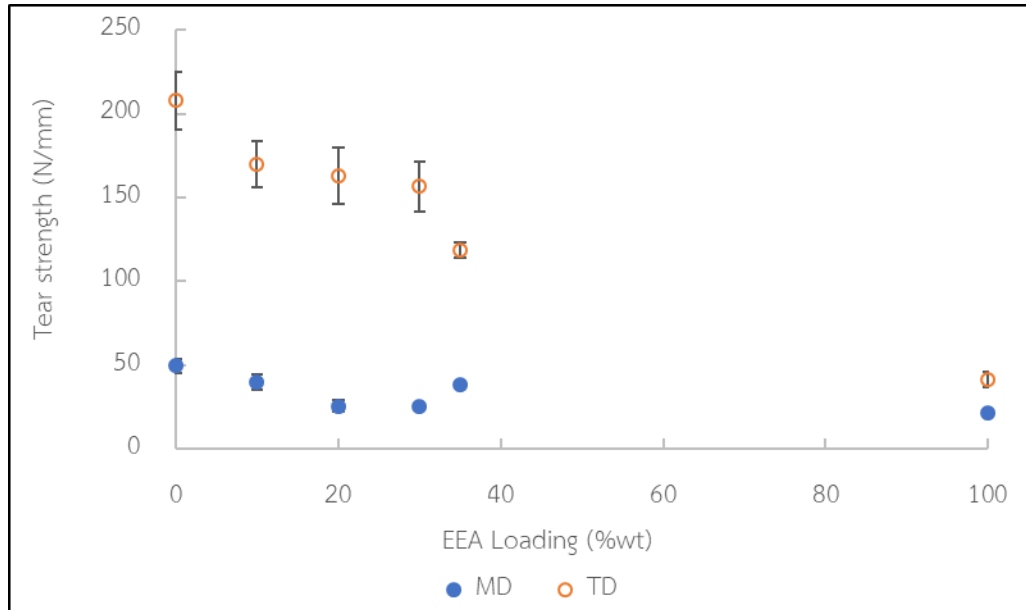


ภาพที่ 4.7 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD100E0 ในแนว MD และแนว TD



ภาพที่ 4.8 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD70E30 ในแนว MD และแนว TD

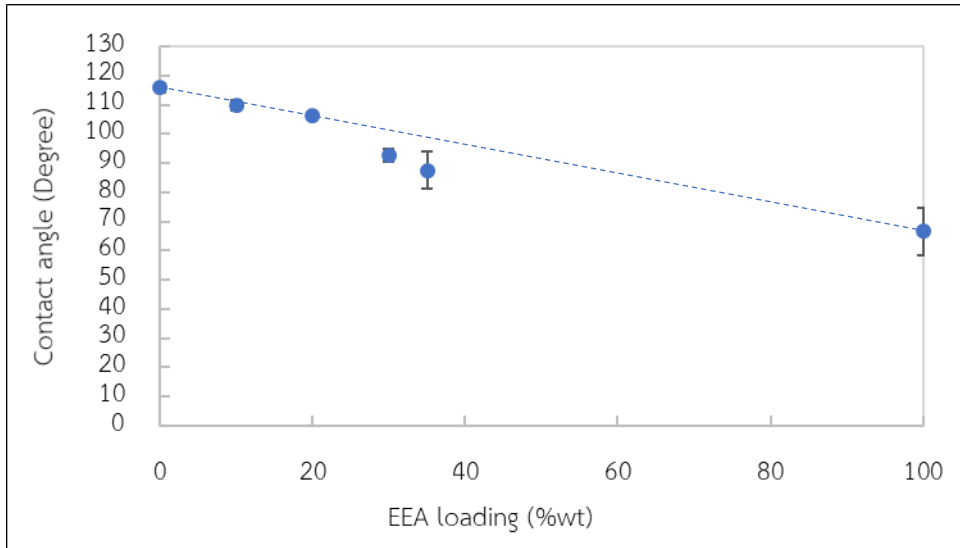
ภาพที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EEA ตามแนว MD และแนว TD พบว่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EEA มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EEA เพิ่มขึ้น เพราะฟิล์มมีความยืดหยุ่นและความนิ่มเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มในแนว TD สูงกว่าแนว MD เนื่องจากการดึงในแนว TD สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวขวางทิศทางการให้แรง



ภาพที่ 4.9 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม HDPE/EEA

4.1.5 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ

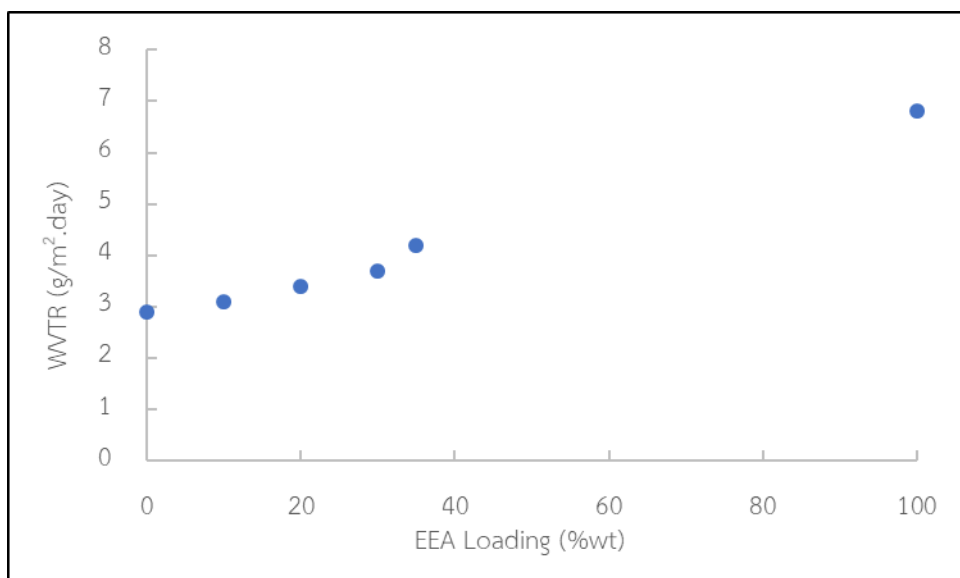
การทดสอบมุมสัมผัสที่พื้นผิวของฟิล์มกับน้ำ เป็นวิธีที่สามารถใช้ประเมินสภาพความมีขี้ของฟิล์มพอลิเมอร์ทางอ้อม เนื่องจาก EEA เป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้มากกว่า HDPE เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้พอลิเมอร์มีขี้และความชอบน้ำเพิ่มขึ้น สมบัติการเปียกผิวจึงเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้ำจึงมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าครรชนีหมู่คาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.2) แต่เนื่องจากขณะเตรียมชิ้นงาน (ตัดด้วยใบมีด) ชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีการยืดตัวเกิดขึ้น (Yield) โดยวัฏภาคของ EEA ซึ่งมีความยืดหยุ่นและนุ่มกว่า HDPE เคลื่อนมาปิดทับวัฏภาคของ HDPE บางส่วน ทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่ได้ของสูตรที่มี EEA สูง (35%) ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงระหว่าง HD100E0 กับ EEA ดังภาพที่ 4.10



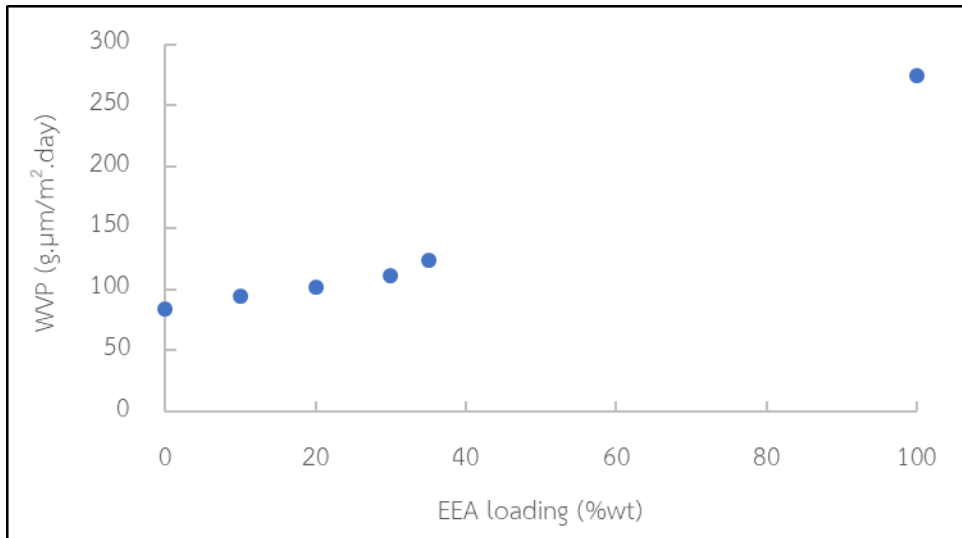
ภาพที่ 4.10 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA

4.1.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

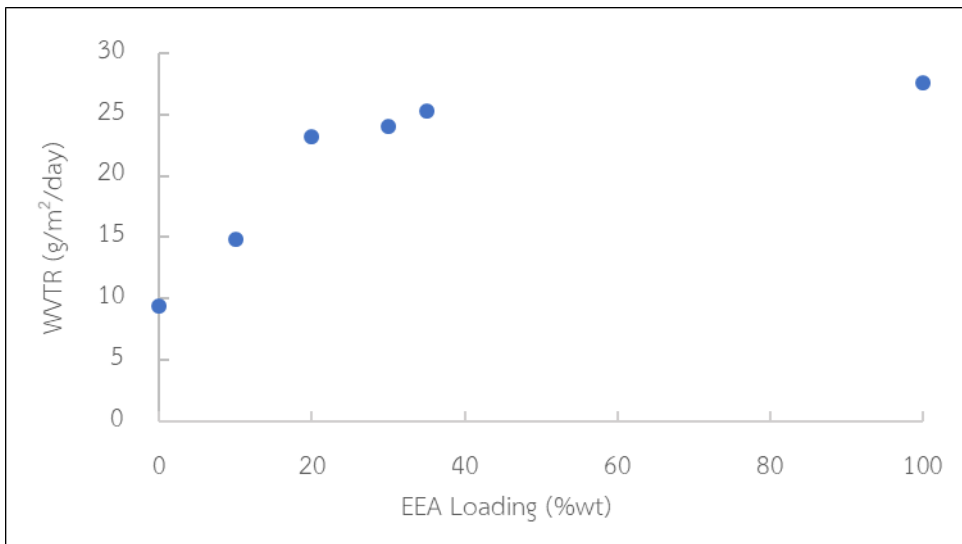
ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.11 โดยทั่วไปการวัดการซึมผ่านไอน้ำ นิยมรายงานค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) แต่ในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบนั้นมีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อลดปัจจัยด้านความหนา เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่หนามีปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์มาก ทำให้ไอน้ำเคลื่อนที่ได้ยาก จึงมีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองในรูปของความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor Permeability, WVP) ร่วมด้วย โดยวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง



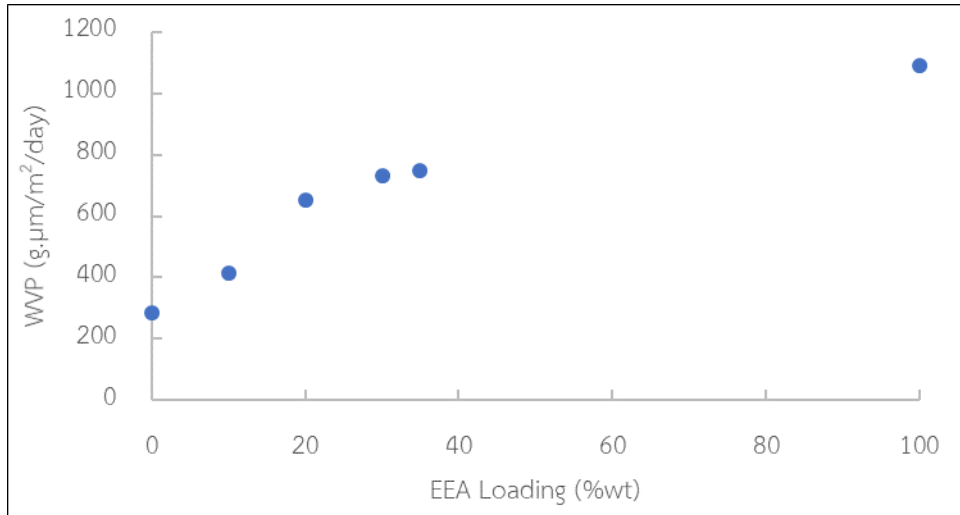
(a) อัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สภาวะทดสอบ 25°C



