



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของชนิดและปริมาณของพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (เอสอีบีเอส)
ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลแอลดีพีอี)

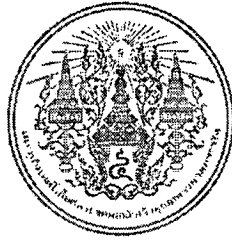
Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) (SEBS) Type and
Content on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density
Polyethylene (LLDPE) Film

นางสุภารัตน์ รักชลธิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของชนิดและปริมาณของพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (เอสอีบีเอส)

ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความ

หนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลแอลดีพีอี)

Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) (SEBS) Type and

Content on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density

Polyethylene (LLDPE) Film

นางสุภารัตน์ รักชลธี

๖๐๐๒๖๙๙๗๙

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๙

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระเบียบข้อดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ ผลของชนิดและปริมาณของพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (เอสอีบีเอส) ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลแอลดีพีอี)

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) กับพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มที่ใช้งานบรรจุภัณฑ์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีต่อผลการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน ได้แก่ อัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20 และ 70/30, ปริมาณสไตรีนใน SEBS (12% ใน SEBS G1657 และ 29% ใน SEBS G1650 และ G2652) และค่าครรชนีการไหลของ SEBS โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด สามารถหาปริมาณของ SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ LLDPE/SEBS ได้ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเติม SEBS ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่เปลี่ยนแปลง จากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่า SEBS มีการกระจายตัวที่ดีใน LLDPE โดยศึกษาวิทยาของฟิล์ม LLDPE/SEBS G1657 ในอัตราส่วน 80/20 เป็นแบบ Spherical และ Cylindrical ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรดอื่น มีศึกษาวิทยาเป็นแบบ Spherical แต่เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราส่วน LLDPE/SEBS เป็น 70/30 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของศึกษาวิทยาจากแบบ Spherical เป็นแบบ Cylindrical มากขึ้น นอกจากนี้การเลือกใช้เกรด SEBS ที่มีเปอร์เซ็นต์สไตรีนที่ต่ำช่วยเพิ่มอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ LLDPE/SEBS ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงกว่าฟิล์ม LLDPE และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ SEBS ในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง และความเค้น ณ จุดครากสูงขึ้น แต่โมดูลัสของยังมีค่าลดลง โดยฟิล์มที่ผสมด้วย SEBS G1657 ให้ค่าเหล่านี้ต่ำกว่า G1650 และ G1652 เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์สไตรีนต่ำที่สุด จากงานวิจัยพบว่าฟิล์ม LL70S30G57 มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน และความแข็งแรงดึงดีที่สุด จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีน, พอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน, พอลิเมอร์ผสม, อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) (SEBS) Type and Content on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) Film

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

In this research work linear low density polyethylene (LLDPE)/polystyrene-ethylene-butylene-styrene copolymer (SEBS) blend films were prepared to improve ethylene gas permeation in packaging films. The factors affecting ethylene gas permeation of blend films were blend ratios of LLDPE/SEBS at 80/20 and 70/30, styrene contents in SEBS (12% in SEBS G1657 and 29% in SEBS G1650 and SEBS G1652) and melt flow index values of SEBS. Polymer blends were compounded by internal mixer and thereafter films were shaped by compression molding. The results revealed that the SEBS contents could be confirmed using Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR). From DSC, it was found that SEBS did not affect the crystallinity in the LLDPE/SEBS films. SEM micrographs illustrated a well dispersed of SEBS in LLDPE. The morphology of dispersed SEBS G1657 in the films was in spherical and cylindrical forms while other SEBS grades showed spherical form in the LDPE/SEBS blends at 80/20 ratio. The higher SEBS contents gave morphological change from spherical to cylindrical form. LLDPE blended with SEBS 1657, low styrene content, facilitated a greater ethylene transmission rate (ETR). From mechanical studies, tensile strength of LLDPE/SEBS blends was higher than that of LLDPE. The higher SEBS contents resulted in an increment of tensile strength and stress at yield whereas Young's modulus was decreased. These values of the films were the lowest when using SEBS G1657 due to the least styrene content. In this research, it was found that LL70S30G57 film had the greatest ethylene gas permeation together with good tensile strength. Therefore it should be suitable for packaging application.

Keywords: LLDPE, SEBS, polymer blends, ethylene transmission rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง โครงการ ผลของชนิดและปริมาณของพอลิเอสไตรีน-เอทิลีนบิวทีลีน-
สไตรีน (เอสบีบีเอส) ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลแอลดีพีอี) (Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) (SEBS)
Type and Content on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene
(LLDPE) Film) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้ คณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๕
(สัญญาเลขที่ 2559-0105030) ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายชัยสิทธิ์ วัฒน ลำพูน นางสาวปณิศา พาลทอง
และนางสาวรัตนาวดี ทุมชะ นักศึกษาปริญญาตรีนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
ของภาควิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ
หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผล	4
2.1.1 การหายใจ	4
2.1.2 การสุก (Ripening).....	5
2.2 บทบาทและหน้าที่ของก๊าซเอทิลีน.....	6
2.3 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน.....	8
2.3.1 การแยกด้วยเมมเบรน	8
2.3.2 ผลของโครงสร้างพอลิเมอร์ต่อสมบัติของเมมเบรน	9
2.3.3 การละลายและการซึมผ่านของก๊าซในเมมเบรน	10
2.3.4 กลไกการซึมผ่านของก๊าซ	11
2.3.5 สมรรถนะของกระบวนการ	12
2.4 พอลิเมอร์ผสม	12
2.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	15
2.6 พอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน.....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	26
3.1 สารเคมี	26
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์.....	28
3.4 การเตรียมฟิล์ม.....	28
3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์มด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี....	29
3.6 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน.....	29
3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	30
3.8 การทดสอบการรับแรงดึง.....	30
3.9 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน.....	31
3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	33
4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์ม LLDPE/SEBS ด้วยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี.....	33
4.2 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน.....	35
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	37
4.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	39
4.5 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน.....	44
4.5.1 ผลของปริมาณ SEBS ต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน.....	46
4.5.2 ผลของปริมาณสไตรีนต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน.....	49
4.5.3 ผลของครรชนีการไหลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน.....	50
4.5.4 ผลของความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน....	52
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก - สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	61
ประวัตินักวิจัย	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการหายใจของผลิตผลชนิดต่างๆ.....	4
2.2 ตัวอย่างของผลไม้พวก Climacteric และ Non climacteric บางชนิด.....	5
2.3 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในระหว่างการสุกของผล.....	6
2.4 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนระหว่างผลิตผลแบบ Climacteric กับ Non climacteric	7
2.5 การจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน.....	8
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการซึมผ่านของตัวถูกละลายในเมมเบรนพอลิเมอร์.....	11
2.7 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	16
2.8 สมบัติบางประการของ LLDPE.....	20
2.9 สมบัติของฟิล์ม LLDPE และ LDPE จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	20
2.10 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ของ PE ชนิดต่างๆ.....	20
2.11 สภาวะการขึ้นรูป SEBS ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และกระบวนการอัดรีด (Extrusion process).....	23
3.1 สมบัติบางประการของ SEBS	23
3.2 สมบัติบางประการของ LLDPE	27
3.3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS (% โดยน้ำหนัก).....	28
3.4 ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (% โดยปริมาตร).....	32
3.5 ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ใช้ทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	32
4.1 ปริมาณ SEBS และ LLDPE โดยน้ำหนักที่พบในฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	35
4.2 ค่า ΔH_f , T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	36
4.3 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20%v/v.....	48
4.4 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20%v/v.....	48
4.5 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20%v/v.....	51
4.6 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 5, 10 และ 20%v/v	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 หลักการของกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน.....	9
2.2 ลักษณะการซึมผ่านของก๊าชผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane).....	11
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน.....	13
2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	14
2.5 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	15
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) กับค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter).....	16
2.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์.....	18
2.8 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	19
2.9 สูตรโครงสร้างทั่วไปของ SEBS.....	21
2.10 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของบล็อกโคพอลิเมอร์.....	22
3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	30
3.2 ท่อแก้วใส.....	31
4.1 FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม LLDPE, SEBS และ LL80S20 SEBS ในฟิล์ม LLDPE/SEBS.....	34
4.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงกับปริมาณ	
4.3 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการสกัด SEBS ออกด้วย THF กำล้างขยาย 3500 เท่า.....	38
4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657...	39
4.5 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657	39
4.6 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657.....	40
4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ.....	40
4.9 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ.....	42
4.10 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ.....	42
4.11 มอดูลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ.....	43
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าชเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิ เมอร์ผสม LL70S30G57 ที่ความเข้มข้นของก๊าชเอทิลีน 20% โดยปริมาตร.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิ- เมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v.....	47
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของเอทิลีนกับเวลา ของฟิล์มพอลิ- เมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v.....	49
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิ- เมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v.....	50
4.17 การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเมื่อวัสดุภาค SEBS ที่มีขนาดและความต่อเนื่องแตกต่างกัน.....	51
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของเอทิลีนกับเวลา ที่ความเข้มข้น ของก๊าซเอทิลีน 5, 10 และ 20 %v/v ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57.....	52
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับความเข้มข้นของ ก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57.....	53
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{ETR}$ กับ $\frac{1}{\text{Ethylene concentrations}}$ ของฟิล์ม พอลิเมอร์ผสม LL70S30G57.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศกสิกรรมสำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก เนื่องจากความหลากหลายและความอุดมสมบูรณ์ของพืชพรรณธรรมชาติ ที่ใช้ประโยชน์ได้ทั้งเป็นของกินและของใช้ ซึ่งผักและผลไม้สดถือเป็นผลผลิตสำคัญอย่างหนึ่งนอกจากนี้ยังเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างรายได้มหาศาลให้กับประเทศเสมอมาอย่างไรก็ดีภูมิอากาศเขตร้อนของบ้านเราได้สร้างปัญหาให้กับพืชผลเหล่านี้ไม่น้อยเลย เนื่องจากผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้มีอายุสั้น เก็บไว้ได้ไม่นานจึงทำให้มีระยะเวลาขนส่งและวางขายเพียงช่วงสั้นๆ เท่านั้น หลายครั้งจึงต้องสูญเสียผลผลิตการเกษตรระหว่างการขนส่งเป็นจำนวนมาก ถือเป็นปัญหาที่แก้ไขได้ยากที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมส่งออกพืชผลทางการเกษตรของไทย [1] เนื่องจากภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ยังมีการหายใจ การคายความร้อน การคายน้ำ และการผลิตก๊าซเอทิลีน [2] ซึ่งปัจจัยที่สำคัญนั้นก็คือก๊าซเอทิลีน เนื่องจากก๊าซเอทิลีนควบคุมการเจริญเติบโตที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของพืชหลายประการ เช่น ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ (Senescence), การสุก (Ripening), การอ่อนนุ่ม (Softening), การเปลี่ยนแปลงรงควัตถุ (Pigment) เป็นต้น [3] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาฟิล์มที่สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุของผลไม้ ชะลอการเน่าเสียและรักษาความสดใหม่ของผลิตผล ปัจจุบันฟิล์มพลาสติกได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE) เป็นพลาสติกที่มีการใช้กันมากที่สุดในปริมาณมากที่สุด สำหรับผลิตภัณฑ์สด, ผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากฟิล์ม PE มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ได้ดี ทนความร้อน ได้สามารถใช้กับกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนได้ (Heat sealing) นอกจากนี้ยังสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและการกัดกร่อนจากกรดบางประเภทได้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ถุงเย็น ถุงซิปป ฟิล์มยืด ฟิล์มหัด ฟิล์มคลุมดิน เป็นต้น [4]

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ [5] ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) กับพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly (styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) ที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ปริมาณ 5, 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ลงใน SEBS การเตรียมฟิล์มให้ซีโอไลต์มีการกระจายตัว 2 แบบ คือ การทำให้ซีโอไลต์กองรวมกันอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของฟิล์ม เรียกว่า Surface-rich และทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อฟิล์ม เรียกว่า Well-dispersed พบว่าการเติมซีโอไลต์ ในปริมาณ 5-10 % โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไป 10 % โดยน้ำหนัก จะทำให้การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีชั้นของ LDPE ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเป็นผลึก ทำให้การซึมผ่านได้ช้า จึงมีการพัฒนาเป็นฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นในงานวิจัยของศราวุธ เลาวกุล [6] โดยการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของพอลิโพลิฟิน (LDPE) และพอลิพรอพิลีนที่ผ่านการจัดเรียงตัว (Oriented polypropylene, (OPP)) กับ SEBS ที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนักทำการเจาะรูฟิล์มในชั้น LDPE และ OPP ให้มีปริมาณรูที่เจาะ 0-100 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ และมีรูขนาด 2-50 มิลลิเมตร ก่อนนำไปประกบติดกับชั้นของ SEBS ที่ผสมอยู่กับซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อเพิ่มความสามารถของฟิล์มในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน เมื่อทำการทดสอบพบว่าฟิล์มที่มีการเจาะรู 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่และมีขนาดรู 2 มิลลิเมตร มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนที่สูง แต่ข้อเสียของการเจาะรูฟิล์มคอมโพสิตสองชั้น คือ ทำให้ฟิล์มมีการกระจายแรงไม่ทั่วชิ้นงาน ความแข็งแรงลดลง และขาดง่าย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า SEBS ช่วยเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนแต่การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีด้วยการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยเลือกใช้ LLDPE เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นกว่า LDPE คือ ความสามารถในการทนต่อแรงดึง ทำให้ผลิตฟิล์มที่มีความบางกว่าโดยไม่เกิดการฉีกขาด มีความทนทานต่อการเจาะทะลุ และมีการใช้งานฟิล์มที่เพิ่มสูงขึ้น [7] โดยมีปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20 และ 70/30, เปอร์เซ็นต์ของสไตรีนใน SEBS (12 %wt, 29 %wt) และค่าครรชนิกการไหลของ SEBS (MFI คือ 1, 5 และ 22 g/10 min) จากนั้นทำการศึกษาการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเตรียมฟิล์ม LLDPE ที่มีการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ดี โดยการใช้ชนิดและปริมาณของ SEBS ที่หลากหลาย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ซึ่งใช้ SEBS ที่มีเปอร์เซ็นต์สไตรีนและค่าครรชนิกการไหล ที่แตกต่างกันในอัตราส่วน 80/20, 70/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

2. ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding)

3. หาปริมาณของ SEBS ในพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) โดยเทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR)

4. ศึกษาสันฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มในสูตรต่างๆด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)
6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC)
7. ศึกษาการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มในสูตรต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เรียนรู้และเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มเกี่ยวกับการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่จะนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์ สามารถนำเอาความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาฟิล์มที่ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผล [2, 8]

ผลิตผลสดหลังการเก็บเกี่ยวอาจจะเกิดความเครียดขึ้นภายใน เนื่องจากผลิตผลที่เก็บเกี่ยวยังคงมีชีวิตอยู่ การหายใจและกิจกรรมทางชีวเคมียังคงดำเนินอย่างต่อเนื่องมีผลทำให้คุณภาพด้านต่างๆ ของผักผลไม้ เช่น สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส รวมทั้งคุณค่าทางโภชนาการ เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น

2.1.1 การหายใจ (Respiration)

ผลผลิตของพืชหลังจากเก็บเกี่ยวออกมาจากต้นแล้วยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับสรีระ-วิทยาและชีวเคมี โดยเฉพาะกระบวนการหายใจจะดำเนินอย่างต่อเนื่องจนสิ้นอายุขัยของเซลล์โดยมีการนำก๊าซออกซิเจน (O_2) เข้าไปสลายโมเลกุลของสารอาหาร ซึ่งเป็นกระบวนการที่พืชเปลี่ยนอาหารที่สะสมไว้ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ไปอยู่ในรูปของพลังงานที่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีในกิจกรรมต่างๆ เพื่อการดำรงชีวิตของผลิตผลไว้แล้วทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และความชื้นออกมา ดังนั้นการหายใจจึงเป็นการดึงอาหารที่สะสมออกมาใช้งาน นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการหายใจจะไปกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ให้เกิดได้รวดเร็วขึ้นทำให้ผลิตผลเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น คุณค่าทางอาหารของผลิตผลจึงลดลงเรื่อยๆ รวมทั้งรสชาติและอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวจะสดได้นานเพียงใดจึงขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารและน้ำที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อและอัตราการหายใจของผลิตผลของพืชชนิดนั้นๆ ซึ่งผลิตผลแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราการหายใจของผลิตผลชนิดต่างๆ

ระดับ	ปริมาณการหายใจที่ $5^\circ C$ (mg CO_2 / Kg hr)	ชนิดพืช
ต่ำมาก	น้อยกว่า 5	แตงโม แตง Honey Dew พวัก Nut
ต่ำ	5-10	ส้ม องุ่น มะเขือเทศ แตงกวา พริก แอปเปิ้ล แคนตาลูป
ปานกลาง	10-20	กล้วย มะเขือ มะเดื่อ ฝรั่ง ท้อ สาลี่ เชอร์รี่ พลัม
สูง	20-40	น้อยหน่า กะหล่ำดอก ผักบั้งจีน คื่นช่าย ผักกาดหอม
สูงมาก	มากกว่า 40	ถั่วเมล็ดกลม (Pea) ข้าวโพดหวาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตผลที่แบ่งตามอัตราการหายใจมี 2 ชนิด คือ

1. ผลไม้พวก Climacteric หมายถึง ผลไม้ที่อัตราการหายใจ เปลี่ยนแปลงตามอายุ นับจากที่ผลไม้แก่จัด อัตราการหายใจจะเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดลงเมื่อผลไม้เริ่มสุกงอม และมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายใน เช่น มีการเปลี่ยนสีของเปลือก การเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้สุกมีรสหวาน เนื้อนิ่ม กลิ่นหอม กว่าผลไม้ดิบ ผลไม้ประเภท Climacteric ในระยะดิบมีการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีน น้อยมาก แล้วกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน ระยะที่ผลไม้แก่จัด ผลผลิตมีการสังเคราะห์เอทิลีน (Ethylene) เมื่อผลไม้สุก (Fruit ripening) ซึ่งก๊าซเอทิลีนมีผลเร่งให้ผลไม้เริ่มสุกเร็วขึ้น ดังนั้นการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนร่วมกับปัจจัย อื่นๆสามารถควบคุมระยะเวลาในการนำผักและผลไม้ไปใช้ประโยชน์ เช่น อาจใช้ชะลอหรือเร่งให้เกิดการสุก ผลไม้ประเภท Climacteric เมื่อเก็บมาจากต้นแล้วจะสามารถสุกต่อ หรือบ่มให้สุกได้ โดยใช้ก๊าซเอทิลีน หรือใช้แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide) เป็นต้น

2. ผลไม้พวก Non climacteric เป็นประเภทของผลไม้ ซึ่งหมายถึง ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจค่อย ๆ ลดลงเมื่อผลไม้อายุมากขึ้น และเมื่อผลไม้สุกอัตราการหายใจไม่เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บมาจากต้นแล้วไม่สุกต่อ และไม่สามารถบ่มให้สุกได้โดยใช้เอทิลีน เป็นผลิตผลที่ควรเก็บเกี่ยวเมื่อสุก (Ripe) เต็มที่

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของผลไม้พวก Climacteric และ Non climacteric บางชนิด

Climacteric	Non climacteric
กล้วย ท้อ สาลี่ มะละกอ สาเก พลับ ฝรั่ง น้อยหน่า ขนุน มะเขือเทศ มะเดื่อ ฝรั่ง ละมุด แตงโม มะม่วง แอปเปิล แอปริคอต กีวี ฟรุต พลัม อะโวคาโด พาสชั่น ฟรุตแตง- ลาย (Muskmelon) บลูเบอรี่ (Blueberry)	ส้ม พริก ทับทิม ผลมะม่วงหิมพานต์ สับปะรด แตงกวา มะเขือ ส้มเขียวหวาน องุ่น มะนาว ถิ่นจี่ ลำไย มะกอก พุทรา เซอร์รี่ โกโก้ สตรอเบอรี่ เกรฟฟรุต ราสป์เบอรี่ (Raspberry) แบลคเบอรี่ (Blackberry)

2.1.2 การสุก (Ripening)

การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลิตผลก่อนเข้าสู่ระบบร่วงโรย การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน ซึ่งเป็นผลจากก๊าซเอทิลีน ที่ถูกผลิตขึ้นจากตัวของผลิตผลเอง ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในระหว่างการสุกของผล

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็น
1. การแก่ของเมล็ด 2. การเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ (Pigments) 2.1 การเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) 2.2 การปรากฏตัวของรงควัตถุที่มีอยู่เดิม 2.3 การสังเคราะห์คาโรทีนอยด์ (Carotenoids) 2.4 การสังเคราะห์แอนโทไซยานิน (Anthocyanins)	สีของผล
3. การนิ่มของผล (Softening) 3.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเพคติน (Pectin) 3.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอื่นๆของผนังเซลล์ (Cell wall) 3.3 การย่อยสลายสารที่เก็บสะสม	เนื้อ (Texture) ของผล
4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) 4.1 การเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล 4.2 การเปลี่ยนรูปของน้ำตาล 5. การสร้างสารที่ทำให้เกิดกลิ่น (Volatile substances) 6. การเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ (Organic acids) 7. การหลุดร่วงของอวัยวะ (Abscission) 8. การเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจ	กลิ่นและรสชาติ

2.2 บทบาทและหน้าที่ของก๊าซเอทิลีน [19]

เอทิลีนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีผลต่อกระบวนการสรีระวิทยาของพืช เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในพืช ซึ่งผลิตจากเนื้อเยื่อของพืชชั้นสูงและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เอทิลีนเป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืชชั้นสูง และจากจุลินทรีย์บางชนิด [9] เอทิลีนเป็นสารฮอร์โมนธรรมชาติที่ควบคุมการบ่มและการสุกของผลผลิต เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชชนิดเดียวที่มีลักษณะเป็นก๊าซ สามารถแพร่กระจายไปยังส่วนต่างๆของพืชได้ง่าย ทำให้มีอิทธิพลต่อการพัฒนาของพืช โดยทั่วไปเอทิลีนสามารถเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของพืชได้แก่ การพักตัวการร่วงการชราการออกดอกการตอบสนองต่อสิ่งเร้าต่างๆ (Tropisms) ทั้งนี้เพราะเอทิลีนสามารถกระตุ้นเนื้อเยื่อทุกชนิดให้มีอัตราเอทิลีนสูงขึ้นกระตุ้นให้ผลไม้ออกการสุกเร็ว กระบวนการสุกไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่มีเอทิลีน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทีลีน และระหว่างการสุกจำเป็นต้องมีเอทีลีนมีจะนั้นแล้วการสุกจะเกิดไม่สมบูรณ์ การตอบสนองของผลิตผลต่อเอทีลีนนี้มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต พัฒนาการของพืชและการสุกของผลไม้หลังเก็บเกี่ยวก๊าซเอทีลีนจึงได้ชื่อว่า Ripening hormone หรือ Ripening gas โดยผลิตผลที่มีรูปแบบการหายใจแบบ Climacteric และ Non-climacteric จะตอบสนองต่อก๊าซเอทีลีนที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การตอบสนองต่อก๊าซเอทีลีนระหว่างผลิตผลแบบ Climacteric กับ Non climacteric

อิทธิพลของเอทีลีน	Climacteric	Non climacteric
1. การตอบสนองต่อการใช้เอทีลีนในการเพิ่มการหายใจ	กระตุ้นเพียงครั้งเดียว	ต้องกระตุ้นตลอดระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยว
2. อิทธิพลของเอทีลีนในการเพิ่มการหายใจ	ขึ้นกับความเข้มข้น	ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น
3. การย้อนกิจกรรมกลับในการเพิ่มการหายใจโดยเอทีลีน	ไม่ย้อนกลับการเพิ่มการหายใจเกิดขึ้นต่อไป	ย้อนกลับการเพิ่มการหายใจเกิดขึ้นต่อไปเมื่อยังคงมีการใช้เอทีลีนอยู่
4. การสร้างเอทีลีนต่อเนื่อง	มีการสร้าง	ไม่มีการสร้าง
5. ความเข้มข้นของเอทีลีนภายใน	แปรปรวนมากตั้งแต่ต่ำไปจนถึงสูงมาก	ความเข้มข้นต่ำ

ดังที่กล่าวมาแล้ว ก๊าซเอทีลีนสามารถถูกผลิตขึ้นจากตัวของผลิตผล ดังนั้นการปล่อยให้ผลิตผลได้รับก๊าซเอทีลีนมีแนวโน้มที่จะทำให้อายุการเก็บรักษาผลิตผลสั้นลง การจัดกลุ่มของผลิตผลพืชสวน โดยอาศัยอัตราการผลิตก๊าซเอทีลีนเป็นเกณฑ์แสดงดังตารางที่ 2.5

บทบาทของเอทีลีนมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเสียหายทางกายภาพของผลิตผลสด เช่น การทำให้เกิดบาดแผล ซึ่งเป็นกระบวนการสุกด้วยเหมือนกัน เพราะฉะนั้นการระบายอากาศไม่เพียงใช้ในการป้องกันการสะสมของเอทีลีนจากผลไม้ลดความเสียหาย และชะลอการสุก ดังนั้นก๊าซเอทีลีนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างรอบคอบในระหว่างการเก็บเกี่ยว ซึ่งเกี่ยวกับอายุ ความแก่ของผลไม้ รวมทั้งการบรรจุหีบห่อและการขนส่งด้วย

ตารางที่ 2.5 การจัดกลุ่มของผลิตผลตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน

กลุ่ม	ช่วงการผลิตที่ 20 °C ($\mu\text{ C}_2\text{H}_4 \text{ Kg-hr}^{-1}$)	ชนิดของผลไม้
ต่ำมาก	ต่ำกว่า 0.1	ส้ม องุ่น พุทรา ทับทิม เซอร์รี่ สตรอเบอร์รี่
ต่ำ	0.1-1.0	แตงกวา มะเขือ กระเจี๊ยบ พริก พลับ สับปะรด ฟักทอง แตงโม โอลีฟ ราสป์เบอร์รี่ บลูเบอร์รี่
ปานกลาง	1.0-10.0	กล้วย มะเดื่อ ฝรั่ง มะม่วง มะเขือเทศ
สูง	10.0-100.0	มะละกอ สาลี่ ท้อ แอปเปิ้ล แอปริคอต อะโวคาโด แคนตาลูป กีวี ฟรุต (ผลสุก) เนคทารีน พลัม
สูงมาก	มากกว่า 100.0	น้อยหน่า ละมุด พาสชันฟรุต

2.3 เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน

กระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน (Gas separation) เป็นกระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรนที่แตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ คือใช้แยกของผสมโดยทิ้งสารป้อน (Feed) และเพอร์มิเอต (Permeate) อยู่ในสถานะก๊าซไม่โซ่ของเหลว ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กลไกการแพร่ผ่านของก๊าซ (Gas diffusion) และกลไกการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) [10]

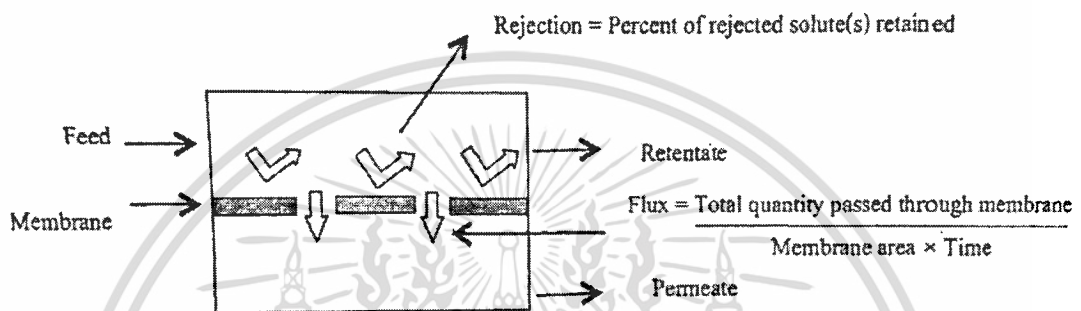
ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมเมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและพอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีนเป็นพอลิเมอร์คู่ผสมโดยศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนโดยผ่านกลไกการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation)

2.3.1 การแยกด้วยเมมเบรน [11-13]

เมมเบรน (Membrane) คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอินทรีย์สังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์ที่ทำหน้าที่กั้นระหว่างสองวัฏภาคที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอนุภาคในของไหล ของไหลในที่นี้คือ ก๊าซและของเหลว ซึ่งการแยกด้วยเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยเมมเบรนในการแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้นสำหรับกระบวนการแยกสารละลายหรือก๊าซผสมมีความแตกต่างจากกระบวนการแยกต่างๆ ไป เช่น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) กระบวนการไล่ออก (Stripping) กระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) และการกลั่น (Distillation) ลักษณะที่สำคัญที่สุดของเมมเบรนคือ มีสมบัติในการเลือกผ่าน (Semi-permeable) เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ เช่น ความสามารถในการละลายและการมี/ไม่มีขั้วของสารนั้นๆ ในเมมเบรนและซึมผ่านออกไป หรือจากขนาดรูพรุนของเมมเบรน หรือจากการมีประจุของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนมีหลักการดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยมีสารละลายป้อน (Feed) ไหลผ่านเมมเบรนโดยแรงขับเคลื่อน (Driving force) ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการถ่ายมวล ตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเมมเบรนหรือละลายในเนื้อเมมเบรนได้น้อยจะถูกกักไว้ สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า รีเทนเตต(Retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (Concentrate) ส่วนตัวทำละลายหรือสารโมเลกุลที่มีขนาดเล็กหรือละลายในเนื้อเมมเบรนได้ดีสามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) ซึ่งส่วนที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นส่วนรีเทนเตตหรือเพอร์มิเอตก็ได้



ภาพที่ 2.1 หลักการของกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน [12]

เมมเบรนที่มีสมรรถนะสูง คือ เมมเบรนที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง (High flux and selectivity)
2. มีความแข็งแรงเชิงกล (Good mechanical strength)
3. ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะดำเนินการได้ (Chemical and thermal stability under operating condition)
4. มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกไว้ที่ผิวต่ำ (Low fouling tendency)
5. ราคาไม่แพง (Cost effective)

2.3.2 ผลของโครงสร้างพอลิเมอร์ต่อสมบัติของเมมเบรน [14]

พอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นเมมเบรน แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ทั้งแบบมีโครงสร้างเป็นสายโซ่เชิงเส้นหรือสายโซ่กิ่งหรือโครงสร้างเชื่อมขวาง
2. พอลิเมอร์ค้ำยยาง (Rubber polymers)
3. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ทั้งแบบมีโครงสร้างเป็นสายโซ่เชิงเส้น, สายโซ่กิ่ง หรือ โครงสร้างเชื่อมขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ มีผลต่อสมบัติของเมมเบรนที่เตรียมได้ในด้านเสถียรภาพทางเคมีและทางความร้อน (Chemical and thermal stability) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) ค่าซึมผ่าน/คัดเลือกของเมมเบรน (Membrane permeability/selectivity) และค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน (Membrane conductivity) ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องเลือกชนิดของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

สมรรถนะของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. ระยะห่างระหว่างสายโซ่ (Interchain distance) หรือปริมาณอิสระของพอลิเมอร์ (Free-volume) ซึ่งมีผลต่อค่าการซึมผ่านได้ของก๊าซ (Gas permeability)
2. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ซึ่งเป็นค่ากำหนดว่าพอลิเมอร์มีลักษณะทางกายภาพแข็งคล้ายแก้ว (Glassy state) หรือมีลักษณะอ่อนนุ่มยืดหยุ่นคล้ายยาง (Rubbery state)
3. องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารเกิดขึ้นผ่านส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานเท่านั้น
4. อันตรกิริยาของสายโซ่ (Chain interaction) หรือความชอบน้ำ (Hydrophilicity)
5. การเชื่อมขวาง (Crosslinking)
6. การบวม (Swellability)

2.3.3 การละลายและการซึมผ่านของก๊าซในเมมเบรน

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการแยกก๊าซ ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ ออสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random orientation) ขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g โมเลกุลของพอลิเมอร์ ออสัณฐานเคลื่อนที่ได้จำกัด มีการซึมผ่านต่ำ ขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g โมเลกุลจะมีความยืดหยุ่นสูง ปริมาตรอิสระสูง และการซึมผ่านสูง

สภาพการซึมผ่าน (Permeability) เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การละลายขององค์ประกอบของก๊าซและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขององค์ประกอบนั้นในเมมเบรน อัตราการเคลื่อนที่ผ่านของเมมเบรนสามารถทำได้โดยใช้เมมเบรนที่บางมากๆ และความดันด้านสารป้อนสูง สภาพการซึมผ่านขององค์ประกอบก๊าซในพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังตาราง 2.6 การละลายของโมเลกุลของก๊าซในพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าของเหลวมาก โมเลกุลของก๊าซที่รวมตัวกันได้ดีสามารถละลายในเมมเบรนได้ดีขึ้น ถ้าก๊าซมี affinity กับพอลิเมอร์สูง และสำหรับพอลิเมอร์ในสถานะแก้วไม่ว่าก๊าซละลายในเมมเบรนได้มากหรือน้อย ความสามารถในการซึมผ่านในเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

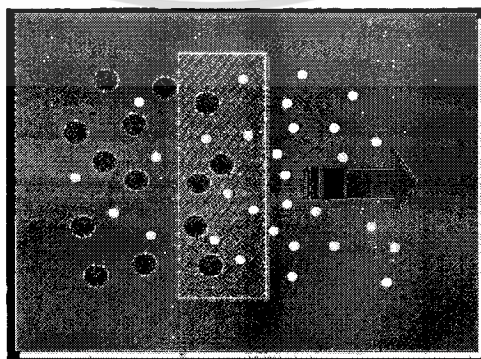
จะเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและสัมประสิทธิ์การละลาย

ตารางที่ 2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการซึมผ่านของตัวถูกละลายในเมมเบรนพอลิเมอร์ [11]

ปัจจัย	สภาพการซึมผ่าน
High polymer density	ต่ำ
High degree of crystallinity	ต่ำ
High degree of crosslinking	ต่ำ
High degree of vulcanization	ต่ำ
High amount of plasticizers	สูง
High amount of filler	ต่ำ
High chemical affinity of solute for polymer (solubility)	สูง

2.3.4 กลไกการซึมผ่านของก๊าซ [10-11]

กลไกการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) เป็นการแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนแบบเนื้อ-แน่น (Dense membrane) โดยใช้แรงขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน สามารถอธิบายด้วยกลไกการละลายแพร่ (Solution diffusion mechanism) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 กล่าวคือสารที่ต้องการแยกหรือเพอร์มิเอต (Permeate) ต้องละลายเข้าไปในเมมเบรนก่อนแล้วซึมผ่าน โดยใช้แรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration gradient) โดยสารละลายในเนื้อเมมเบรน สารสามารถเกิดการแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ความสามารถในการคัดกรองแยกสารเกิดจากความแตกต่างของความสามารถในการละลายของสารและความเร็วในการซึมผ่านของสารเข้าไปในเนื้อเมมเบรนแต่ละชนิด ทำให้สารแต่ละชนิดมีการซึมผ่านเมมเบรนได้แตกต่างกัน



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการซึมผ่านของก๊าซผ่านเมมเบรนแบบเนื้อ-แน่น (Dense membrane) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหลักการนี้ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้

1. ที่ผิวสัมผัสของสารละลายกับผิวหน้าเมมเบรนของทั้ง 2 ด้านของเมมเบรนต้องอยู่ในสถานะที่สมดุล
2. ศักย์ทางเคมีของสารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรนต้องต่อเนื่อง เป็นการบ่งบอกถึงการดูดซึมที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของสารภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน
3. ความดันที่ใช้ทั้งสองข้างของแต่ละชนิดผ่านเมมเบรน ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้น ถ้าความแตกต่างของความเข้มข้นสูงๆ อัตราการซึมผ่านเมมเบรนจะสูง ระยะเวลาที่ใช้ในการซึมผ่านขึ้นกับความหนา ถ้าความหนาของเมมเบรนน้อยๆ จะทำให้การซึมผ่านเร็วขึ้น หรือฟลักซ์ (Flux) สูง

2.3.5 สมรรถนะของกระบวนการ [14]

โดยทั่วไปการประเมินสมรรถนะของกระบวนการซึมผ่านของก๊าซ นิยมใช้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตเป็นตัวบ่งชี้ ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตคือ ปริมาณของเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ หรือ $1/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.1)

$$J_v = V_p / A \cdot t \quad (2.1)$$

เมื่อ J_v คือ ฟลักซ์ของเพอร์มิเอตของตัวทำละลาย ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

V_p คือ ปริมาตรของเพอร์มิเอต (m^3)

A คือ พื้นที่ของเมมเบรน (m^2)

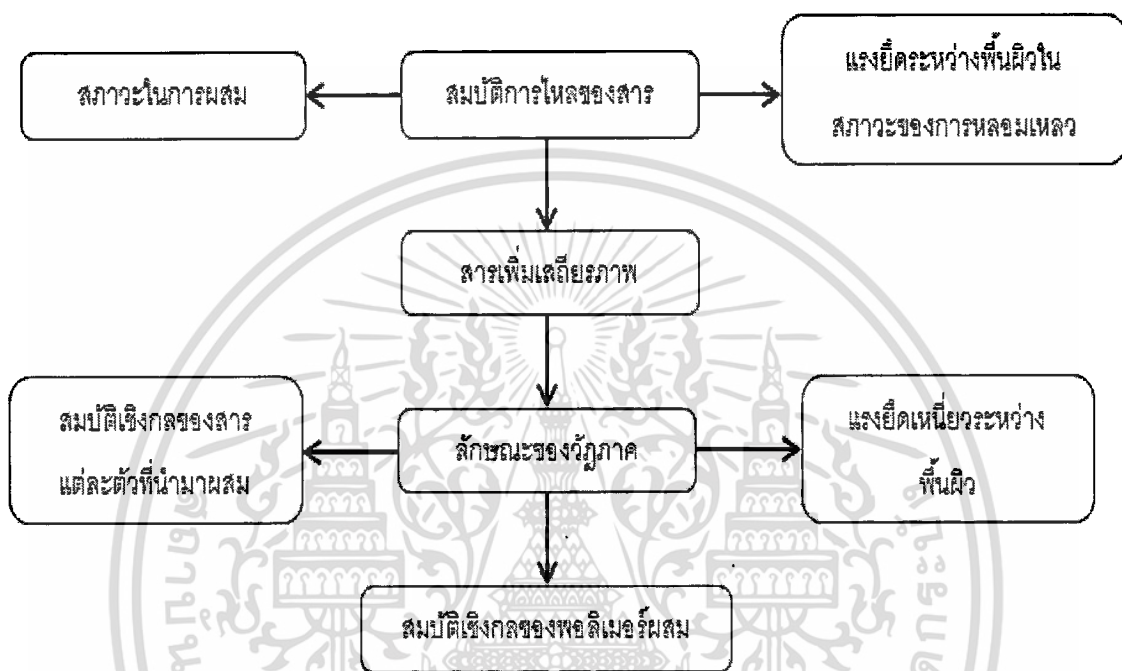
t คือ เวลา (s)

ฟลักซ์ (Flux) ที่ได้จะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของก๊าซต่างชนิดมีการละลายในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน

2.4 พอลิเมอร์ผสม [16-18]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) คือ การนำพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน (Combining) โดยวิธีทางกายภาพซึ่งส่วนมากจะปราศจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยวัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม คือ ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีความหลากหลายมากขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์ชนิดใหม่ ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่า แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก อาจทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกวัฏภาค โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการผสมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมแสดงตามแผนภาพในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [19]

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว หรือไม่สามารถผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวได้ (Immiscible) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันคือพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกของวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมกัน สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์จึงเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม ซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะถูกกำหนดโดยสมดุลของเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) สำหรับสารที่มีโมเลกุลใหญ่อย่างพอลิเมอร์นั้นจะมีค่าเอนโทรปีเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้โอกาสที่พอลิเมอร์จะผสมเข้ากันได้ลดลง ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจึงถูกกำหนดโดยเอนทัลปีอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการผสมสามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.2)

