



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของการใช้ LDPE ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด  
LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม

Effect of LDPE on Processing and Properties of LLDPE/LDPE/EVA  
Packaging Films with zeolite A Filler

นางสุภารัตน์ รักขลธิ์

RCH  
TP  
1180  
.P66  
ศ838๑

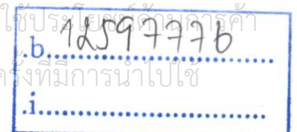
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....130278  
รับ. เดือน. ปี... 2 1260 2557

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยเด็ดขาด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง  
หากมีการนำไปใช้



ชื่อโครงการ อิทธิพลของการใช้ LDPE ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม  
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์  
ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท  
ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556  
หัวหน้าโครงการวิจัย  
นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)  
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีต่อการขึ้นรูป และสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)/ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)/ เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม ใช้อัตราส่วนของพอลิเอทิลีน (PE) ต่อ EVA เท่ากับ 80/20 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม โดยในส่วนของ PE ทำการผสม LLDPE กับ LDPE ในอัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม และเติมซีโอไลต์เอ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสูตรผสม การผสมใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ และหาค่าดรรชนีการหลอมไหล จากนั้นขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นฟิล์มแบบเป่าในสูตรผสม LLDPE/LDPE/EVA และในสูตรผสมที่มีซีโอไลต์เอทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป นำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าการเพิ่มปริมาณ LDPE (0-20 ส่วน) ลงใน PE ทำให้ความหนืดลดลง การผสมสูตรทำได้ง่ายขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม เพราะ LLDPE และ LDPE ที่เลือกใช้มีความแข็งแรงดิ่งใกล้เคียงกัน ส่วนสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงเพราะในทุกสูตรฟิล์มมีความเป็นผลึกและปริมาณ EVA เท่าๆ กัน การเติมซีโอไลต์เอ 10% โดยน้ำหนัก ทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่สูงขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอมีรูพรุนและมีขั้วสูง

คำสำคัญ : ฟิล์มพอลิเอทิลีน, อีวีเอ, ซีโอไลต์เอ, การซึมผ่านไอน้ำ

**Research Title:** Effect of LDPE on Processing and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Packaging Films with zeolite A Filler

**Researcher:** Mrs. Suparat Rukchonlatee

**Faculty:** Science

**Department:** Chemistry

## ABSTRACT

This research studied effect of LDPE on processing and properties of LLDPE/LDPE/EVA films with zeolite A filler. The blend ratio of PE/EVA studied was 80/20 by weight of polymer blend. In part of PE, blends LLDPE/LDPE were varied from 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 to 80/20 by weight of polymer blend. An addition of zeolite A at 10% by weight of the compound was also studied. All compounds were mixed using a twin-screw extruder and measured melt flow index. Then the LLDPE/LDPE/EVA films were prepared using a blown film process and LLDPE/LDPE/EVA/Zeolite A films were prepared using a compression molding process. The films were investigated morphology, thermal properties, mechanical properties and water permeability. Increasing in LDPE content (0-20 parts) in PE phase caused reducing in viscosity and so good processability. However, the mechanical properties of all the films were not altered because tensile strength of LLDPE was similar to that of LDPE. Water permeability of the films did not change because all the films had equal crystallinity and EVA content. Adding 10% zeolite A by weight led to increase of water permeability due to high porosity and polarity in zeolite A.

**Keywords:** PE film, EVA, Zeolite A, Water Vapor Permeability (WVP)

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง อิทธิพลของการใช้ LDPE ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม (Effect of LDPE on Processing and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Packaging Films with zeolite A Filler) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากทุนวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี งบประมาณ ๒๕๕๖

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวณัฐริกา ใจสมบุรณ์ นางสาวพัชรพล มนัสพงษ์ธนากุล นางสาวศศิภา นาประดิษฐ์ นายสมพล จันทิมา นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

หัวหน้าโครงการ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
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 การรักษาคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว.....	4
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว.....	5
2.1.1.1 การหายใจ.....	5
2.1.1.2 การคายน้ำ.....	9
2.1.1.3 การสุก.....	9
2.1.2 การควบคุมการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว.....	10
2.1.2.1 การลดความร้อนภายหลังการเก็บเกี่ยว.....	10
2.1.2.2 การเก็บรักษาผักและผลไม้.....	11
2.1.3 บรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้.....	13
2.1.3.1 การซึมผ่านก๊าซ.....	13
2.1.3.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ.....	13
2.1.4 การออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อผู้บริโภค.....	14
2.1.4.1 การระบายอากาศ.....	14
2.1.4.2 ความชื้น.....	14
2.2 फिल्मที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์.....	15
2.2.1 การซึมผ่านของฟิล์ม.....	15
2.3 พอลิเอทิลีน.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน.....	16
2.3.1.1 ความหนาแน่น.....	16
2.3.1.2 ครรชนีการไหล.....	17
2.3.1.3 การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล.....	17
2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	18
2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	20
2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์.....	22
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์.....	22
2.4.2 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์.....	22
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	23
2.5 ซีโอไลต์เอ.....	23
2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	24
2.5.2 การสังเคราะห์.....	24
2.5.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ.....	25
2.5.3.1 สารดูดน้ำ (Desiccants).....	25
2.5.3.2 การแลกเปลี่ยน ไอออน (Ion exchangers).....	25
2.5.3.3 สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves).....	25
2.5.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน.....	25
2.6 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า.....	25
2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 สารเคมี.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	33
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์.....	33
3.3.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	34
3.3.1.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/LDPE/EVA.....	34
3.3.1.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/LDPE/EVA/Zeolite A.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์สูตรผสม.....	35
3.3.3 การเตรียมฟิล์ม.....	36
3.3.3.1 การเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่า.....	36
3.3.3.2 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด.....	36
3.3.4 ความกว้าง และ/หรือความหนาของฟิล์ม.....	37
3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์ม.....	37
3.3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก....	37
3.3.7 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มสูตรผสม.....	38
3.3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	38
3.3.8.1 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอ.....	38
3.3.8.2 การกระจายตัวของ EVA.....	38
3.3.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	38
3.3.10 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ.....	39
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>40</b>
4.1 ผลจากการศึกษาฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA.....	40
4.1.1 ค่าดัชนีการไหลของสูตรผสม.....	40
4.1.2 ความหนาและความกว้างของฟิล์มตัวอย่าง.....	41
4.1.3 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ในฟิล์มตัวอย่าง.....	42
4.1.4 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มตัวอย่าง.....	43
4.1.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	45
4.1.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม.....	45
4.1.7 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง.....	47
4.2 ผลการศึกษาฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอ.....	48
4.2.1 ค่าดัชนีการไหลของสูตรผสมที่มีซีโอไลต์เอ.....	48
4.2.2 ความหนาของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ.....	49
4.2.3 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ.....	49
4.2.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ.....	50
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ.....	51
4.2.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบการทดสอบของฟิล์มตัวอย่างกับฟิล์มทางการค้า.....	52
4.3.1 ความหนาและความกว้างของฟิล์มทางการค้า.....	52
4.3.2 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสูตรผสมที่ใช้ในการทดสอบและฟิล์ม ทางการค้า.....	52
4.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างและฟิล์มทางการค้า.....	53
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ข้อมูลประวัติคณะวิจัย.....	61





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก.....	5
2.2 อัตราการหายใจของผักและผลไม้บางชนิด.....	8
2.3 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก.....	9
2.4 ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนในฟิล์มชนิดต่างๆ.....	13
2.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ.....	14
2.6 สมบัติบางประการของ LDPE ทั่วไป.....	19
3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE.....	31
3.2 สมบัติบางประการของ LDPE.....	31
3.3 สมบัติบางประการของ EVA.....	32
3.4 สมบัติบางประการของ Zeolite A.....	32
3.5 น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมด.....	34
4.1 อักษรย่อแทนสูตรและสูตรผสมทั้งหมด.....	40
4.2 ค่าดัชนีการไหลของแต่ละสูตรผสม.....	41
4.3 ความหนาและความกว้างของฟิล์ม.....	41
4.4 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนในฟิล์มสูตรต่างๆ.....	45
4.5 ค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์ผสม.....	48
4.6 ความหนาของฟิล์ม.....	49
4.7 ผลการทดสอบทางความร้อนของฟิล์ม.....	50
4.8 ผลการทดสอบเชิงกลโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	51
4.9 ความหนาเฉลี่ย อัตราการซึมผ่านไอน้ำ และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ.....	51

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงราคาเม็ดพลาสติกต่างประเทศปี 2011.....	2
2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบให้ออกซิเจนและไม่ให้ออกซิเจน....	7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทาง กายภาพ.....	17
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโมเลกุล.....	18
2.4 โครงสร้างของ LDPE.....	18
2.5 โครงสร้างของ EVA.....	22
2.6 Frame work ของซีโอไลต์เอ.....	24
2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	24
2.8 ภาพขยายของซีโอไลต์เอจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	24
2.9 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	26
2.10 ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด.....	27
3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	39
4.1 ภาพ SEM ของฟิล์ม LLDPE และฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA แสดงการกระจายตัวของ EVA จากพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 3500 เท่า) .....	42
4.2 พฤติกรรมการไหลของพอลิเอทิลีนขณะหลอมเหลวที่มีองค์ประกอบต่างกัน.....	43
4.3 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่าง.....	44
4.4 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
4.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ.....	47
4.6 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เอ.....	50
4.7 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่างและฟิล์มทางการ ค้า.....	52
4.8 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างในงานวิจัยและฟิล์มทางการค้า.....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผลผลิตด้านเกษตรกรรม เช่น ผักและผลไม้ถือเป็นสินค้าส่งออกสำคัญที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทย ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ขณะขนส่ง เนื่องจากภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ยังมีการหายใจ มีการคายน้ำอยู่ ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนัก การสุก และการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องทำการลดความร้อนภายหลังเก็บเกี่ยว ป้องกันการกระทบกระเทือนขณะขนส่ง รวมทั้งมีการควบคุมการหายใจเพื่อชะลอการสุกและการเก็บรักษาตัวอย่างที่ถูกต้อง โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องป้องกันการสูญเสียน้ำเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่สูญเสียน้ำหนักไปมากนัก ต้องมีการถ่ายเทไอน้ำและอากาศที่เพียงพอเพื่อคงความสดให้อยู่ได้นานขึ้น อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้สดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา หรือระหว่างการขนส่ง ดังนั้นการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ถูกต้องจะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะช่วยรักษาผลผลิตทางการเกษตรให้คงอยู่ในสภาพเดิมมากที่สุด และยังเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการขนส่งสินค้า [1]

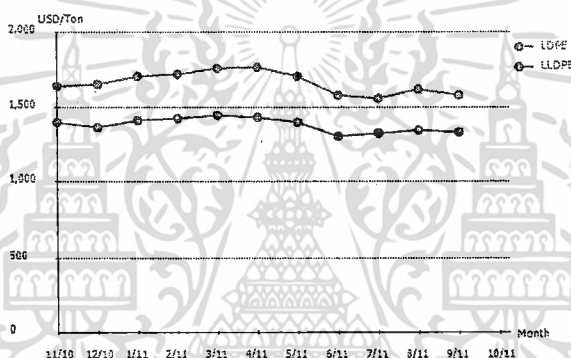
ในปัจจุบันนิยมใช้พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้สด เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีข้อดีคือ ราคาถูก ปลอดภัยกับอาหารเพราะพอลิเอทิลีนเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่มีข้อเสียคือมีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ จึงมีการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยระบายไอน้ำ แต่การเจาะรูทำให้บรรจุภัณฑ์ฉีกขาดได้ง่าย ขาดความสวยงาม และอาจทำให้จุลินทรีย์ในอากาศสัมผัสกับผักผลไม้ได้ [2] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำได้โดยไม่ต้องมีการเจาะรู

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของนันทวรรณ ม่วงมี [3] ได้มีการทดลองเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี โดยมีการเติมซีโอไลต์เอ (Zeolite A) ที่มีรูพรุน มีขั้วสูง และมีสมบัติดูดซึมน้ำได้ดีมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ แต่การนำซีโอไลต์เอที่มีขั้วสูงมาผสมกับ LDPE ซึ่งมีขั้วต่ำนั้น จะเกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดี เพราะมีความแตกต่างระหว่างขั้วมาก จึงนำเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA) ซึ่งมีขั้วมาผสมเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE เนื่องจาก EVA สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับ LDPE ทั้งนี้ยังมีส่วนที่เป็นขั้วของไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA) ซึ่งสามารถผสมเข้ากับซีโอไลต์เอได้ดีอีกด้วย ผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนของ LDPE:EVA เท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Water Vapor Permeability, WVP) สูงกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโอไลต์เอลงไป พบว่าฟิล์ม LDPE:EVA (80:20) ที่มีซีโอไลต์อยู่ 25% โดยน้ำหนัก จะมีค่า WVP สูงกว่าฟิล์ม LDPE:EVA (80:20) 60% และสูงกว่าฟิล์ม LDPE ถึง 106% ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติที่มีขั้วของ EVA และซีโอไลต์เอ ซึ่งดูดซับไอน้ำได้ดี จึงช่วยเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอย่างมาก โดยที่ยังมีสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างจากฟิล์ม LDPE นัก

ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) แทนการใช้ฟิล์ม LDPE มากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบัน LLDPE มีราคาต่ำกว่า LDPE ประมาณ 200-300 USD/Ton [4] และ LLDPE สามารถผลิตให้มีสมบัติที่หลากหลายได้จากการใช้มอนอเมอร์ร่วม แต่จากสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด พบว่า LLDPE ขึ้นรูปได้ยากกว่า LDPE จึงอาจต้องมีการผสม LDPE ลงไปบางส่วน เพื่อปรับปรุงสมบัติในการขึ้นรูป



ภาพที่ 1.1 กราฟแสดงราคาเม็ดพลาสติกต่างประเทศปี 2011 [4]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตทางการแพทย์ให้มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่าอัตราส่วนที่ให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำและสมบัติเชิงกลดี คือ อัตราส่วนระหว่าง LDPE:EVA เท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราส่วนเท่าเดิม แต่ในส่วนของ LDPE จะใช้เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE และ LDPE เพื่อช่วยในการขึ้นรูปของ LLDPE และยังมีเติมซีโอไลต์เอลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการเติม LDPE ในฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่ใช้อัตราส่วนของ PE:EVA คงที่เป็น 80:20 โดยน้ำหนัก และมีซีโอไลต์ผสมอยู่ เพื่อใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำดี

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PE และ EVA ในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก โดยในส่วนของ PE จะทำการผสมระหว่าง LLDPE กับ LDPE ในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10, 85:15 และ 80:20 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนของซีโอโลต์เอเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 10 % โดยน้ำหนัก
2. หาค่าดรรชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ
3. ขึ้นรูปฟิล์มสูตรต่างๆจากกระบวนการเป่าและกระบวนการอัดขึ้นรูป
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสูตรฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
5. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)
6. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)
7. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)
8. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงอิทธิพลของการใช้ LDPE ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม และสามารถผลิตฟิล์มที่มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น และนำความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การรักษาคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผักและผลไม้ หลังการเก็บเกี่ยว แม้จะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่ได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลา เนื่องจากผลผลิตนั้นยังคงมีการหายใจและการคายน้ำเหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักของผลผลิตนั้นขาดหายไป และยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านคุณภาพและรสชาติของผลผลิตในทางที่แย่ลงด้วย

การเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อรักษาคุณภาพที่ดีของผลผลิตไว้ นั้นเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ ดังนี้ [5]

- ความชื้นในอากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศโดยปกติจะมีค่าต่ำกว่าระดับความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% ส่วนผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% โดยความดันไอน้ำภายนอกเซลล์ของผักและผลไม้จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งเราอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำในผลผลิตมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งมีค่ามากกว่าความดันไอน้ำในบรรยากาศ เพราะฉะนั้นจึงเกิดการแพร่ของไอน้ำออกจากผักและผลไม้สู่บรรยากาศตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับความชื้นของบรรยากาศภายนอกว่ามีมากน้อยเพียงใด

ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศอิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% ก็ยังมีโอกาสสูญเสียน้ำออกจากผักและผลไม้สู่บรรยากาศภายนอกได้ เนื่องจากผักและผลไม้เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการหายใจ เกิดพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศตลอดเวลา ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นและทำให้บรรยากาศรับน้ำได้เพิ่มขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชื้นในอากาศและการสูญเสียน้ำ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลน้ำจะมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามในผักและผลไม้ซึ่งเป็นปริมาตรปิด จึงเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำเกิดขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของน้ำจะหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีมากขึ้น