(b) ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สภาวะทดสอบ 25°C



(c) อัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สภาวะทดสอบ 38°C

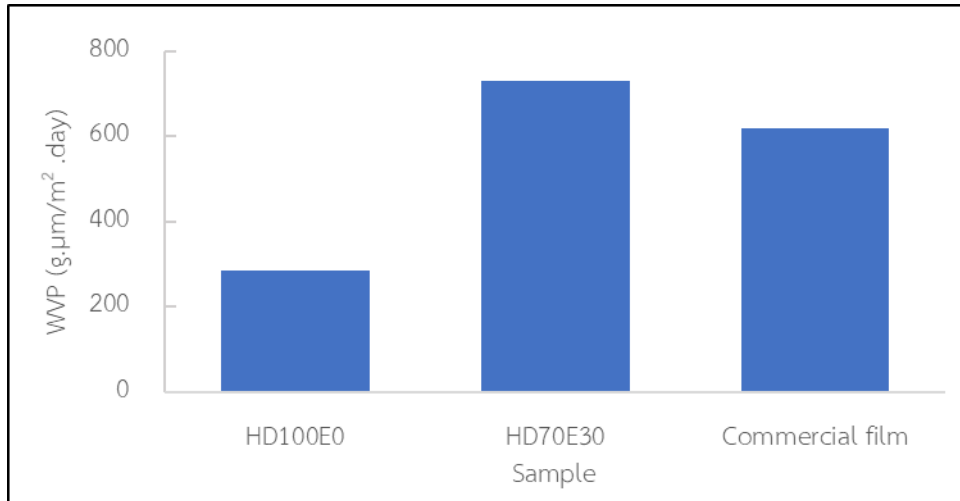


(d) ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สภาวะทดสอบ 38°C

ภาพที่ 4.11 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA เมื่อมี EEA ในปริมาณต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.10 เมื่อปริมาณ EEA เพิ่มขึ้น สภาพผิวของฟิล์มและความสามารถในการเปียกผิวของฟิล์ม HDPE/EEA เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA (ภาพที่ 4.11) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EEA เป็นการลดชั้น HDPE ซึ่งเป็นชั้นกีดขวาง (Barrier) ลดระยะทางของชั้นกีดขวางในการซึมผ่านไอน้ำ (Diffusion pathway) และการเพิ่มปริมาณ EEA เป็นการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาตรอิสระในฟิล์มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มสภาพผิวให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ทำให้ฟิล์มเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับไอน้ำจึงสามารถเหนี่ยวนำไอน้ำให้มาเปียกที่ผิวของฟิล์มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความแตกต่างความเข้มข้น (Concentration gradient) ของไอน้ำ

จากการใช้อุณหภูมิในการทดสอบต่างกัน พบว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า (ภาพที่ 4.11 (c) และ (d)) จะให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มากกว่า เพราะ ณ สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิสูงมีปริมาณไอน้ำและความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า



ภาพที่ 4.12 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะทดสอบอุณหภูมิ 38°C







จากภาพที่ 4.11 เมื่อมีปริมาณ EEA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของฟิล์มสูตร HD65E35 จากลักษณะทางกายภาพ พบว่าผิวของฟิล์มไม่เรียบและมีความหนาไม่สม่ำเสมอบางบริเวณ ดังนั้นในแง่ของการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ จึงเลือกใช้ฟิล์มสูตร HD70E30 ที่มีผิวเรียบมีความสามารถการซึมผ่านไอน้ำและสมบัติเชิงกลที่ดีมาเปรียบเทียบกับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตามท้องตลาด (High permeation film) จากภาพที่ 4.12 ฟิล์มสูตร HD70E30 มีความสามารถการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตามท้องตลาด [2] จึงเหมาะที่จะนำมาใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์และสามารถนำมาพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์ได้

4.2 การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

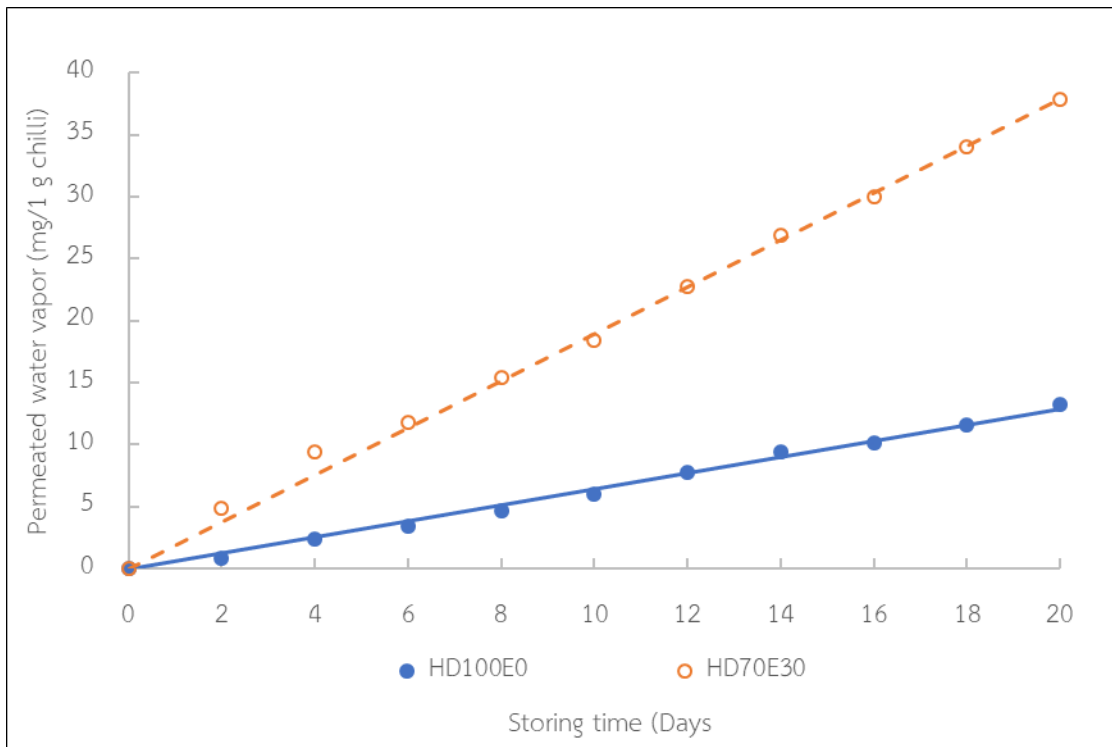
การทดสอบการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้เลือกพริกขี้หนูสดมาทำการทดสอบเนื่องจากจัดเป็นผลิตผลประเภท Non-climacteric ซึ่งไม่มีการสุกตัวหลังการเก็บเกี่ยว อีกทั้งยังมีการหายใจที่คงที่และการหายใจให้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งหากมีการเก็บสะสมไว้นานจะทำให้ผลิตผลเกิดการเน่าเสียได้ โดยการทดสอบนี้ควบคุมอายุ ปริมาณ และน้ำหนักพริกขี้หนูสดเริ่มต้นให้ใกล้เคียงกันและนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 20 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40% จากภาพที่ 4.13 แสดงพริกขี้หนูที่บรรจุภัณฑ์ก่อนและหลังการรักษาเป็นเวลา 20 วัน พริกขี้หนูสดยังคงมีสีเขียวเหมือนเดิมเพราะไม่มีการสุกหลังการเก็บเกี่ยว แต่จะเกิดอาการคล้ำที่บริเวณขั้ว การเหี่ยวที่บริเวณก้าน และมีความแน่นเนื้อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ได้แก่ การมีสีคล้ำลงของผลิตผลสด (Darkening) และการเหี่ยว (Wilting) [46]

ขณะที่เก็บพริกขี้หนูสดในบรรจุภัณฑ์ พริกขี้หนูสดยังมีการหายใจและการคายน้ำ ซึ่งไอน้ำที่เกิดจากการหายใจส่วนหนึ่งจะสามารถระบายออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ และไอน้ำที่เหลือจะถูกกักเก็บอยู่ในบรรจุภัณฑ์ (ภาคผนวก จ) ซึ่งปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทขึ้นกับอัตราการซึมผ่านไอน้ำของ

บรรจุภัณฑ์ หากซึมผ่านออกไปได้ดี จะมีปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทมาก ในทางกลับกันปริมาณไอน้ำกักเก็บจึงเหลือน้อยลง โดยไอน้ำกักเก็บที่เหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์จะควบแน่นเป็นหยดน้ำ หากมีหยดน้ำเหล่านี้เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์มากส่งผลให้ผลิตผลเกิดการขึ้นแฉะและนำไปสู่การเน่าเสียได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพในการเก็บรักษาผลิตผลสดด้วยการนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ และคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์

HD100E0	HD70E30
 <p data-bbox="411 972 692 1014">ก่อนบรรจุในบรรจุภัณฑ์</p>	 <p data-bbox="968 972 1249 1014">ก่อนบรรจุในบรรจุภัณฑ์</p>
 <p data-bbox="341 1344 762 1386">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (20 วัน)</p>	 <p data-bbox="898 1344 1319 1386">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (20 วัน)</p>
 <p data-bbox="392 1704 711 1747">หลังเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์</p>	 <p data-bbox="948 1704 1267 1747">หลังเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์</p>

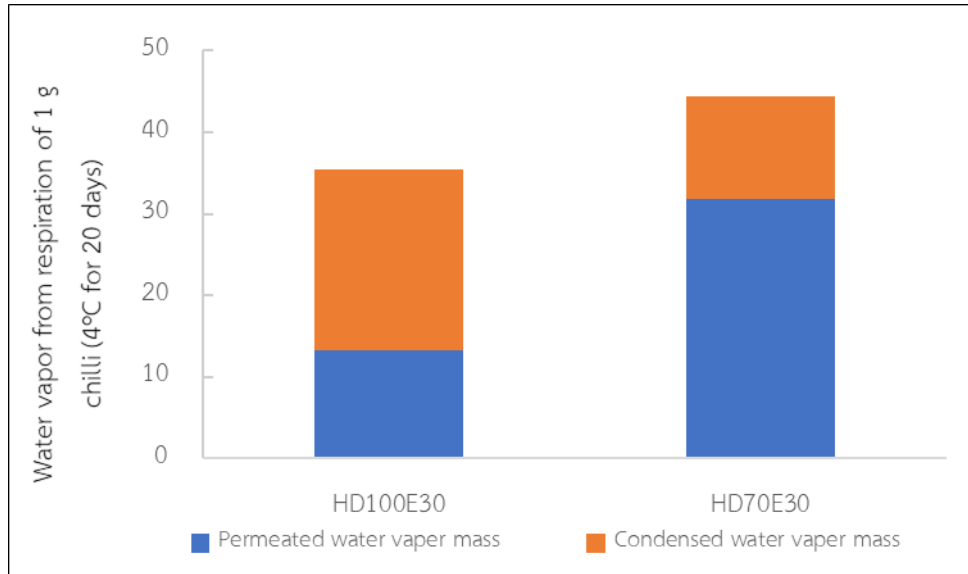
ภาพที่ 4.13 ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40%



ภาพที่ 4.14 ปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกมาจากบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลา 20 วัน

ระหว่างเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในบรรจุภัณฑ์ทุก ๆ 2 วัน จนครบ 20 วัน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของบรรจุภัณฑ์แสดงให้เห็นถึงการหายใจของพริกซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลักคือไอน้ำ และไอน้ำส่วนหนึ่งสามารถซึมผ่านออกนอกถุงบรรจุภัณฑ์ได้ ทำให้น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์และพริกลดลงไปจากวันแรก จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่สามารถซึมผ่านออกจากรูบรรจุภัณฑ์และจำนวนวันในการเก็บรักษา โดยเมื่อจำนวนวันมากขึ้นพบว่าไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมีปริมาณมากขึ้น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงไม่ว่าจะเป็นฟิล์มสูตรใด ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร HD70E30 มีปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านออกไปมากกว่า สอดคล้องกับค่า WVTR