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระในการผสม (kJ/mol)
 ΔH คือ ความแตกต่างของเอนทาลปีในการผสม (kJ/mol)
 ΔS คือ ความแตกต่างของเอนโทรปีในการผสม (kJ/mol)

โดยความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันสามารถจำแนกได้จากค่าความแตกต่างของพลังงานอิสระในการผสม (ΔG) [19] ดังนี้

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) มีค่า ΔG เป็นลบ นั่นคือ $\Delta H - T\Delta S < 0$ เป็นผลทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) มีค่า ΔG เป็นบวก นั่นคือ $\Delta H - T\Delta S > 0$

เมื่อพิจารณาพลังงานอิสระในการผสม สมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองที่นำมาผสมกัน สามารถเขียนกราฟ จะได้พฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมเป็น 2 กรณี [17] คือ

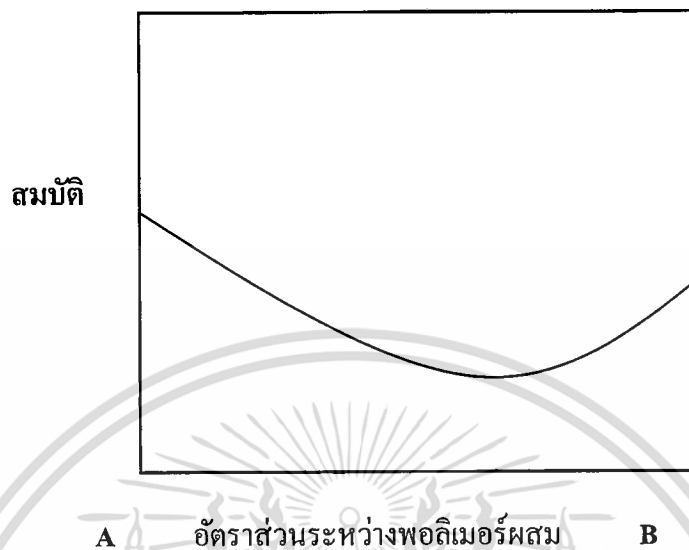
กรณีที่ 1 พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blends) ถ้าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปสมบัติที่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้น โค้งสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [17]

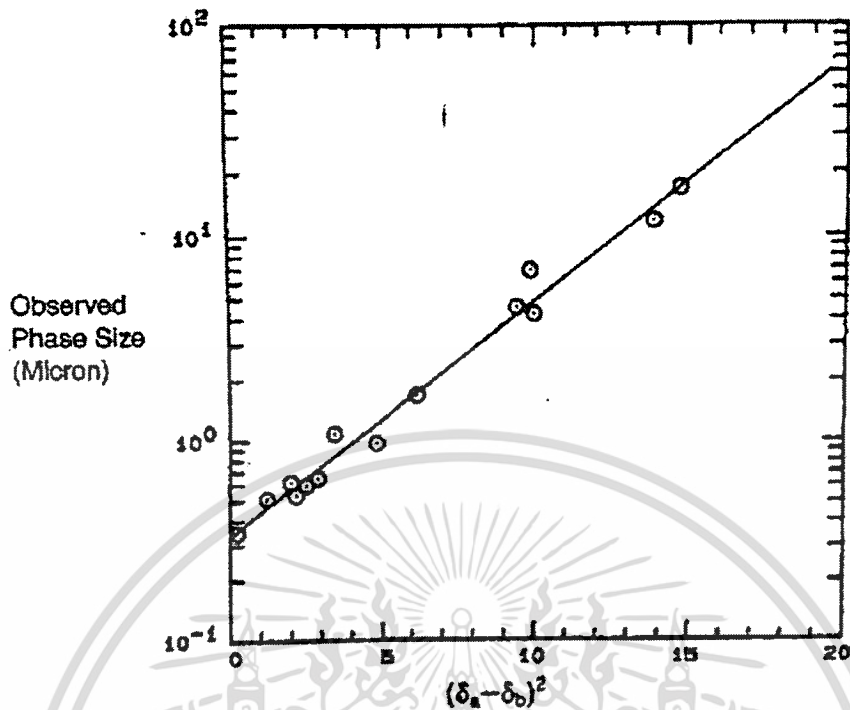
กรณีที่ 2 พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ถ้าพอลิเมอร์สองชนิดเอกสารไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์และแยกออกเป็นสองวัฏภาค โดยร้อยละของวัฏภาคค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Interphases) มีแรงดึงดูดระหว่างกันน้อยมาก ดังนั้นอาจทำให้สมบัติของ พอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์เดิม จึงทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [17]

นอกจากการพิจารณาค่าพลังงานอิสระในการผสมแล้ว ยังสามารถพิจารณาจากค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) โดยเลือกพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าดังกล่าวเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว (Surface tension) ของพอลิเมอร์ โดยถ้าหากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก ทำให้มีแรงตึงผิวระหว่างกันสูง ทำให้ผสมเข้ากันได้ยากและเกิดวัฏภาคใหญ่เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค ดังนั้นในการเลือกคู่ผสมจะต้องเลือกคู่ที่มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี จากภาพที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและความแตกต่างของค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน พบว่าขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความสามารถในการละลายที่เพิ่มขึ้น ในตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลายบางชนิด



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) กับค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) [20]

ตารางที่ 2.7 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลายชนิดต่างๆ [21]

Solvent	δ_1 (cal/cm ³)	Polymer	δ_2 (cal/cm ³)
n-Hexane	7.24	Polyethylene	7.90
CCl ₄	8.58	Polybutadiene	8.40
Xylene	8.80	Polystyrene	8.60
2-Butanone	9.04	Poly(methyl methacrylate)	9.10
Benzene	9.15	Poly(vinyl chloride)	9.50
Chloroform	9.24	Poly(ethylene terephthalate)	10.70
Acetone	9.17	Nylon 66	13.60
Methanol	14.50	Polyacrylonitrile	15.40

หากคู่พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก หรือหาสารที่มี
ความสามารถในการละลายใกล้เคียงกันยาก จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
(Immiscible blend) มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งเป็นข้อบกพร่องในชิ้นงาน จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเว็บไซต์นี้โปรดแจ้งให้เจ้าของเว็บไซต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้มีความสนใจในการแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยมีการนำเสนอสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้และให้ผลในการช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสอง ภูมิภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีภูมิภาคกระจาย ตัวที่มีขนาดเล็กและทำให้สมบัติยึดติดที่พื้นผิวระหว่างภูมิภาคดีขึ้น

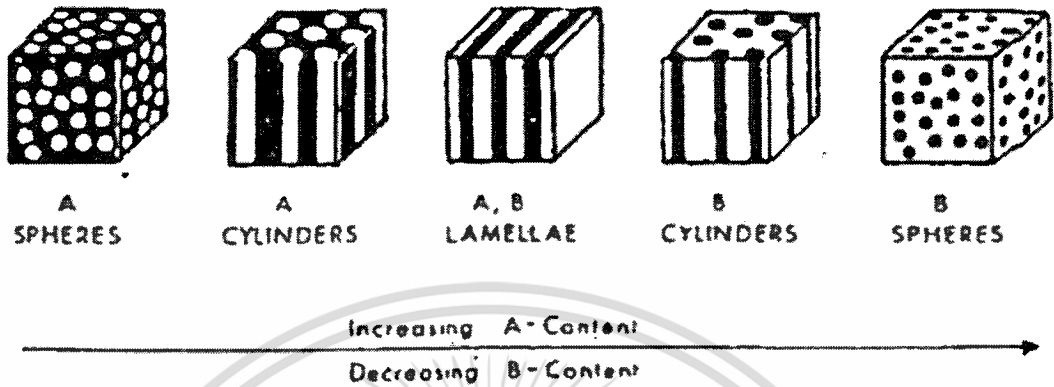
การปรับอัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio, λ) [22]

อัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio, λ) คือค่าความหนืดของภูมิภาคต่อเนื่อง (Matrix, Continuous phase) ต่อความหนืดของภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) สามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.3)

$$\lambda = \eta_2 / \eta_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ λ คือ อัตราส่วนความหนืด
 η_1 คือ ความหนืดของภูมิภาคต่อเนื่อง
 η_2 คือ ความหนืดของภูมิภาคกระจาย

การปรับอัตราส่วนความหนืดให้มีค่าประมาณ 1 ($\lambda = 1$) จะสามารถช่วยเพิ่ม ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยช่วยให้พอลิเมอร์ผสมปรับเข้าสู่เสถียรภาพที่เสถียรได้เร็วยิ่งขึ้น ลดแรงตึงที่พื้นผิวระหว่างสองภูมิภาค และทำให้ภูมิภาคกระจายมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเสถียรภาพ-วิทยา โดย พอลิเมอร์ที่มีอยู่ในอัตราส่วนที่มากกว่าเป็นภูมิภาคหลัก (Major phase) เป็นภูมิภาคต่อเนื่องทำ หน้าที่ควบคุมสมบัติส่วนใหญ่ของพอลิเมอร์ผสมในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนน้อยกว่าเป็นภู ภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) กระจายตัวอยู่ในภูมิภาคหลัก ด้วยเหตุนี้ถ้าอัตราส่วน A/B มีค่า เพิ่มขึ้น ลักษณะทางเสถียรภาพจะเปลี่ยนไปจากเดิมที่มีการกระจายตัวอนุภาคทรงกลม A (Sphere A) ในภูมิภาคต่อเนื่อง B ไปเป็นแบบท่อ A (Cylinder A) ที่กระจายตัวในภูมิภาคต่อเนื่อง B และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ A ให้สูงขึ้น จะได้โครงสร้างของ A และ B ซ้อนกันเป็นชั้นๆ ที่เรียกว่า Lamellae และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ A ให้มากพอจะเกิดการเปลี่ยนภูมิภาคกลับ (Phase reversion) นั่นคืออนุภาค B จะกระจายตัวในภูมิภาคต่อเนื่องของ A ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์ A

2.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [7, 23-24]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) จัดเป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ชนิดหนึ่ง พอลิเอทิลีนได้จากการสังเคราะห์สารปิโตรเลียม ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ซึ่งพอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป (Commodity plastics) สามารถแปรรูปได้หลากหลายตอบสนองความต้องการของมนุษย์ จึงมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีราคาถูกและมีสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น แข็งแรง เหนียว กันการสึกกร่อนได้ดี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงพอลิเอทิลีนสามารถบวมตัวและละลายในพาราไซลีน (p-Xylene), ไตรคลอโรเบนซีน (Trichlorobenzene), เดคเคน (Decane) และเดคคาลิน (Decalin) ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซต่ำ ง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้โครงสร้างของพอลิเอทิลีนมีลักษณะเป็นเส้นตรงทำให้มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง (High crystallinity) จุดหลอมเหลวขึ้นกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง -130°C ถึง 60°C พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามโครงสร้าง คือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene หรือ HDPE) มีความหนาแน่น $0.941\text{-}0.965\text{ g/cm}^3$

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene หรือ LDPE) มีความหนาแน่น $0.910\text{-}0.925\text{ g/cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของ LLDPE [24]

Properties	LLDPE
Density, g/cm ³	0.926
Surface hardness	SD48
Tensile strength, MPa	20
Flexural modulus, GPa	0.35
Notched izod, kJ/m	1.06
Elongation at break, %	500
Strain at yield, %	20
Max operating temp, °C	50
Water absorption, %	0.01
Oxygen index, %	17
Flammability	HB
Dielectric strength	25
Dielectric constant 1kHz	2.3
Melting temperature range	120 to 160 °C

ตารางที่ 2.9 สมบัติของฟิล์ม LLDPE และ LDPE จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป [25]

Properties	LLDPE	LDPE
Density, g/cm ³	0.926	0.918
Melt flow index, g/10 min	0.8	2.0
Dart impact, g	210	110
Puncture energy, J/mm	60	25
Tensile strength (MD), MPa	33	20
Tensile strength (TD), MPa	25	18
Tensile elongation (MD), %	690	300
Tensile elongation (TD), %	740	500
Modulus (MD), MPa	210	145
Modulus (TD), MPa	250	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

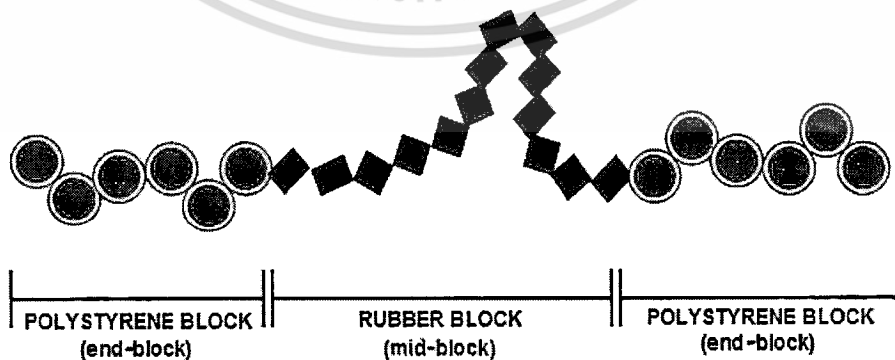
ปัจจุบันสัดส่วนการใช้งานของ PE แต่ละชนิดในสหรัฐอเมริกาโดยประมาณต่อปีนั้นพบว่า LDPE มีส่วนแบ่ง 30%, HDPE 45% และ LLDPE 25% [18] โดยลักษณะของการนำไปใช้งานแสดงดังตารางที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า LLDPE ถูกนำมาผลิตฟิล์มมากกว่า LDPE ในปัจจุบัน เพราะ LLDPE มีสมบัติโดยทั่วไปเหมือนกับ LDPE มีค่า Melt viscosity สูงกว่า LDPE ในระหว่างการขึ้นรูป ความแข็งแรงของ LLDPE ในระหว่างการขึ้นรูปเป็นฟิล์มจึงสูงกว่า LLDPE จึงได้รับความนิยมในการผลิตเป็นฟิล์มมากกว่า

ตารางที่ 2.10 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ของ PE ชนิดต่างๆ [18]

Market area	LDPE (%)	HDPE (%)	LLDPE (%)
Film	58	19	66
Extrusion coating	13	7	<1
Injection molding	6	18	10
Blow molding	<1	35	<1
Wire and cable	4	<1	3
Others	19	20	22

2.6 พอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน [26-28]

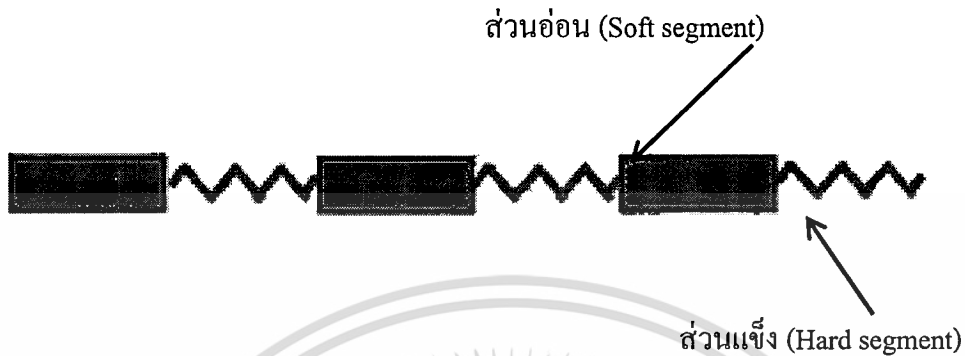
พอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylene-butylene-styrene), SEBS) จัดเป็นยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPEs) ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยบล็อกของพอลิสไตรีน (Polystyrene block) และโคพอลิเมอร์เอทิลีนและบิวทิลีน (Ethylene-butylene copolymer) ดังภาพที่ 2.9 ทำให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกชนิดนี้มีเฉพาะพันธะเดี่ยวเท่านั้น



ภาพที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทั่วไปของ SEBS [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางเทอร์โมพลาสติกชนิดบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว ซึ่งในแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วยส่วนแข็ง (Hard segment) และส่วนอ่อน (Soft segment) มาเรียงต่อกันดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แบบจำลอง โครงสร้าง โมเลกุลของบล็อกโคพอลิเมอร์ [27]

สมบัติของ SEBS และการนำไปใช้งาน

SEBS มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ -55°C ที่มาจากส่วนของ Ethylene-butylene (Soft segment) และที่ 95°C มาจากส่วนของ Polystyrene (Hard segment) จากสององค์ประกอบนี้ ส่งผลให้ SEBS มีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนสูง มีความเหนียว และยังสามารถในการรักษาสมบัติความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยทั่วไป SEBS สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เนื่องจากมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจึงเหมาะที่จะใช้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้งานกลางแจ้ง SEBS สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) ในสถานะที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สภาวะการขึ้นรูป SEBS ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และ
กระบวนการอัดรีด (Extrusion process) [30]

กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	
Barrel setting	205 - 245 °C
Injection speed	ปานกลาง
Injection pressure	350 ถึง 1500 kg/cm ³
Back pressure	ปานกลางถึงสูง
Screw speed	25 ถึง 75 rpm
Tool temperature	35 - 65 °C
Melt temperature	175 - 200 °C
Processing stability	ดีเยี่ยม
กระบวนการอัดรีด (Extrusion process)	
Barrel setting	160 - 210 °C
Screw speed	50 - 100 rpm
Haul-off/Cooling	water bath chilled 10°C

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก๊าซเอทิลีนเป็นฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้น ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาของผลผลิตภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การสุกของผลไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลไม้ประเภท Climactic มีการผลิตก๊าซเอทิลีนเมื่อเริ่มสุกสูงกว่าผลไม้ประเภท Non climacteric ทำให้การหายใจสูงขึ้นและผลิตผลเกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น [31] ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาสารยับยั้งหรือกำจัดเอทิลีนมาใช้เพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของผลผลิตสด โดยสารดูดซับเอทิลีนที่นิยมใช้ ได้แก่ ค่างทับทิม (Potassium permanganate, KMnO_4) โดยพบว่าเมื่อเก็บรักษาผลผลิต เช่น กล้วย มะม่วง ร่วมกับการใช้ค่างทับทิม ผลผลิตมีอายุการเก็บรักษานานขึ้นและช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของผลผลิต เนื่องจากค่างทับทิมทำปฏิกิริยากับเอทิลีนในบรรยากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาล ทำให้ช่วยลดระดับความเข้มข้นของเอทิลีนที่มีอยู่ในบรรยากาศได้ [32] แต่อย่างไรก็ตามค่างทับทิมเป็นพิษ สามารถทำลายเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้และละลายน้ำได้ง่ายจึงเกิดการปนเปื้อนในผลผลิตสด ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับต่อการบริโภค [33]

การศึกษาผลของการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเมอร์ต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีน, เอกสารโพ-ลิพรอพิลีน, พอลิเอสเตอร์ และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น โดยพอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแปรรูปได้ง่าย ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีความหลากหลายและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ จึงมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีราคาถูกและมีสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานหลายด้าน [4] จึงมีการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มเอทิลีน (LDPE, LLDPE และ HDPE) และการใช้ฟิล์มที่มีความหนาแตกต่างกัน (50, 80 และ 100 μm) พบว่าฟิล์ม LDPE มีค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน ($30.8 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) และก๊าซออกซิเจน ($16.6 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) ซึ่งมีความสูงกว่าฟิล์ม LLDPE และ HDPE เนื่องจาก LDPE มีสายโซ่กิ่งสูง จึงส่งผลให้มีความเป็นผลึกต่ำกว่า LLDPE และ HDPE ก๊าซจึงสามารถซึมผ่านได้ดีกว่า และการใช้ฟิล์มที่มีความหนาแตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ [34]

การศึกษาผลของจำนวนชั้นฟิล์มที่มีผลต่อประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) ที่ 1, 2, 4, 8 และ 12 ชั้น ทำการทดลองโดยป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ สภาวะการทดลองเริ่มต้นจาก 25°C จนถึง 85°C ที่ความดัน 20 cmHg จากการทดลองพบว่าจำนวนชั้นของฟิล์มไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์ม (Gas flux) ที่สภาวะสมดุลจะไม่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นของฟิล์มไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [35]