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการถ่ายเทอากาศที่ดี เนื่องจากในบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งก๊าซที่สำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผักและผลไม้คือก๊าซออกซิเจน และบางครั้งในการเก็บรักษาอาจมีการผลิตก๊าซหลายชนิดที่มีผลทำให้เกิดการเน่าเสียของผักและผลไม้ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาที่ดีควรมีการถ่ายเทอากาศที่ดี

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [6]

ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บ รักษาได้
	°F	°C		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-59	7-10 วัน
กระหล่ำปลม	32	0	90-59	3-4 สัปดาห์
กระหล่ำปลี				
พินธุ์เบา	32	0	90-59	3-6 สัปดาห์
พินธุ์หนัก	32	0	90-59	3-4 เดือน
ดอกกระหล่ำ	32	0	85-97	2-3 สัปดาห์
ข้าวโพดหวาน	31-32	0	85-95	4-8 วัน
แตงกวา	45-50	11	85-95	2-3 สัปดาห์
มะเขือ	45-50	11	85-90	10 วัน
ฮันนี่ดีว	45-50	11	85-90	2-3 สัปดาห์
เห็ด	32	0	85-90	3-5 สัปดาห์
กระเจี๊ยบฝัก	50	11	85-90	2 สัปดาห์
หอมหัวใหญ่	32	0	70-75	6-8 เดือน
มันเทศ	55-60	13-16	85-90	4-6 เดือน
มะเขือเทศ				
สุก	50	11	85-90	8-12 วัน
ดิบ	55-70	13-21	85-90	2-6 สัปดาห์

### 2.1.1 การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว แม้จะถูกตัดออกจากต้นแล้ว กระบวนการต่างๆ ทั้งทางสรีระและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับตอนก่อนการเก็บเกี่ยว ดังนั้นผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังคงหายใจต่อไปโดยดูด  $O_2$  เข้าไปและคาย  $CO_2$  และความร้อนออกมา การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการเก็บเกี่ยว คือ

#### 2.1.1.1 การหายใจ

การหายใจ หมายถึง กระบวนการทางเมตาบอลิซึม (Metabolism) ที่ผลิตผลนำเอาอาหาร (สารอินทรีย์จำพวก แป้ง น้ำตาล ไขมัน โปรตีน) ที่สะสมไว้ตั้งแต่ระยะก่อนการเก็บเกี่ยวมาแตกตัวเป็นสารที่มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน พร้อมทั้งให้พลังงานออกมา พลังงานนี้เองที่ผลิตผลจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ออกซิเจนในกระบวนการดังกล่าวนี้ และในขณะเดียวกันก็จะสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อผลิตผลอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอจะส่งผลให้เกิดกระบวนการ Anaerobic respiration หรือ Fermentation ขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการสร้างแอลกอฮอล์ขึ้นภายในผลิตผล ซึ่งจะทำให้เซลล์ถูกทำลายและรสชาติผลิตผลเปลี่ยนไป [7]

- การสูญเสียอาหารที่สะสมไว้ในผลิตผลเนื่องจากกระบวนการหายใจนั้นหมายถึง

1. มีผลทางตรงในการเร่งให้เกิดความเสื่อมโทรมของผลิตผล เนื่องจากสารอาหารที่ถูกเก็บไว้ถูกใช้หมดไปเรื่อยๆ เพื่อให้เซลล์ของผลิตผลยังคงมีสภาพมีชีวิตอยู่ได้

2. เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารที่ผู้บริโภคควรจะได้รับ

3. คุณภาพในเรื่องรสชาติเสียไป โดยเฉพาะความหวาน

4. ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก

- การหายใจของผลผลิตสดนั้นมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

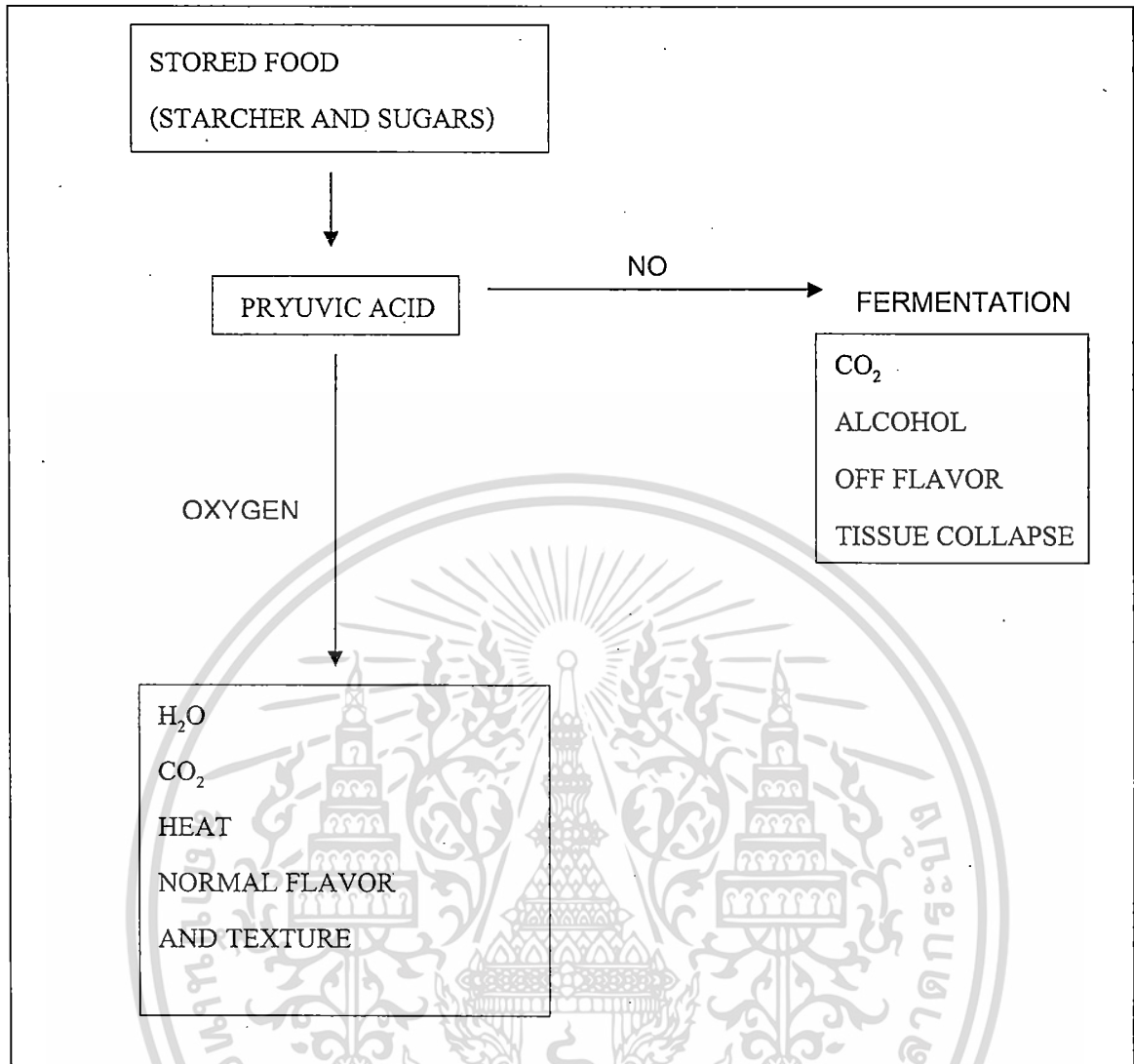
2. ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก

3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิก และกรดอินทรีย์อื่นๆที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานซึ่งเกิดจากการหายใจของผลผลิตหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ สรุปได้เป็นสมการง่ายๆ คือ



โดยที่การหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจนเลย [8]





ภาพที่ 2.1 แผนผังแสดงการหายใจของพืช โดยสังเขป ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน [8]

อัตราการหายใจของผลิตผลโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเน่าเสีย ดังนั้นสามารถใช้เป็นเครื่องแสดงให้เห็นถึงอายุการเก็บรักษาของผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวได้เป็นอย่างดี โดยผลิตผลที่มีอัตราการหายใจในระดับที่สูงกว่ามีแนวโน้มที่จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่าผลิตผลที่มีอัตราการหายใจที่ต่ำกว่า

## ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผักและผลไม้บางชนิด [9]

ประเภทอัตรา การหายใจ	อัตราการหายใจสูงสุดที่ 25°C (mg CO <sub>2</sub> /kg hr )	ชนิดของผลิตผล
ต่ำมาก	<5	เมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ต่ำ	5-20	ส้ม กระหล่ำปลี หอมหัวใหญ่
ปานกลาง	2-100	เงาะ มังคุด มะละกอ มะเขือเทศ มะเขือยาว ผักกาดขาว
สูง	100-200	มะม่วง น้อยหน่า หน่อไม้ฝรั่ง ผักคะน้า ผักบุงจีน
สูงมาก	>200	ทุเรียน ข้าวโพดอ่อน ถั่วฝักยาว เห็ด

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืชดังต่อไปนี้

1. Climacteric Fruit คือ ผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด กัลฉ่าย ทุเรียน

2. Non-Climacteric Fruit คือ ผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากที่ผลแก่จัดอัตราการหายใจลดต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ อัตราการหายใจค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุการเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่จัดเต็มที่ ก็จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป ดังนั้นจึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แดงกวาง

### ตารางที่ 2.3 ชนิดของผลไม้จำแนกตามลักษณะการหายใจขณะผลแก่หรือสุก [10]

ประเภท Climacteric	ประเภท Non-Climacteric
แอปเปิ้ล	สตอเบอรี่
สตี้	องุ่น
ท้อ	ส้มชนิดต่างๆ
กล้วย	มะพร้าว
กีวี	สับปะรด
อโวคาโด	เงาะ
น้อยหน่า	มังคุด
มะละกอ	ลิ้นจี่
มะม่วง	ลำไย
ทุเรียน	มะไฟ
แตงโม	มะเฟือง
มะเขือเทศ	แตงกวา
ขนุน	มะเขือเทศพันธุ์ Rin และ Nor
ฝรั่ง	เชอร์รี่
ละมุด	มะกอกและกลางสาด

#### 2.1.1.2 การคายน้ำ

การคายน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของผักและผลไม้ อัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำจะขึ้นกับพื้นที่ผิวและลักษณะ โครงสร้างผิว ผักที่มีใบมากจะมีอัตราการคายน้ำหรือสูญเสียน้ำรวดเร็วและมีค่าสูงเนื่องจากพื้นที่ผิวสูง และ โครงสร้างของใบมีช่องเปิดทำให้สูญเสียน้ำได้ง่าย ส่วนแอปเปิ้ลจะมีการสูญเสียน้ำน้อย เนื่องจากมีรูปร่างกลมซึ่งมีพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ และยังมีไขเคลือบผิวช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำด้วย อัตราการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อนี้จะขึ้นกับความดันไอที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกและภายในเนื้อเยื่อ ถ้าความแตกต่างมีมากอัตราการสูญเสียน้ำก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วความดันไอของเนื้อเยื่อภายในจะมีค่าสูงกว่าภายนอกเสมอ

#### 2.1.1.3 การสุก

การสุกเป็นการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ผลไม้แก่จัดแต่ยังไม่มีคุณภาพเหมาะสมกับการบริโภค การสุกเป็นการพัฒนาขั้นสุดท้ายของผลไม้ก่อนเข้าสู่ระยะร่วงโรยการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับ ไม่ได้และการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงของผลไม้อายุที่อาจพบได้คือ เมล็ดแก่เต็มที่ สีเปลี่ยนแปลง ผลหลุดจากช่กอัตรการหายใจเปลี่ยนแปลง เนื่อนี้มีลงและมีการสร้างสารให้กลิ่นรส

### 2.1.2 การควบคุมการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว [11]

ผักและผลไม้จะมีคุณภาพดีและเก็บรักษาได้นานถ้าเก็บเกี่ยวเมื่อมีความแก่อ่อนเหมาะสม การเก็บเกี่ยวจะทำเมื่อผักและผลไม้มีความแก่ตามความต้องการของตลาด แต่เมื่อเก็บเกี่ยวแล้ว ผักและผลไม้ยังมีการหายใจและการคายน้ำอยู่ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนัก การสุกและการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ เพื่อให้ผักและผลไม้มีคุณภาพตามที่ผู้บริโภคประสงค์จึงต้องทำการลดความร้อนภายหลังการเก็บเกี่ยว ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และแมลงที่ติดมา ควบคุมการหายใจเพื่อชะลอการสุก หรือเร่งให้มีการสุก และทำการเก็บรักษาอย่างถูกต้อง

#### 2.1.2.1 การลดความร้อนภายหลังการเก็บเกี่ยว

การปล่อยให้ผลิตผลทางการเกษตรมีอุณหภูมิสูงหลังจากเก็บเกี่ยวจะทำให้อัตราการหายใจสูงขึ้น เร่งให้เกิดการแก่ การสุกและการเสื่อมสลายเร็วขึ้น ทำให้สูญเสีย น้ำ เร่งการสร้างเอทิลีนและยังทำให้เชื้อจุลินทรีย์ต่างๆเจริญได้อย่างรวดเร็ว การลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ของพืชผลบางชนิดสามารถทำได้ตั้งแต่ก่อนการลดความร้อน หรือทำควบคู่กันกับการลดอุณหภูมิของผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยว ขึ้นอยู่กับว่าจะจัดจำหน่ายแบบขายส่งหรือขายปลีก วิธีการลดความร้อนของผลิตผลทางการเกษตรที่นิยมใช้ ได้แก่

1. การใช้ลมเย็น (Forced-air cooling) เป็นการลดอุณหภูมิโดยการเป่าอากาศเย็น อุณหภูมิประมาณ  $0-3^{\circ}\text{C}$  และทำการหมุนเวียนอากาศด้วยความเร็วสูง การทำให้อากาศเย็นไหลผ่านและแทรกตัวเข้าไประหว่างภาชนะบรรจุด้วยความเร็วสูงจะทำให้อากาศพาความร้อนออกจากผักและผลไม้ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อผักและผลไม้เย็นลงแล้ว จะต้องลดหรือหยุดการหมุนเวียนของอากาศเพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ เมื่อผักและผลไม้เย็นลงแล้วควรจะทำ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมกับผักและผลไม้ชนิดนั้นๆ วิธีนี้นิยมใช้กับส้ม สตรอเบอรี่ แตง มะเขือเทศ องุ่น ท้อ แอปเปิ้ล กล้วย

การใช้สุญญากาศหรือการลดความดัน (Vacuum cooling) เป็นวิธีการลดอุณหภูมิที่รวดเร็วที่สุด นิยมใช้กับผักใบต่างๆ ทำได้โดยการใส่ผักหรือผลไม้ในภาชนะที่ปิดมิดชิด แล้วดูดอากาศออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศจนมีความดันประมาณ 4.5 มม.ปรอท ซึ่งจะทำให้ไอน้ำระเหยเป็นไอน้ำออกจากผักและผลไม้ ทำให้อุณหภูมิลดลง วิธีการนี้จะมีการสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้มาก ดังนั้นจึงอาจสเปรย์ผักและผลไม้ด้วยน้ำสะอาดก่อน นิยมใช้กับผักกาดหอม หน่อไม้ฝรั่ง เซอร์รี่ ข้าวโพดหวาน ถั่วฝักสด เห็ด

2. การใช้น้ำเย็น (Hydro cooling) เป็นการลดความร้อนโดยใช้น้ำเย็น เป็นวิธีการที่รวดเร็ว ใช้ได้กับผักและผลไม้หลายชนิด สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ปล่อยให้ น้ำเย็นไหลผ่านผักและผลไม้ซึ่งเคลื่อนมาตามสายพาน การสเปรย์น้ำเย็นลงบนผักและผลไม้ การจุ่มผักและผลไม้ลงในน้ำเย็นหรือถังน้ำแช่แข็ง น้ำที่ใช้ควรมีอุณหภูมิ  $1^{\circ}\text{C}$  และเติมคลอรีนหรือสารระงับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ การใช้น้ำเย็นเป็นวิธีการที่นิยมใช้เนื่องจากใช้เวลา น้อย ลดการสูญเสีย น้ำหนักของผักและผลไม้ และยังช่วยทำความสะอาดเบื้องต้นด้วย นิยมใช้กับหน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดหวาน เซอร์ แครอท แรดิช สาลี่