จากการเก็บรักษาพริกที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ครบ 20 วัน สามารถคำนวณหาปริมาณไอน้ำรวมที่พืชหายใจได้จากปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากรูบรรจุภัณฑ์ร่วมกับปริมาณไอน้ำกักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง และแสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร HD70E30 สามารถระบายไอน้ำออกจากบรรจุภัณฑ์ได้มากกว่า เนื่องจากมีค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่า HD100E0 จึงมีปริมาณไอน้ำกักเก็บน้อยกว่า ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวเหมาะกับการนำไปใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดทางการเกษตรได้



รูปที่ 4.15 ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการหายใจต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยเอทิลีนเอทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (EEA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีวัฏภาคอสัณฐานและมีขั้ว จากการศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE/EEA (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 65/35 และ 0/100) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. พอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA เป็น Immiscible blend โดย EEA มีการกระจายตัวที่ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และ EEA ไม่รบกวนการเกิดผลึกของ HDPE การเพิ่มขึ้นของ EEA ทำให้สมบัติเชิงกล คือความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ยังมอดูลัส และความแข็งแรงจิกขาดมีแนวโน้มลดลง

2. จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม HDPE/EEA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ค่าดัชนีการบอณิลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการวัดมุมสัมผัสที่มุมสัมผัสมีค่าลดลง นั่นคือ EEA ที่เป็นโคพอลิเมอร์ผสมช่วยให้ฟิล์มมีสภาพขั้วเพิ่มขึ้น ทำให้มีสมบัติในการเปียกที่ผิว (Surface wettability) ดีขึ้น

3. จากการศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่าเมื่อปริมาณ EEA เพิ่มขึ้นความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EEA เป็นการลดชั้น HDPE ซึ่งเป็นชั้นกีดขวาง (Barrier) ลดระยะทางของชั้นกีดขวางในการซึมผ่านไอน้ำ (Diffusion pathway) และเป็นการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้เกิดความแตกต่างความเข้มข้น (Concentration gradient) ของไอน้ำ

4. จากการศึกษาการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ ในการเก็บรักษาพริกชี้หนูสดในช่องแช่แข็งตู้เย็นที่ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เป็นเวลาที่ 20 วัน โดยทดสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่าง HD100E0 กับ HD70E30 พบว่าบรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม HD70E30 มีมวลไอน้ำที่ซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ได้มากและมีมวลไอน้ำที่กักเก็บสะสมอยู่น้อย ทำให้มีโอกาสในการเก็บรักษาพริกชี้หนูสดโดยปราศจากการเน่าเสียอันเนื่องมาจากไอน้ำจากการหายใจของพืช

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร HD70E30 กับฟิล์มในท้องตลาดที่มีการซึมผ่านไอน้ำสูง (High permeation film) พบว่าฟิล์ม HD70E30 มีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (730 g.µm/m²/day) ซึ่งสูงกว่าฟิล์มในท้องตลาด ดังนั้นจึงสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อาจปรับเปลี่ยนคู่พอลิเมอร์ผสมให้มีดรรชนีการไหลใกล้เคียงกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมลดปัญหาในกระบวนการผลิตฟิล์ม

2. อาจใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการผลิตฟิล์มทั้งนี้เพื่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ โดยการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่มีโอกาสทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงสมบัติเชิงกลที่ดีแม้ว่ามีโคพอลิเมอร์ผสมอยู่ แต่การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาจทำให้ปริมาณผลึกของฟิล์มเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง จึงต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลและค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทวรรณ ม่วงมี. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [2] ณัฐริกา ใจสมบูรณ์. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [3] จูตินันท์ ศิริจันทน์. “สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แอลดีพีอี/อีเอ็มเอ/ซีโอไลต์เอ เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [4] จิตรา ศักดาพิสุทธิ, เมธาวิ อุดตสูรดี และรันตี บุญตา. “การปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH และซีโอไลต์เอ.” โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [5] บุญนรงค์ โคนุก, ปาลิตา ช่วยสกุล และภัสรา บัวแก้ว. “การปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเอชดีพีอีด้วยอีเอ็มเอเพื่อใช้ในการบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณ์สด.” โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [6] eFunda, Inc. “Ethylene/methyl acrylate” 2013. [online]. Available: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=5.
- [7] eFunda, Inc. “Ethylene/methyl acrylate” 2013. [online]. Available: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=4.
- [8] สังคม เศรษฐศาสตร์. “เอกสารประกอบการเรียนสรีรวิทยาของพืชสวนบทที่ 4 สรีรวิทยาการสุกของผล.” ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2552.
- [9] สมชาย กล้าหาญ. “วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวของผัก.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [10] พีรเดช ทองอำไพ. “การสุกของผลไม้” 2557. [online]. Available: <http://www.thaikasetsart.com/การสุกของผลไม้/>.

- [11] จิรา ณ หนองคาย. “เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมสพลับลิชชิง. 2534.
- [12] สายชน เกตุษา. “สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” นครปฐม: สำนักพิมพ์ส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. 2528.
- [13] ดนัย บุญเกียรติ และนิชิยา รัตนานนท์. “การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2535.
- [14] งามทิพย์ ภู่วโรดม. “การบรรจุอาหาร.” กรุงเทพฯ: เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด. 2550
- [15] จริงแท้ ศิริพานิช. “สรีรวิทยาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [16] D. Zagory and A.A. Kader. “Modified atmosphere packaging of fresh produce.” **Food Technology**. 42 (1988) 70-77.
- [17] F.A. Paine and H.Y. Paine. “**A handbook of food packaging**” 2012. [online]. Available: <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/015map.pdf>.
- [18] N. Mir and R.M. Beaudry. “**Modified Atmosphere Packaging**” 2012. [online]. Available: <http://www.ba.ars.usda.gov/nb66/015map.pdf2012>.
- [19] R.T. Parry. “**Principles and applications of modified atmosphere packaging of food.**” Blackie. London. : Academic and Professional.
- [20] M.H. Grant and K.J. Mackenzie. “**Encyclopedia of Chemical Technology.**” New York. : John Willey & Sons Inc. 1993.
- [21] รุ่งนภา วิสิฐอุตรการ. “เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [22] ชีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์. “เคมีพอลิเมอร์.” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556.
- [23] Food Network Solution Co., Ltd. “บรรจุภัณฑ์อาหาร ตอนที่ 5 (บรรจุภัณฑ์พลาสติก).” 2554. [Online]. Available: https://http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article/0101/บรรจุภัณฑ์อาหาร-ตอนที่-5-บรรจุภัณฑ์พลาสติก.
- [24] Differencebetween. “**Difference Between HDPE and LDPE.**” 2015. [Online]. Available: [https:// http://www.differencebetween.com/difference-between-hdpe-and-vs-ldpe/](https://http://www.differencebetween.com/difference-between-hdpe-and-vs-ldpe/).

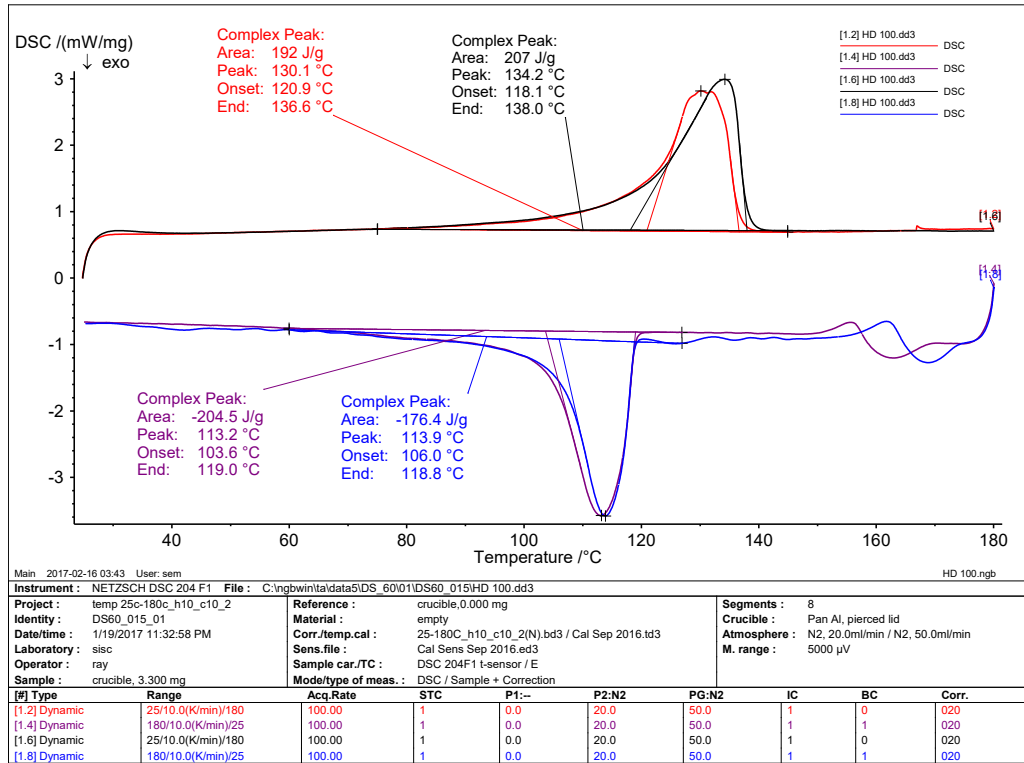
- [25] ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับ บริษัท ไทยโพลิเอทิลีน จำกัด. “การสัมมนาเรื่อง HDPE บรรจุภัณฑ์ที่ทันสมัย.” กรุงเทพฯ: ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย. 2532.
- [26] ปุ่น คงเจริญเกียรติ และสมพร คงเจริญเกียรติ. “บรรจุภัณฑ์อาหาร.” กรุงเทพฯ: บริษัท โรงพิมพ์หิ่เฮง จำกัด. 2541.
- [27] F. W. Billmeyer ,JR. “**Textbook of Polymer Science.**” New York. : John Willey & Sons Inc. 1984.
- [28] Wikipedia. “**Photo-oxidation of polymers.**” 2013. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Photo-oxidation_of_polymers.
- [29] Plastic International. “**HDPE (High density polyethylene).**” 2016. [Online]. Available: <https://www.plasticsintl.com/datasheets/HDPE.pdf>.
- [30] Polyethylene. “**Plastic moulding.**” 2004. [Online]. Available: <http://www.plasticmoulding.ca/polymers/polyethylene.htm>.
- [31] Staff of Modern Plastics Magazine. “**Plastics Handbook.**” New York. : McGraw-Hill. 1994.
- [32] SIGMA ALDRICH. “**Poly (Ethylene-co-ethyl acylate).**” 2013. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/200581?lang=en®ion=TH>.
- [33] C. A. Harper and E. M. Petrie. “**Plastics materials and process.**” Canada : Public simultaneously.. 1976.
- [34] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. “พอลิเมอร์ผสม.” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 10(1) (2543) 41-17.
- [35] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “สารปรับแต่งพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ: บั๊คเน็ต. 2547.
- [36] B. John, S. P. Thomas, K. T. Varughese , Z. Oommen and S. Thomas. “The effects of blend ratio, compatibilization and dynamic vulcanization on permeation of gases through HDPE/EVA blends.” **Journal of Polymer Research** 18 (2011) 1101-1109.
- [37] T. Chatterjee, R. Patel, J. Garnett IV, R. Paradkar, S. Ge, L. Liu, K. T. F. Jr and N. Shah. “Machine direction orientation of high density polyethylene (HDPE): Barrier and optical properties.” **Polymer** 55 (2014) 4102-4115.
- [38] Y. Chen, H. Zou, M. Liang and Y. Cao. “Melting and crystallization behavior of partially Miscible High density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends.” **Thermochimica Acta** 15 (2014) 456-843.