นอกจากนี้ยังมีการนำเอาซีโอไลต์ที่เป็นผลึก มีรูพรุน และเหมาะสำหรับใช้เป็นสารดูดซับก๊าซเอทิลีนมาประยุกต์ใช้แทนสารดูดซับเอทิลีนทางการค้าที่มีค่าทั้งที่แพงและเป็นองค์ประกอบ สำหรับการเก็บรักษาเพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงของผลิตผลสด ทำให้ยังคงความสดใหม่และรักษาคุณภาพทางโภชนาการ [4] การศึกษาฟิล์มคอมโพสิตซีโอไลต์-พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และซีโอไลต์-พอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (SEBS) โดยเลือกสารดูดซับเป็นซีโอไลต์ทางการค้าคือ ZSM5-5(280), ZSM-5(50) และซีลิกาไลต์สังเคราะห์ พบว่าการเติม ZSM5-5(280) มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กในฟิล์มคอมโพสิตช่วยให้การซึมผ่านก๊าซเอทิลีนดีกว่าการเติม ZSM-5(50) เนื่องจากความมีขั้วต่ำกว่า และการเติมซีลิกาไลต์ลงในฟิล์ม SEBS 1652 โดยการหล่อแบบสารละลาย พบว่าการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงขึ้นแต่มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค SEBS และซีลิกาไลต์ต่ำ เนื่องจากเกิดช่องว่างที่พื้นผิวของ SEBS และอนุภาคซีลิกาไลต์ และพบว่าค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนในฟิล์ม ZSM-5(280)/SEBS มีค่าสูงกว่าฟิล์ม ZSM-5(280)/LDPE แต่อย่างไรก็ตาม SEBS มีความเหนียวืดสูงและขึ้นรูปยาก [16] จึงมีการนำพอลิโอฟีนมาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทำให้ขึ้นรูปฟิล์มง่ายขึ้น โดยเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของ LDPE กับ SEBS ที่มีการเติมซีโอไลต์ชนิดไม่มีขั้ว ZSM-5(280) ในปริมาณ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักลงในฟิล์ม SEBS และทำการเตรียมให้ซีโอไลต์ ZSM-5(280) มีการกระจายตัวในชั้น SEBS 2 แบบ (แบบ Surface-rich และแบบ Well-dispersed) พบว่าการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 ในปริมาณ 5-10% สามารถเพิ่มการซึม

ผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่ถ้าปริมาณที่เติมมากกว่า 10% การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มไม่มากนัก และการกระจายตัวที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน เนื่องจากมีชั้น LDPE ที่มีความเป็นผลึก (Crystallinity) ขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซ ทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ช้า [5] จากปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยต่อมาได้มีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตสองชั้นของพอลิโพลีเอทิลีน (LDPE) กับ SEBS ที่มีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5(280) ปริมาณ 5% ลงในฟิล์ม SEBS โดยทำการเจาะรูฟิล์มในชั้น LDPE ให้มีปริมาตรรูที่เจาะ 0-100% และขนาดของรู 2-5 mm เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม ก่อนนำไปประกบติดกับชั้น SEBS พบว่าฟิล์มที่มีการเจาะรู 40% ของพื้นที่และมีขนาดรู 2 mm มีค่าความแข็งแรงเชิงกลดี มีค่าการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูง และการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 5% ช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเจาะรูที่ฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงลดลงและขาดง่ายขึ้น [6]

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาฟิล์มที่มีการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนได้ดีด้วยระบบ พอลิเมอร์ผสม โดยเลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากราคาถูกกว่าและมีสมบัติเชิงกลดีกว่า LDPE เช่น ทนแรงฉีกขาดและแรงที่มทะลุดีกว่า อย่างไรก็ตามความเป็นผลึกของ LLDPE ส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่ำ จึงทำการปรับปรุงการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE กับ SEBS เนื่องจากปริมาณของ SEBS ที่เพิ่มขึ้น สามารถช่วยเพิ่มค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนให้สูงขึ้น โดยมีปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20 และ 70/30, เปอร์เซ็นต์ของสไตรีนใน SEBS (12%wt และ 29 %wt) และค่าครรชนิกการไหลของ SEBS (MFI คือ 1,5 และ 22 g/10 min) จากนั้นทำการศึกษาการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly (styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) จะใช้เกรด G1650, G1652 และ G1657 จากบริษัท Kraton Performance Polymers จำกัด สมบัติของ SEBS แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ SEBS

สมบัติ	G1650	G1652	G1657
ปริมาณสไตรีน (Styrene content), %wt	28.8 ถึง 31.6	29.0 ถึง 30.8	12.3 ถึง 14.3
ครรชนีการไหล (Melt flow rate), g/10 min, 230 °C	<1	5	22
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.91	0.91	0.90
ความหนืด (Viscosity), cP	1100 ถึง 1900	400 ถึง 525	1200 ถึง 1800
การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break), %	500	500	750
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), psi	5000	4500	3400
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (300% Modulus), psi	500	700	350
ความแข็งกด (Hardness), Shore A, 10 s	72	60	47

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) เกรดเป่าฟิล์ม PE 1220G1 จากบริษัทดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด สมบัติของ LLDPE แสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ LLDPE

สมบัติ	PE 1220G1
ครรชนีการไหล (Melt flow rate), g/10 min, 190°C	2
ความหนาแน่น (Density), g/cm ³	0.919

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางที่ 3.1 ถึง 3.2 เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)
4. เททระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF)
5. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)
6. ก๊าซ Air Zero ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.9 % จากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด
7. น้ำกลั่น (Distilled water)
8. ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas) ความบริสุทธิ์สูงอย่างน้อย 99.9% จากบริษัทไทยอินดัส-
เตรียลแก๊ส จำกัด
9. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas) ความบริสุทธิ์สูงอย่างน้อย 99.9% จากบริษัทไทยอินดัส-
เตรียลแก๊ส จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) บริษัท C.Melchers (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น PL2000 / PL 2001
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) บริษัทแมชกรุป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT
3. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-5410LV
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared-spectrophotometer, FT-IR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FT-IR spectrum Gx
6. เครื่อง Gas chromatograph บริษัท Varian จำกัด รุ่น CP-3800
7. ท่อแก้วใสสำหรับวัดการซึมผ่านของก๊าซ (เครื่องประกอบ Home-made)
8. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น DSC 204 F1 Phoenix[®] ASC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้ใช้ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า
11. ปริกัณฑ์เครื่องแก้ว
12. ไมโครมิเตอร์
13. กระจบอกใส่ไนโตรเจนเหลว
14. ตู้อบความร้อน

3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS ซึ่งมีอัตราส่วน LLDPE/SEBS ต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดโดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- Front plate 190 °C
- Mixer chamber 190 °C
- Rear panel 190 °C
- Roter speed 60 rpm
- เวลาในการผสม 10 นาที

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ SEBS (โดยน้ำหนัก)

เกรดของ LLDPE	เกรดของ SEBS	ชื่อสูตร	พอลิเมอร์	
			LLDPE	SEBS
PE 1220G1	-	LLDPE	100	-
PE 1220G1	G1650	LL80S20G50	80	20
		LL70S30G50	70	30
PE 1220G1	G1652	LL80S20G52	80	20
		LL70S30G52	70	30
PE 1220G1	G1657	LL80S20G57	80	20
		LL70S30G57	70	30

3.4 การเตรียมฟิล์ม

ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) ให้ฟิล์มมีความหนาประมาณ 50-60 μm โดยใช้สภาวะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ 20x20x1cm³
- ความดันในการกดอัด 1800 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุณหภูมิในการกดอัด	200 °C
- เวลาในอุณหภูมิ	5 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์	5 นาที
- เวลาในการกดอัดครีออน	5 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น	12 °C
- เวลาในการกดอัดเย็น	5 นาที

3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์มด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE/SEBS ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 40/60 และ 0/100 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) โดยชั่งน้ำหนักรวมของ LLDPE และ SEBS 10 กรัม ทำการละลายพอลิเมอร์ในไซลีนปริมาตร 60 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C พร้อมคนด้วยแท่งแก้ว จากนั้นเทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ ตั้งทิ้งไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปกดอัดเป็นฟิล์มเรียบโดยใช้สภาวะเครื่องกดอัดตามข้อ 3.4 นำฟิล์มตัวอย่างมาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงเลขคลื่น 4000 cm^{-1} ถึง 650 cm^{-1} ใช้เทคนิค Attenuated total reflectance (ATR) เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ที่มีอยู่จริงในฟิล์มสูตรต่างๆ หาอัตราส่วนระหว่างค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาว 698 cm^{-1} กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1462 cm^{-1} นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างอัตราส่วนของค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 698 cm^{-1} ต่อความยาวคลื่น 1462 cm^{-1} กับปริมาณ SEBS (% โดยน้ำหนัก)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ ทำการคำนวณอัตราส่วนของค่าดูดกลืนคลื่นแสงเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ SEBS ที่มีอยู่จริงในฟิล์มตัวอย่าง

3.6 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ LLDPE ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในช่วง 25-160 °C ด้วยอัตราเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาทีภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) โดยใช้น้ำหนักตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม นำข้อมูลที่ได้มาหาค่า T_m , T_c และเอนทัลปีความเย็นเป็นผลึกของ LLDPE ตามมาตรฐาน ASTM E794 โดยนำค่า Heat of fusion (ΔH_f) มาคำนวณหาเอนทัลปีความเย็นเป็นผลึก สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{โดยน้ำหนักของ PE ที่มีอยู่จริง}} \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100%

มีค่า 293 J/g

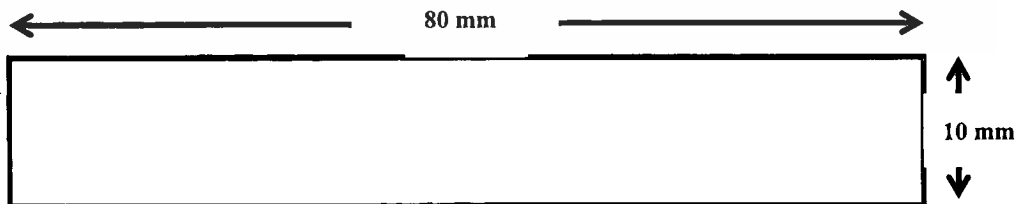
3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ นำไปแช่ในโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเย็น แล้วทำการสกัดด้วยอากาศของ SEBS ออกจากชิ้นงานตัวอย่าง โดยการนำแผ่นฟิล์มที่หักเรียบร้อยแล้วใส่ในขวดรูปชมพู่และแช่ด้วยตัวทำละลายเทตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) แล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องนำฟิล์มไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์มเพื่อดูการกระจายตัวของ SEBS ในฟิล์มตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.8 การทดสอบการรับแรงดึง

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 882 โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด $10 \times 80 \text{ mm}^2$ ดังภาพที่ 3.1 โดยใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

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



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ร้อยละการยืด ณ จุดขาด, ความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยัง สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)} = (l - l_0 / l_0) \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.4)$$

$$\text{มอดูลัสของยัง (Young 's Modulus)} = \text{ความเค้น/ความเครียด} \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดนั้นๆ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

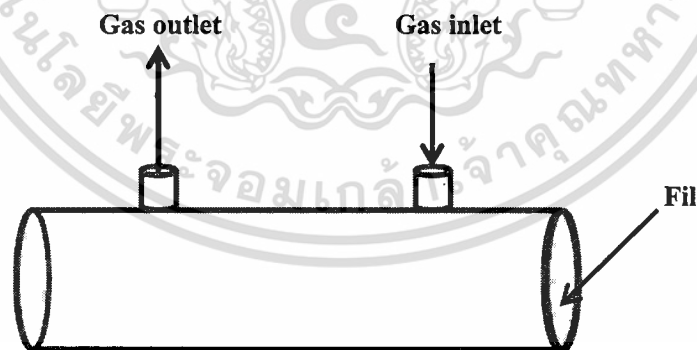
l คือ ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด

l_0 คือ ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length)

หมายเหตุ: ค่ามอดูลัสของยังคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 0.5 และ 1% การดึงยึด)

3.9 การทดสอบการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน

การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน เตรียมได้โดยนำฟิล์มตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ มาติดตรงปลายของท่อแก้วใสทั้งสองข้างดังภาพที่ 3.2 ทำการผสมก๊าซไนโตรเจน (N_2) กับก๊าซเอทิลีน (C_2H_4) ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ ด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Mass flow meter) ดังตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 ท่อแก้วใส

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (% โดยปริมาตร)

ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน, % (v/v)	C ₂ H ₄ flow rate, (ml/min)	N ₂ flow rate, (ml/min)
5	10	190
10	20	180
20	40	160

จากนั้นทำการก๊าซผสมทางด้าน Gas inlet ให้เต็มท่อแก้วใสปริมาตร 1 ลิตรประมาณ 30 นาที นำเข็ม (Syringe) ดูดเอาก๊าซที่อยู่ในท่อแก้วใส ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนตั้งต้น โดยทำการฉีดเข้าเครื่อง Gas chromatograph (GC) ที่บรรจุคอลัมน์ชนิดแพ็ค (Porapak Q column) โดยมีก๊าซฮีเลียม (He) เป็นก๊าซพา ใช้สถานะเครื่องในการทดสอบดังนี้

- Column oven 120°C
- Thermal Conductivity Detector 120°C

ทำการฉีดก๊าซทุกๆ 0 นาที, 15 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนจนมีค่าคงที่ โดยจะทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20% โดยปริมาตรของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร แล้วเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงที่สุดมาทดสอบที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 10% โดยปริมาตรและ 5% โดยปริมาตรดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ใช้ทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ชื่อสูตร	ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)		
	5	10	20
Pure LLDPE	-	-	√
LL80S20G50	-	-	√
LL70S30G50	-	-	√
LL80S20G52	-	-	√
LL70S30G52	-	-	√
LL80S20G57	-	-	√
LL70S30G57	√	√	√

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

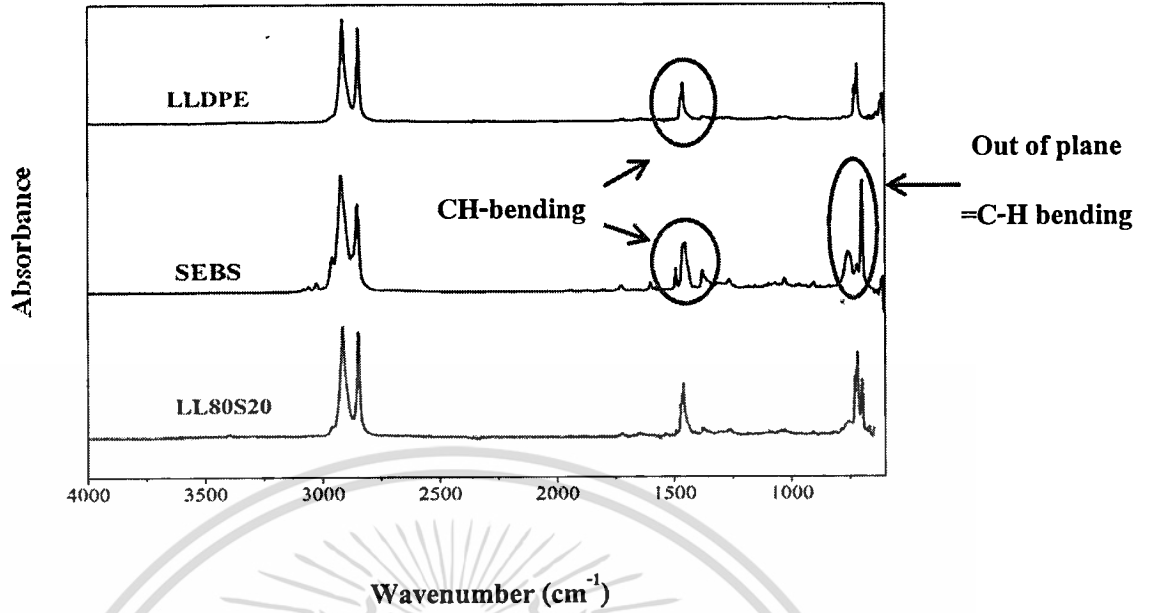
ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) กับบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly (styrene-ethylenebutylene-styrene), SEBS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์โดยศึกษาอัตราส่วน LLDPE/SEBS คือ 80/20 และ 70/30 เปอร์เซ็นต์ของสไตรีนใน SEBS (12 และ 29 %wt) และครรชนีการไหลของ SEBS (MFI คือ 1,5 และ 22 g/10 min) ที่มีต่อการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด นำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์ม LLDPE/SEBS ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

FT-IR สเปกตรา ดังภาพที่ 4.1 พบว่าใน LLDPE มีค่าสัญญาณ CH-bending ที่ความยาวคลื่น 1462 cm^{-1} , SEBS มีค่าสัญญาณ CH-bending ของเอทิลีน-บิวทิลีน และ Out of plane =C-H bending ซึ่งพบในวงอะโรมาติกของสไตรีนที่ความยาวคลื่น 698 cm^{-1} และในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL80S20 แสดงพิกัดสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันที่มาจากทั้งส่วนของ LLDPE และ SEBS จากผลการทดลองสามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ที่มีอยู่ในฟิล์ม LLDPE/SEBS โดยนำมาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance ratio) จากสมการ 4.1 กับปริมาณ SEBS ในอัตราส่วน LLDPE/SEBS 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 0/100 โดยน้ำหนัก

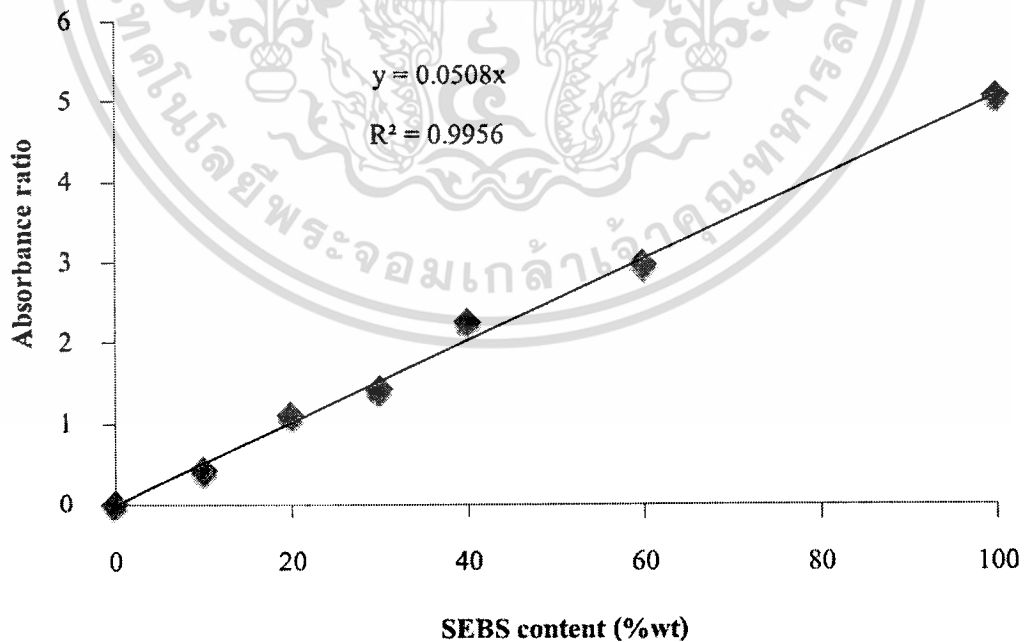
$$\text{Absorbance ratio} = \frac{\text{Absorbance at } 698\text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbance at } 1462\text{ cm}^{-1}} \quad (4.1)$$

เมื่อ Absorbance at 698 cm^{-1} คือ พิกัดของหมู่ฟังก์ชัน Out of plane =C-H bending
Absorbance at 1462 cm^{-1} คือ พิกัดของหมู่ฟังก์ชัน C-H bending



ภาพที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์ม LLDPE, SEBS และ LL80S20

จากกราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 4.2 มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดกันใจ (R^2) เท่ากับ 0.9956 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ทำให้สามารถนำกราฟนี้ไปใช้หาปริมาณ SEBS ที่มีอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้



ภาพที่ 4.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงกับปริมาณ SEBS ในเอกสารนี้เป็นเอกสารฟิล์ม LLDPE/SEBS ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณ SEBS และ LLDPE โดยน้ำหนักที่พบในฟิล์ม LLDPE/SEBS