3. การใช้น้ำแข็ง (Contact icing) นิยมใช้กับผักใบ ใช้น้ำแข็งปนคลุมด้านบนหรือปูเป็นชั้นๆระหว่างผลิตผลเพื่อลดความร้อน เมื่อน้ำแข็งละลาย น้ำเย็นจะไหลผ่านผักและผลไม้เมื่อผลิตผลทางการเกษตรมีอุณหภูมิลดลงแล้ว ก่อนการบรรจุเกษตรกรสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์โดยการพรมสารละลายของโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์ หรือการรมควันทามะถันในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อลดจุลินทรีย์หรือแมลงที่ติดมาบนผิวของผักและผลไม้ เป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวโดยไม่กระทบกระเทือนคุณภาพภายในของพืช การรมควันทามะถันนี้นิยมใช้กับผลไม้ประเภทที่ไม่ได้บริโภคเปลือก เช่น ลำไย ลิ้นจี่ เป็นต้น

#### 2.1.2.2 การเก็บรักษาผักและผลไม้

การเก็บรักษาที่ถูกต้องจะช่วยควบคุมหรือยับยั้งการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการในพืช (เช่น การงอกของมันฝรั่ง การเกิดสีเขียวของส่วนหัวของแครอท การเกิดความเหนียวของถั่วแขก เป็นต้น) ช่วยควบคุมการสูญเสีย น้ำของผักและผลไม้ ควบคุมอัตราการหายใจให้ช้าลง และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีควบคุมไปกับการลดอุณหภูมิ สารเคมีที่ใช้ อาจเป็นฮอร์โมนพืช แต่มีราคาแพง หรือใช้การดูดซับเอทิลีนที่ผลไม้สร้างขึ้น เพื่อให้มีความเข้มข้นต่ำเกินกว่าจะทำให้เกิดการสุก เช่น การใช้ด่างทับทิมหรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารดูดซับเอทิลีน โดยการใส่ในช่องหรือภาชนะบรรจุที่ก๊าซผ่านเข้า-ออกได้ และวางไว้ใกล้ๆกับผักและผลไม้ หรือถ้าจะเร่งการสุกก็สามารถทำได้โดยให้ก๊าซเอทิลีนหรือก๊าซอะเซทิลีนแก่ผักและผลไม้ แต่ก๊าซอะเซทิลีนมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเอทิลีน ทำให้ต้องใช้ในปริมาณมากและอาจมีกลิ่นติดไปกับผลไม้ได้ การเก็บรักษาที่นิยมใช้ควบคู่กับการควบคุมการหายใจและการคายน้ำของพืชมี 3 วิธีคือ

1. การใช้ความเย็น (Refrigerated storage) อุณหภูมิภายในห้องเย็นต้องสูงกว่าจุดเยือกแข็งของผักและผลไม้เล็กน้อย และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเก็บรักษาประมาณ 85-95% เช่น การเก็บสตอเบอรี่ที่อุณหภูมิ  $0-1^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเก็บรักษาที่เหมาะสมจะขึ้นกับชนิดและพันธุ์ของพืช ผักและผลไม้ในเขตร้อนมักจะเสื่อมเสีย ถ้าเก็บในที่เย็นจัดเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Chilling injury) จึงควรเก็บที่อุณหภูมิ

สูงกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่างเช่น กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม ควรเก็บที่อุณหภูมิ  $13-14^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 90–95% เงาะโรงเรียน เงาะสีชมพู ควรเก็บที่อุณหภูมิ  $13^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 90–95% พืชที่มีความชื้นต่ำ เช่น หอมแดง กระเทียม ควรใช้ความชื้นสัมพัทธ์ 65–75% ควรมีการหมุนเวียนของอากาศภายในห้องเย็นเพื่อให้ภายในห้องมีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด นอกจากนี้ควรมีการกำจัดเอทิลินที่พืชสร้างขึ้น โดยใช้สารดูดซับ เช่น ค่างทับทิม

## 2. การควบคุมหรือปรับสภาวะของบรรยากาศ สามารถทำได้หลายระดับคือ

การควบคุมสภาพบรรยากาศ (Controlled Atmosphere Storage; CAS) หมายถึง การเก็บรักษาในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของก๊าซในบรรยากาศแตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ โดยลดปริมาณออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ลงให้เหลือน้อยกว่า 10% แต่ไม่ต่ำกว่า 2.5% เพื่อลดอัตราการหายใจ และเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็น 1–5% ถ้าความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$  สูงเกินไป การหายใจจะเปลี่ยนจากแบบใช้ออกซิเจนเป็นไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ผักและผลไม้มีกลิ่นรสผิดปกติ ระบบ CAS นี้จะต้องการเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผลิตและควบคุมความเข้มข้นของก๊าซควบคู่กับเครื่องทำความเย็น

การปรับสภาพบรรยากาศ (Modified Atmosphere Storage; MAS) หมายถึง การเก็บรักษาที่มีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของบรรยากาศที่จุดเริ่มต้นเท่านั้น หลังจากนั้นส่วนประกอบของบรรยากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากการหายใจของผักและผลไม้ นิยมใช้การเก็บในถุงพอลิเอทิลีน ผักผลไม้และเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังหลงเหลืออยู่ที่ผิวของผักผลไม้และจะใช้  $\text{O}_2$  ที่มีอยู่ในถุงในการหายใจและมีการสร้าง  $\text{CO}_2$  ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของก๊าซ  $\text{O}_2$  และ  $\text{CO}_2$  ในบรรยากาศในภาชนะบรรจุ สัดส่วนของก๊าซในระหว่างการเก็บรักษาจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและพันธุ์ของผักและผลไม้ ชนิดและจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ ตลอดจนบรรจุภัณฑ์ที่เลือกใช้ว่าป้องกันการผ่านเข้า-ออกของก๊าซได้มากน้อยเพียงใด

3. การเก็บรักษาโดยการลดความดัน (Hypobaric storage) เป็นการควบคุมสภาพบรรยากาศอีกวิธีหนึ่งโดยการควบคุมความดันไอของก๊าซในห้องเก็บ โดยการดูดอากาศจากห้องเก็บรักษาให้มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศปกติ ความดันย่อยของออกซิเจนและก๊าซชนิดอื่นจะลดลงด้วย อัตราการหายใจและการสังเคราะห์เอทิลินลดลง ความดันต่ำในห้องเก็บรักษาทำให้ก๊าซชนิดต่างๆที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์แพร่กระจายออกสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น เซลล์ของผักและผลไม้จึงสัมพันธ์กับเอทิลินน้อยลง ปัญหาของวิธีการนี้คือการสูญเสียความชื้นของผักและผลไม้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมความชื้นของบรรยากาศในห้องเย็นให้สูงอยู่เสมอ

### 2.1.3 บรรจุก๊าซเพื่อรักษาคุณภาพผักและผลไม้ [12]

บรรจุก๊าซหรือภาชนะบรรจุเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตผลหลังจากการเก็บเกี่ยวและการขนส่ง บรรจุก๊าซที่ดีที่สุดรักษาคุณภาพของผลิตผลที่บรรจุให้ยังคงสภาพดีขณะขนส่งไปยังแหล่งขาย สมบัติที่สำคัญของวัสดุบรรจุก๊าซที่ต้องพิจารณามีดังนี้

#### 2.1.3.1 การซึมผ่านก๊าซ

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสถานะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน  $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24\text{hr}$  ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอควรจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{O}_2$  ประมาณ  $20\text{-}30 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24\text{hr}$  สำหรับผักผลและไม้สดต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านจะมีค่าตั้งแต่  $2000 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24\text{hr}$  ขึ้นไป

ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนในฟิล์มชนิดต่างๆ [13]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของ $\text{O}_2$ ( $\text{cc}/25\mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ที่ $23/25^\circ\text{C}, 50\%\text{RH}$ )
พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET)	47-94
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80-9000
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	2100-2900
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	7100-7800
พอลิพรอพิลีน (PP)	2400-3800

#### 2.1.3.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเป็นบรรจุก๊าซจากค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำที่เกิดขึ้นภายในบรรจุก๊าซและปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาเรื่องหยดน้ำในบรรจุก๊าซและในทางกลับกันบรรจุก๊าซที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้ง่ายมักเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหานี้ อาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือเจาะรูเล็กๆเพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากบรรจุก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [13]**

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (cc/25 $\mu$ m <sup>2</sup> .day ที่ 38°C, 90%RH)
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	16-20
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	80-500
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	4.7
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	16-24
พอลิพรอพิลีน (PP)	11

#### 2.1.4 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค [14]

การออกแบบบรรจุหรือหีบห่อสำหรับผู้บริโภคต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

##### 2.1.4.1 การระบายอากาศ

การใช้ฟิล์มพลาสติกทำเป็นบรรจุภัณฑ์นั้น พลาสติกแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการยอมให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้แตกต่างกัน ปกติฟิล์มพลาสติกจะยอมให้ก๊าซ CO<sub>2</sub> ผ่านเข้าออกได้มากกว่าก๊าซ O<sub>2</sub> ดังนั้นอัตราการสะสมของก๊าซ CO<sub>2</sub> จึงน้อยกว่าอัตราการหายไปของก๊าซ O<sub>2</sub> และถ้าก๊าซ O<sub>2</sub> ถูกใช้ไปจนหมดจากบรรยากาศภายในของบรรจุภัณฑ์ จะทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O<sub>2</sub> ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์และก๊าซ CO<sub>2</sub> ส่งผลให้เซลล์ของพืชตาย ผักและผลไม้จะเกิดการเน่าเสียและรสชาติเปลี่ยนไป

ฟิล์มพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์นั้นควรมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด 1/4-1/8 นิ้ว เพื่อช่วยในการระบายอากาศ ผลผลิตจะไม่ขาดออกซิเจน ไม่เกิดการสะสมของแอลกอฮอล์และก๊าซ CO<sub>2</sub> ขณะวางขายในสภาพอุณหภูมิสูง

##### 2.1.4.2 ความชื้น

ผักและผลไม้ที่มีน้ำหรือความชื้นเป็นส่วนประกอบอยู่สูง 75-95% จะอยู่ในลักษณะสมดุลกับบรรยากาศได้เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่สูงถึง 95% ขึ้นไป โดยปกติผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวแล้วจะเหี่ยวแห้งอย่างรวดเร็วเนื่องจากอากาศทั่วไปมีความชื้นอยู่ค่อนข้างต่ำ ทำให้เซลล์เกิดการเสียรูปและหดรัดตัว

การเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน แต่พลาสติกที่ใช้ห่อผักและผลไม้สดจะทำให้ความชื้นข้างในรอบๆ ผักและผลไม้สูงและอาจสูงถึง 100% ดังนั้นจึงต้องเจาะรูที่ถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ออกไปข้างนอก เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงให้เหมาะสม



## 2.2 พลาสติกที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ [14]

- พลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene) เป็นพลาสติกที่ยอมให้ก๊าซ  $\text{CO}_2$  และก๊าซ  $\text{O}_2$  ผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้าไอน้ำภายใน โดยทั่วไปนิยมใช้ทำฟิล์มพลาสติกที่มีความหนาอยู่ระหว่าง 25-65 ไมครอน ฟิล์มพอลิเอทิลีนนิยมผลิตจาก LDPE เนื่องจากมีการขยายตัวตามแนววงเครื่องจักรได้มาก สามารถทำฟิล์มที่บางมากๆได้ และสามารถยืดตัวได้

- พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ฟิล์มชนิดนี้สามารถยืดและหดได้ทุกทิศทาง ก๊าซและน้ำผ่านเข้าออกได้ง่าย มีสมบัติดีกว่า LDPE นิยมใช้งานในลักษณะของแผ่นฟิล์มปิดภาชนะ ไม่เหมาะแก่การทำเป็นถุงบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปแบบเป่าได้

- พลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) ฟิล์มชนิดนี้จะมีความใสมากกว่าฟิล์ม LDPE สามารถขึ้นรูปแบบเป่าได้ ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทถุงและถาด สามารถใช้ความร้อนในการปิดผนึกได้

- เซลโลเฟน (Cellophane) เป็นวัสดุที่ทำจากเซลลูโลส (Cellulose) ในไม้หรือพืชเส้นใยอื่นๆ โครงสร้างทางเคมีเป็นกระดาษ แต่รูปร่างลักษณะจัดเป็นพลาสติก เป็นวัสดุโปร่งแสงและใส ความชื้นผ่านได้มาก อากาศผ่านได้น้อย ดังนั้นจึงมักใช้เป็นแผ่นกันความชื้น

- Rubber Hydrochlorine หรือ Piloform เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการสูญเสียไอน้ำได้ดีและอาจใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทถุงได้

### 2.2.1 การซึมผ่านของฟิล์ม

ฟิล์มเป็นวัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร มีสมบัติหลากหลายขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตเป็นฟิล์ม พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) ในส่วนของสายโซ่ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะเป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำผ่าน ส่วนที่ไม่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่หรือส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) จะเป็นส่วนที่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำผ่านได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) สายโซ่ของพอลิเมอร์จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ ปริมาตรอิสระ (Free volume) ถูกจำกัด แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  จะเกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโซ่นี้จะส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านก๊าซและไอน้ำของฟิล์ม

ความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐาน

การซึมผ่านของก๊าซสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลง และการยึดฟิล์มเป็นการเพิ่มการจัดเรียงตัวของสายโซ่ เพิ่มความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ความสามารถในการซึมผ่านก็จะลดลงเช่นกัน

### 2.3 พอลิเอทิลีน [15]

พอลิเอทิลีน (PE) นับเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีน (Ethylene) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงโดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal catalyst) การจับของโมเลกุลในลักษณะของสายโซ่สั้นและยาวจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนที่ได้ออกมามีความหนาแน่นแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนแบ่งเป็น 3 ประเภทตามค่าความหนาแน่น คือ

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) ความหนาแน่น 0.926-0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 2.3.1 สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [16]

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่จะพิจารณามีอยู่ 3 ประการ คือ ความหนาแน่น (Density) ดรรชนีการไหล (Melt flow index) และการกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 2.3.1.1 ความหนาแน่น

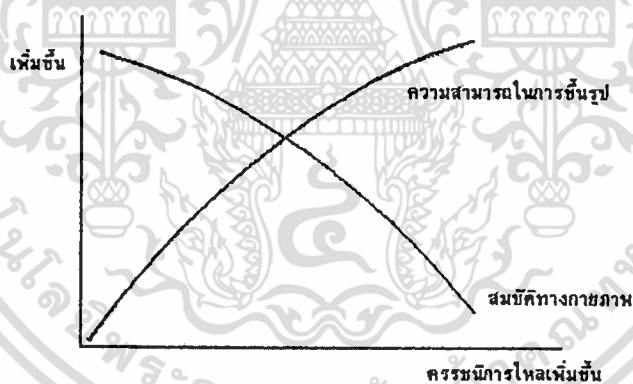
ความหนาแน่นของพลาสติก หมายถึง น้ำหนักพลาสติกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งทาง ASTM จะใช้หน่วยของความหนาแน่นเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) พอลิเอทิลีนจะมีความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิตและตัวเร่งที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยจะมีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลที่มีกิ่งยาวและจำนวนมากจะทำให้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อย โมเลกุลอยู่แบบหลวมๆ แสงทะลุผ่านง่ายจึงมีความใสแต่ความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นและจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะ โมเลกุลอยู่อย่างมีระเบียบและอยู่ใกล้กัน จะ

มีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านยาก ซึ่งเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” และส่วนที่อยู่กันอย่างหลวมๆเรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน”

### 2.3.1.2 दररชนีการไหล

ดรรชนีการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าดรรชนีการไหลหรืออาจเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “ดรรชนีการไหล” หมายถึงการวัดการไหลของพลาสติกขณะเหลว โดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและแรงอัดมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก ค่าดรรชนีการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้ที่จะมีปัญหาในการปรับเครื่องเม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานต่างๆกันจะมีค่าดรรชนีการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าดรรชนีการไหลแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้น การที่ค่าดรรชนีการไหลสามารถแสดงถึงขนาด น้ำหนักโมเลกุลได้ เพราะถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นการเคลื่อนไหวการไหลตัวจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานเท่ากันในการทดสอบการไหลตัว ขนาดโมเลกุลใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า

ในด้านความสัมพันธ์ของดรรชนีการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพ [16]