- [39] K.G. Gravalos, J.K.Kallitsis and N.K. Kalfoglow. "In situ compatibilization of poly(ethylene terephthalate)/Poly(ethylene-co-ethyl acrylate) blends." **Polymer** 36 (1995) 1393-1399.
- [40] American Society for Testing and Material. "**Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.**" ASTM E794-06. Annual Book of ASTM Standard 14.02. Philadelphia. 2012.
- [41] M.N. Khalaf. "**Green Polymers and Environment Pollution Control.**" Ontario : Canada. 2015.
- [42] American Society for Testing and Material. "**Standard Test Method for Tear Propagation Resistance (trouser tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by asingle Tear Method.**" ASTM D1938. Committee on Standard. 2007.
- [43] The Prospector®. "**Tear Strength - ASTM D624 Plastic Test Standard.**" 2014. [Online]. Available: http://www2.ulprospector.com/property_descriptions/ASTMD624.asp.
- [44] ASTM D5946-09 Committee on Standard. "**Standard Test Method for Corona Treated Polymer Film using water Contact Angle measurements.**" Philadelphia. American Society for Testing and Material. 2003.
- [45] ชนิกานต์ สูดพวง, วิชชุดา เย็นใจมา และสิริ เกริกมณี. "การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PP/SEBS/ZSM-5 เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์." โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [46] ญาดา จันทสมบูรณ์. "ผลของการบรรจุที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาพริกชี้ฟ้าสด." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549.
- [47] J.G. Bessetti. "**Consumable analytical plasticware comprising high solubility plastic.**" 2012. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/EP2525909A1?cl=en>.
- [48] Hildebrand and Hansen Solubility Parameters. "**Solubility parameters.**" 2004. [Online]. Available: <http://www.wag.caltech.edu/publications/sup/pdf/587.pdf>.
- [49] J. Burke. "**Solubility Parameters : Theory and Application.**" 1984. [Online]. Available: <http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v03/bp03-04.html>.

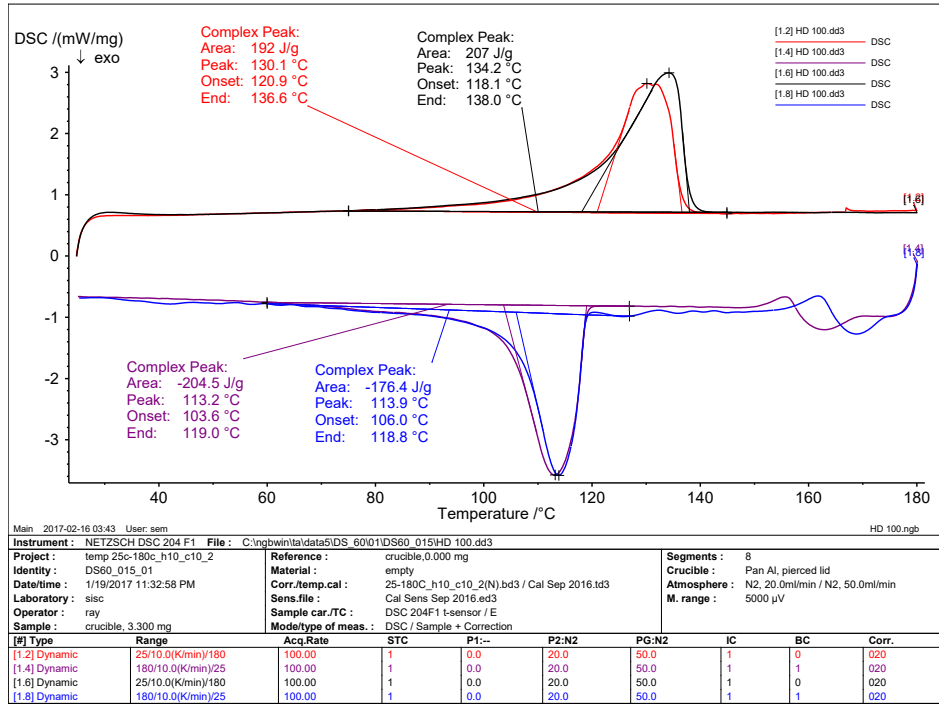
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

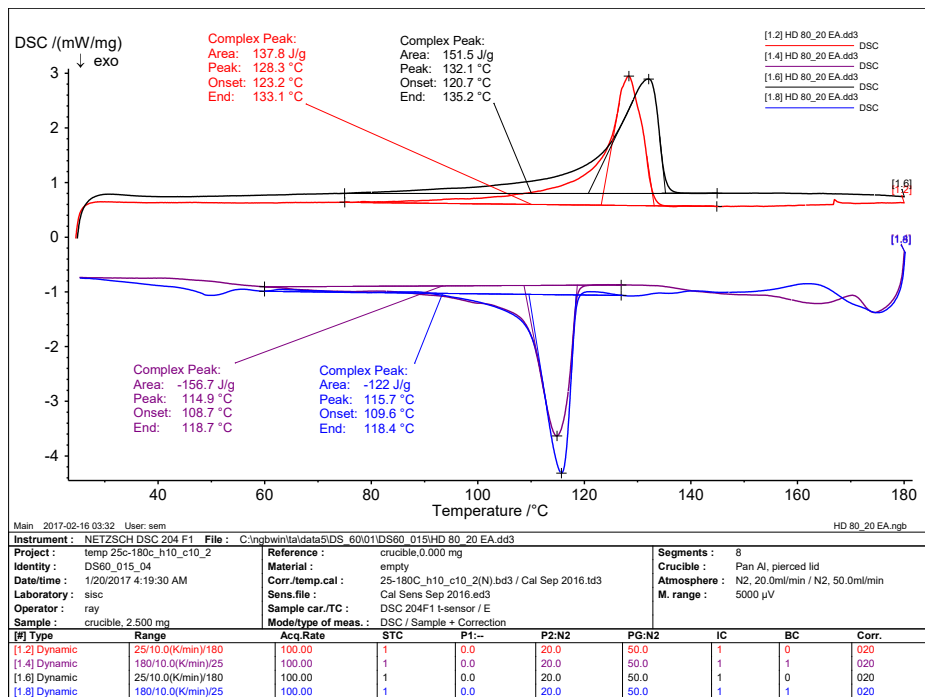
เทอร์โมแกรม DSC



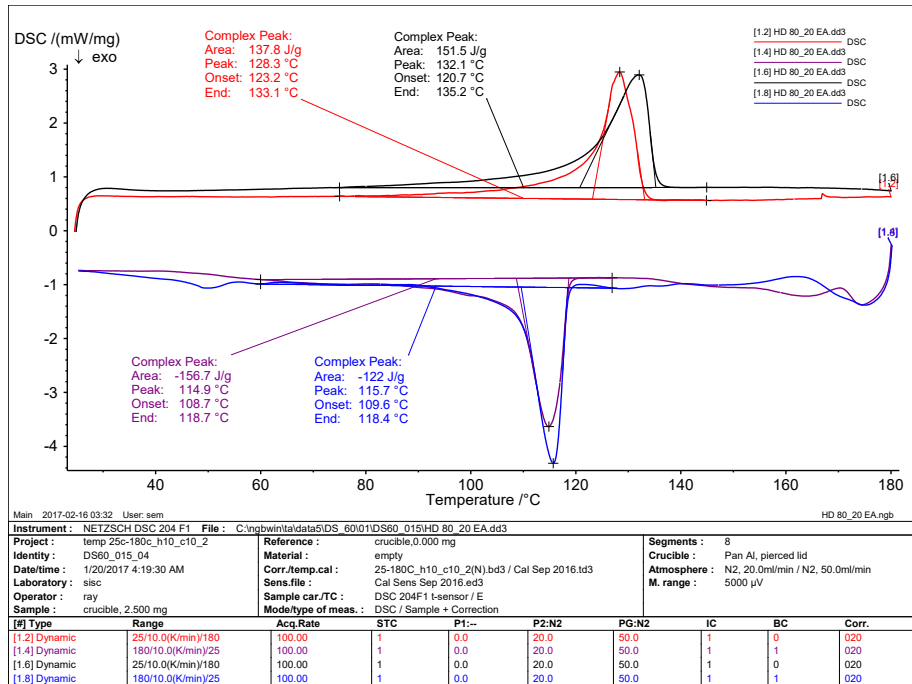
ภาพที่ ก.1 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD100E0



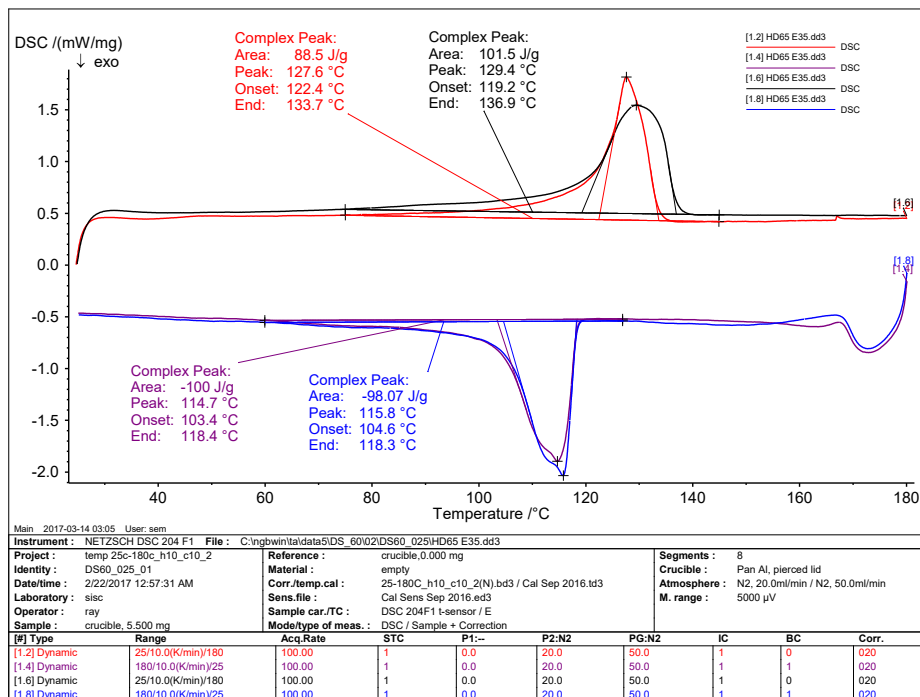
ภาพที่ ก.2 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD90E10



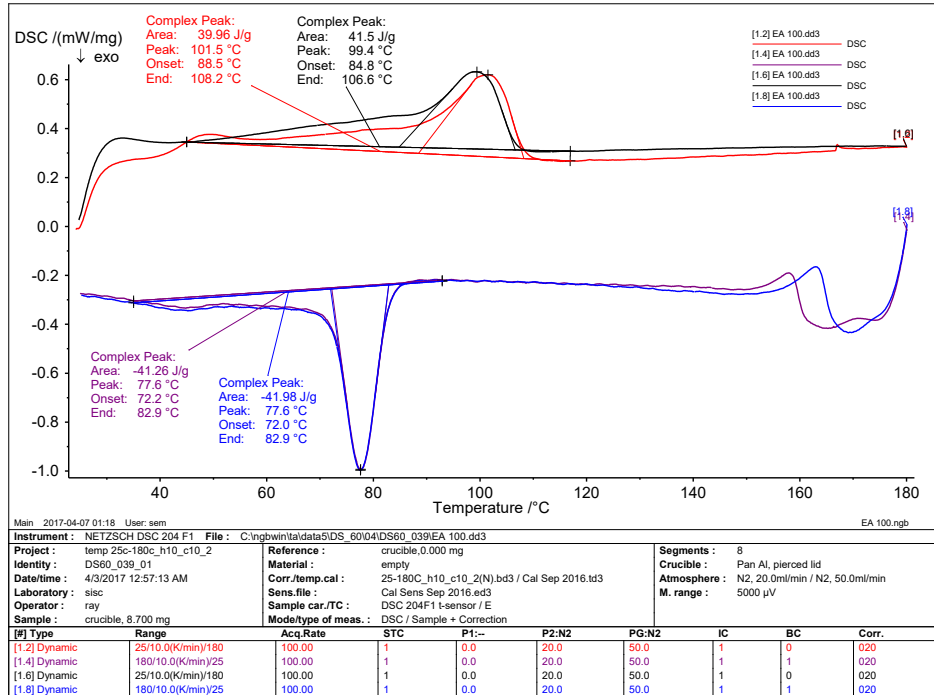
ภาพที่ ก.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD80E20