ชื่อสูตร	ปริมาณ SEBS โดยน้ำหนัก		ปริมาณของ LLDPE โดยน้ำหนักที่พบในฟิล์ม LLDPE/SEBS
	ที่กำหนด	ที่พบในฟิล์ม	
LLDPE	-	-	100
LL80S20G50	20	20.9	79.1
LL70S30G50	30	29.2	70.8
LL80S20G52	20	21.6	78.4
LL70S30G52	30	26.9	73.1
LL80S20G57	20	20.8	79.2
LL70S30G57	30	28.4	71.6

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณ SEBS โดยน้ำหนักที่พบในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ SEBS ที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าวิธีการสร้างกราฟมาตรฐานดังกล่าวสามารถนำไปใช้หาค่าปริมาณ SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ได้

4.2 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (ΔH_f) เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในแต่ละสูตรมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 25-29 % แสดงว่าเมื่อทำการเติม SEBS ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกใน LLDPE และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรพบว่า ทั้ง First run และ Second run มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงสันนิษฐานได้ว่าพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ที่ผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผลึก (Crystal growth) ใน LLDPE

ตารางที่ 4.2 ค่า ΔH_f , T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในฟิล์ม LLDPE/SEBS

ชื่อสูตร	ΔH_f (J/g)		T_m ($^{\circ}$ C)		T_c ($^{\circ}$ C)		% Crystallinity	
	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd
LLDPE	76.57	85.19	123	124	106	106	26.1	29.0
LL80S20G50	63.02	67.70	125	126	104	103	27.2	26.1
LL70S30G50	65.02	66.69	125	126	103	103	22.6	29.2
LL80S20G52	52.27	56.46	119	120	102	102	22.7	24.6
LL70S30G52	56.59	58.40	119	122	100	102	26.4	27.2
LL80S20G57	56.81	61.09	126	127	103	103	24.5	26.3
LL70S30G57	49.41	51.72	125	126	104	104	23.6	24.7

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในแต่ละสูตรมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 25-29 % แสดงว่าเมื่อทำการเติม SEBS ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกใน LLDPE และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรพบว่า ทั้ง First run และ Second run มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงสันนิษฐานได้ว่าพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ที่ผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผลึก (Crystal growth) ใน LLDPE

วิธีการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^{\circ}} \times \frac{100}{\% \text{ โดยน้ำหนักของ LLDPE ที่พบในฟิล์ม}} \quad (4.2)$$

ตัวอย่างการคำนวณในฟิล์มสูตร LL70S30G50

- จากข้อมูลตารางที่ 4.2
- ค่าพื้นที่ใต้กราฟของ T_m (ΔH_f) ของ 1st = 65.02
 - ค่าพื้นที่ใต้กราฟของ T_m (ΔH_f) ของ 2nd = 66.69
 - % โดยน้ำหนักของ PE ที่มีอยู่จริงในฟิล์ม = 70.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ LLDPE ที่มีความเป็น

ผลึก 100% (ΔH_f°) = 293 J/g

$$1^{st}; \text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{65.02 \times 100}{293} \times \frac{100}{70.8}$$

$$= 22.6 \%$$

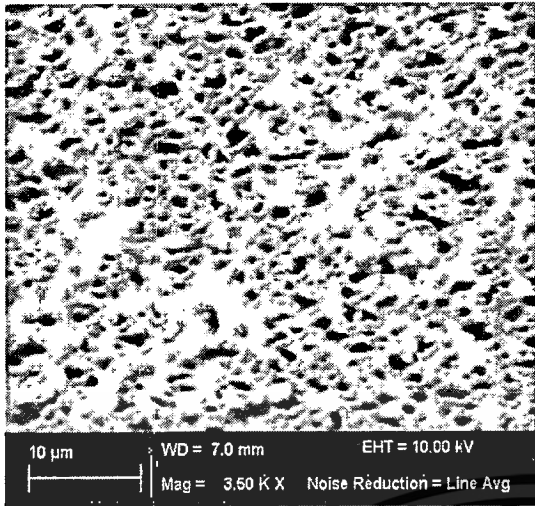
$$2^{nd}; \text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{66.68 \times 100}{293} \times \frac{100}{70.8}$$

$$= 29.2 \%$$

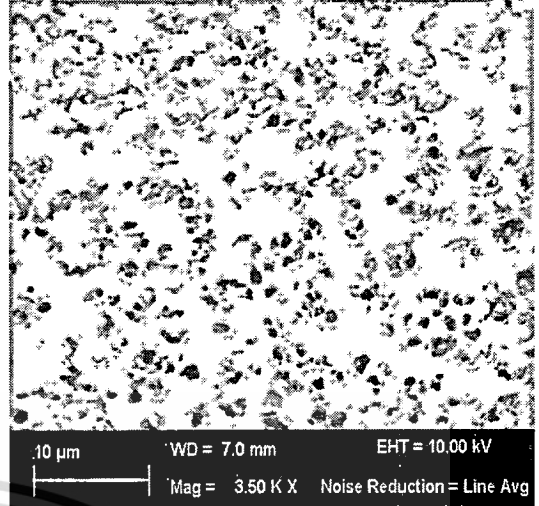
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ฟิล์ม LLDPE/SEBS เป็นพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ที่มีส่วนของวัฏภาคต่อเนื่อง (Matrix, Continuous phase) คือ LLDPE และวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) คือ SEBS เพื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาได้อย่างชัดเจนมากขึ้น จึงทำการสกัดวัฏภาคของ SEBS ด้วยเทระไฮโดรฟูแรน (THF) ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ภาพที่ 4:3) พบว่ามีลักษณะเป็นช่องว่างสีดำ ซึ่งเป็นบริเวณที่เคยมี SEBS อยู่แสดงให้เห็นว่า SEBS มีกระจายตัวใน LLDPE ที่ดี

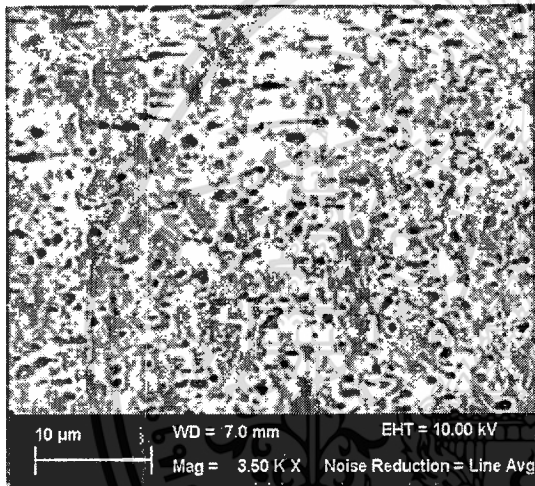
เมื่อพิจารณา SEBS เกรด G1650 พบว่าในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร LL80S20G50 และ LL70S30G50 มีเป็นช่องว่างลักษณะกลมคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นสัณฐานวิทยาแบบ Spherical ส่วนในเกรด G1652 พบว่าสูตร LL80S20G52 เป็นช่องว่างลักษณะกลม เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1650 แต่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจาก G1652 มีดัชนีการไหลสูงกว่า สันนิษฐานว่าความหนืดใกล้เคียง LLDPE จึงส่งผลทำให้อัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio, λ) มีค่าใกล้เคียง 1 เกิดการผสมเข้ากันได้ดีทำให้ SEBS เกิดการกระจายที่ดีและมีขนาดเล็ก นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมสูตร LL70S30G52 ที่มี SEBS มากขึ้น พบว่ามีสัณฐานวิทยาแบบ Cylindrical เนื่องจากวัฏภาคกระจายที่มีสัณฐานวิทยาเป็น Spherical เกิดการรวมตัวกันทำให้มีลักษณะยาวคล้ายท่อ ส่วนฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ SEBS เกรด G1657 ที่มีดัชนีการไหลสูงสุดคือมีความหนืดต่ำสุด พบว่าทั้งสูตร LL80S20G57 และ LL70S30G57 มีสัณฐานวิทยาทั้งแบบ Spherical และ Cylindrical



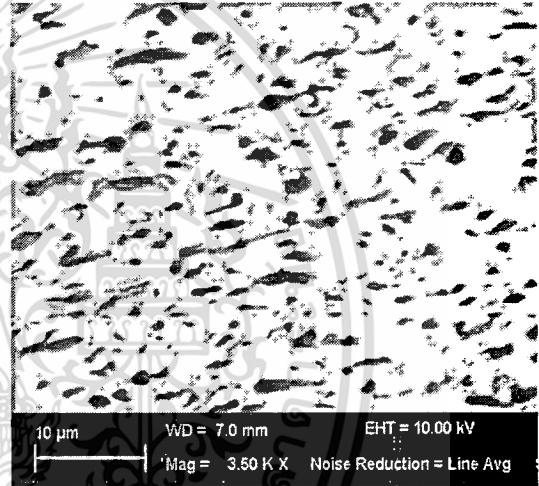
a) LL80S20G50



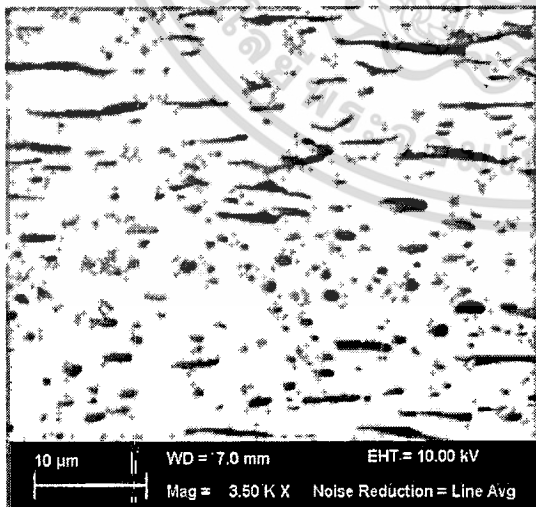
b) LL70S30G50



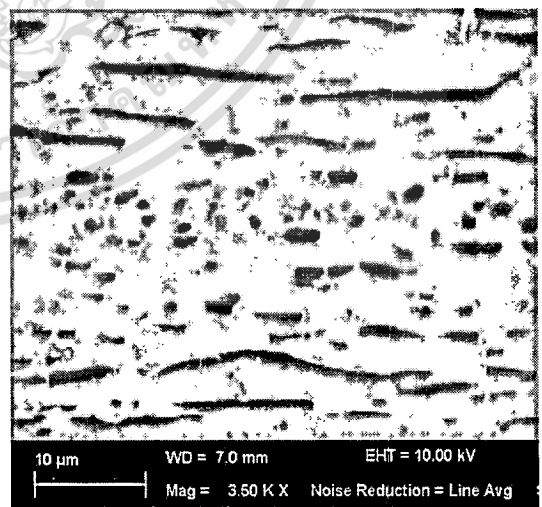
c) LL80S20G52



d) LL70S30G52



e) LL80S20G57



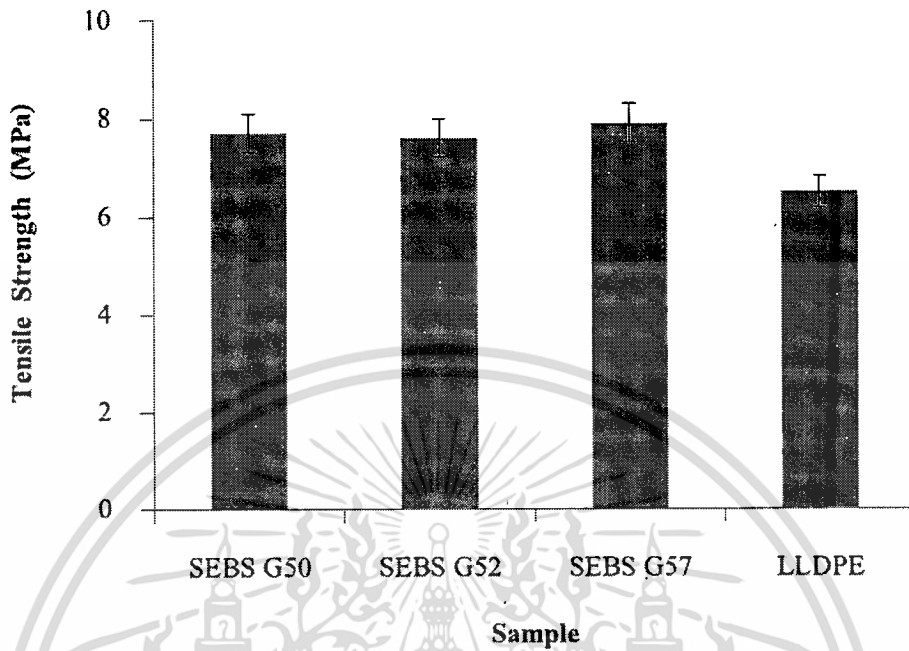
f) LL70S30G57

ภาพที่ 4.3 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการสกัด

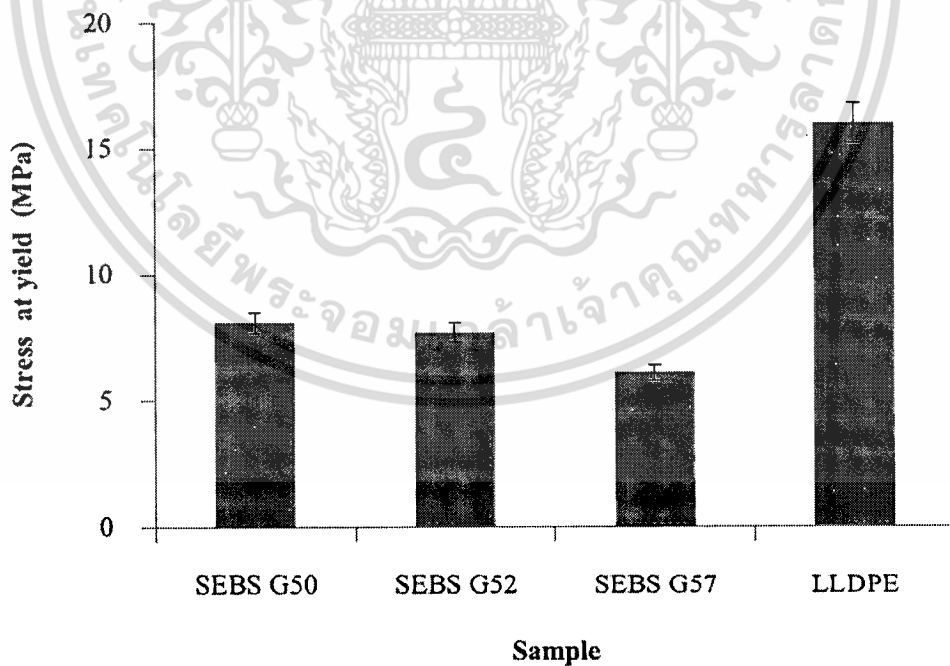
SEBS ออกด้วย THF กำล้างขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE/SEBS

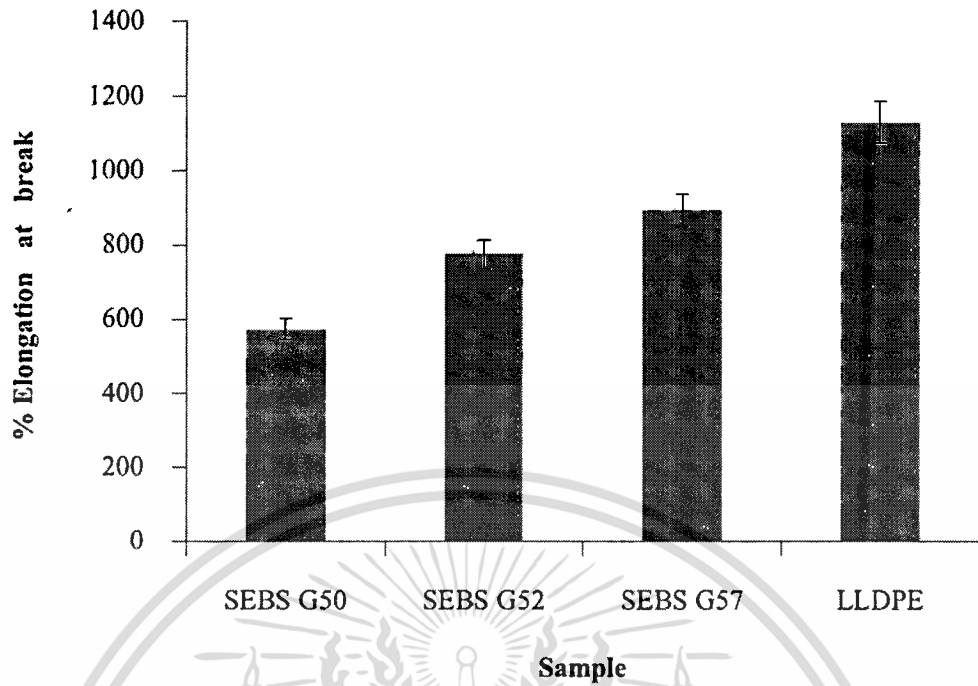


ภาพที่ 4.4 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657

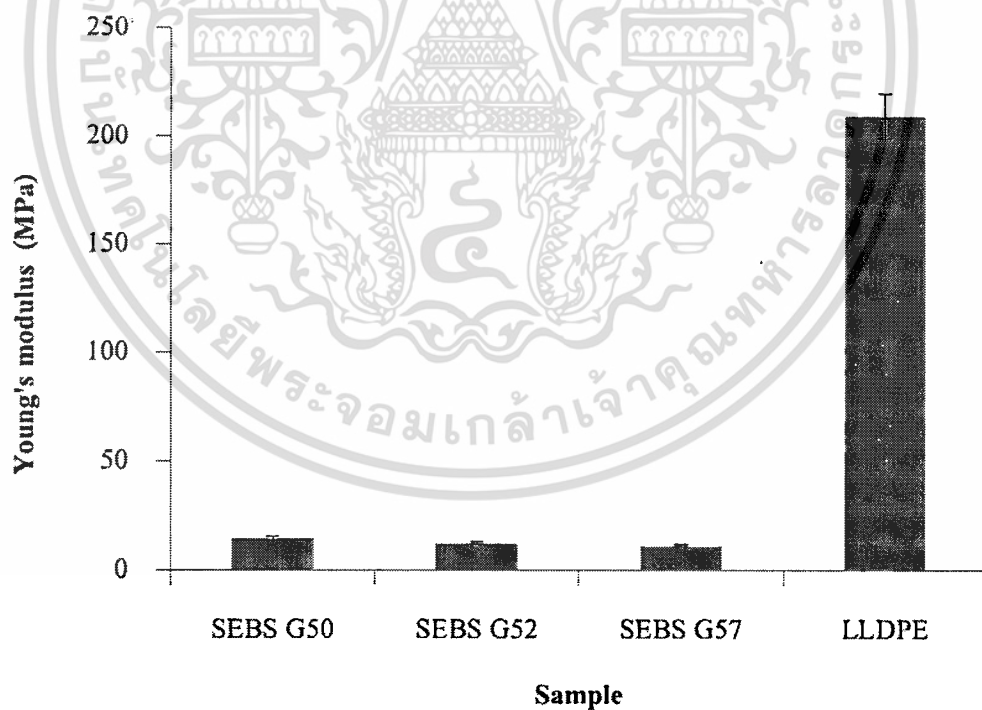


ภาพที่ 4.5 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657



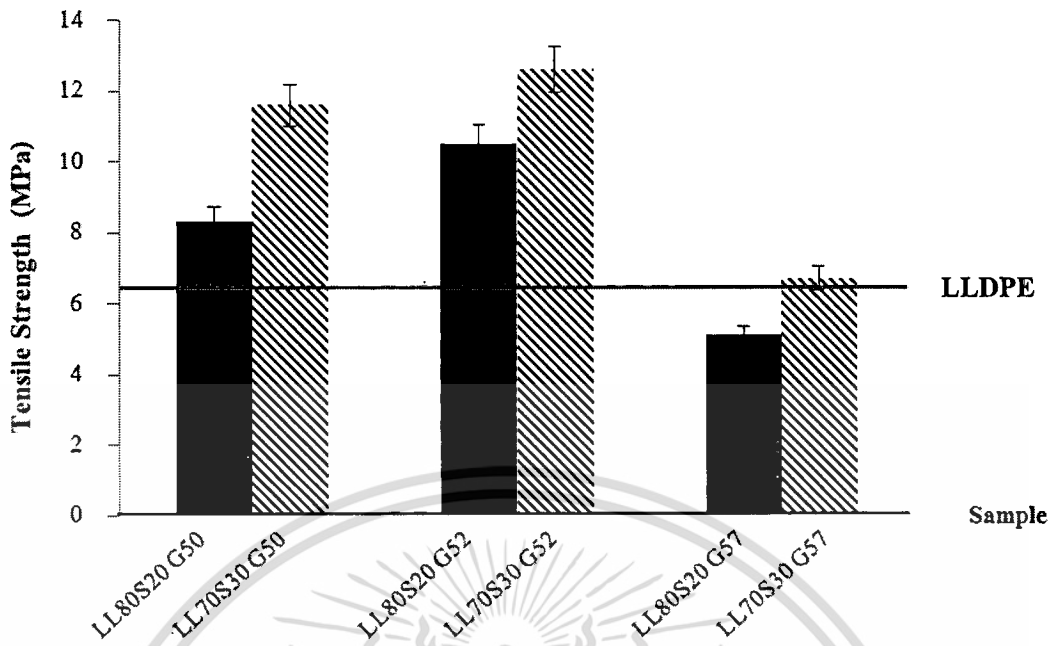
ภาพที่ 4.7 มอดุลัสของยังของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