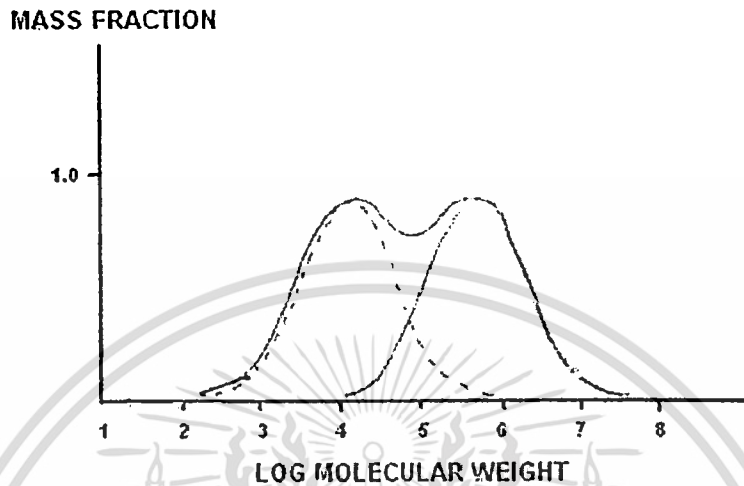
จากกราฟแสดงว่าเมื่อดรรชนีการไหลเพิ่มขึ้น การผลิตขึ้นรูปจะง่ายขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่จะลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

### 2.3.1.3 การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล

การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติบางประการทั้งการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยเล็กๆที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาว แต่จำนวนหน่วยของมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะมีจำนวนไม่เท่ากันทุกๆ โมเลกุล ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากจะเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง” ซึ่งพอจะอธิบายได้คร่าวๆจากกราฟต่อไปนี้

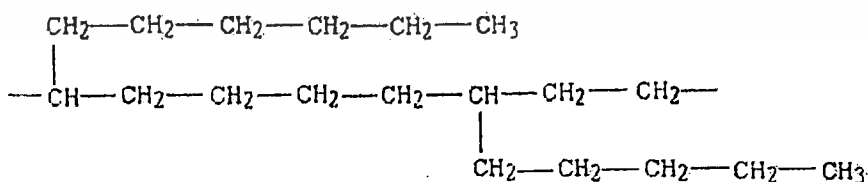


ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโมเลกุล [16]

ผลกระทบที่เด่นๆ ในเรื่องของการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ ความยากง่ายในการไหลตัวของพลาสติกในเครื่องอัดรีด ถ้าการกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้างจะช่วยให้การไหลตัวง่ายขึ้นในค่าธรรมชาติการไหลที่เท่ากัน

### 2.3.2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งสาขายาว พอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งจำนวนมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “Intramolecular back-biting”



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของ LDPE [17]

## ตารางที่ 2.6 สมบัติบางประการของ LDPE ทั่วไป [17]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.925
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.1-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความแข็งแรงกระแทก	J.m <sup>-1</sup>	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

### สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE [17]

1. มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt flow index อยู่ในช่วง 0.1–10.9 g/10นาทีย
3. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
4. มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
5. फिल्मที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low haze)
6. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good dielectric property)

LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะว่ราคาไม่แพง แต่มีราคาสูงกว่า LLDPE ยึดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้อย่างดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยึดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

LDPE เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มหัด ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยึดตัวได้ดี โครงของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE ยังทนต่อกรดและด่างต่างๆ ไปได้ และปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย แต่ข้อเสียของ LDPE คือ สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย

### การใช้งานของ LDPE มีดังนี้

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดที่บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมอบึง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงสำหรับบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลิตผลเกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย ฯลฯ
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ ฯลฯ
- फिल्मหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัดสินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนส่งเป็นหน่วยใหญ่

2. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

3. งานที่ฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นูนเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง

4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์ม บนผิวแผ่นออลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทห่มกึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ

5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของตะกร้า รถจักรยาน ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

### 2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [18]

กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ในปัจจุบันการบวนการผลิต LLDPE ได้แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ

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

ซึ่งกระบวนการผลิตเป็นดังนี้

- ความดันที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่ำมากคือ 6-20 บรรยากาศ (100-300 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยกว่า 100°C
- พอลิเมอร์ที่ได้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนกับบิวทีน (C<sub>4</sub>) หรือเฮกซีน (C<sub>6</sub>) หรือออกทีน (C<sub>8</sub>) ลักษณะโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ค่อนข้างมีระเบียบโมเลกุลมากแต่สั้น การกระจายน้ำหนักแคบ นอกจากนั้นสมบัติ LLDPE ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้

### ลักษณะทั่วไปของ LLDPE

LLDPE เป็นพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่ผลิตโดยใช้กระบวนการความดันต่ำ สามารถควบคุมโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเก่าที่ใช้ความดันสูง ทำให้เม็ดพลาสติกที่ผลิตได้เป็น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีกิ่งก้านสาขาเล็กๆกระจายตลอดความยาวของเส้นตรงและมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลนี้ ทำให้ LLDPE เป็นเม็ดพลาสติกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีคุณภาพสูง และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตฟิล์มที่ต้องการฟิล์มคุณภาพสูง อีกทั้งด้านราคาของ LLDPE ยังมีราคาถูกกว่า LDPE อีกด้วย

### สมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติก LLDPE

- ความต้านทานแรงดึงดีกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าเราผสม LLDPE ใน LDPE จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มสูงขึ้น
- ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  ของฟิล์มที่ผลิตจาก LLDPE ที่เตรียมการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
- ความสามารถในการทรงรูปดีกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE
- ความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE ถึง 60%
- ความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Hot tack/Sealing strength) สูงกว่าฟิล์มที่ผลิตจาก LDPE มาก ซึ่งสมบัตินี้เป็นตัวกำหนดความเร็วของการทำงานในขั้นการเชื่อมด้วยความร้อนหรือบรรจุและเชื่อม โดยทำให้การทำงานในขั้นตอนต่างๆ สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและเร็วขึ้น
- การผลิตฟิล์มบางๆของ LDPE 100% สามารถผลิตฟิล์มความหนาประมาณ 38 ไมครอน แต่ถ้าผสม LLDPE 10-20% จะสามารถดึงฟิล์มได้มากขึ้น ทำให้มีความหนาเพียง 4-5 ไมครอน
- โดยทั่วไป LLDPE ไม่ค่อยใส จึงต้องใส่ LDPE เข้าไปเพื่อรบกวนการตกผลึกของโมเลกุลของ LLDPE โดยค่าความขุ่น (Haze) จะลดลงและค่าความเงา (Gloss) จะเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากค่าความหนาแน่นลดลง อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะจำกัดขนาดผลึกพอลิเอทิลีนที่เกิดขึ้น

### การใช้งาน LLDPE ในปัจจุบัน

- แผ่นฟิล์มและชีท (Film and sheet) ในการบรรจุหีบห่อฟิล์มและชีทจะต่างกันตรงความหนา โดยสามารถใช้ทั้งในลักษณะฟิล์มเดี่ยวๆ และฟิล์มหนาหลายชั้น
- ผลิตภัณฑ์แบบเป่า (Blow molding) เช่น ขวดบีบ วัสดุภายในดรัม (Drum liner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

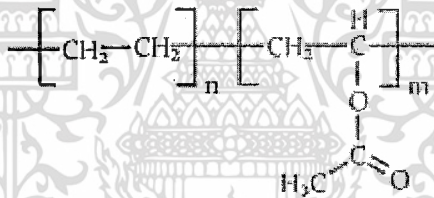
- ผลิตภัณฑ์ฉีดแบบ (Injection molding) เช่น ฝาขวด ตะกร้า ภาชนะบรรจุที่ใช้ในตู้เย็น และเครื่องใช้ในบ้านและในครัวเรือน

## 2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ [19]

### 2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene Vinyl Acetate Copolymer, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอลิฟินส์ เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตต (Vinyl Acetate, VA) มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซิเตตเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก พบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

EVA เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตต โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulphates โครงสร้างของ EVA แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของ EVA [19]

### 2.4.2 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.95
- สามารถละลายได้ในสารอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ ณ อุณหภูมิต่ำกว่า  $-70^{\circ}\text{C}$  จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง  $60-80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า  $T_g$  ตั้งแต่  $-20^{\circ}\text{C}$  (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง  $20^{\circ}\text{C}$
- มีค่า Dielectric strength เท่ากับ 21 kV/mm
- มีค่า Dielectric constant ณ 1 MHz เท่ากับ 2.8
- สมบัติทางฟิสิกส์ มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- |  |                      |
|--|----------------------|
| ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D           | เท่ากับ 90-95        |
| ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)       | เท่ากับ 2.9-19.6 MPa |
| ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at break) | เท่ากับ 500-700%     |
- มีความโค้งงอดีที่อุณหภูมิสูง
  - มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
  - ทนต่อสภาพการใช้งาน การซักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
  - สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
  - ขึ้นรูปได้ง่าย
  - มีความยืดหยุ่น และ โค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

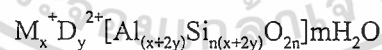
#### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์ เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ ใช้ในงานการผลิตรองเท้า และเบาะรองนั่ง ปริมาณ ไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส และมีความมันวาว

#### 2.5 ซีโอไลต์เอ [20-24]

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามมิติและมีลักษณะเป็นทรงแปดหน้าที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรเคมีของซีโอไลต์เป็นดังนี้



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

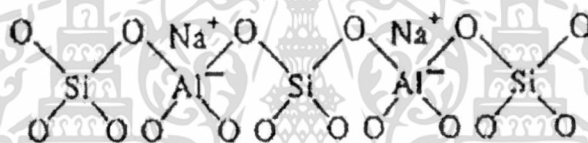
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากคือ ประมาณ 600-,1000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

### 2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

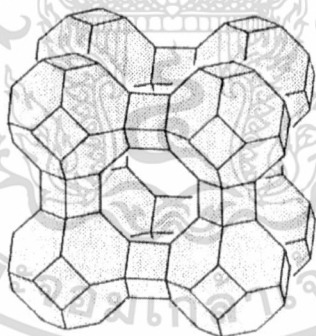
ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$  โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2 อังสตรอม

### 2.5.2 การสังเคราะห์

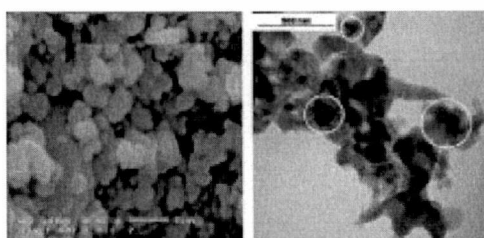
ซีโอไลต์เอ มีวิธีการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายกับซีโอไลต์อื่นๆ ทั่วไปโดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมิเนต) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจลซึ่งสารละลายเหล่านั้น ได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70-300°C จะได้ผลึกของซีโอไลต์ที่อยู่ในรูปแบบของโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ )



ภาพที่ 2.6 Frame work ของซีโอไลต์เอ [21]



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [22]



ภาพที่ 2.8 ภาพขยายของซีโอไลต์เอ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ [20]

#### 2.5.3.1 สารดูดน้ำ (Desiccants)

เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จึงสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดี

#### 2.5.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchangers)

เนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วทำให้ดูดซับน้ำได้ น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกละลายในโครงสร้างซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลาดังสมการ



ไฮโดรเนียมไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

#### 2.5.3.3 สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves)

เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างความขั้วของซีโอไลต์ และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอไลต์ที่มีขั้วสูง (มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) ซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

### 2.5.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน [24]

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบซูเปอร์cej (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-specific catalysis) พื้นที่ภายในของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมาก ในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสารและแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงและมีขนาดของรูพรุนมากกว่าโมเลกุล

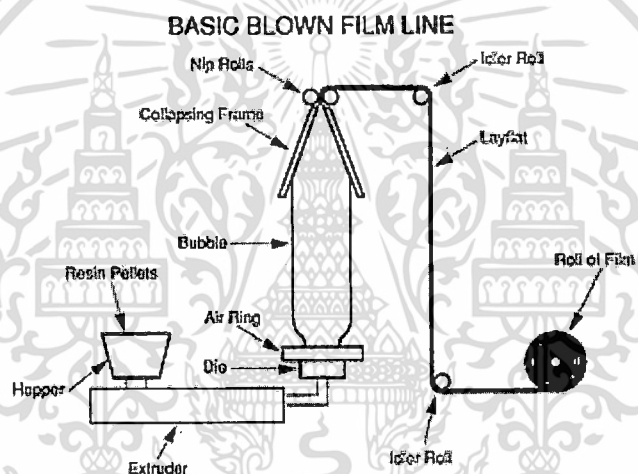
## 2.6 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า [25]

การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขั้ว (Extruder) พร้อมกับมีการให้ความร้อนเพื่อทำการหลอม พลาสติกหลอมเหลวถูกขับออกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านหัวดาย (Die head) รูปวงแหวน พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวดายจะถูกเป่าให้เป็นท่อกลวงโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของฟิล์มติดกันและลดแรงตึงภายในเนื้อฟิล์ม ท่อพอลิเมอร์จะถูกดึงให้เกิดการยืดตัวตามแนวยาวและมีการเป่าให้เกิดการขยายตัวออกในแนวขวาง และถูกม้วนเก็บเพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือทำเป็นถุงต่อไป

ความหนาของฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนเป่า (Blow-up ratio), อัตราส่วนการดึงลง (Draw-down ratio), ผลผลิตจากเครื่องอัดรีด, ความเร็วสกรู, อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและดาย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้ต้องมีการปรับให้เหมาะสม

การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าเหมาะสมในการขึ้นรูปถุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นท่อที่ไม่มีตะเข็บข้าง และสมบัติเชิงกลต่างๆมีความสม่ำเสมอทั้งในทิศทางตามแนวและขวางแนวเครื่องจักร แต่ข้อเสียคือฟิล์มที่ได้จะมีความหนาที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีความใสน้อยกว่าวิธีขึ้นรูปแบบหล่อ (Cast extrusion)



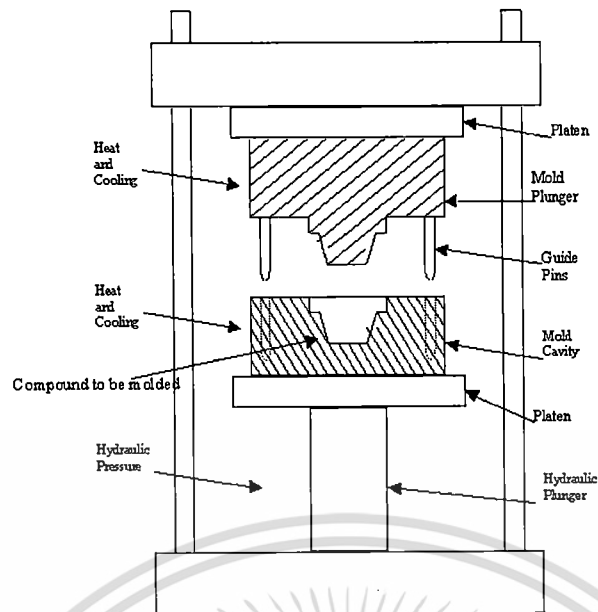
ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [25]

## 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด [26]

เทคนิคการอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์ที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง แต่ก็ยังมีการใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันก็ยังมีมีการใช้เทคนิคการอัดพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตและยาง นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้กับเทอร์โมพลาสติกที่แปรรูปด้วยเทคนิคอื่นได้ยาก

ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ทำให้สามารถทำการปิดเปิดเบ้าได้ เนื่องจากเบ้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้ง 2 แผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องแสดงดังภาพที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด [26]