ภาพที่ ก.4 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD70E30



ภาพที่ ก.5 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม HD65E35



ภาพที่ ก.6 เทอร์โมแกรมของฟิล์ม EEA

ภาคผนวก ข

ค่า Solubility parameter

ตารางที่ ข.1 ค่า Solubility parameter ของ Polymer

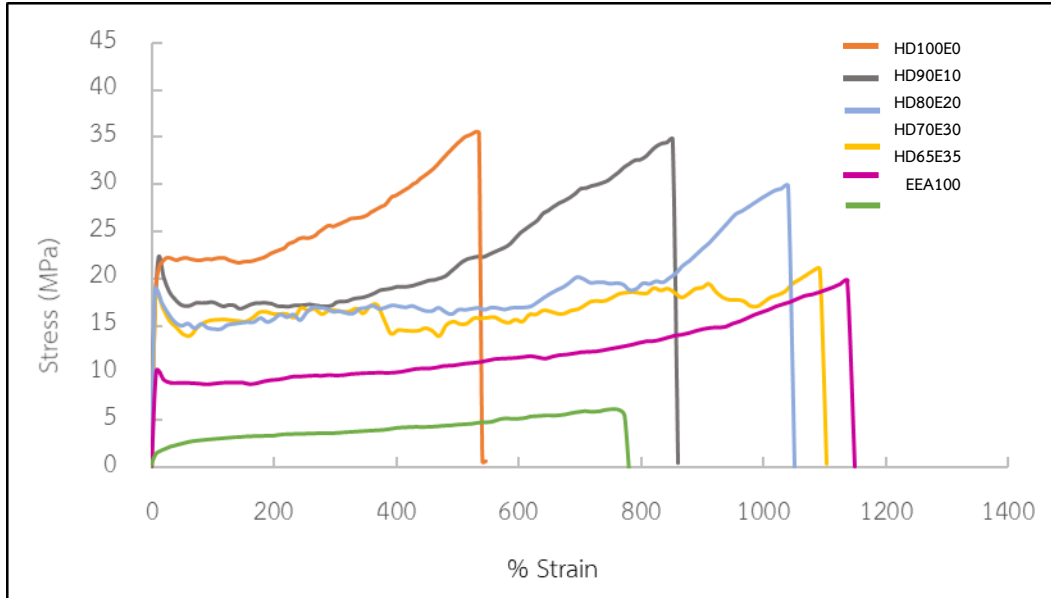
Polymer	Solubility parameter (cal/cm^3) ^{1/2}
Polyethylene [47]	7.90
EEA [48]	9.50

ตารางที่ ข.2 ค่า Solubility parameter ของ Solvent

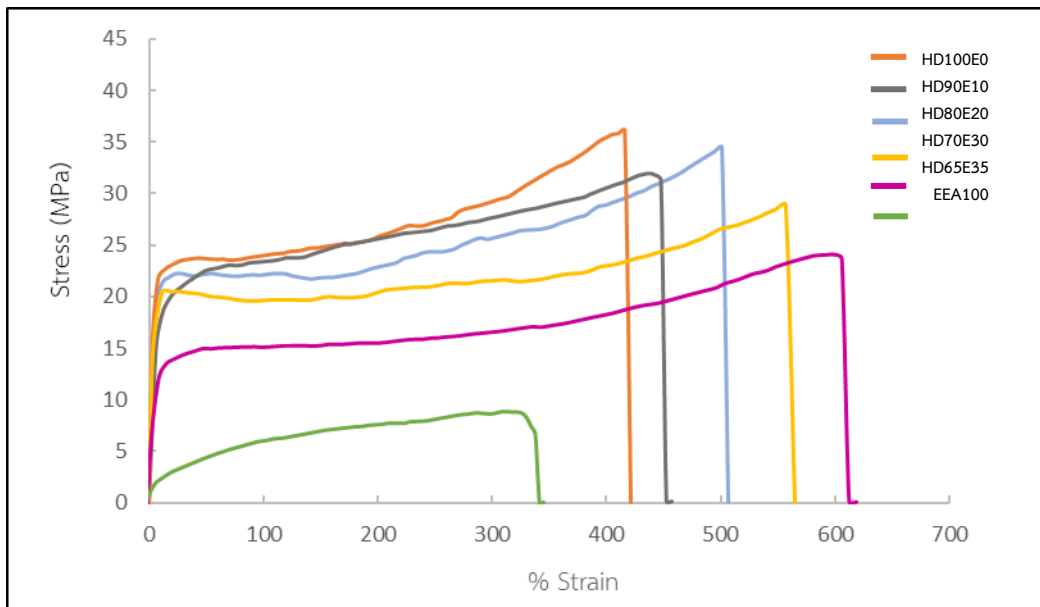
Solvent [49]	Solubility parameters (cal/cm^3) ^{1/2}
n-Haxane	7.24
Freron® TF	7.25
Diethyl ether	7.62
1, 1, 1 Trichloroethane	8.57
Cyclohexane	8.18
Carbon tetrachloride	8.65
Xylene	8.85
Ethyl acetate	9.10
Toluene	8.91
Tetrahydrofuran	9.52
Benzene	9.15
Chloroform	9.21
Trichloroethylene	9.28
Methyl ethyl ketone	9.27
Acetone	9.77
Diacetone alcohol	10.18
Ethylene dichloride	9.76
Methylene chloride	9.93
Water	23.50

ภาคผนวก ค

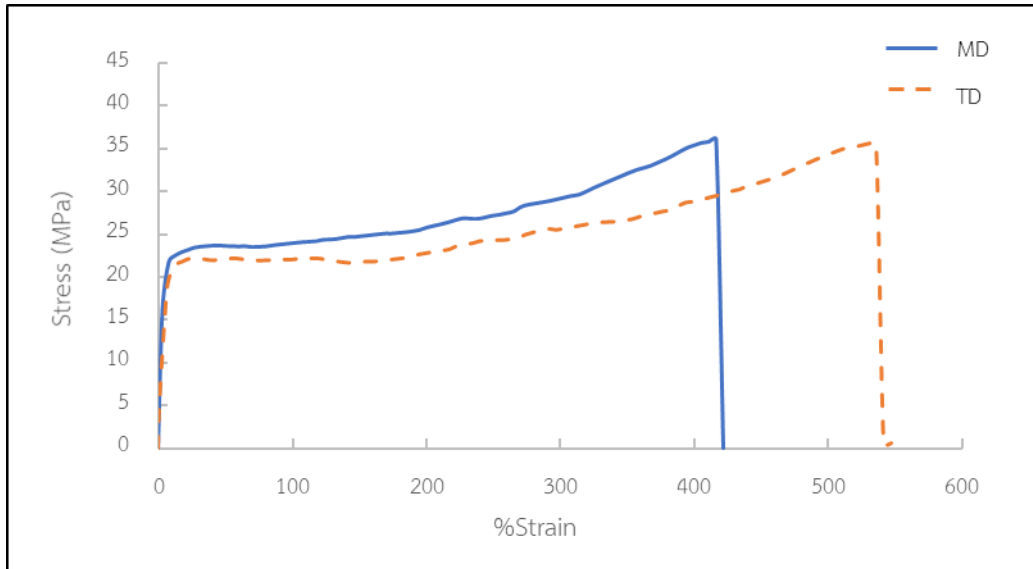
กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA



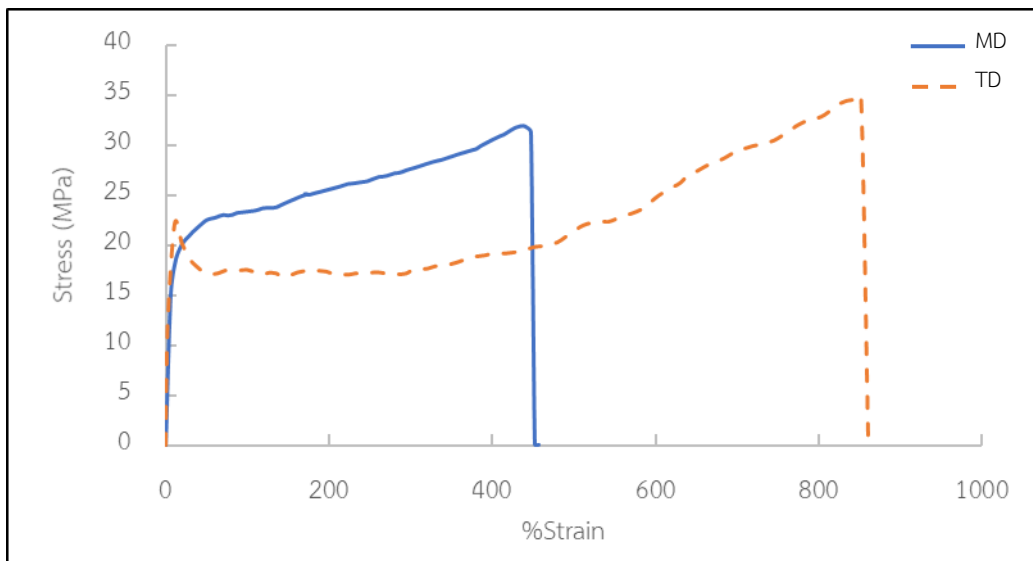
ภาพที่ ค.1 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว TD



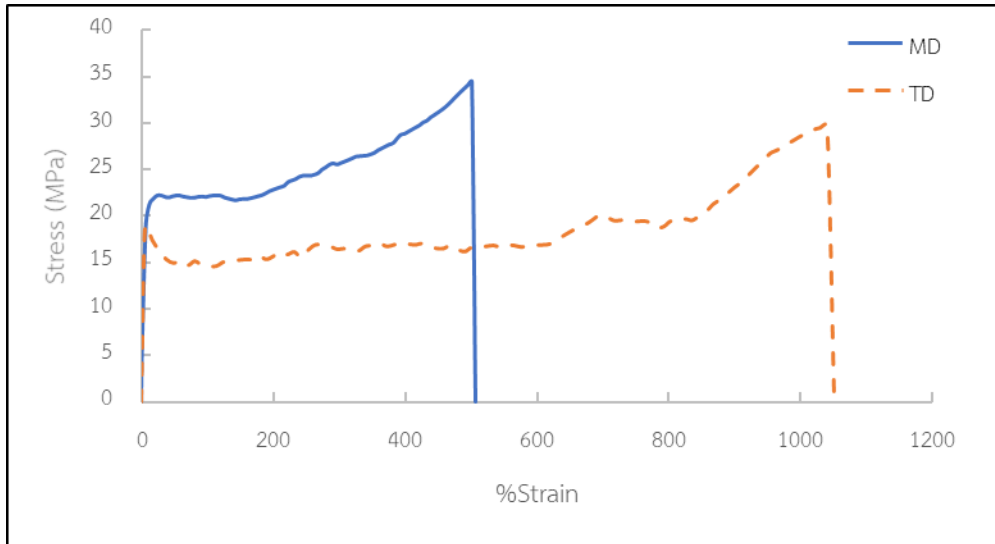
ภาพที่ ค.2 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HDPE/EEA ในแนว MD



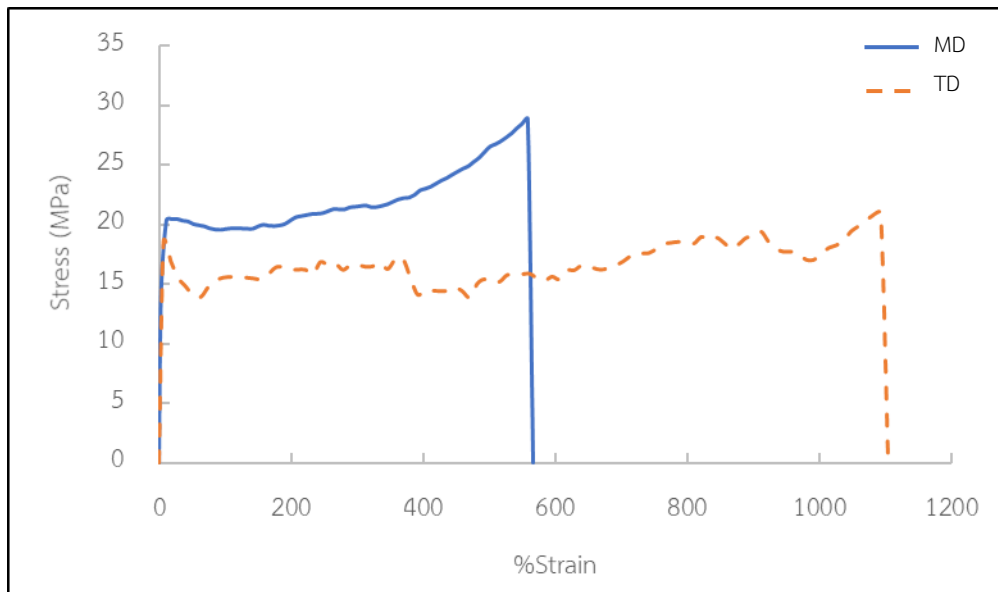
ภาพที่ ค.3 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD100E0 ในแนว MD และแนว TD