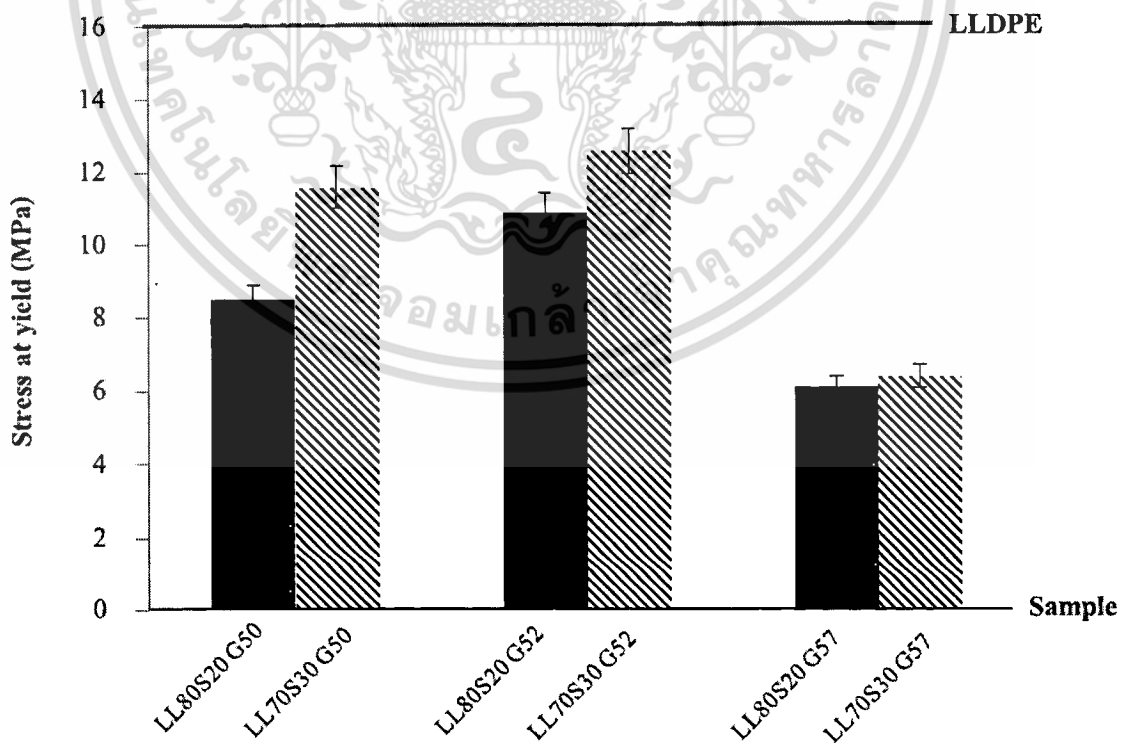
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LLDPE และ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657 ที่ผ่านกระบวนการกดอัด (Compression molding) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ถึง 4.7 เมื่อพิจารณา LLDPE กับ SEBS พบว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์ม SEBS มีค่าสูงกว่าฟิล์ม LLDPE เนื่องจาก SEBS เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous polymer) ซึ่งประกอบด้วยพอลิ- สไตรีน (Polystyrene) ที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกช่วยเพิ่มความแข็งแรง แต่ทำให้ฟิล์มเปราะ ซึ่งส่งผลต่อการดึงยึด ทำให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของฟิล์ม SEBS ต่ำกว่า นอกจากนี้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีการจัดเรียงตัวอย่าง เป็นระเบียบทำให้สามารถรับแรงได้มากก่อนการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation) ส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) ในฟิล์ม LLDPE มีค่าสูงกว่า ส่วนค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์ม LLDPE มีค่าสูงกว่า SEBS เนื่องจากใน SEBS มีโครงสร้างของ เอทิลีน-บิวทิลีน (Ethylene-butylene) ที่มีความนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายยางทำให้รับแรงกระทำได้น้อยแต่สามารถมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มาก ส่วน LLDPE ที่มีความเป็นผลึกสูงสามารถรับแรงได้มากแต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย

เมื่อพิจารณา SEBS เกรดต่างๆ G1650, G1652 และ G1657 ที่มีปริมาณสไตรีนแตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 7.8 - 8 MPa และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าในช่วง 10-15 MPa ส่วนค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) พบว่า SEBS เกรด G1657 ซึ่งมีปริมาณสไตรีนน้อย จึงทำให้มีการรับแรงก่อนการเสียสภาพได้น้อย จึงมีค่าต่ำสุด ในทางตรงกันข้ามค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของฟิล์มนี้มีค่าสูงเนื่องจากมีปริมาณของเอทิลีน-บิวทิลีนที่มากกว่า G1650 และ G1652

ฟิล์ม LLDPE นิยมนำมาใช้ในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงที่ทำให้ฟิล์มมีการยึดตัวที่ดี แต่การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนมีค่าต่ำ จึงนำมาผสมกับ SEBS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานมีความสามารถในการซึมผ่านที่ดี แต่มีความเหนียวที่ค่อนข้างสูงทำให้การขึ้นรูปยาก ดังนั้นการเตรียมพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปและเพิ่มประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนอีกด้วย

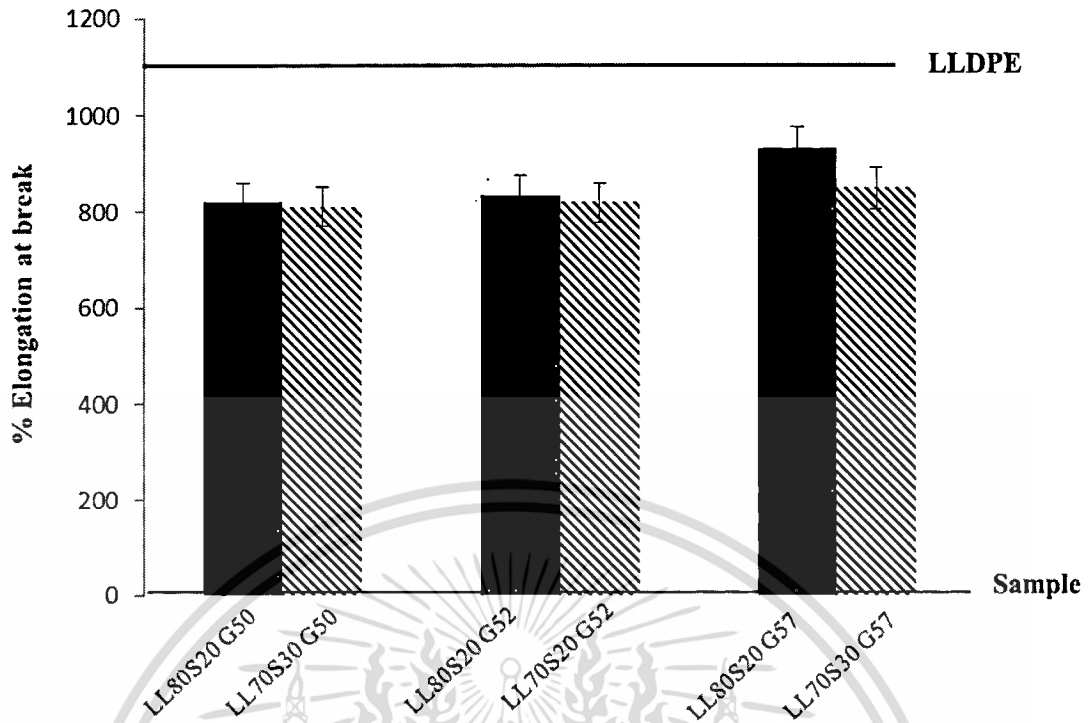


ภาพที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ

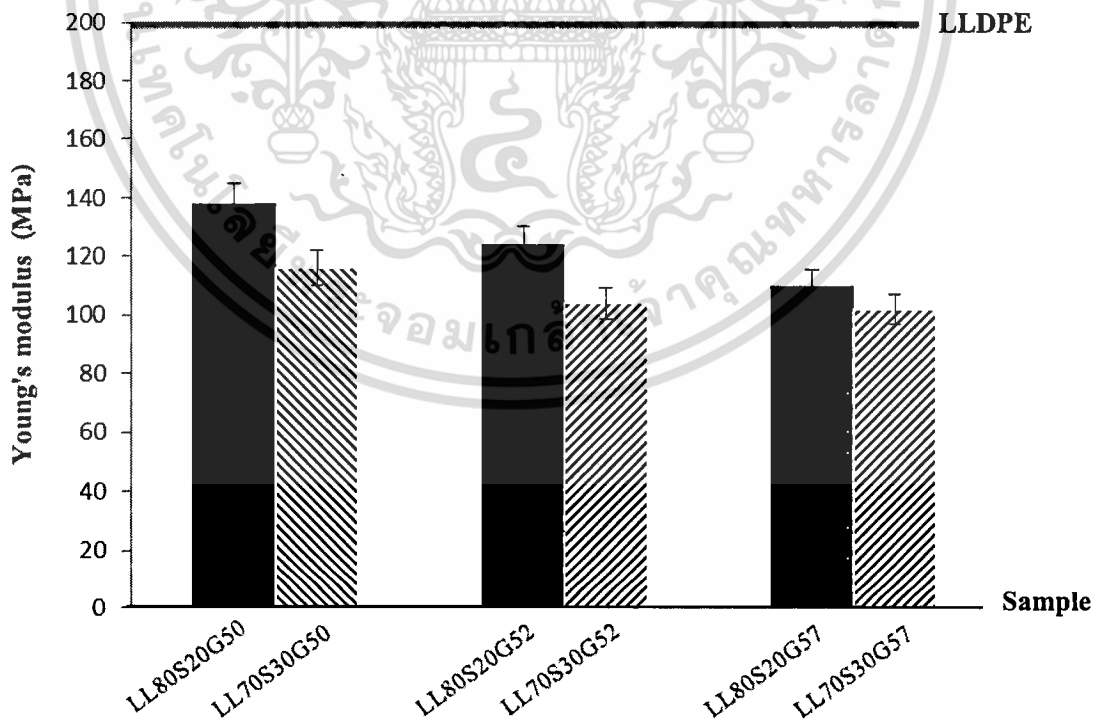


ภาพที่ 4.9 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.11 โมดูลัสของยังของฟิล์ม LLDPE/SEBS ในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... โจทย์ข้อนี้เป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล โดยขั้นตอนการคำนวณต่างๆ... โจทย์ข้อนี้เป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล โดยขั้นตอนการคำนวณต่างๆ... โจทย์ข้อนี้เป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล โดยขั้นตอนการคำนวณต่างๆ...

ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติร่วมกันระหว่าง 2 ภูมิภาค โดยสมบัติขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน จากผลการทดลองพบว่าฟิล์ม LLDPE มีค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield), ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าสูงกว่า SEBS ในขณะที่ SEBS มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูง ดังนั้นเมื่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มีสัดส่วนของ SEBS มากขึ้น เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS มาทดสอบพบว่า มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ที่สูงขึ้น แต่ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield), ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ SEBS เกรด G1650, G1652 และ G1657 ซึ่งมีปริมาณสไตรีนที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ SEBS เกรด G1657 มีค่าต่ำ เพราะปริมาณสไตรีนที่น้อย ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ SEBS เกรด G1650 และ G1652 ที่มีปริมาณสไตรีนที่เท่ากัน พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ SEBS เกรด G1652 มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) มากกว่า G1650 เนื่องจาก SEBS เกรด G1652 มีกระบวนการไหลที่ใกล้เคียงกับ LLDPE เกิดการผสมเข้ากันได้ดี ทำให้มีการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (SEBS) ที่ดีกว่า SEBS เกรด G1650 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะวิทยา ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของ G1652 ดีกว่า นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของ SEBS ในพอลิเมอร์ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) มีค่าสูงขึ้น แต่ปริมาณ SEBS ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ส่วนค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS เนื่องจากมีส่วนของเอทิลีน-บิวทิลีน ซึ่งมีความยืดหยุ่นคล้ายยางเพิ่มมากขึ้น

4.5 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมาทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนดังการทดลองที่ 3.9 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนในเซลล์ทดลองเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ได้ดังสมการที่ 4.3

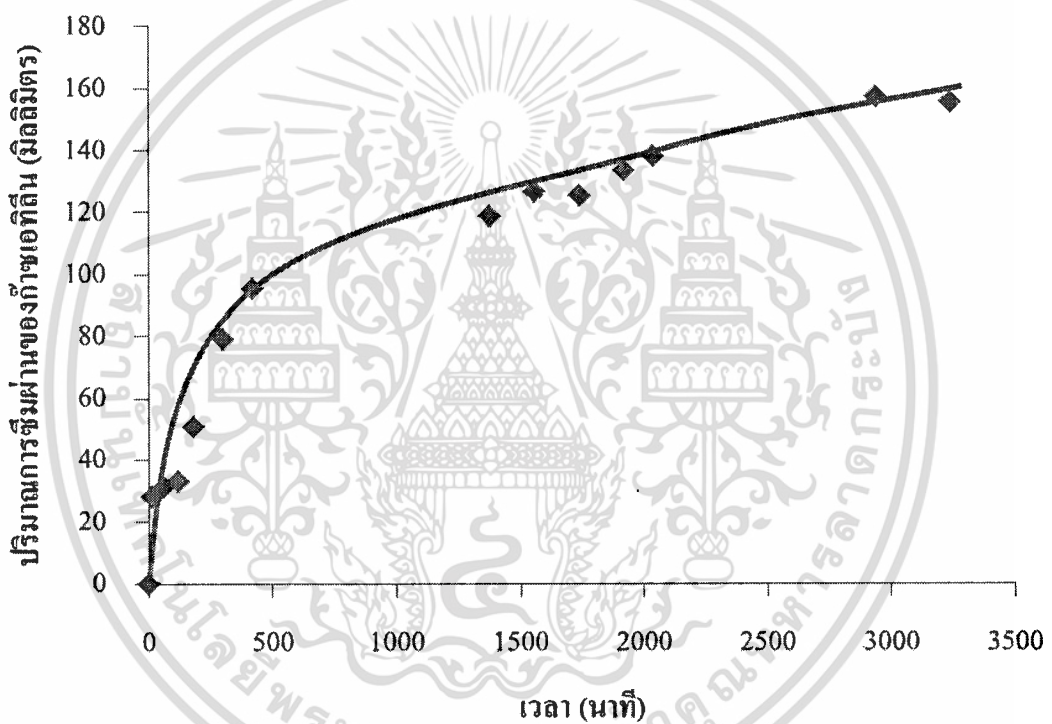
$$\text{ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ml)} = [Et]_t - [Et]_i \times \frac{1000}{100} \quad (4.3)$$

เมื่อ $[Et]_i$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเริ่มต้น (%v/v)

$[Et]_t$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน ณ เวลาใดๆ (%v/v)

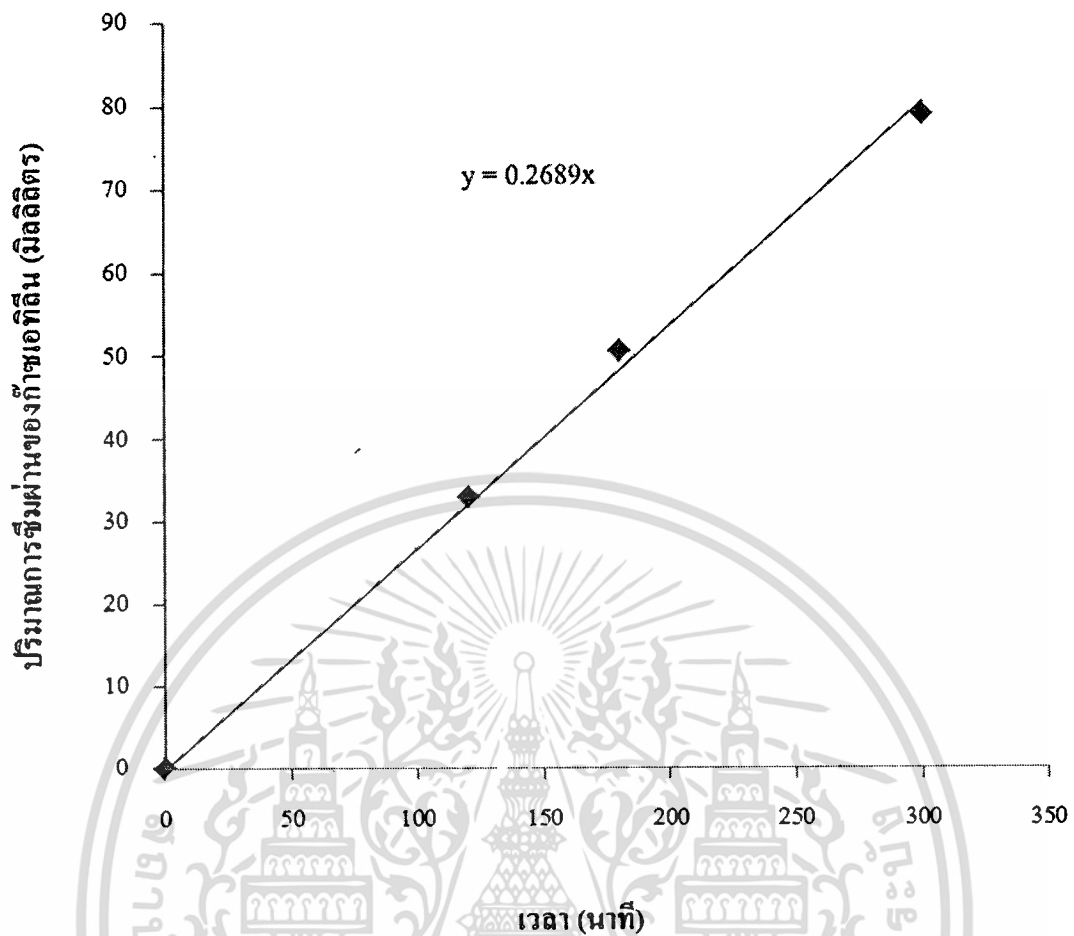
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลา พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงต้น (ภาพที่ 4.12) เนื่องจากการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนอาศัยแรงขับเคลื่อน (Driving force) จากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration gradient) โดยก๊าซผสมเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ทำให้ช่วงแรกของการซึมผ่านมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนในเซลล์ทดลองมีปริมาณที่ลดลง



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57 ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