วิธีการขึ้นรูปทำได้โดยนำวัสดุผสมเข้าไปในเบ้า และให้ความร้อนขณะทำการอัด จากนั้นใช้ระบบหล่อเย็นโดยใช้น้ำไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของเบ้า ความดันที่ใช้ในการอัดเบ้าต้องใช้ให้น้อยที่สุด แต่มากพอที่ทำให้พลาสติกไหลเต็มช่องว่างของเบ้า แต่ไม่สูงจนทำให้พลาสติกรั่วไหลออกจากรอยแยกเบ้า ระดับความดันที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chytiri S. และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรังสีแกมมาที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ LDPE หลายชั้น ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง คือ ฟิล์ม 100% virgin LDPE, ฟิล์ม 50% virgin ผสมกับ 50% Recycled LDPE และฟิล์ม 100% Recycled LDPE จากนั้นนำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างไปทำการฉายรังสีแกมมา 240 kCi ( $^{60}\text{Co}$ ) ในปริมาณต่างกันคือ 5, 10, 30 และ 60 kGy พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Recycled LDPE ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์หลายชั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ส่วนอิทธิพลของการฉายรังสีพบว่า ฟิล์มที่มีการฉายรังสีสูงสุด ซึ่งก็คือ 60 kGy จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลเล็กน้อย ในขณะที่ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน และสมบัติการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ ซึ่งการศึกษานี้เป็นประโยชน์ต่อการนำเศษเหลือของ LDPE ไปรีไซเคิลใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compan V. และคณะ [28] ทำการศึกษาอิทธิพลของการแอนนิลที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์, ออกซิเจน และไนโตรเจนในฟิล์ม LLDPE พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านก๊าซของฟิล์มที่ผ่านการแอนนิลมีค่ามากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านการแอนนิลถึง 4 เท่า ซึ่งในความเป็นจริงฟิล์มที่ผ่านการแอนนิลจะต้องมีค่าการซึมผ่านก๊าซลดลงเล็กน้อย แต่เนื่องจากการแอนนิลจะทำให้มีค่าการละลาย (Solubility) เพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติการซึมผ่านของแก๊สในฟิล์ม LLDPE มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

Mousavi S. A. และคณะ [29] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเตรียมที่มีต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติการซึมผ่านก๊าซ (Gas permeation properties) ของฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE film) และฟิล์มเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA film) พบว่าในฟิล์ม PE นั้นความหนาจะมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม โดยเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มจะมีค่าลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ในฟิล์ม PE พบว่าก๊าซ CO<sub>2</sub> มีความสามารถในการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ O<sub>2</sub> เนื่องจากก๊าซ CO<sub>2</sub> มีขนาดที่เล็กกว่าและมีความหนาแน่นของโมเลกุลที่สูงกว่า จึงส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซที่มากกว่า ในทางเดียวกัน ก๊าซ CO<sub>2</sub> สามารถซึมผ่านฟิล์ม EVA ได้ดีกว่าก๊าซ O<sub>2</sub> แต่ต่างกันที่ฟิล์ม EVA มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงกว่าฟิล์ม PE มากเนื่องจากการมีหมู่อะซิเตต (VA group) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วจึงเกิดการดูดซับและส่งผ่านก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซจากวิธีการเตรียมฟิล์ม พบว่าฟิล์ม EVA ที่เตรียมโดยใช้เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) เป็นตัวทำละลายจะให้ฟิล์มที่มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซสูงกว่าฟิล์ม EVA ที่เตรียมโดยใช้คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจาก THF มีปริมาตรโมลาร์ (Molar volume) สูงกว่า ซึ่งเป็นตัวควบคุมความหนาแน่น เกิดการรวมตัวของช่องว่างทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมาก ส่งผลทำให้ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มเพิ่มขึ้น

Kim J. H. และคณะ [30] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของ Poly (amide-6-b-ethylene) copolymer พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการซึมผ่านและความสามารถในการเลือกผ่านที่ดีมาก โดยจะยอมให้โมเลกุลของก๊าซที่มีขั้ว เช่น SO<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ผ่าน ส่วนโมเลกุลของก๊าซที่ไม่มีขั้ว เช่น O<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงเมื่อขนาดของโมเลกุลมีขนาดเพิ่มขึ้น ความสามารถทั้งด้านการซึมผ่านและการเลือกผ่านของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นี้ เกิดจากการก่อตัวของภูมิภาคพอลิเอทิลีนซึ่งช่วยในการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ โดยภูมิภาคของพอลิเอทิลีนที่เกิดขึ้นจะมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบของบล็อกโคพอลิเมอร์กับพอลิเอไมด์

Poon B. C. และคณะ [31] ที่ทำงานศึกษาเกี่ยวกับการยึดเกาะของฟิล์ม PE กับฟิล์ม PP โดยอาศัยวิธีการรีดร่วม พบว่าการยึดเกาะที่ดีจะเกิดกับฟิล์ม PE ประเภทที่ใช้ Metallocene catalyst เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

copolymer (MPE) ที่มีความหนาแน่น  $0.9 \text{ g/cm}^3$  หรือต่ำกว่าเป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูป โดยการยึดเกาะที่คี่นี้เกิดจากมีการเชื่อมกันของวัฏภาค PP กับปลายสายโซ่ของ PE ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน ในทางตรงกันข้าม การใช้พอลิเอทิลีนประเภท Ziegler-Natta catalyst copolymer (ZNPE) ที่มีความหนาแน่น  $0.925 \text{ g/cm}^3$  เป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปนั้น จะแสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีของฟิล์ม PE กับฟิล์ม PP เนื่องจากเกิดการแยกชั้นของ PE สายโซ่สั้นเกิดเป็นวัฏภาคอสัณฐานอยู่ระหว่างชั้นผลึกของวัฏภาค PE กับวัฏภาค PP การใช้ MPE และ ZNPE ผสมกันสามารถแก้ปัญหาการแยกวัฏภาคของวัฏภาค PE กับวัฏภาค PP ได้

Faker M. และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหล สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (PE/EVA blends) กับพฤติกรรมทางความร้อน จากการศึกษาการไหลของ PE และ EVA ที่มีอันตรกิริยาบริเวณผิวสัมผัส พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูงจะมีอันตรกิริยาสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EVA สูง ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม มีความหนืดและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองใช้เครื่อง Rheometric mechanical spectrometer (RMS) วัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PE/EVA ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสมของ PE/EVA เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน EVA ขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบริเวณ EVA เพิ่มขึ้นด้วย การกระจายขององค์ประกอบในสัณฐานวิทยาสังเกตได้จากพอลิเมอร์ผสมที่มี EVA จะมีการกระจายของขนาดอนุภาคมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PE สูง และเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนพอลิเมอร์ผสม พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature,  $T_m$ ) ของ PE จะลดลง เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือการเกิดผลึกร่วมของ PE กับ EVA การเกิดผลึกร่วมสูงขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 90/10 ทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นและการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เพราะการเกิดผลึกร่วมทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างวัฏภาคเพิ่มขึ้น และความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่จะลดลง

Marais S. และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน โค ไวนิลอะซิเตต (Poly (Ethylene-Co-Vinyl Acetate), EVA) ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตตต่างกัน โดยใช้วิธีการหล่อแบบสารละลาย (Casting solution) ในการเตรียมฟิล์ม พบว่าเมื่อปริมาณไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate, VA) มากขึ้น การดูดซึมน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น นำไปสู่ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ดีขึ้น เนื่องจากมีหมู่ Carbonyl group ที่มีขั้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการผสม PVC ลงในพอลิเอทิลีนโคไวนิลอะซิเตตด้วย เพื่อศึกษาสมบัติในด้านเดียวกันของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับปริมาณไวนิลอะซิเตต ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ที่มีขั้วจะเข้าไปสร้างพันธะกับพอลิไวนิลคลอไรด์ สำหรับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิด พบว่าการเพิ่มขึ้นของไวนิลอะซิเตตเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการซึมผ่านของก๊าซ กล่าวคือ เมื่อปริมาณไวโนลอะซิเตตเพิ่มขึ้น ความสำเร็จเป็นผลึกของแผ่นฟิล์มลดลง ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีโอกาที่จะเกิดพันธะระหว่างหมู่ที่มีขั้วสูงขึ้น

Sadeeghi M. และคณะ [34] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  และ  $CO_2$  ผ่านฟิล์มเอทิลีนไวโนลอะซิเตต/ซิลิกา นาโนคอมโพสิต (Ethylene vinyl acetate-silica (EVA/Si) nanocomposite membrane) โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซิลิกาในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ EVA ที่มี Si 5%, 6% และ 10% เป็นองค์ประกอบ ตามลำดับ ซึ่งทำการเตรียมฟิล์ม EVA โดยวิธีหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) และสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาผ่านกระบวนการ Sol-gel จากการศึกษาพบว่าเมื่อฟิล์ม EVA/Si นาโนคอมโพสิตมีส่วนของอนุภาคนาโนซิลิกามากจะ ทำให้ความสามารถการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  และ  $CO_2$  ผ่านฟิล์มได้ดีขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเป็นอสัณฐานมากขึ้น ความเป็นผลึกลดลง จึงมีช่องว่างให้ก๊าซผ่านฟิล์มได้มากขึ้น

Gholizadeh M. และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) ของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอน ไดออกไซด์, สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity) และการละลาย (Solubility) ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม EVA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดัน และความหนา พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น จะทำให้ Permeability และ Solubility ลดลง แต่ Diffusivity เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ Permeability เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้ Permeability และ Diffusion เพิ่มขึ้นชัดเจนในก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ  $O_2$  และ  $CO_2$  ในฟิล์ม EVA พบว่าการเพิ่มปริมาณหมู่ไวโนลอะซิเตต (VA) ลงไป 28%wt จะเพิ่ม Permeability ของก๊าซ  $O_2$  และ  $CO_2$  เนื่องจากความเป็นขั้วของก๊าซ  $CO_2$  จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง  $CO_2$  กับ VA



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene, LLDPE) เกรดเป่าฟิล์ม PE 1220G1 จากบริษัท ดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรดเป่าฟิล์ม LD1905FA จากบริษัทเอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด
3. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เกรด UL 00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical จำกัด
4. ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
5. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>)
6. ไซลีน (Xylene) จากบริษัท แล็บซิสเต็ม จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE

สมบัติ	PE 1220G1	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	2.00	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm <sup>3</sup>
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	MD:10.1*, TD:10.3*	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	MD:570*, TD:660*	%

\*ฟิล์มหนา 20 ไมครอน MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร TD: ทดสอบตามขวางเครื่องจักร

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ LDPE

สมบัติ	LD1905FA	หน่วย
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C/2.16 kg)	5.00	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm <sup>3</sup>
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	TD:10.0*	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	MD:400*, TD:700*	%

\*ฟิล์มหนา 38 ไมครอน MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร TD: ทดสอบตามขวางเครื่องจักร

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ EVA

สมบัติ	UL 00728CC	หน่วย
ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate)	27.5	wt%
ดรรรชนีการไหล (Melt flow rate)	7	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.952	g/cm <sup>3</sup>

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Zeolite A

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

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200; Intro Engineering)
2. เครื่องทดสอบหาดรรรชนีการหลอมไหล (Melt flow indexer, รุ่น 6841; Ceast)
3. เครื่องเป่าฟิล์มพลาสติก (Film blowing tower, รุ่น LF-400; Labtech Engineering Co.,Ltd.) ที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder, รุ่น Polydrive with rheomex R252)
4. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding, รุ่น LP 20; Labtech Engineering Co.,Ltd.)
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น Bosco A600; Bosco Engineering)
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM. รุ่น LR 5K; LLOYD Instrument)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM. รุ่น JSM-5410LV; JEOL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR. รุ่น FTIR Spectrum Gx; Perkin Elmer)

9. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® ASC)

10. เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus)

11. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Permeation Tester; Lyssy L80-4000J)

12. เครื่องปั๊มลม (รุ่น BEBICON 400; Hitachi Co.,Ltd.)

13. คีม

14. ตู้อบความร้อน

15. เครื่องชั่งละเอียด

16. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนีย

17. กระบอกใส่ไนโตรเจนเหลว

18. กระจกนาฬิกา

19. ขวดรูปชมพู่

20. เคชเคเตอร์

21. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

- การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร โดยให้อัตราส่วนของ PE:EVA เท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก โดยในส่วนของ PE จะทำการผสมระหว่าง LLDPE และ LDPE ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.5
- การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีซีโอโลต์ผสมอยู่ในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักของสูตรผสม

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมด

สูตร	สูตรผสม			น้ำหนักของสารใน 1 กิโลกรัม (กรัม)			
	LL:LD (PE 80% โดย น้ำหนักพอลิเมอร์)	EVA 20% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์	Zeolite A (% โดยน้ำหนัก สูตรผสม)	LLDPE	LDPE	EVA	Master batch
LL100	100:0		-	80	-	20	-
LL95L5	95:5		-	76	4	20	-
LL90L10	90:10		-	72	8	20	-
LL85L15	85:15		-	68	12	20	-
LL80L20	80:20		-	64	16	20	-
LL100Z10	100:0		10	72	-	8.8	19.2
LL80L20Z10	80:20		10	57.6	14.4	8.8	19.2

หมายเหตุ Master batch คือ สูตรเข้มข้นของ EVA และซีโอไลต์เอ ที่อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก (วิธีการเตรียมอยู่ในหัวข้อ 3.3.1.1.2) จากงานวิจัยนี้ Master batch มีซีโอไลต์เอเท่ากับ 52% โดยน้ำหนัก

### 3.3.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

#### 3.3.1.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/LDPE/EVA

ซึ่งส่วนผสม LLDPE, LDPE และ EVA ให้ได้ตามสัดส่วนตามตารางที่ 3.5 เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสถานะของเครื่องดังนี้

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

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดและผสมผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้งโดยใช้สถานะเดิม และทำการตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการเป่าฟิล์มต่อไป

### 3.3.1.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร LLDPE/LDPE/EVA/Zelite A

- การเตรียมสูตรเข้มข้นของ EVA และซีโอไลต์เอ

เตรียมโดยนำซีโอไลต์เอไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชม. แล้วนำมาผสมกับ EVA ที่อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก ทำการเขย่าทั้งสองเพื่อให้เข้ากัน จากนั้นนำมาเทลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone  $130^{\circ}\text{C}$
- Metering zone  $140^{\circ}\text{C}$
- Compression zone  $150^{\circ}\text{C}$
- Die zone  $160^{\circ}\text{C}$
- Screw speed 10 rpm

- การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

ซึ่งส่วนผสม LLDPE และ LDPE กับสูตรเข้มข้น (Master batches) ให้ได้สัดส่วนตามตารางที่ 3.5 ลงในภาชนะฝาปิด เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นเทลงใน Hopper ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- Feed zone  $160^{\circ}\text{C}$
- Metering zone  $170^{\circ}\text{C}$
- Compression zone  $180^{\circ}\text{C}$
- Die zone  $190^{\circ}\text{C}$
- Screw speed 10 rpm

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดและผสมผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่อีกครั้ง โดยใช้สภาวะเดิม และทำการตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูป

### 3.3.2 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์สูตรผสม

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆมาหาค่าครรชนิกการไหลด้วยเครื่องทดสอบหาครรชนิกการไหลอมไหล (Melt flow indexer) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 [36] โดยใช้สภาวะ ดังนี้

- อุณหภูมิ  $190^{\circ}\text{C}$
- Load 2.16, 5.00 และ 10.00 kg

### 3.3.3 การเตรียมฟิล์ม

#### 3.3.3.1 การเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่า

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นไปที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film) โดยตั้งสภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว ที่ต่อกับเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่ใช้ตายประเภทวงแหวน (Annular die) ดังนี้

สภาวะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เพื่อควบคุมความหนา 30-40 ไมครอน

- อุณหภูมิ	
Feed zone	190°C
Compression zone	200°C
Metering zone	200°C
- Screw speed	10 rpm
สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม	
- Blowing zone	200°C
- Upper zone	200°C
- Lower zone	200°C
- ขนาดปั๊มลมที่ใช้	5 bar
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1	1.0-1.6 rpm
- ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2	1.0-1.6 rpm
-	

#### 3.3.3.2 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการกดอัด

ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มสูตรที่มีซีโอโลดส์เอ จะใช้วิธีการกดอัด เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าเหมือนงานวิจัยของนันทวรรณ ม่วงมี [3] ได้

สภาวะของเครื่องกดอัด ดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด	200°C
- ความดันในการกดอัด	1800 psi
- เวลาในการกดอัด	5 min
- อุณหภูมิในการเย็นตัว	15°C
- เวลาในการเย็นตัว	5 min

### 3.3.4 ความกว้าง และ/หรือความหนาของฟิล์ม

วัดความกว้างของท่อฟิล์มแบนราบที่ผลิตด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูปด้วยไม้บรรทัด โดยทำการวัดตลอดแนวหน้ากว้างประมาณ 10 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย วัดความหนาของฟิล์มทุกชนิดที่ผลิตโดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอโลต์ในฟิล์ม

ทำการหาปริมาณซีโอโลต์ที่มีอยู่ในฟิล์ม โดยใช้เครื่อง TGA ซึ่งกำหนดสภาวะที่ทดสอบ ดังนี้

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

นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณซีโอโลต์ได้ตามมาตรฐาน ASTM E1131[37]

### 3.3.6 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึกและปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งน้ำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 140°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของกรหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [38]