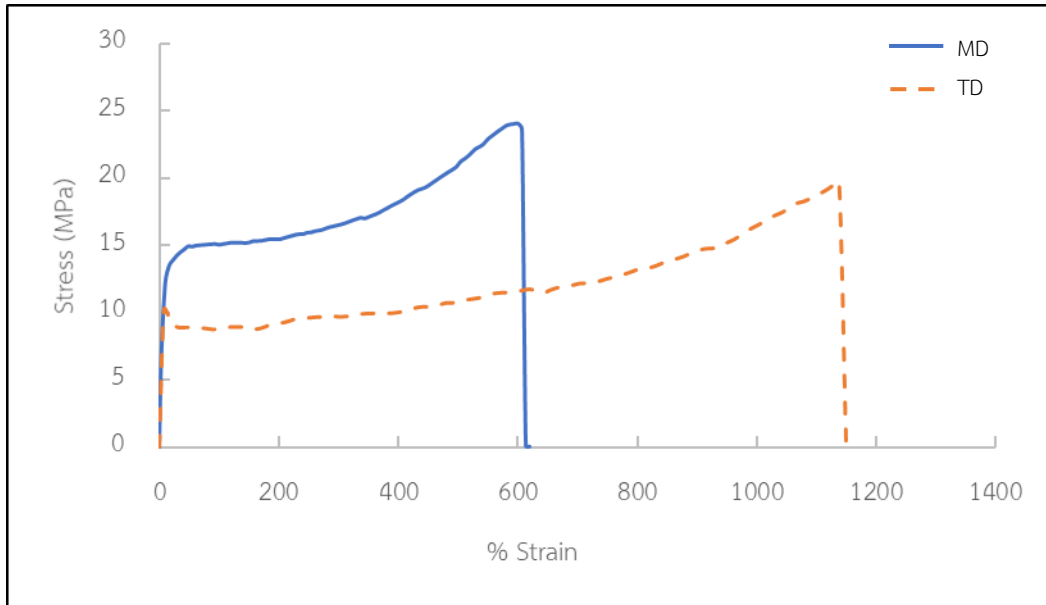
ภาพที่ ค.4 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD90E10 ในแนว MD และแนว TD



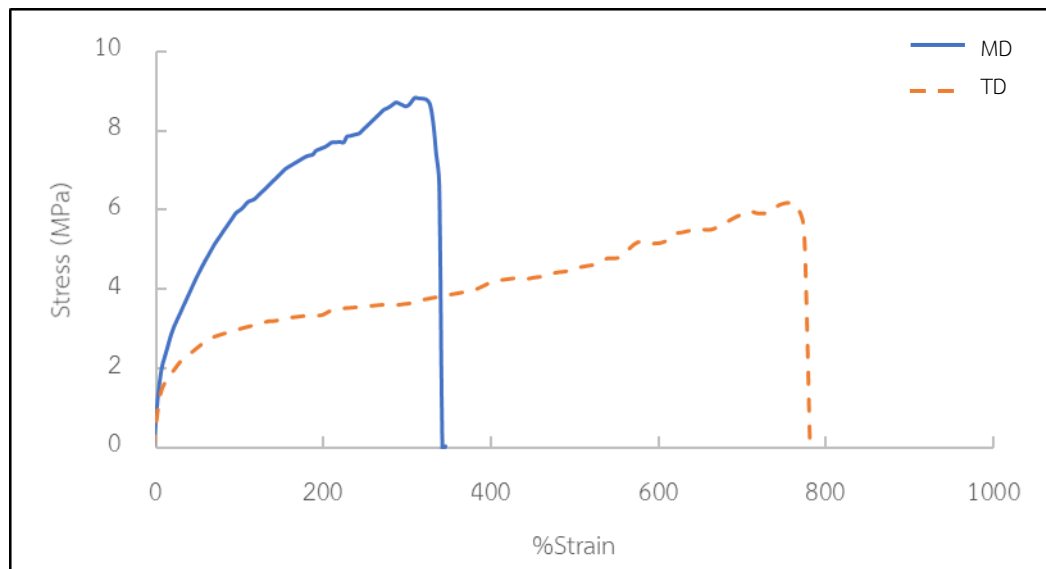
ภาพที่ ค.5 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD80E20 ในแนว MD และแนว TD



ภาพที่ ค.6 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD70E30 ในแนว MD และแนว TD



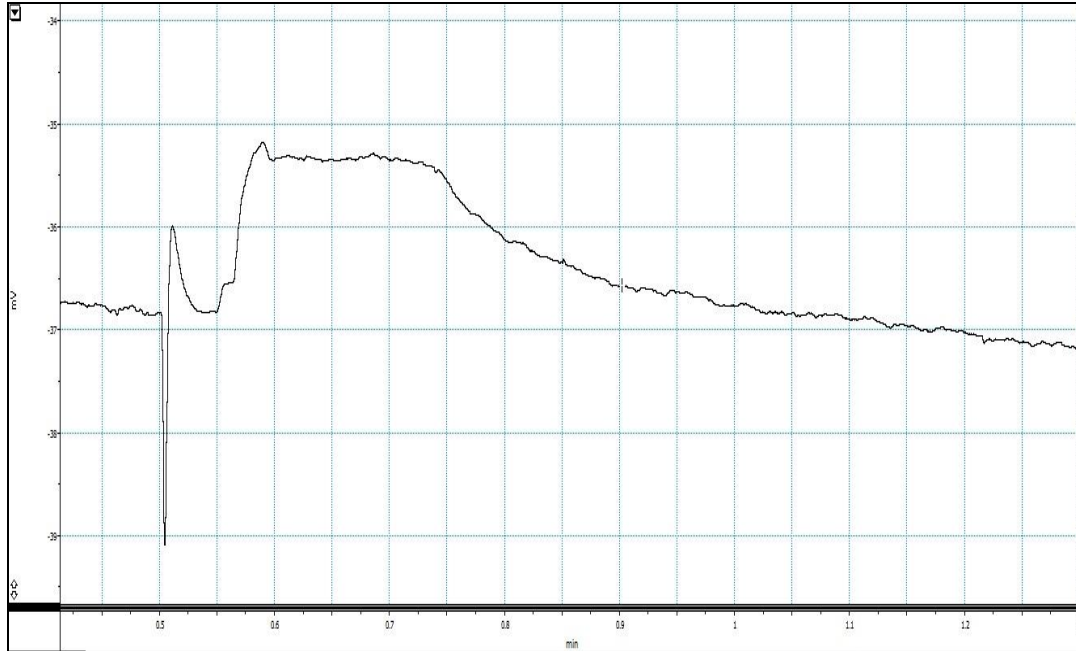
ภาพที่ ค.7 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม HD65E35 ในแนว MD และแนว TD



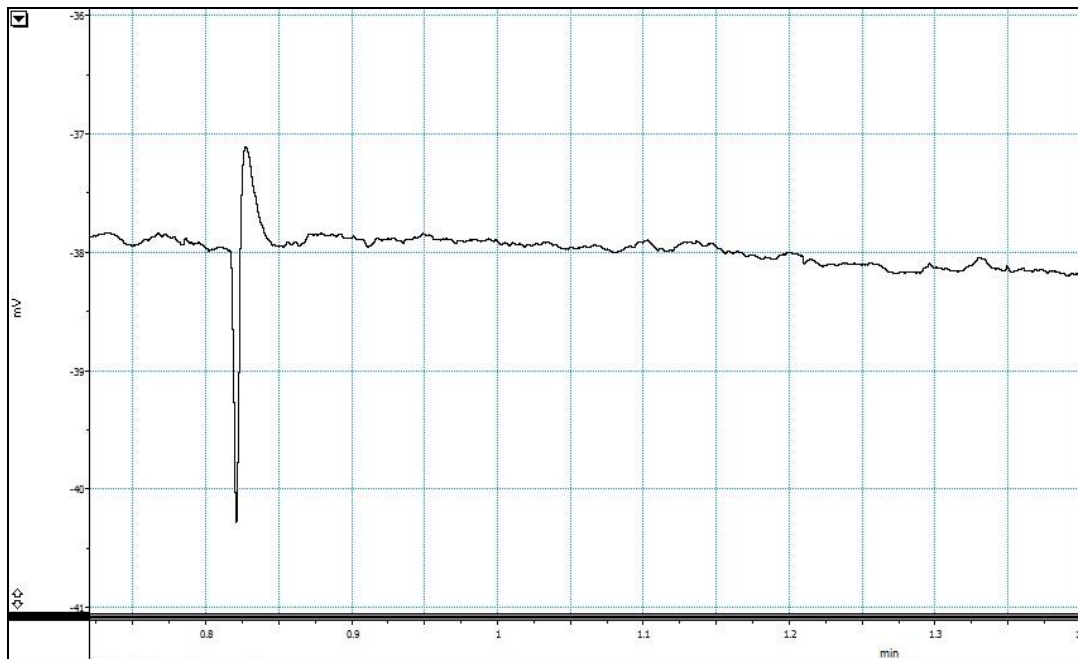
ภาพที่ ค.8 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม EEA ในแนว MD และแนว TD

ภาคผนวก ง

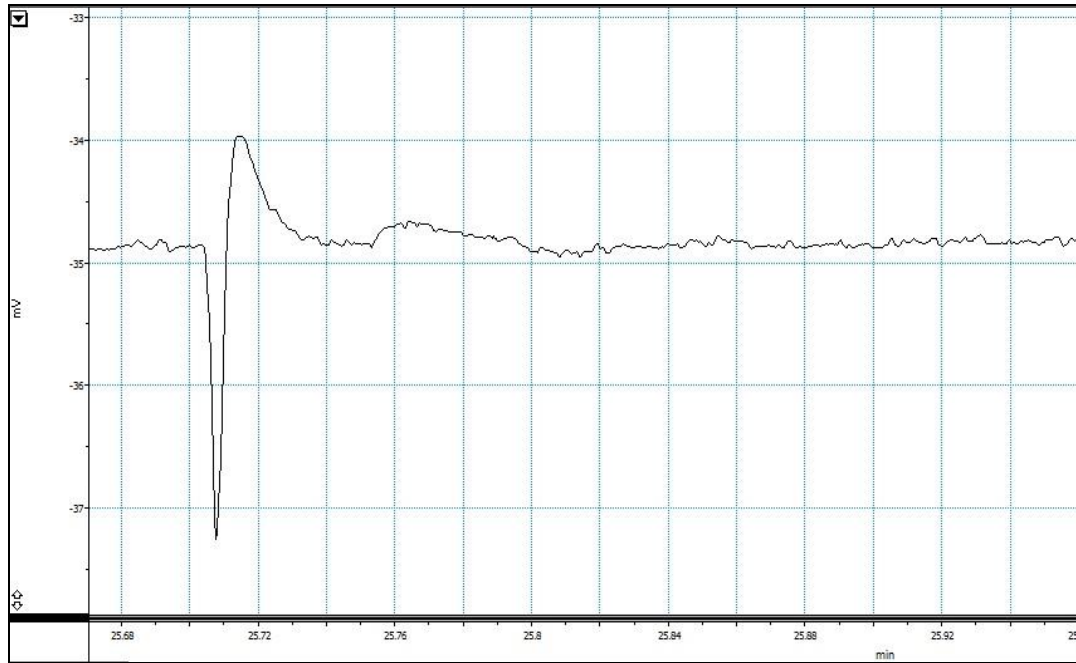
การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HDPE/EEA