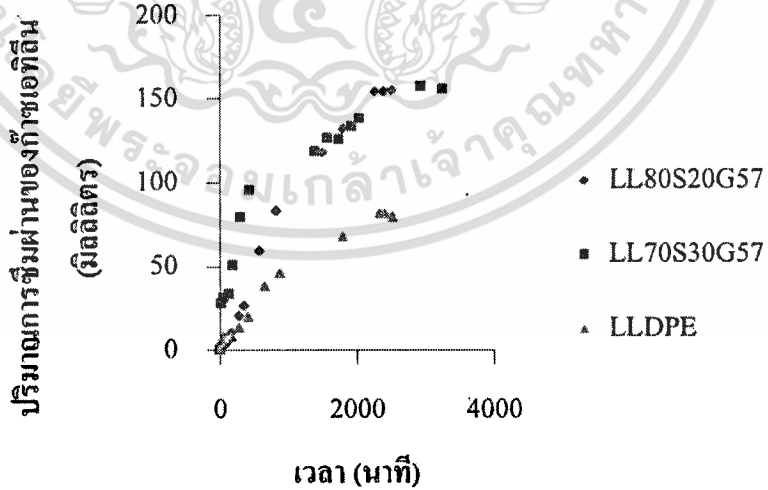
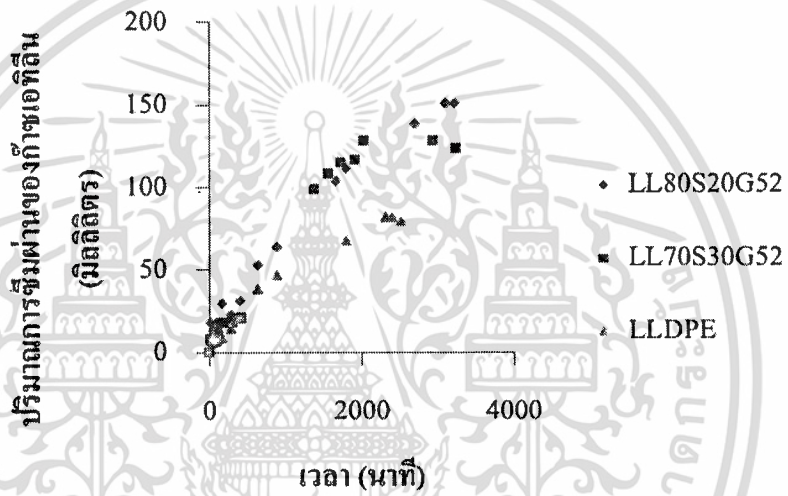
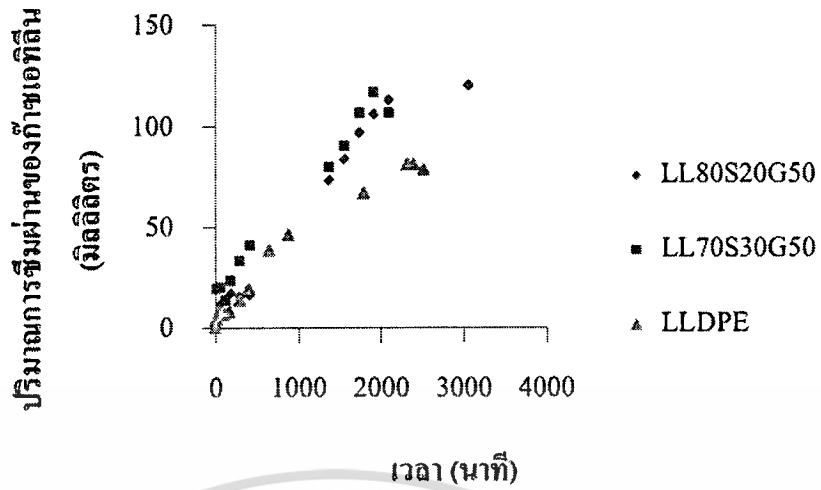
เราจึงสามารถอนุมานอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้จากปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนต่อเวลาในช่วงเริ่มต้นที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.13 เพื่อคำนวณหาอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (Ethylene transmission rate, ETR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57 ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

4.5.1 ผลของปริมาณ SEBS ต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

เมื่อทำการเติม SEBS ลงใน LLDE พบว่าในทุกเกรดของ SEBS (G1650, G1652 และ G1657) ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LLDPE ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลาของฟิล์ม

พอลิเมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ 4.14 พบว่าการเติม SEBS ลงใน LLDPE ช่วยให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LLDPE เนื่องจากฟิล์ม LLDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้เกิดการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้น้อย ในขณะที่ SEBS เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous polymer) ที่มีปริมาตรอิสระมาก (Free volume) และประกอบด้วยเอทิลีน-บิวทิลีน (Ethylene-butylene) ซึ่งมีความยืดหยุ่นคล้ายยางและมีโครงสร้างแบบอะลิฟาติก (Aliphatic) จึงทำให้ก๊าซเอทิลีนสามารถละลายในวัฏภาคของ SEBS และเกิดการซึมผ่านฟิล์มได้ดี นอกจากนี้การผสม SEBS ใน LLDPE จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีส่วนของอสัณฐานมากขึ้น เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้มากขึ้น แต่ SEBS ไม่ส่งผลต่อปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ดังผล DSC ในตารางที่ 4.2

เมื่อคำนวณหาอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน LLDPE/SEBS จาก 80/20 เป็น 70/30 มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

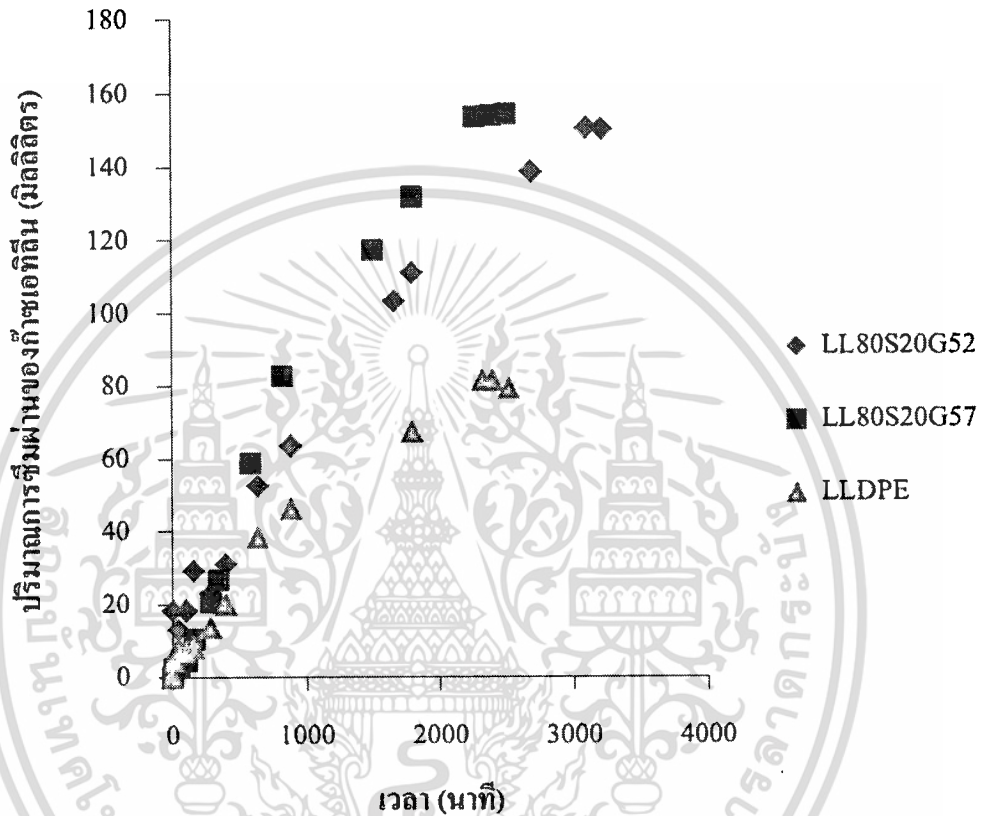
ตารางที่ 4.3 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

ชื่อสูตร	ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)	อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$)
LLDPE	20	10848
LL80S20G50	20	13955
LL70S30G50	20	15635
LL80S20G52	20	16578
LL70S30G52	20	16756
LL80S20G57	20	20117
LL70S30G57	20	68475

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการผสม SEBS ไม่ว่าจะเกรดใดก็ตามในอัตราส่วน 70/30 ให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่สูงกว่าอัตราส่วน 80/20 เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 70/30 มีสัดส่วนของเอทิลีน-บิวทิลีนที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้สัณฐานวิทยาของฟิล์มเปลี่ยนจาก Spherical เป็น Cylindrical (ภาพที่ 4.3) เนื่องจากวัฏภาคกระจาย (SEBS) เกิดการรวมตัวกัน ทำให้วัฏภาคของ SEBS มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องมากขึ้น จึงมีโอกาสทำให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้ดีกว่าสัณฐานวิทยาแบบ Spherical โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1657 ที่มีปริมาณสไตรีนที่ต่ำจึงส่งผลทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มสูงที่สุด

4.5.2 ผลของปริมาณสไตรีนต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

เมื่อทำการผสม SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ SEBS เกรด G1652 และ G1657 ซึ่งมีปริมาณสไตรีน 29 %wt และ 12 %wt ตามลำดับ ในอัตราส่วน LLDPE/SEBS เท่ากับ 80/20 พบว่า G1657 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ภาพที่ 4.15) และอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่า G1652 ดังแสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

ตารางที่ 4.4 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

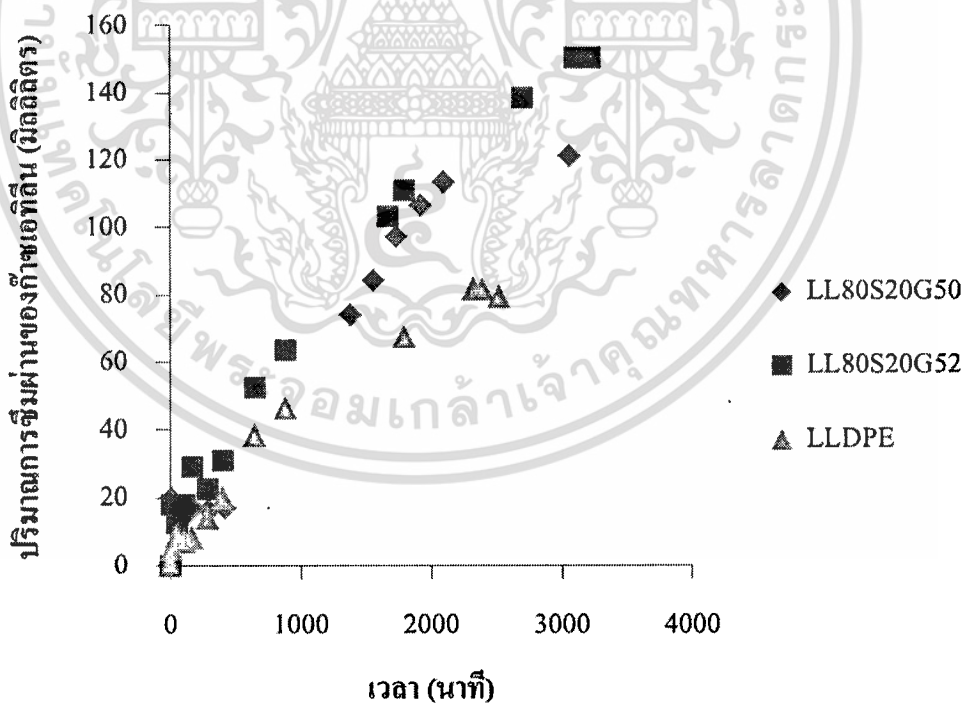
ชื่อสูตร	ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)	อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$)
LLDPE	20	10848
LL80S20G52	20	16578
LL80S20G57	20	20117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.15 พบว่าการผสม SEBS ที่มีปริมาณสไตรีนที่แตกต่างกันส่งผลต่อการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน โดยในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร LL80S20G57 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน ที่สูงกว่า LL80S20G52 และเมื่อนำมาคำนวณอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนดังแสดงในตารางที่ 4.4 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน เนื่องจาก LL80S20G57 มีปริมาณสไตรีนต่ำ จึงมีส่วนของเอทิลีน-บิวทิลีนมาก และมีฐานวิทยเป็นแบบ Cylindrical มากกว่า LL80S20G52 (ภาพที่ 4.3) แสดงให้เห็นว่าการเติม SEBS ที่มีปริมาณสไตรีนที่ต่ำลงใน LLDPE ส่งผลทำให้การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนดีขึ้นกว่าการเติม SEBS ที่มีปริมาณสไตรีนที่สูง

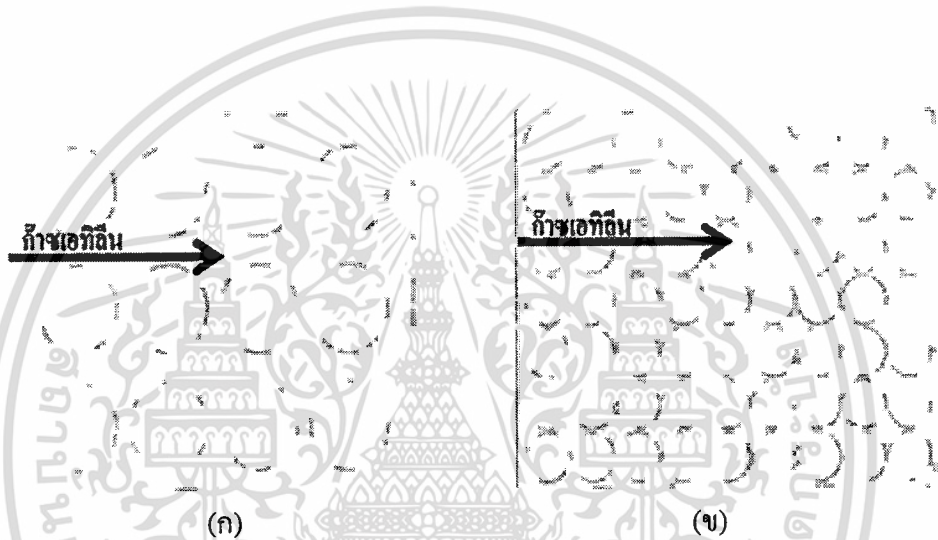
4.5.3 ผลของดรชนีการไหลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

เมื่อเติม SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ซึ่ง SEBS เกรด G1650 และ G1652 มีปริมาณสไตรีนเท่ากัน แต่มีค่าดรชนีการไหลที่แตกต่างกัน คือ SEBS เกรด G1652 (MFI < 1 g/10 min) มีค่าดรชนีการไหลสูงกว่า G1650 (MFI = 5 g/10 min) พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1652 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1650 ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

จากภาพที่ 4.16 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1652 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่สูงกว่า SEBS เกรด G1650 เนื่องจาก G1652 มีค่าครชนีการไหล (MFI) สูงกว่า จึงคาดว่าจะมีความหนืดที่ต่ำใกล้เคียงกับ LLDPE ส่งผลทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดี และ SEBS มีกระจายตัวที่ดีใน LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับผลสัมฤทธิ์ (ภาพที่ 4.3) ที่พบว่า LL80S20G52 มี Spherical กระจายตัวอยู่ที่ฟิล์มและวัฏภาคของ SEBS มีขนาดเล็กกว่าใน LL80S20G50 ทำให้วัฏภาคของ SEBS ใกล้เคียงกันและมีความต่อเนื่องของส่วนที่เป็นอสังฐานมากขึ้น จึงมีโอกาสมากขึ้นให้ก๊าซเอทิลีนซึมผ่านได้มาก (ภาพที่ 4.17) และส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร LL80S20G52 มีค่าสูงกว่า LL80S20G50 ดังตารางที่ 4.5



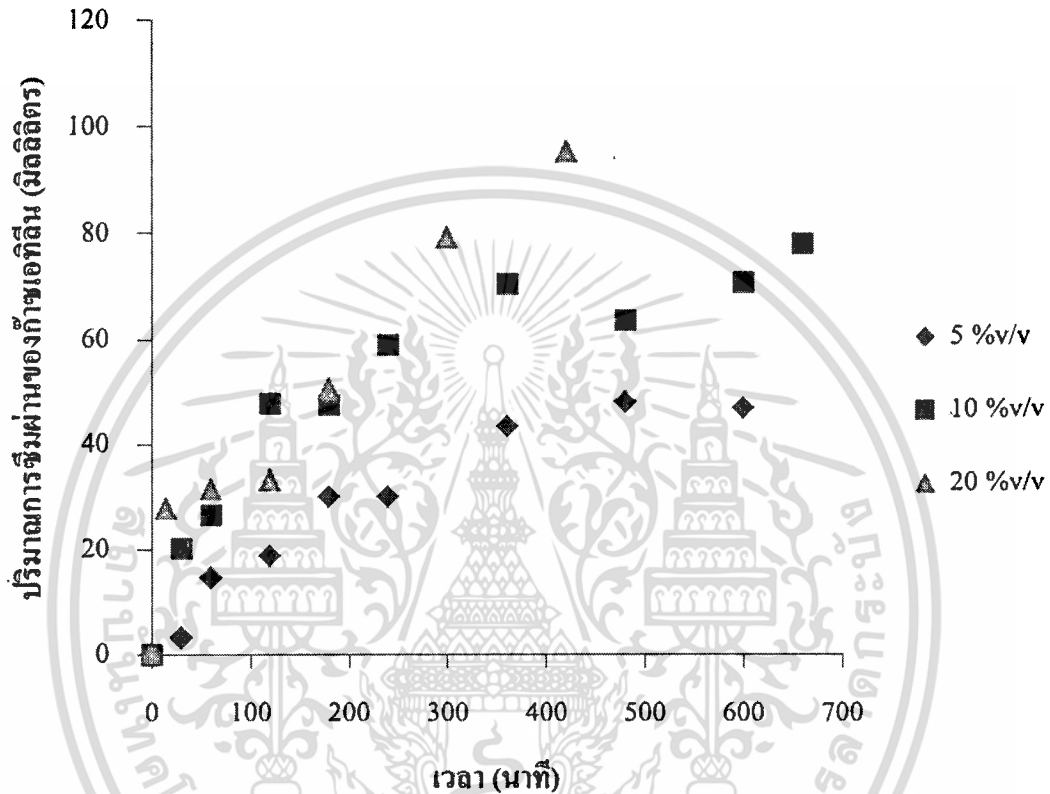
ภาพที่ 4.17 การซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเมื่อวัฏภาค SEBS ที่มีขนาดและความต่อเนื่องแตกต่างกัน
(ก) SEBS มีขนาดใหญ่ มีความต่อเนื่องระหว่างวัฏภาคน้อย เกิดการซึมผ่านได้น้อย
(ข) SEBS มีขนาดเล็ก มีความต่อเนื่องระหว่างวัฏภาคมาก เกิดการซึมผ่านได้มาก

ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 20 %v/v

ชื่อสูตร	ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)	อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน (cm ³ /m ² .day.atm)
LLDPE	20	10848
LL80S20G50	20	13955
LL80S20G52	20	16578

4.5.4 ผลของความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน

จากผลการทดลองข้างต้น พอลิเมอร์ผสมสูตร LL70S30G57 มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงที่สุด จึงนำมาทดสอบการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน โดยใช้ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 5 %v/v, 10 %v/v, 20 %v/v ดังแสดงในภาพที่ 4.18



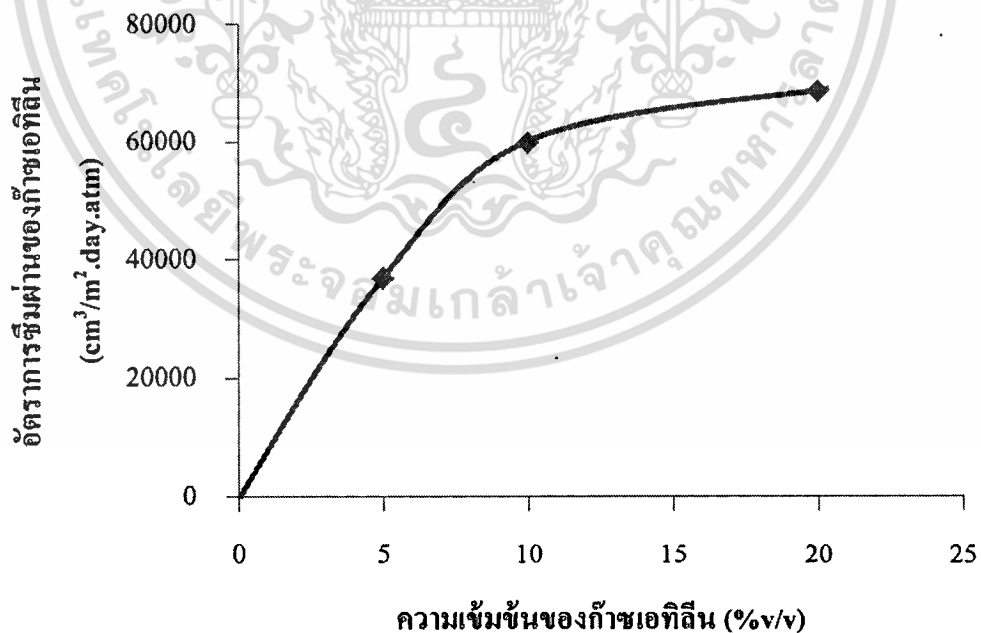
ภาพที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับเวลา ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 5 , 10 และ 20 %v/v ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร LL70S30G57