การคำนวณหา Heat of fusion ( $\Delta H_f$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของ  $T_m$

$\Delta H_f^\circ$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 293 J/g [15]

### 3.3.7 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มสูตรผสม

นำแผ่นฟิล์มเรียบที่ได้ มาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในช่วงเลขคลื่น  $600\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4,000\text{ cm}^{-1}$  ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR)

### 3.3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยา

#### 3.3.8.1 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอ

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด  $1 \times 3\text{ cm}^2$  แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง SEM

#### 3.3.8.2 การกระจายตัวของ EVA

นำแผ่นฟิล์มมาทำการหักชิ้นงานเหมือนหัวข้อ 3.3.8.1 แล้วนำไปแช่ตัวทำละลายไซลีนที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชม. เพื่อสกัดเอา EVA ออกจากชิ้นงาน จากนั้นนำมาอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EVA ด้วยเครื่อง SEM

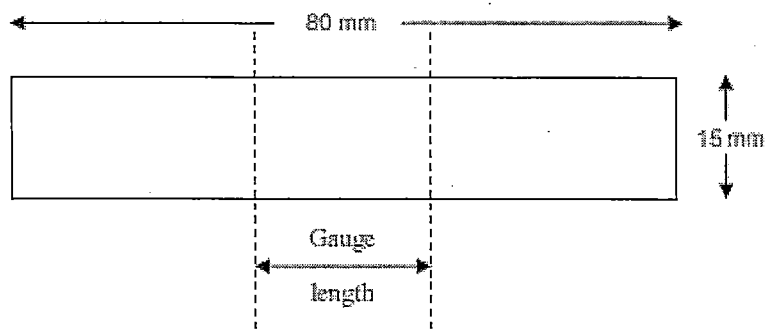
### 3.3.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบความแข็งแรงดึง ซึ่งสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [39] โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแบบประตัก ในกรณีที่เป็นฟิล์มเป่าจะทำการตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) ให้มีขนาด  $15 \times 80\text{ mm}^2$  ส่วนในกรณีที่เป็นฟิล์มอัดขึ้นรูป ทำการทดลอง 1 จุด เนื่องจากสมบัติที่ได้เป็น Isotropic

ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

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





ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} &= \frac{F}{A} \\ \text{มอดุลัส (Modulus)} &= \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \\ \text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (\%Elongation at yield)} &= \left[ \frac{l-l_0}{l_0} \right] \times 100 \end{aligned}$$

เมื่อ

- $F$  = แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดคราก
- $A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )
- $l$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
- $l_0$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่ามอดุลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 2 และ 3 % การดึงยืด)

### 3.3.10 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนด และภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น  $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$  ที่อุณหภูมิ  $38^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่อง Lyssy water permeability ตัดชิ้นงานให้มีขนาด  $11 \times 11 \text{ cm}^2$  เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 15106-1: 2003 (E) Plastic-film and Sheeting-determination of Water vapor transmission rate-part 1: Humidity detection sensor method ตามมาตรฐาน ISO 15106-1: 2003 (E) [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE/LDPE/EVA และมีการเติมซีโอไลต์ เอ 10% โดยน้ำหนัก นำเสนอโดยใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆดังตารางที่ 4.1 โดยให้อัตราส่วนของ PE:EVA เท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก โดยในส่วนของ PE จะทำการผสมระหว่าง LLDPE และ LDPE

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรและสูตรผสมทั้งหมด

อักษรย่อ แทนสูตร	สูตรผสม		กระบวนการขึ้นรูป
	LLPE:LDPE (PE 80% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์)	Zeolite A (% โดยน้ำหนักสูตรผสม)	
LL100	100:0	-	เป่า
LL95L5	95:5	-	เป่า
LL90L10	90:10	-	เป่า
LL85L15	85:15	-	เป่า
LL80L20	80:20	-	เป่า
LL100-C	100:0	-	กดอัด
LL80L20-C	80:20	-	กดอัด
LL100Z10-C	100:0	10	กดอัด
LL80L20Z10-C	80:20	10	กดอัด
COM	N/A (เกรดการค้า)		เป่า

#### 4.1 ผลจากการศึกษาฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA

##### 4.1.1 ค่าดัชนีการไหลของสูตรผสม

จากการศึกษาสมบัติการไหลโดยการวัดค่าดัชนีการไหล พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักก่ดทับ ค่าดัชนีการไหลจะสูงขึ้น เนื่องจากมีความเค้น (Stress) มากขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง นอกจากนี้ ค่าดัชนีการไหลจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE ลงไป เนื่องจาก LLDPE มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 2 g/10min แต่ LDPE มีค่าเท่ากับ 5 g/10min ดังนั้นเมื่อนำ LDPE มาเพิ่มใน LLDPE จึงทำให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ซึ่งจะช่วยให้การผสมทำได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการไหลของแต่ละสูตรผสม

สูตร	ค่าดัชนีการไหลที่น้ำหนักกด (g/10min)		
	2.16 kg	5.00 kg	10.00 kg
LL100	2.1±0.04	7.1±0.09	20.7±0.82
LL95L5	2.2±0.04	7.2±0.18	20.7±0.92
LL90L10	2.4±0.04	7.7±0.26	23.0±1.74
LL85L15	2.4±0.03	7.8±0.13	22.8±0.40
LL80L20	2.6±0.17	8.6±0.20	23.1±0.81

อย่างไรก็ตามในการทดสอบ เมื่อใช้น้ำหนักกดที่ตบสูง (ที่น้ำหนักกดที่ 10 kg) จะควบคุมกระบวนการทดสอบได้ยาก เนื่องจากชิ้นงานไหลออกมาเร็ว ทำให้ค่าดัชนีการไหลมีค่าเบี่ยงเบนมากกว่าน้ำหนักกดที่ต่ำ

#### 4.1.2 ความหนาและความกว้างของฟิล์มตัวอย่าง

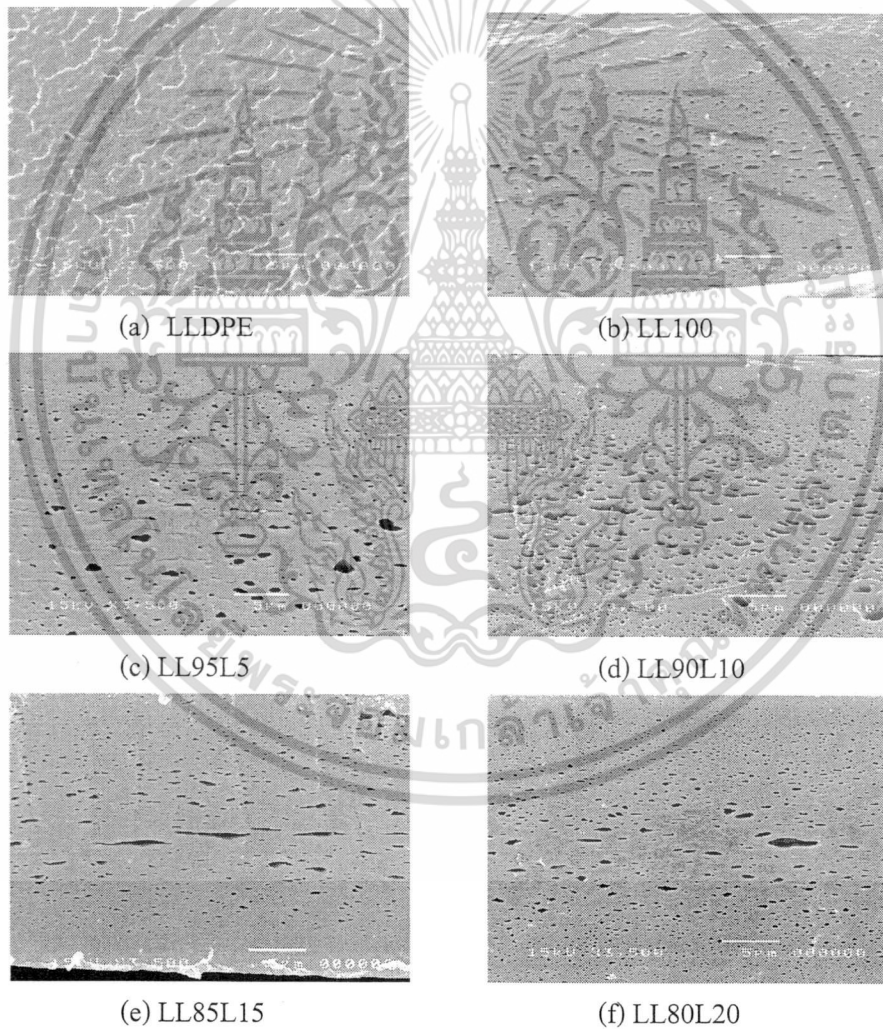
จากการวัดความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้จากกระบวนการเป่า พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 29-35 ไมครอน ส่วนความกว้างของฟิล์ม พบว่าความกว้างเฉลี่ยอยู่ในช่วง 65-74 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.3 ความหนาและความกว้างของฟิล์ม

สูตร	สูตรผสม		ความหนาเฉลี่ย (µm)	ความกว้างเฉลี่ย (mm)
	LLDPE:LDPE (PE 80% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์)	EVA (% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์)		
LL100	100:0	20	29.67±3.16	73.6±2.6
LL95L5	95:5	20	31.74±3.23	65.8±3.4
LL90L10	90:10	20	30.84±2.59	66.4±1.7
LL85L15	85:15	20	33.80±2.24	71.9±1.4
LL80L20	80:20	20	34.88±3.14	65.8±2.9

#### 4.1.3 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ในฟิล์มตัวอย่าง

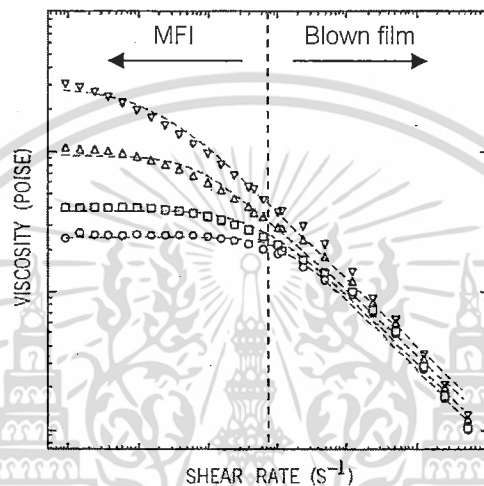
การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE/LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่ง EVA มีปริมาณคงที่อยู่ที่ 20% โดยน้ำหนักของทุกสูตรผสม โดยช่องว่างที่แสดงในภาพที่ 4.1 คือบริเวณที่เคยมีวัฏภาคของ EVA อยู่ ซึ่งมีการกระจายตัวของ EVA ดี และจากการวิเคราะห์พื้นผิวที่แตกหักพบว่าบริเวณด้านบนและล่างของฟิล์มจะมีขนาดของช่องว่างเล็กกว่าส่วนกลางของฟิล์ม เนื่องจากผิวทั้งสองด้านจะสัมผัสกับอากาศและลมก่อนในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ทำให้ที่ผิวฟิล์มมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าส่วนกลางของฟิล์ม เมื่อเครื่องจักรดึงฟิล์มไปเรื่อยๆ บริเวณกลางฟิล์มจะยังสามารถเคลื่อนที่ตามแรงดึงได้ จึงเกิดการรวมตัวกันของวัฏภาค EVA ส่วนกลางของฟิล์มจึงมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณอื่น [41]



ภาพที่ 4.1 ภาพ SEM ของฟิล์ม LLDPE และฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA แสดงการกระจายตัวของ EVA จากพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 3500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณ LDPE ลงใน LLDPE ทำให้ความหนืดลดลง (จากผล MFI) ทำให้การผสมโดยใช้ Twin screw extruder ทำได้ง่ายขึ้นและสามารถเก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมมาเป่าขึ้นรูปผ่านกระบวนการ Blown film extrusion พบว่ามีการกระจายตัวของ EVA เท่าๆกัน เนื่องมาจากกระบวนการ Blown film จะมี Shear rate และ Stress สูงกว่าการทดสอบค่าดัชนีการไหล ซึ่งพฤติกรรมโดยส่วนใหญ่ของพอลิเอทิลีนขณะหลอมเหลวแสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 พฤติกรรมการไหลของพอลิเอทิลีนขณะหลอมเหลวที่มีองค์ประกอบต่างกัน [42]

จากภาพที่ 4.2 พฤติกรรมการไหลที่ Shear rate ต่ำ ความหนืดแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อ Shear rate สูง สายโซ่พอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำอย่างรวดเร็ว เกิดการคลายสายโซ่ (Disentanglement) เนื่องจากแรงกระทำ จึงสามารถไหลตามแนวแรงได้ดี ความหนืดจึงลดลง และเห็นความแตกต่างของค่าความหนืดน้อยลงที่ Shear rate สูง

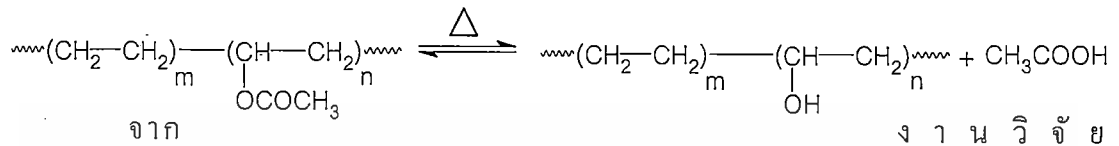
กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blown film extrusion) จะอยู่ในช่วงที่มี Shear rate ค่อนข้างสูง เนื่องจากใช้ Single-screw extruder ส่งผลให้ความหนืดมีความแตกต่างกันน้อยมาก การกระจายตัวของ EVA จึงไม่แตกต่างกัน ต่างจากผลการทดลองของค่าดัชนีการไหล ซึ่งเป็นการวัดสมบัติการไหลในช่วง Shear rate ต่ำ

#### 4.1.4 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มตัวอย่าง

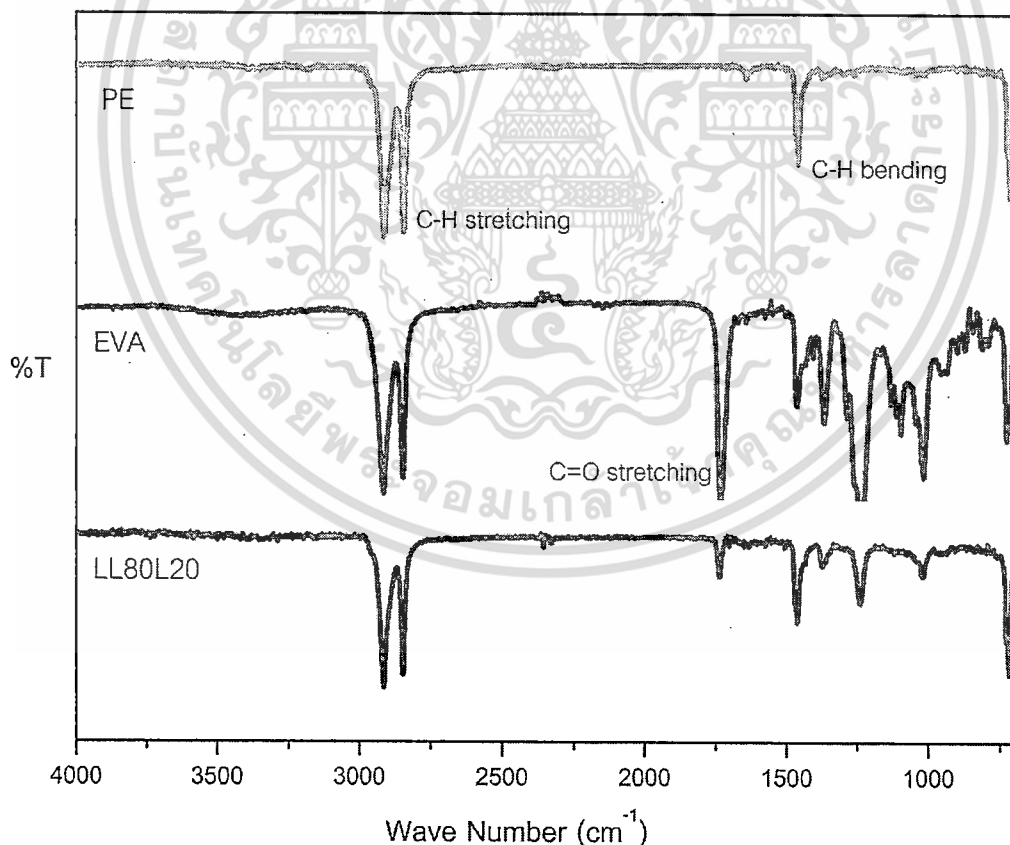
จากการศึกษาผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสเปกตรัมที่ได้แสดงสัญญาณหมู่ C-H Stretching ของ  $\text{CH}_3$  ในช่วง  $3000\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-H Bending ของ  $\text{CH}_2$  ในช่วง  $1480\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ LLDPE, LDPE และ EVA นอกจากนี้ยังแสดงสัญญาณหมู่ C=O Stretching ของเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาเป่าขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอกซิเลต (-COOR) ในช่วง  $1820-1670\text{ cm}^{-1}$  [43] ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVA โดยขนาดของพีคจะไม่สูงเท่า EVA 100% เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์สูตรผสมที่มีปริมาณ EVA อยู่ 20% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ ดังภาพที่ 4.3