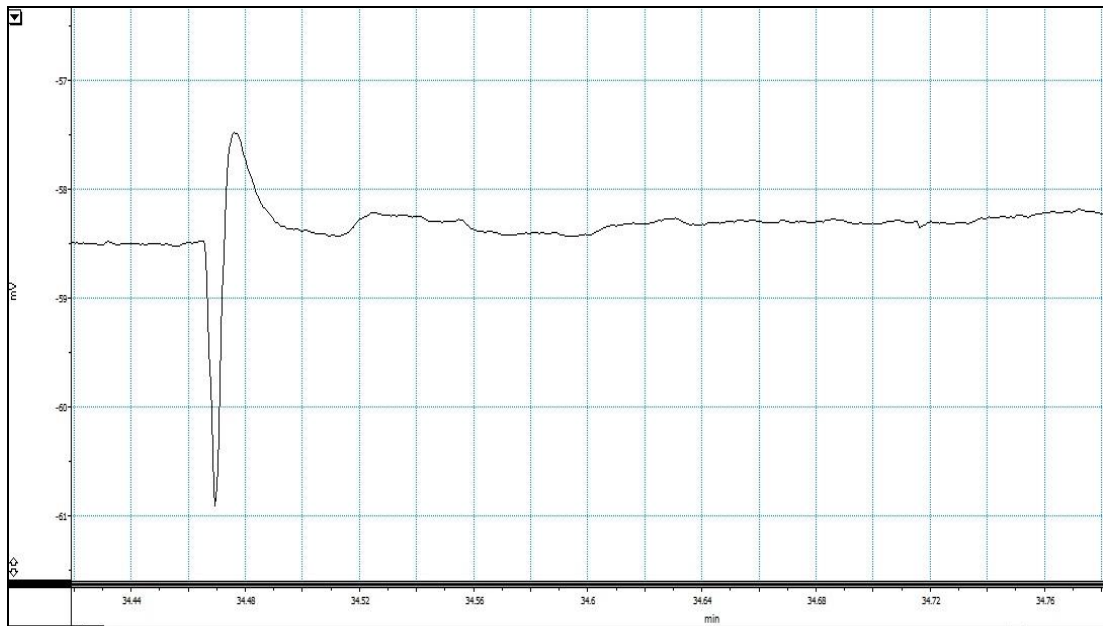
ภาพที่ ง.1 โครมาโทแกรมไอน้ำมาตรฐาน



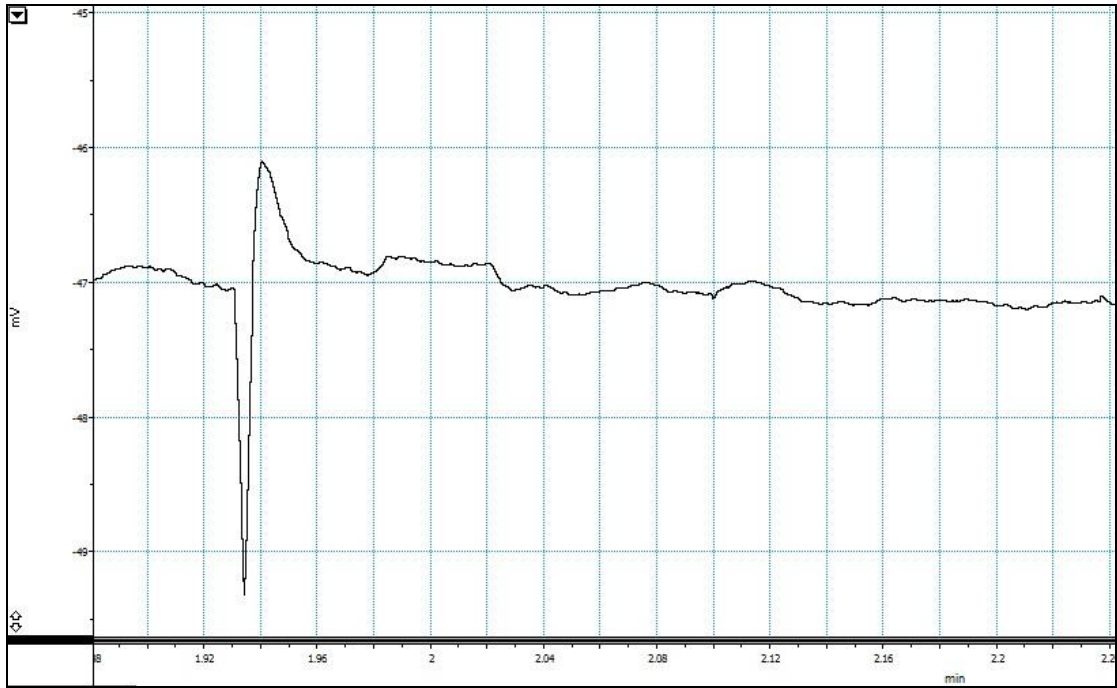
ภาพที่ ง.2 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD100E0



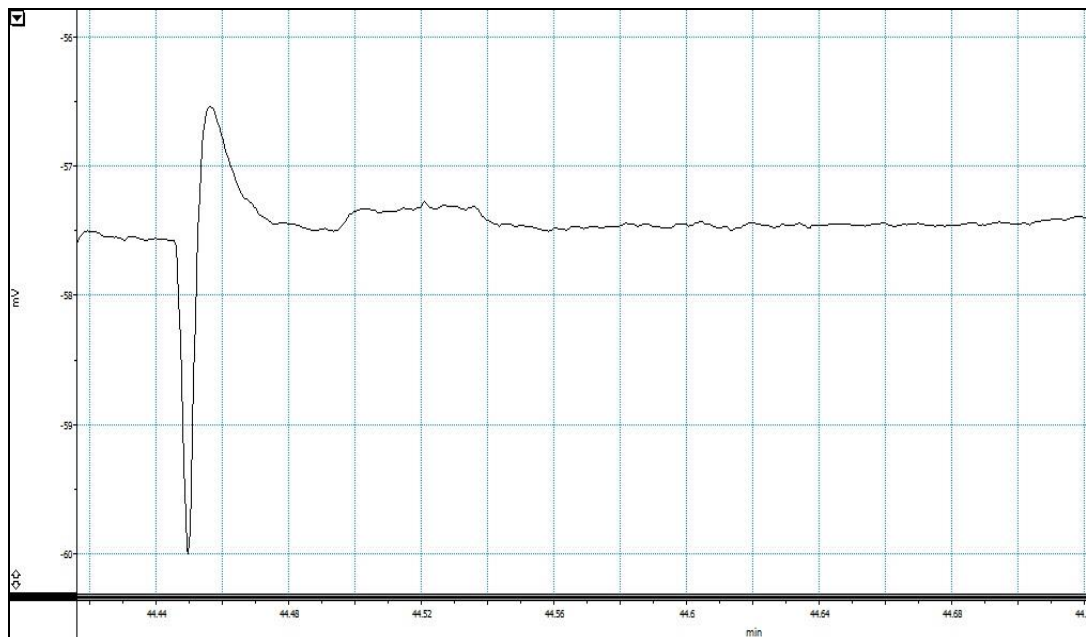
ภาพที่ ๓.๓ โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD90E10



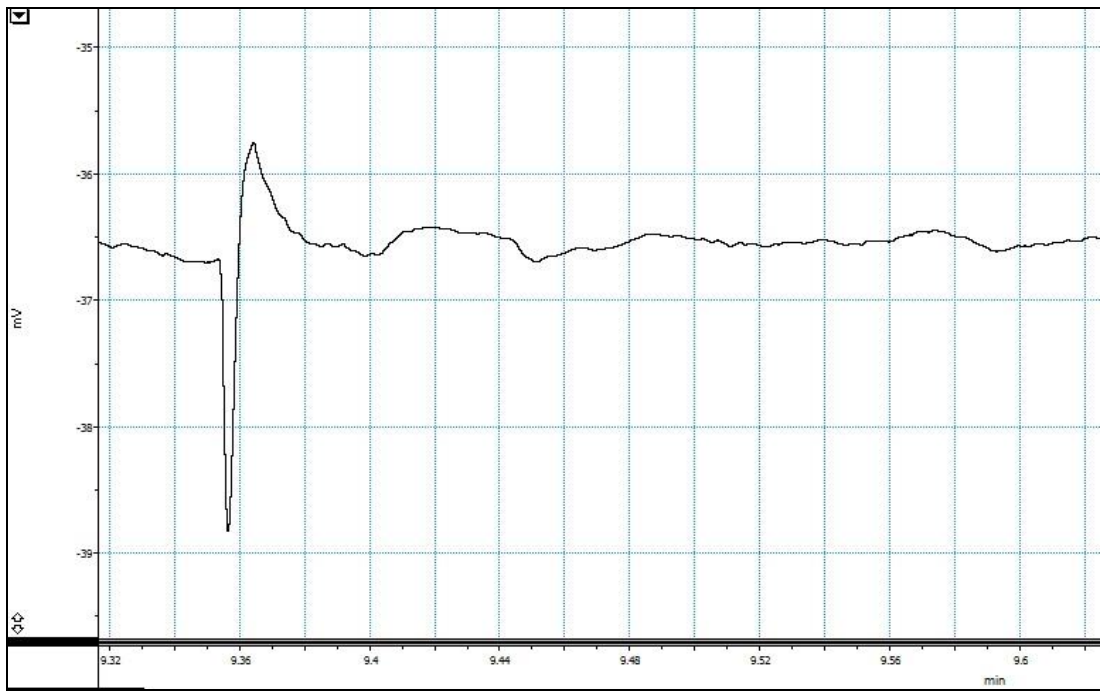
ภาพที่ ๓.๔ โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD80E20



ภาพที่ ง.5 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD70E30



ภาพที่ ง.6 โครมาโทแกรมของฟิล์ม HD65E35



ภาพที่ ๗.7 โครมาโทแกรมของฟิล์ม EEA

ตัวอย่างการคำนวณการซึมผ่านของไอน้ำที่สถานะทดสอบ 25°C (HD100E0-1)

- การคำนวณ Pressure drop

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A}$$

m = มวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

A = พื้นที่หน้าตัด loop

หามวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อรูปตัวยู (m)

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad D = \frac{m}{V}$$

$$m = DV ; V = Ah$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad P_{\text{drop}} = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{DAhg}{A} = Dhg$$

$$= (1000 \text{ kg/m}^3) (5 \times 10^{-2} \text{ m}) (9.807 \text{ m/s}^2)$$

$$= 490.35 \text{ kg/m.s}^2 \text{ or Pa}$$

$$= 490.35 \text{ Pa} \times \frac{1}{101325} \text{ atm/Pa}$$

$$= 0.004839378 \text{ atm}$$

- คำนวณความเข้มข้นไอน้ำมาตรฐาน

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad PV = nRT ; n = \frac{PV}{RT}$$

โดยที่ P = 0.020127589 atm

$$(\text{Water vapor pressure at } 20^\circ\text{C}) \times (\text{Atmospheric pressure} + \text{Pressure drop})$$

$$V = 1 \times 10^{-3} \text{ L (ปริมาตรของท่อ)}$$

$$R = 0.082 \text{ atm. L/mol.K}$$

$$T = 298 \text{ K (อุณหภูมิ ณ ห้องปฏิบัติการ)}$$

หาปริมาตรของไอน้ำ

$$\text{จะได้} \quad n = \frac{PV}{RT} = \frac{(0.020127589 \text{ atm}) (1 \times 10^{-3} \text{ L})}{(0.082 \text{ atm.L/mol.K}) (298 \text{ K})}$$

$$= 8.18 \times 10^{-7} \text{ mol}$$

เปลี่ยนเป็นหน่วยความเข้มข้น (mol/L)

$$\text{จะได้ ปริมาตรท่อขนาด } 1 \times 10^{-3} \text{ L มีไอน้ำ} \quad 8.18 \times 10^{-7} \text{ mol}$$

$$\text{ถ้าปริมาตรท่อขนาด } 1.00 \text{ L จะมีไอน้ำ} \quad \frac{(1.00 \text{ L}) (8.18 \times 10^{-7} \text{ mol})}{(1 \times 10^{-3} \text{ L})}$$

$$= 8.19 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

เปลี่ยนเป็นหน่วย g/L

$$\text{จะได้} \quad (8.19 \times 10^{-4} \text{ mol/L}) (18 \text{ g/mol}) = 0.014736 \text{ g/L}$$

คำนวณการซึมผ่านของไอน้ำ (ฟิล์ม HD100E0)

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟของไอน้ำมาตรฐานที่ความเข้มข้น } 0.014736 \text{ g/L } (A_s) = 38.81 \text{ mV.s}$$