จากภาพที่ 4.18 เมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่แตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 20 %v/v มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงกว่าความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 5 และ 10 %v/v และที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 20 %v/v มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 5, 10 และ 20 %v/v

ชื่อสูตร	ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)	อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีน ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$)
LL70S30G57	20	68475
	10	59715
	5	36771

จากตารางที่ 4.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน ดังแสดงในภาพที่ 4.19 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนภายในเซลล์ทดลอง ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนอาศัยแรงขับเคลื่อน (Driving force) จากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration gradient) โดยก๊าซผสมเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 20 %v/v ที่มีความเข้มข้นสูงนั้นส่งผลให้ความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายนอกเซลล์และภายในเซลล์มีมาก จึงทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนมีค่าสูงกว่าที่ 5 %v/v และ 10 %v/v



ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.19 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนกับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน ไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนภายในเซลล์ทดลอง แต่ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนบนพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งเป็นไปตามกฎของแลงเมียร์ (Langmuir equation) ดังสมการ

$$\theta = \frac{KC}{1+KC} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{KC} + 1 \quad (4.5)$$

จากสมการอัตราเร็ว

$$\begin{aligned} \text{Rate} &= kc \\ &= k\theta \end{aligned} \quad (4.6)$$

แทนค่า θ ในสมการที่ 4.6 จะได้

$$\text{Rate} = \frac{kKC}{1+KC} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{\text{Rate}} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \quad (4.8)$$

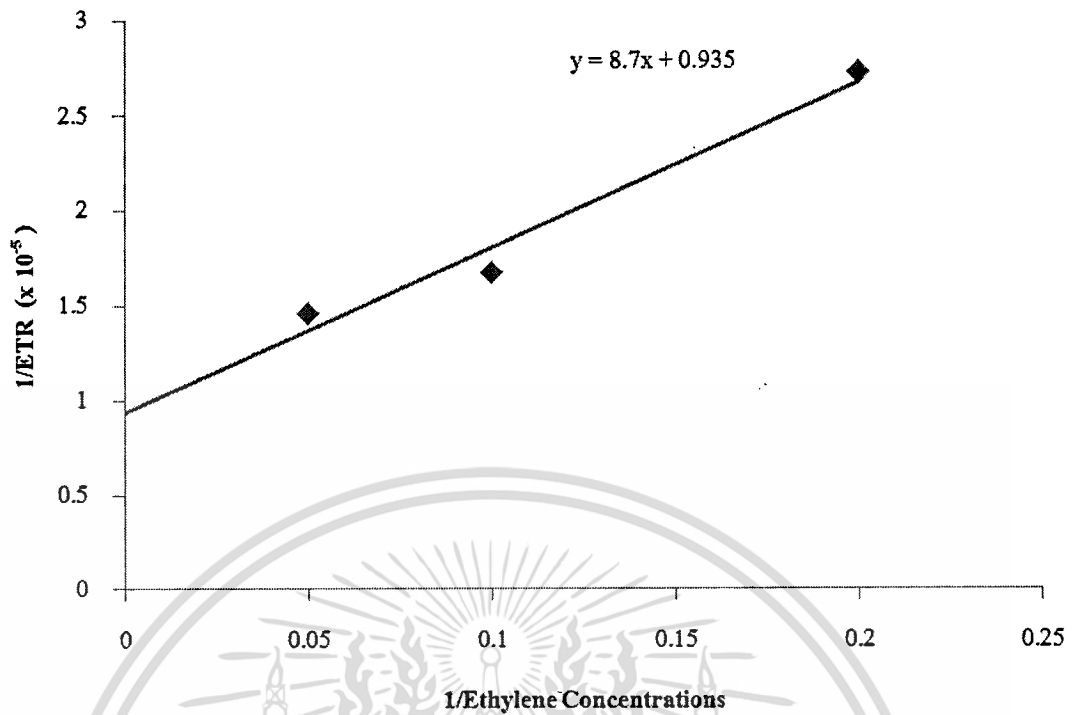
เมื่อ Rate คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน (ETR)

C คือ ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน (%v/v)

นำสมการที่ 4.8 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{\text{ETR}}$ กับ

$\frac{1}{\text{Ethylene concentrations}}$ แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่ากราฟมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เราจึง

สามารถอนุมานได้ว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนบนพื้นผิวของฟิล์ม



ภาพที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{ETR}$ กับ $\frac{1}{Ethylene concentrations}$ ของฟิล์ม
พอลิเมอร์ผสม LL70S30G57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) กับพอลิสไตรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (Poly(styrene-ethylene-butylene-styrene), SEBS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนในฟิล์มที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ สามารถวิเคราะห์หาปริมาณ SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ด้วยเทคนิค Attenuated total reflectance (ATR) โดยการสร้างกราฟมาตรฐานซึ่งมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใจเข้าใกล้ 1 สามารถนำไปใช้หาปริมาณของ SEBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่าการเติม SEBS ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า SEBS ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึก และไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผลึก LLDPE จากการศึกษาลักษณะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ใช้ SEBS ต่างเกรด พบว่า G1650 มีลักษณะวิทยาแบบ Spherical ที่มีขนาดใหญ่กว่า G1652 เนื่องจาก SEBS เกรด G1650 มีดรชนีการไหลต่ำคือความหนืดมาก ทำให้การกระจายตัวของภูมิภาค SEBS ในพอลิเมอร์ผสมไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ G1650 เมื่อปริมาณของ SEBS เพิ่มขึ้นลักษณะวิทยา เปลี่ยนจาก Spherical เป็น Cylindrical เนื่องจากเกิดความต่อเนื่องของภูมิภาค SEBS การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเติม SEBS ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดีกว่าฟิล์ม LLDPE นอกจากนี้ในฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีปริมาณ SEBS มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่าความเค้น ณ จุดคราก มีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจาก SEBS มีพอลิสไตรีนเป็นส่วนประกอบ ที่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่ค่ามอดูลัสของยังมีค่าลดลง เพราะมีส่วนเอทิลีน-บิวทิลีน ซึ่งมีความยืดหยุ่นคล้ายยางเพิ่มมากขึ้น พิจารณาในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS ต่างเกรด พบว่า G1657 ค่าความแข็งแรงดึง, ค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังมีค่าต่ำ เนื่องจาก SEBS เกรดนี้มีปริมาณสไตรีนใน SEBS ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณา SEBS ที่มีปริมาณสไตรีนเท่ากัน G1650 และ G1652 พบว่า G1652 มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจากดรชนีการไหลของ G1652 มากกว่า สันนิษฐานว่าใกล้เคียงกับ LLDPE ทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่าและมี การกระจายตัวของ SEBS ที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะวิทยา จากการศึกษากาการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน พบว่าปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน และอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม LLDPE มีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก LLDPE เป็นพอลิ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมอร์กิงผลึก มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทำให้การซึมผ่านเกิดขึ้นน้อย ในขณะที่เดียวกัน SEBS เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีปริมาตรอิสระมากและมีการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ง่ายทำให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี เมื่อพิจารณาผลการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS ต่างเกรด พบว่า G1657 มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน และอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนมีค่าสูง เนื่องจากใน SEBS เกรด G1657 มีปริมาณของเอทิลีน-บิวทิลีนมากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณ SEBS พบว่าในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ SEBS เกรด G1650 และ G1652 มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนใกล้เคียงกัน แต่การเพิ่มปริมาณในเกรด G1657 พบว่ามีค่านี้สูงขึ้น จากการศึกษาการซึมผ่านที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 5 %v/v, 10 %v/v และ 20 %v/v ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LL70S30G57 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซมากขึ้น และอัตราการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณ SEBS อื่นๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีน แต่เนื่องจากปริมาณ SEBS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ยากต่อการขึ้นรูปฟิล์ม จึงอาจทำการผสมซีโอไลต์ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งซีโอไลต์เป็นโครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่มีความเฉพาะเจาะจง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการซึมผ่านของก๊าซเอทิลีนได้
2. การศึกษาปัจจัยอื่นที่จะช่วยในการชะลอการสุกและเน่าเสียในผักและผลไม้สด เช่น การซึมผ่านของก๊าซชนิดต่างๆ ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น
3. การนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปทดสอบห่อผลิตผลสดทางการเกษตรที่มีความว่องไวต่อก๊าซเอทิลีน เช่น กกล้วย, มะม่วง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรณิฉินศิริกุล และคณะ. “Keep Fresh?.” Food Focus Thailand 4. 36 (มิถุนายน 2552) 44-49.
- [2] สังคม เศษวงค์เสถียร. “สรีรวิทยาการสุกของผล (Physiology of Fruit Ripening).” การปฏิบัติ หลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (2535) 25-32.
- [3] พรชัย ราชตะนະพันธ์. “Ethylene scavenger บรรจุภัณฑ์แอคทีฟแบบดูดซับเอทิลีนเพื่อยืดอายุ การเก็บผักและผลไม้.” Food Focus Thailand 5. 46 (2553) 38-41.
- [4] ปุ่น คงเจริญเกียรติ และสมพร คงเจริญเกียรติ. “บรรจุภัณฑ์อาหาร.” 2555. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/knowledge/content/101>.
- [5] พรพรรณ มั่นประสิทธิ์. “Study on Ethylene Gas Permeability of SEBS/LDPE Double Layered Zeolite Composite.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [6] ศราวุธ เลาวกุล. “Study on Zeolite-SEBS Composite/Perforated Polyolefins (LDPE and BOPP) Double-Layered Films for Improving Ethylene Permeation.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [7] James, D.E. “Linear Low Density Polyethylene.” Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. 6 (1986) 429-454.
- [8] สมชาย กล้าหาญ. “เอทิลีน.” วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวของผัก. ภาควิชาพืชสวน คณะ เทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2546) 151-171.
- [9] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). “การสุกของผลไม้.” 2544. [Online]. Available: http://www.tistr-foodprocess.net/Fruit/fruit_home/fruit_home2.html.
- [10] รัตนา จิระรัตนานนท์ และคณะ. “การแยกของผสมเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอร์เมอ-เพอร์เรชั่น.” เทคโนโลยีชีวภาพกับความหลากหลายทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ : พันธ- วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. 2537.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ปรีชาดิ จันทร์ โชติ. “การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแยกบิวทานอลจากน้ำหมักโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายร่วมกับการแยกด้วยเมมเบรน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2548.
- [12] Rowan University. “Membrane Gas Separation.” 2012. [Online]. Available: <http://users.rowan.edu/~savelski/uol/gas.html>.
- [13] R. Rautenbach and R. Albrecht. “Membrane Separation Process.” New York : John Wiley and Sons Inc. 2007.
- [14] ชันทอง สุนทรภา. “เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.” กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [15] M. Kargol. “Gas Separation.” 2012. [Online]. Available: http://www.separationprocess.com/Membrane/MT_ChpGS-1.htm.
- [16] เสาวรณีย์ ช่วยจุลจิตร. “เอกสารประกอบการสอน วิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์1.” ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
- [17] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “เอกสารประกอบการสอน วิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [18] อาทิตยา โยธารักษ์. “ผลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดที่มีต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ไว้นิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมแบบหลอม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2549.
- [19] M.R. Lloyd. “Polymer Blends.” 2012. [Online]. Available: http://files.hanser.de/hanser/docs/20071031-2713114551-70-978-3-446-22569-5_Extract.pdf.
- [20] G. Holden. “Understand Thermoplastic Elastomers.” Munich : HanserPunlisher. 2000.
- [21] J. Burke. “Solubility Parameter : Theory and Application.” 2012. [Online]. Available: <http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v03/bp03-04.html>.
- [22] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. “พอลิเมอร์ผสม.” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. ปีที่10. 1 (2543) 14-17.

- [23] บรรเจิด จงสมจิตร. “ตัวเร่งปฏิกิริยามทัลโลซีนสำหรับการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Metallocene Catalyst for LLDPE Production).” วารสารข่าวและความรู้จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3 (2544) 10-11.
- [24] Wikipedia. “Linear Low Density Polyethylene.” 2012. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_low-density_polyethylene.
- [25] X.M. Zhang, S. Elkoun, A. Ajji and M.A. Huneault. “Oriented Structure and Anisotropy Properties of Polymer Blown Films: HDPE, LLDPE and LDPE” *Journal of Polymer Science* 45 (2004) 217-229.
- [26] นเรนทร์ อาศัพนิชย์. “การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2550.
- [27] Omnexus. “Block copolymer based on styrene and butadiene (TPE-S or SBS, SEBS).” 2012. [Online]. Available: <http://www.omnexus.com/plastics-channels/rubber-replacement/performaces.aspx>.
- [28] Kraton Polymer LLC. “An Introduction to Kraton Polymer.” 2012. [Online]. Available: <http://docs.kraton.com/kratoon/attachment/download/32733AM.pdf>.
- [29] Eastman. “Block Copolymer.” 2012. [Online]. Available: http://www.eastman.com/Markets/Tackifier_Center/Pagea/Block_Copolymer.aspx.
- [30] CJP. “Styrene-EthyleneButadiene-Styrene (SEBS).” 2012. [Online]. Available: <http://cjpsales.co.uk/products/downloads/19.pdf>.
- [31] กฤษณา ชูติมา. “เอทิลีน ฮอร์โมนพืช.” *Journal of Royal Institute* 3 (1994) 69-78.
- [32] สัมฤทธิ์ เศรษฐวงศ์. “ฮอร์โมนและการใช้ฮอร์โมนกับไม้ผล.” พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ไทยเส็ง. 2552
- [33] C. Wu. “An Overview of Postharvest Biology and Technology of Fruits and Vegetables.” 2012. [Online]. Available: <http://ir.tari.gov.tw:8080/bitstream/345210000/2813/1/public>.
- [34] Y. Wang. “Ethylene and Oxygen Permeability Through Polyethylene Packaging Films.” *Packaging Technology and Science*. New York : John Wiley & Sons. 11(4) (1998) 169-178.
- [35] J.P.G. Villaluenga and B. Seoane. “Permeation of carbon dioxide through multiple linear low-density polyethylene films.” *European Polymer Journal* 36 (2000) 1697-1702.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ 2559-0105030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

แหล่งทุน: เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์

ชื่อโครงการ: ผลของชนิดและปริมาณของพอลิไตรีน-เอทีลินบิวทีลีน-สไตรีน (เอสบีบีเอส) ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ เอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทีลินชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลแอลดีพีอี)

ชื่อหัวหน้าโครงการ: นางศุภการ์ตรี รักษาตรี

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		คงเหลือ	รายรับ	งบบุคลากร	รายจ่าย				รวม	
			รับ	จ่าย				ค่าตอบแทน	ค่าวัสดุ	ค่าสาธารณูปโภค	งบลงทุน		ค่าครุภัณฑ์
	งบประมาณที่ได้รับการอนุมัติ (ตามแผน)												
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%)		42,500.00										
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)		7,500.00										
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3)												
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			12,859.00				3,000.00	7,910.00	1,949.00			12,859.00
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			37,141.00				11,000.00	18,000.00	8,141.00			37,141.00
	งบประมาณคงเหลือ		50,000.00		0.00								
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย												
ครั้งที่ 1													
9 พ.ย. 58	ค่าวัสดุ ถุงซิปล	เล่มที่ 62 เลขที่ 05								100.00			100.00
12 พ.ย. 58	ค่าวัสดุ แผ่นใส	2996								260.00			260.00
20 ม.ค. 59	ค่า DSC	400558/59							3,000.00				3,000.00
22 ม.ค. 59	ค่า WVTR	เล่มที่ 103 เลขที่ 471							3,750.00				3,750.00
29 ม.ค. 59	ค่า CTA	เล่มที่ 1627 เลขที่ 4							660.00				660.00
2 ก.พ. 59	ค่าวัสดุ แผ่นใส ปากคิปล	3652								400.00			400.00
11 ก.พ. 59	ค่า CTA	เล่มที่ 1625 เลขที่ 18							200.00				200.00
15 ก.พ. 59	ค่าวัสดุ	เล่มที่ 68 เลขที่ 13								513.00			513.00
20 ก.พ. 59	ค่าวัสดุ แผ่นใส	IV5902-0943								261.00			261.00
29 ก.พ. 59	ค่าวัสดุ	เล่มที่ 80 เลขที่ 15								415.00			415.00
7 มี.ค. 59	ค่า CTA	เล่มที่ 1627 เลขที่ 33							300.00				300.00
15 มี.ค. 59	ค่ารวบรวมข้อมูล ครั้งที่ 1	ไม่มี						3,000.00					3,000.00
	รวมครั้งที่ 1							3,000.00	7,910.00	1,949.00			12,859.00

แหล่งทุน: เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์

ชื่อโครงการ: ผลของชนิดและปริมาณของพอลิไทรีน-เอทิลีนบิวทิลีน-สไตรีน (เอตบีเอส) ที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ เอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (แอลเอแอลดีทีอี)

ชื่อหัวหน้าโครงการ: นางสุภารัตน์ รักขันธ์

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		รายรับ	รายจ่าย	รวม									
			จ่าย	คงเหลือ			ดอกเบี้ยรับ	งบอุดหนุน	งบลงทุน	ค่าครุภัณฑ์	รวม	รายจ่าย				
ครั้งที่ 2																
16 มี.ค. 59	ค่า SEM	เล่มที่ 1679 เลขที่ 38									3,000.00					3,000.00
21 มี.ค. 59	ค่าวัสดุ แผ่นใส	102-002695										107.00				107.00
23 มี.ค. 59	ค่า WVTR	เล่มที่ 112 เลขที่ 230									6,000.00					6,000.00
26 เม.ย. 59	ค่าวัสดุ แผ่นอะคริลิก	เล่มที่ 098 เลขที่ 4898										3,103.00				3,103.00
9 พ.ค. 59	ค่าวัสดุ UPS	0105957									9,000.00					9,000.00
12 พ.ค. 59	ค่า XPS	เล่มที่ 0555 เลขที่ 00542														
16 พ.ค. 59	ค่าถ่ายเอกสาร	ไม่ระบุ										650.00				650.00
2 มิ.ย. 59	ค่าวัสดุ ไม้ไผ่	03496										100.00				100.00
24 มิ.ย. 59	ค่าวัสดุ แผ่นใส	เล่มที่ 102 เลขที่ 32										550.00				550.00
4 ก.ค. 59	ค่าวัสดุ ปลั๊กไฟ	04595										205.00				205.00
28 ก.ค. 59	ค่าถ่ายเอกสาร	เล่มที่ 248 เลขที่ 12400										750.00				750.00
18 ส.ค. 59	ค่าวัสดุ	เล่มที่ 73 เลขที่ 12										706.00				706.00
25 ส.ค. 59	ค่าถ่ายเอกสาร	ไม่ระบุ										390.00				390.00
31 ส.ค. 59	ค่ารวบรวมข้อมูล ครั้งที่ 2	ไม่มี									6,000.00					6,000.00
31 ส.ค. 59	ค่าทำรายงานและจัดทำรูปเล่ม	ไม่มี									5,000.00					5,000.00
	รวมครั้งที่ 2										11,000.00	15,000.00	8,141.00			37,141.00

สุภารัตน์ รักขันธ์

วันที่ 1 กันยายน 2559

ชื่อหัวหน้าโครงการ
(นางสุภารัตน์ รักขันธ์)

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธี

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	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555-2557	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 รักชลธี ธนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธี กังสาดล บัวบุตรา ฌัญฉิชาร์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวีร์ สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธี ปรมินทร์ ช้างเพชร และประภษญ์ แสงทองอโณทัย, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธี พงษ์ธร แซ่ฮุย ชีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุดิ, ผลของเถ้ากลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธี ชีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของเถ้ากลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) กับมอนตม์อริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICChE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICChE 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธิ นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของโคโคซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, 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 และสุภารัตน์ รักชลธิ, फिल्मพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, 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. Wiwattanankul, 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. Chitraruwatkul, 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. Sirichantan, 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.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

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

งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊กส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุขน้อย อธิพิล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ เฌมีหลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊กส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) *สาร...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด* 2549.
2. อธิพิล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย *ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า* 2553.