การเสถียรภาพของ EVA เนื่องจากอุณหภูมิการผสมและการขึ้นรูป จะทำให้เกิดสัญญาณของหมู่ -OH ในช่วง  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  [43] เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดังสมการ



นันทวรรณ ม่วงมี [3] ใช้อุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม LDPE/EVA ที่  $170^\circ\text{C}$  แล้วไม่พบการเสถียรภาพของฟิล์ม เพราะไม่พบสัญญาณของหมู่ -OH ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่  $200^\circ\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดการเสถียรภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบฟิล์ม LL80L20 ไม่พบสัญญาณของหมู่ -OH เกิดขึ้น แสดงว่าโครงสร้างของ EVA มีเสถียรภาพดี ไม่เกิดการเสถียรภาพจากกระบวนการเตรียมและการขึ้นรูป



ภาพที่ 4.3 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์ทางความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกของ PE ในทุกๆสูตรใกล้เคียงกัน

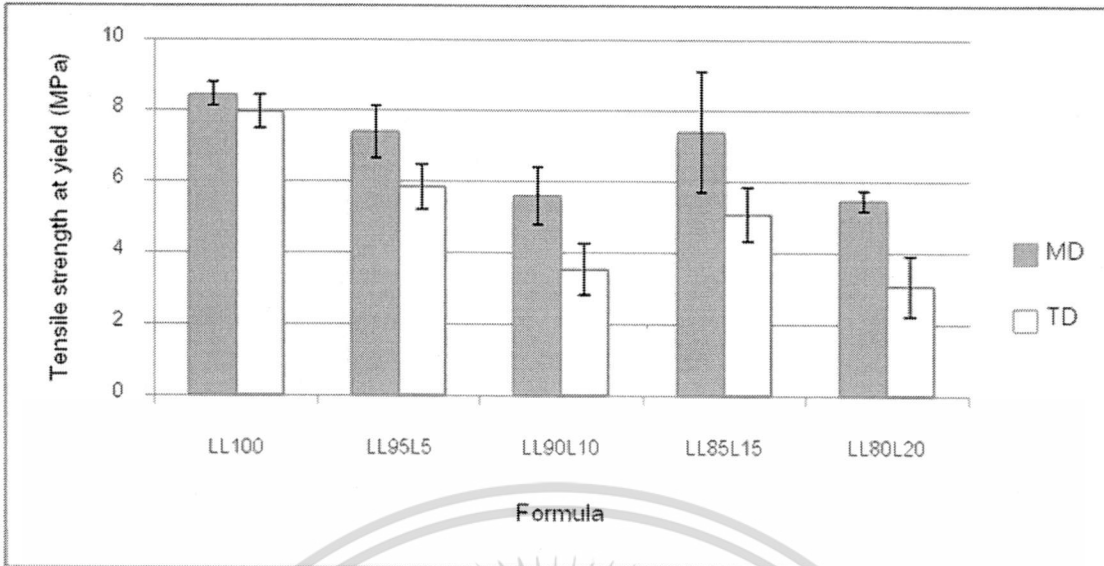
ตารางที่ 4.4  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนในฟิล์มสูตรต่างๆ

สูตร	$T_m$ ของ PE (°C)	$T_c$ ของ PE (°C)	% Crystallinity ของ PE
LL100	114.9	104.5	12.8%
LL95L5	117.9	104.6	14.0%
LL90L10	114.9	103.3	14.0%
LL85L15	114.0	104.3	14.0%
LL80L20	114.8	104.2	12.8%

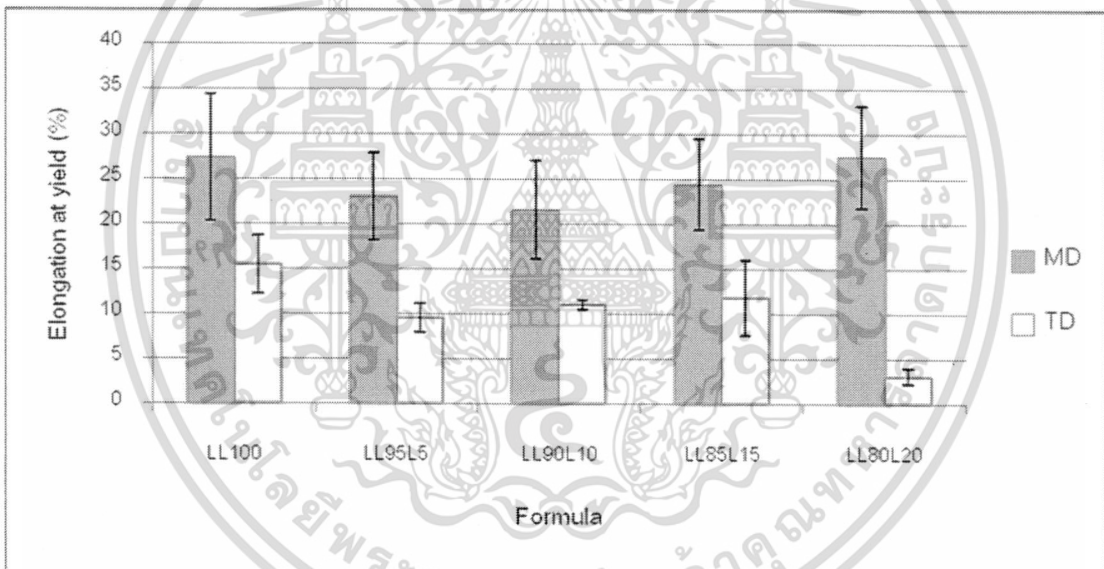
#### 4.1.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction, MD) มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield), การดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) และมอดุลัส (Modulus) มากกว่าฟิล์มในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) เนื่องจากการผลิตฟิล์มด้วยเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) ในงานวิจัยนี้มีการจัดเรียงตัวที่เกิดจากการดึงในขั้นตอนม้วนเก็บมากกว่าการเป่าขยายด้านข้าง

ในทางทฤษฎีความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, การดึงยืด ณ จุดคราก และมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/LDPE/EVA สูตรต่างๆ ควรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากทุกสูตรมีปริมาณ EVA เท่ากัน และสมบัติเริ่มต้นของ LDPE มีค่าใกล้เคียง LLDPE ตัวอย่างเช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของ LLDPE มีค่าเท่ากับ 10.3 MPa (ข้อมูลจากผู้ผลิต) ในขณะที่ LDPE มีค่าเท่ากับ 10.0 MPa (ข้อมูลจากผู้ผลิต) แต่จากผลการทดลองพบว่า มีบางสูตรผสมที่มีค่าต่ำกว่าปกติ คาดว่าน่าจะเกิดจากผลการมีรอยตำหนิในฟิล์ม ซึ่งสามารถสังเกตเห็นจุดตาปลา (Fish eye) เป็นจุดที่เกิดจากการที่พอลิเมอร์หลอมไม่สมบูรณ์



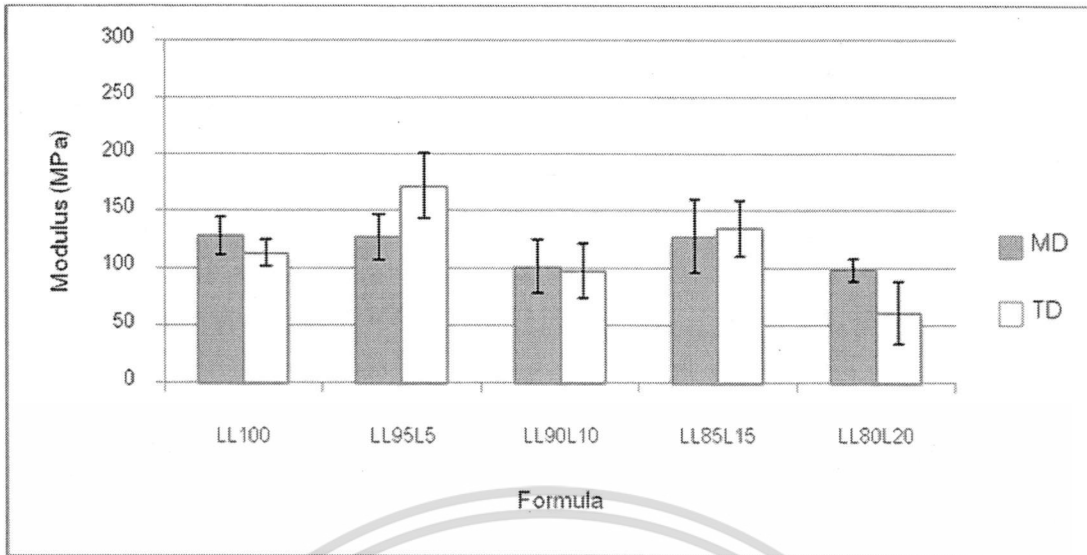
(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



(b) การดัดยืดยืด ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



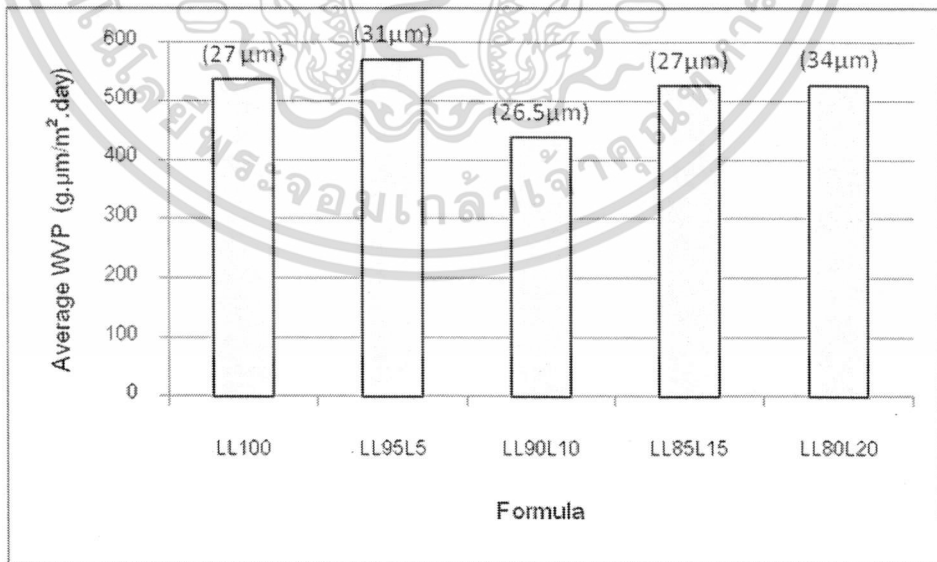


(c) มอดุลัส

ภาพที่ 4.4 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.7 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Permeability, WVP) ของฟิล์มตัวอย่างสามารถแสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟิล์มตัวอย่างเป็น LLDPE/LDPE/EVA โดยแต่ละสูตรมีปริมาณ EVA เท่ากันและมีการกระจายตัวดี ซึ่งการซึมผ่านไอน้ำจะเกิดส่วนใหญ่ในวัฏภาคที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีขั้ว ซึ่งคือ วัฏภาคของ EVA ทำให้มีค่าการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ

หมายเหตุ ตัวเลขบนแท่งกราฟแสดงค่าความหนาของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอ

ในการทดลองนี้ได้เติมซีโอไลต์เอ เพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม เนื่องจากซีโอไลต์เอ เป็นอนุภาคของแข็งที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงและมีขนาดเล็ก จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำในฟิล์มตัวอย่าง

### 4.2.1 ค่าดัชนีการไหลของสูตรผสมที่มีซีโอไลต์เอ

ค่าดัชนีการไหลแสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสูตร LL100-C กับ LL100Z10-C และสูตร LL80L20-C กับ LL80L20Z10-C ซึ่งแตกต่างกันที่สูตร LL100Z10-C และ LL80L20Z10-C มีการเติมซีโอไลต์เอลงไป 10% โดยน้ำหนักสูตรผสม จะเห็นว่าในสูตรที่มีซีโอไลต์เอ ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เมื่ออนุภาคของซีโอไลต์เอกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสูตร LL100-C และ LL80L20-C ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ในสูตร LL80L20-C มีการแทนที่ LLDPE ด้วย LDPE ลงไป 20% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม จะเห็นว่าในสูตรที่มีการเติม LDPE ลงไปนั้น ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจาก LDPE มีความหนืดต่ำกว่า LLDPE เมื่อเติมลงไปในระบบจึงส่งผลให้ระบบมีความหนืดลดลง

จากการพิจารณาพบว่า เมื่อมีการแทนที่ LLDPE ด้วย LDPE ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.4 g/10min (ที่น้ำหนักกดทับ 10 kg) และเมื่อเติมซีโอไลต์เอลงไป 10% โดยน้ำหนักสูตรผสม ค่าดัชนีการไหลลดลง 6.9 g/10min แสดงว่าการเติมซีโอไลต์เอมีผลต่อค่าดัชนีการไหลของสูตรผสมมากกว่าการเติม LDPE 20% ลงไปแทนที่ LLDPE ในสูตรผสม

ตารางที่ 4.5 ค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ค่าดัชนีการไหลที่น้ำหนักกด (g/10min)		
	2.16 (kg)	5.00 (kg)	10.00 (kg)
LL100-C	2.1±0.04	7.1±0.09	20.7±0.82
LL100Z10-C	1.7±0.06	5.4±0.07	16.1±0.71
LL80L20-C	2.6±0.17	8.6±0.20	23.1±0.81
LL80L20Z10-C	1.8±0.02	5.7±0.11	16.2±0.80

#### 4.2.2 ความหนาของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ

เนื่องจากปัญหาในการขึ้นรูปฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบเป่า (Blown film extruder) ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอได้และฟิล์มเกิดรอยฉีกขาดเป็นแนวยาว ในการทดลองนี้จึงเปลี่ยนมาเป็นการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งจะทำการควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มให้อยู่ในช่วง 60-70 ไมครอน

จากการวัดความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 58-62 ไมครอน ซึ่งความหนามีค่ามากกว่าฟิล์มที่ได้จากกระบวนการเป่า เนื่องจากข้อจำกัดที่ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิและความดันเพื่อลดความหนืดของพอลิเมอร์ได้ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายทางความร้อนของฟิล์มที่อาจเกิดขึ้นได้

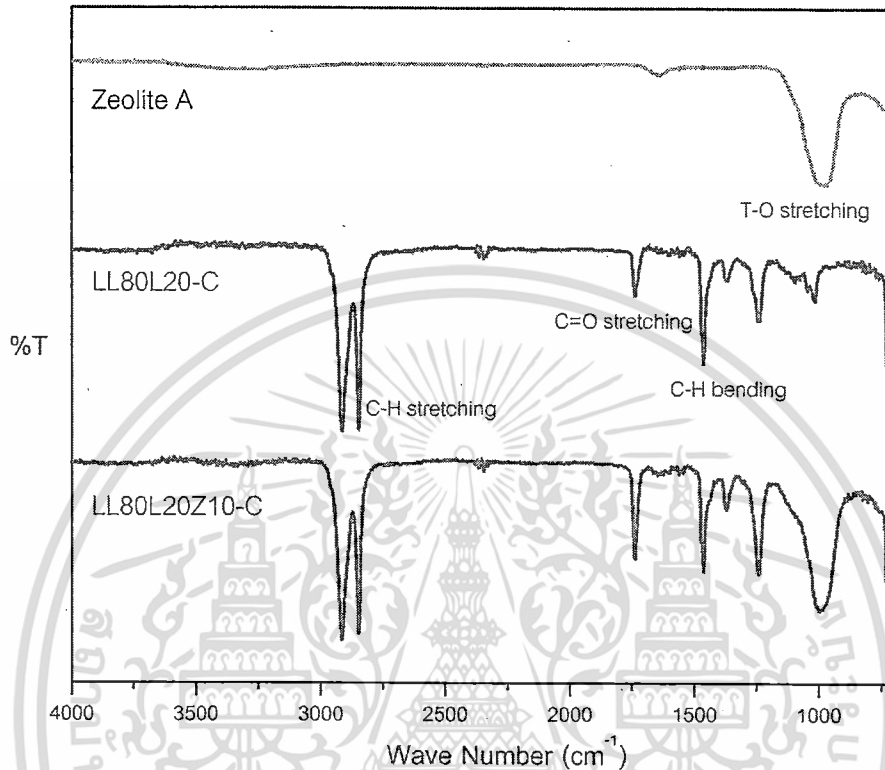
ตารางที่ 4.6 ความหนาของฟิล์ม

สูตร	สูตรผสม		ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
	LL:LD (PE 80% โดย น้ำหนักพอลิเมอร์)	Zeolite A (% โดยน้ำหนักสูตรผสม)	
LL100-C	100:0	-	58.27 $\pm$ 2.37
LL80L20-C	80:20	-	62.55 $\pm$ 2.25
LL100Z10-C	100:0	10	61.24 $\pm$ 1.87
LL80L20Z10-C	80:20	10	62.38 $\pm$ 1.94