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟของไอน้ำที่ซึมผ่าน (Permeate) } (A_w) = 0.42 \text{ mV.s}$$

$$\text{ความเข้มข้นของไอน้ำที่ซึมผ่าน} = \frac{0.42 \text{ mV.s} \times 0.014736 \text{ g/L}}{38.81 \text{ mV.s}}$$

$$= 1.6136 \times 10^{-4} \text{ g/L}$$

$$\text{อัตราการไหลของก๊าซ } (F_g) = 30 \text{ mL/min}$$

$$= 0.03 \text{ L/min}$$

$$\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่อเวลา } (J) = 1.5797 \times 10^{-4} \text{ g/L} \times 0.03 \text{ L/min}$$

$$= 4.8408 \times 10^{-6} \text{ g/min}$$

$$\text{พื้นที่ของฟิล์มตัวอย่าง } (A_F) = 0.0025 \text{ m}^2$$

$$\text{ความหนาของฟิล์ม } (\Delta x) = 29 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{อัตราเร็วการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)} = \frac{J}{A_F}$$

$$= \frac{4.8408 \times 10^{-6} \text{ g/min}}{0.0025 \text{ m}^2}$$

$$= 1.9363 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}$$

$$= 2.7883 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$$

$$\text{การซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{J \times \Delta x}{A_F}$$

$$= \text{WVTR} \times \Delta x$$

$$= (2.7298 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day})(29 \text{ } \mu\text{m})$$

$$= 79.1663 \text{ g} \cdot \mu\text{m/m}^2 \cdot \text{day}$$

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะทดสอบ 25°C





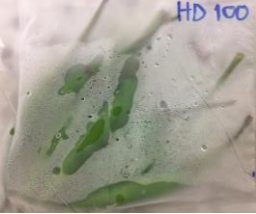





Sample	Thickness (μm)	WVTR ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	WVP ($\text{g} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
HD100E0	29	2.9	84
HD90E10	30	3.1	94
HD80E20	30	3.4	102
HD70E30	30	3.7	111
HD65E35	29	4.2	124
EEA	41	6.8	274

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะทดสอบ 38°C

ตัวอย่าง	ความหนา(μm)	WVTR ($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$)	WVP ($\text{g} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2/\text{day}$)
HD100E0	30	9.8	295
	31	8.9	276
HD90E10	27	16.2	437
	29	13.5	392
HD80E20	27	23.2	626
	29	23.3	676
HD70E30	32	22.8	730
	29	25.2	731
HD65E35	30	25.2	756
	29	25.5	740
EEA	39	27.5	1073
	40	27.8	1112

ภาคผนวก จ

การทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อพริกชี้หนูสด

HD100E0	HD70E30
 <p data-bbox="411 638 694 683">ก่อนบรรจุในบรรจุภัณฑ์</p>	 <p data-bbox="962 638 1244 683">ก่อนบรรจุในบรรจุภัณฑ์</p>
 <p data-bbox="347 940 754 985">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (4 วัน)</p>	 <p data-bbox="898 940 1305 985">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (4 วัน)</p>
 <p data-bbox="339 1227 762 1272">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (10 วัน)</p>	 <p data-bbox="893 1227 1316 1272">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (10 วัน)</p>
 <p data-bbox="339 1534 762 1579">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (20 วัน)</p>	 <p data-bbox="893 1534 1316 1579">ขณะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ (20 วัน)</p>
 <p data-bbox="387 1814 715 1859">หลังเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์</p>	 <p data-bbox="946 1814 1273 1859">หลังเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์</p>

ภาพที่ จ.1 ภาพการทดสอบการใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาพริกก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์ม HD100E0

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ปริมาณไอน้ำที่เก็บ (g)
	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (g)	น้ำหนักพริก (g)	น้ำหนักรวม (g)	
HD100E0-1	0.5016	10.1568	10.6565	0.5037	9.8164	10.5400	21.65
HD100E0-2	0.5045	10.1629	10.6661	0.5067	9.7995	10.5313	22.15
เฉลี่ย							21.90

ตารางที่ จ.2 น้ำหนักรวมของฟิล์ม HD100E0 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวนวันที่เก็บรักษา (วัน)	น้ำหนักรวม HD100E0-1 (g)	น้ำหนักรวม HD100E0-2 (g)	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์ (g)
0	10.6565	10.6661	0.00
2	10.6513	10.6573	0.69
4	10.6369	10.6414	2.18
6	10.6294	10.6318	3.02
8	10.6133	10.6193	4.43
10	10.6050	10.6050	5.54
12	10.5884	10.5875	7.22
14	10.5706	10.5706	8.93
16	10.5648	10.5636	9.56
18	10.5542	10.5484	10.83
20	10.5400	10.5313	12.37

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบการเก็บรักษาพริกในบรรจุภัณฑ์ของฟิล์ม HD70E30

ตัวอย่าง	ก่อนเก็บรักษา			หลังเก็บรักษา			ปริมาณไอน้ำ กักเก็บ (g)
	น้ำหนัก บรรจุ ภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	น้ำหนัก บรรจุ ภัณฑ์ (g)	น้ำหนัก พริก (g)	น้ำหนัก รวม (g)	
HD70E30-1	0.5371	10.0407	10.5724	0.5360	9.5899	10.2522	12.58
HD70E30-2	0.5349	10.0544	10.5757	0.5214	9.5866	10.2398	13.11
เฉลี่ย							12.84

ตารางที่ จ.4 น้ำหนักรวมของฟิล์ม HD70E30 และค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ออกจากบรรจุภัณฑ์

จำนวนวันที่เก็บ รักษา (วัน)	น้ำหนักรวม HD70E30-1 (g)	น้ำหนักรวม HD70E30-2 (g)	ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำที่แพร่ ออกจากบรรจุภัณฑ์ (g)
0	10.5724	10.5757	0.00
2	10.5429	10.5408	3.20
4	10.5045	10.5034	6.98
6	10.4730	10.4749	9.96
8	10.4473	10.4399	12.98
10	10.4159	10.4063	16.22
12	10.3890	10.3752	19.10
14	10.3502	10.3395	22.81
16	10.3255	10.3100	25.51
18	10.2885	10.2743	29.13
20	10.2522	10.2398	32.65

ตัวอย่างในการคำนวณ

- หาปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ต่อ (mg) น้ำหนักพริก 1 กรัม (ในวันที่ 20) จากบรรจุภัณฑ์ HD100E0-1 โดยหาได้จาก

ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม (ในแต่ละวัน)

$$= \frac{[(\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์}) - \text{น้ำหนักรวมในแต่ละวัน}] \times 1000}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

$$= \frac{[\text{น้ำหนักรวมก่อนการเก็บรักษา} - \text{น้ำหนักรวมในแต่ละวัน}] \times 1000}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

$$= \frac{[10.6565 - 10.5400] \times 1000}{10.1568}$$

$$10.1568$$

$$= 11.47$$

- หาปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม จากบรรจุภัณฑ์ HD100E0-2 โดยหาได้จาก

ปริมาณไอน้ำที่กักเก็บภายในบรรจุภัณฑ์ (mg) ต่อน้ำหนักพริก 1 กรัม

$$= \frac{[\text{น้ำหนักรวมหลังการเก็บรักษา} - (\text{น้ำหนักพริกหลังการเก็บรักษา} + \text{น้ำหนักบรรจุภัณฑ์})] \times 1000}{\text{น้ำหนักพริกเริ่มต้น}}$$

$$= \frac{[10.5400 - (9.8164 + 0.5037)] \times 1000}{10.1568}$$

$$10.1568$$

$$= 21.65$$

ภาคผนวก ฉ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ตารางที่ ฉ.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรม
(มอก. 711-2530) [2]

คุณลักษณะ	ความหนา	
	0.05	0.07
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (MPa)	5	7
การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (%)	250	250
ความแข็งแรงฉีกขาด มีค่าไม่น้อยกว่า (N)	2.5	3.5

ภาคผนวก ข

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1 42,500 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 1 ตุลาคม 2560.....

งวดที่ 2 7,500 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 6 มิถุนายน 2561.....

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่าย

หมวดค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	-
งบดำเนินงาน	
ค่าตอบแทน	-
ค่าใช้สอย	32,930.00
ค่าวัสดุ	17,073.22
ค่าสาธารณูปโภค	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณที่จ่ายไปแล้ว	50,003.22

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	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	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยงบรายได้ 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. 2555-2557	ทุนวิจัยงบรายได้ 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 รักชลธิ ธนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธิ กังสดาล บัวบุตรา ญัฐนิชาร์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวีร์ สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธิ ประมินทร์ ช้างเพชร และประภคณีย์ แสงทองอโณทัย, ”สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธิ พงษ์ธร แซ่ฮุย ธีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุฒิ, ผลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธิ ธีระชาติ 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 เจริญสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICeE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุฬห์, 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 รักชลธี นवलพรรณ 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.
18. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ สุภารัตน์ รักชลธี, ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.

19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, *The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38)*, October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The Proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.
21. Chitranuwatkul, J., Ochaikul, D., Rukchonlatee, S. and Janvikul, W., Studied on Preparation and Antibacterial Activity of Zinc Oxide/Cellulose Composite Films, *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology 2013 (ICEAST 2013)*, August 21-24, The Sukosol, Bangkok, Thailand, 2013.
22. Rukchonlatee, S., Napradit, S., Manusongtanakul, P., Juntima, S and Sooknoi, T., Effect of LLDPE/LDPE Ratio on Processability and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Films, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID100, pp.114-115, 2013.
23. Pinsakul, S., Rukchonlatee, S., Monvisade, P. and Chaiyanit, V., Modified Plastisol Inks Based on Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Methyl Acrylate Copolymers, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID71, pp.73-74, 2013.
24. Sirichantanon, T., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 169-172, 2014.
25. Pinsakul, S., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Potential Use of Modified Plastisol Inks Based on EVA/EVOH, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 174-177, 2014.
26. Uttasuradee, M., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 215-217, 2014.

27. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S., Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/ Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 416-419, 2015.
28. Sahassanon, T. Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Improvement of Ethylene Permeation in LLDPE/SEBS Film with Zeolite Y, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 432-435, 2015.
29. Makphon, K., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Ritvirulh, C., Study on LLDPE/SEBS/modified zeolite ZSM-5 blends for ethylene permeation improvement of packaging film, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 353-358, 2016.
30. Kunjit, P., Sooknoi, T., Maluangnont, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Photodegradable film prepared from LDPE/TiO₂ nanotube, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 452-456, 2016.
31. Arnutnanon, P., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Modified plastisol ink based on EVA/NR and EVA/ENR, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 267-272, 2016.
32. Rukchonlatee, S., Ochaikul, D., Suankaew, C. and Janvikul, W., Mangosteen shell extract/bacterial cellulose mat as potential antibacterial wound dressings, *The 14th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, Russia, 6 – 9 November, 2016.
33. Ritvirulh, C., Hongthong, K., Makphon, K., Rungroang C., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T., Selective Ethylene Permeability of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 Films, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
34. Rukchonlatee, S., Sonpoo, T., Deesamer, S. and Sooknoi, T., Improvement of Mechanical and Water Vapor Permeability Properties of LDPE/EVA/EVOH Films with Zeolite A, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.

35. Mahawanjarn, P., Piamsuwansiri, S., Pongtanapaisan, O., Ruckchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Photodegradable Film Prepared from LDPE/TiO₂ and LDPE/Hydrophobic TiO₂, The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016), Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
36. Ruckchonlatee, S., Jaisomboon, N. and Sooknoi, T., Improvement of Water Vapor Permeability of LLDPE/EVA Film with Zeolite A as Filler, Key Engineering Materials, 730, 31-36, 2017.
37. Sonpoo, T. and Ruckchonlatee, S. Effect of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer on Mechanical Properties of Bottles produced from High Density Polyethylene Mixed with Calcium Carbonate, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 170-174, 2017.
38. Makphon, K., Na Lampoon, C., Phanthong, P., Tumsa, R., Ritvirulh, C., Sooknoi, T. and Ruckchonlatee, S., Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) Type on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene Film, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 175-179, 2017.

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 อิทธิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ เคมี่ หลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) สาร...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549.

2. อิทธิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุพห์ จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วมงคลชัย **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์** สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า 2553.