#### 4.2.3 ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ

จากการศึกษาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA และฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA/Zeolite A เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอเทียบกับสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เอ พบว่าสเปกตรัมที่ได้แสดงสัญญาณหมู่ C-H Stretching ของ  $\text{CH}_3$  ในช่วง  $3000\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-H Bending ของ  $\text{CH}_2$  ในช่วง  $1480\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ LLDPE, LDPE และ EVA นอกจากนี้ยังแสดงสัญญาณหมู่ C=O Stretching ของคาร์บอกซิเลต (-COOR) ในช่วง  $1820\text{-}1670\text{ cm}^{-1}$  [43] ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ EVA แต่ในสูตรที่มีซีโอไลต์เอ จะแสดงสัญญาณหมู่ T-O stretching ของซีโอไลต์เอ ในช่วง  $900\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$  [43] ซึ่งผลการทดสอบเป็นเช่นเดียวกับสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เอคือ ถ้าเกิดการเสียหายของ EVA เนื่องจากอุณหภูมิการผสมและการขึ้นรูป จะทำให้เกิดสัญญาณของหมู่ -OH ในช่วง  $3600\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$  [43]

ในงานทดลองนี้ได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากับ  $200^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดสอบไม่พบการเสียดสภาพทางความร้อนของ EVA ในขณะที่ทำการขึ้นรูป



ภาพที่ 4.6 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เอ

#### 4.2.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอ

การศึกษาสมบัติทางความร้อน ทำการศึกษาหาค่าเปอร์เซ็นต์ซีโอไลต์เอ โดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA), อุณหภูมิหลอมผลึก ( $T_m$ ), อุณหภูมิก่อผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) โดยใช้เครื่อง DSC ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบทางความร้อนของฟิล์ม

สูตร	% Zeolite A	$T_m$ ของ PE ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ของ PE ( $^{\circ}\text{C}$ )	% Crystallinity
LL80L20-C	-	122.8	102.5	24.5
LL80L20Z10-C	11.0	113.7	104.3	15.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 การทดสอบด้วยเครื่อง TGA เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ซีโอโลต์เอได้ผลว่า ในสูตร LL80L20Z10-C มีปริมาณของซีโอโลต์เอเท่ากับ 11% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณที่เราต้องการ (10% โดยน้ำหนัก) และจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC เพื่อหา  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PE พบว่า  $T_m$  ของสูตร LL80L20-C มีค่ามากกว่าในสูตร LL80L20Z10-C แสดงว่าการเติมซีโอโลต์เอ 10% โดยน้ำหนัก ทำให้ผลึก PE ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง และมีความสมบูรณ์น้อยลง จึงพบค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงจาก 24.5% เป็น 15.3%

#### 4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีซีโอโลต์เอ

โดยทฤษฎีแล้ว ซีโอโลต์เอเป็นอนุภาคของแข็งที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ และไม่มีอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับสายโซ่ของพอลิเมอร์ สามารถส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลงได้ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์มมีค่าลดลงเล็กน้อย คาดว่าน่าจะเป็นเพราะมีการเติมซีโอโลต์เอเพียง 10% โดยน้ำหนัก

ส่วนค่ามอดูลัสในสูตรที่มีซีโอโลต์เอ จะมีค่าสูงกว่าในสูตรที่ไม่มีซีโอโลต์เอ เนื่องจากเป็นการเติมอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบเชิงกลโดยเครื่องทดสอบเนกประสงค์

สูตร	Tensile strength at yield (MPa)	Elongation at yield (%)	Modulus (MPa)
LL80L20-C	7.7±0.3	27±7	132±32
LL80L20Z10-C	6.3± 0.8	24±4	194±36

#### 4.2.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีซีโอโลต์เอ

จากผลการทดสอบพบว่า ในสูตร LL80L20Z10-C ซึ่งมีซีโอโลต์เอ มีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าสูตร LL80L20-C เนื่องจากซีโอโลต์เอมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงมาก เพราะโครงสร้างของซีโอโลต์เอมีความเป็นรูพรุน และมีขั้วสูง

ตารางที่ 4.9 ความหนาเฉลี่ย อัตราการซึมผ่านไอน้ำ และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)	WVTR เฉลี่ย (g/m <sup>2</sup> .day)	WVP เฉลี่ย (g.μm/m <sup>2</sup> .day)
LL80L20-C	67	6.64	445
LL80L20Z10-C	54	10.27	554

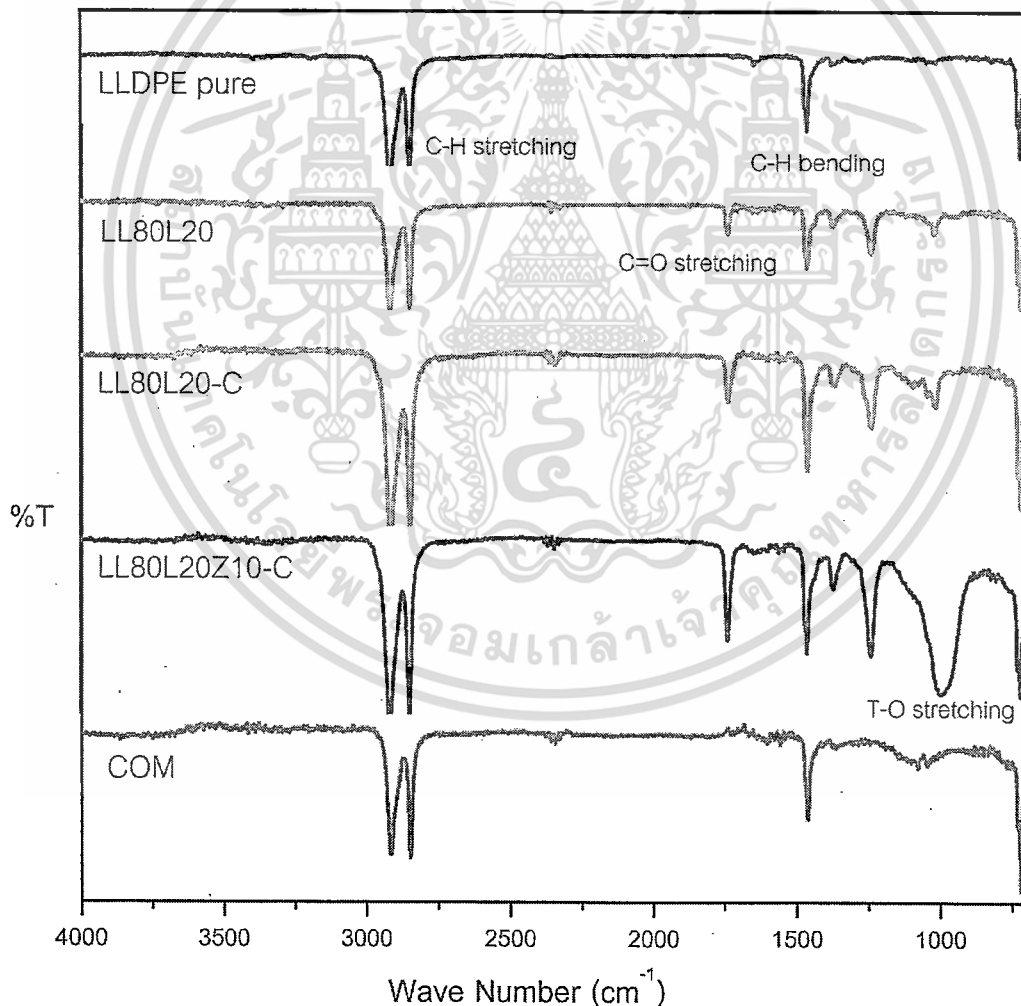
### 4.3 การเปรียบเทียบการทดสอบของฟิล์มตัวอย่างกับฟิล์มทางการค้า

#### 4.3.1 ความหนาและความกว้างของฟิล์มทางการค้า

จากการวัดความหนาของฟิล์มทางการค้า (สูตร COM) ที่ผลิตจากกระบวนการเป่าขึ้นรูป พบว่ามีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ  $25.86 \pm 1.11$  ไมครอน และวัดความกว้างเฉลี่ยได้เท่ากับ  $230.6 \pm 0.3$  มิลลิเมตร

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสูตรผสมที่ใช้ในการทดสอบและฟิล์มทางการค้า

การศึกษาการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มทางการค้า และฟิล์มในงานวิจัยนี้ แสดงผลดังภาพที่ 4.7 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสูตรผสม LL80L20 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าเปรียบเทียบกับ LL80L20-C ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าสเปกตรัมมีลักษณะที่เหมือนกัน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ผสมสูตรเดียวกันจึงมีองค์ประกอบที่เหมือนกัน



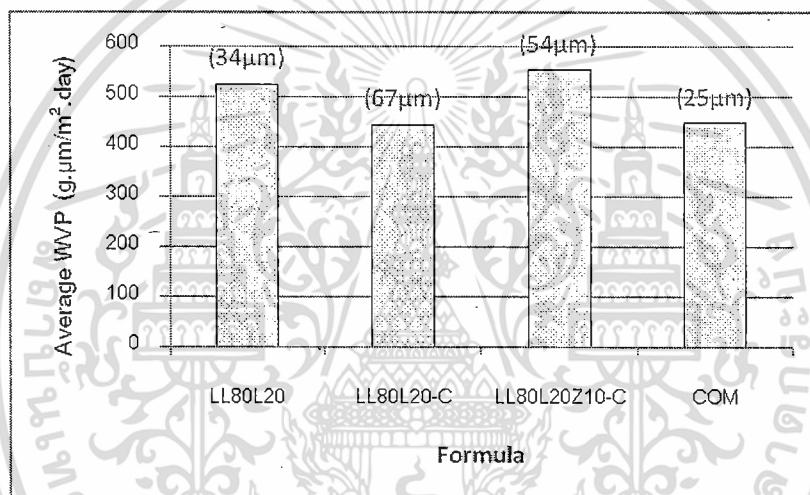
ภาพที่ 4.7 ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FT-IR ของฟิล์มตัวอย่างและฟิล์มทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสูตรผสม LL80L20Z10-C ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการกดอัดเปรียบเทียบกับฟิล์มทางการค้าที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่า พบว่ามีลักษณะสเปกตรัมที่แตกต่างกัน กล่าวคือฟิล์มทางการค้าจะมีสเปกตรัมแสดงสัญญาณหมู่ C-H Bending ของ  $\text{CH}_2$  ในช่วง  $1480\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-H Stretching ของ  $\text{CH}_3$  ที่ตำแหน่ง  $3000\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$  [43] ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ PE แสดงว่าฟิล์มทางการค้าที่เลือกมาทำการทดสอบมีลักษณะไปทาง PE

#### 4.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างและฟิล์มทางการค้า

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability, WVP) ของฟิล์มตัวอย่างและฟิล์มทางการค้าสามารถแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างในงานวิจัยและฟิล์มทางการค้า  
หมายเหตุ ตัวเลขบนแท่งกราฟแสดงค่าความหนาของฟิล์ม

จากภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของสูตร LL80L20 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าและสูตร LL80L20-C ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของ LL80L20 สูงกว่า LL80L20-C ทั้งนี้เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน กล่าวคือฟิล์ม LL80L20 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่ามีความหนาน้อยกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป จึงทำให้มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) สูงกว่า จึงส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ต่ำกว่า

การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ LL80L20 กับฟิล์มทางการค้า (COM) พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของ LL80L20 สูงกว่าฟิล์มทางการค้า เนื่องจาก LL80L20 มี EVA เป็นองค์ประกอบส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำส่วนใหญ่เกิดในภูมิภาคของ EVA จึงทำให้ LL80L20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มทางการค้าที่นำมาทดสอบ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ LL80L20Z10-C กับฟิล์มทางการค้า พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของ LL80L20Z10-C สูงกว่าฟิล์มทางการค้า เนื่องจาก LL80L20Z10-C มี EVA และซีโอโลต์เอเป็นองค์ประกอบ จะเห็นได้ว่า การมีทั้ง EVA และซีโอโลต์เอจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ เป็นผลมาจากการที่ไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ดีในวัฏภาคอสัณฐานของ EVA เพราะมีสมบัติมีขั้วเหมือนกันและซีโอโลต์เอที่มีขั้วสูง สามารถดูดซึมไอน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ LL80L20Z10 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มทางการค้าที่นำมาทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์ม LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม เพื่อศึกษาอิทธิพลของ LDPE ที่มีต่อการขึ้นรูป และศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์ม โดยใช้อัตราส่วนของพอลิเอทิลีน (PE) ต่อ EVA เท่ากับ 80/20 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม โดยในส่วนของ PE ทำการผสม LLDPE กับ LDPE ในอัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม และมีการเติมซีโอไลต์เอ 10 % โดยน้ำหนักสูตรผสม จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของปริมาณ LDPE (0-20 ส่วน) ที่เติมลงใน LLDPE โดยการวัดค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการเพิ่มปริมาณ LDPE ใน LLDPE ทำให้ค่า MFI เพิ่มขึ้น เนื่องจาก LDPE มีค่า MFI สูงกว่า LLDPE ซึ่งช่วยให้การผสมทำได้ง่ายขึ้นและสามารถเก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมง่ายขึ้น เพราะความหนืดมีค่าลดลง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติเชิงกลของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความแข็งแรงของ LLDPE และ LDPE มีค่าใกล้เคียงกัน การซึมผ่านไอน้ำของทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการซึมผ่านไอน้ำส่วนใหญ่เกิดในวัฏภาคของ EVA ซึ่งงานวิจัยนี้ให้ปริมาณ EVA คงที่
2. จากการศึกษาการเติมซีโอไลต์ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่า MFI ลดลง เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นของแข็ง จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และซีโอไลต์เอไม่มีอันตรกิริยาที่แข็งแรงกับพอลิเมอร์ส่งผลให้ในสูตรที่มีซีโอไลต์เอมีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เอเล็กน้อย แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูงขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอมีรูพรุน และมีขั้วสูง
3. จากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าเปรียบเทียบกับกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่า ฟิล์มที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่ามีค่าการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป เนื่องจากฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปมีความหนาแน่นมากกว่า
4. จากการศึกษาการเปรียบเทียบของฟิล์มตัวอย่างกับฟิล์มทางการค้า พบว่าผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันฟิล์มทางการค้าที่เลือกมาทำการทดสอบจากสูตรโครงสร้างพบว่ามีลักษณะเป็นพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) มีค่าการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มตัวอย่างสูตร LL80L20Z10-C เนื่องจากมี EVA และซีโอไลต์เอช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในกรณีที่ผสมซีโอโลต์เอควร์มีการพัฒนาระบบกำจัดสารระเหย (Venting) ด้านหน้าของ Extruder ของเครื่องเป่าฟิล์ม เพื่อให้มีการกำจัดน้ำออกจากพอลิเมอร์ได้หมดก่อนถูกเป่าเป็นท่อฟิล์ม เนื่องจากระบบที่ทำการต่อขึ้นเอง ไม่สามารถกำจัดไอน้ำออกได้หมด จึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีผิวไม่เรียบและมีรอยขาดเป็นแนวยาว ไม่สามารถนำไปทดสอบได้
2. ควรพัฒนาให้มีการเพิ่มปริมาณการเติม EVA ลงในพอลิเมอร์ผสมให้มากขึ้น เนื่องจากสามารถทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยที่ต้องควบคุมค่าความแข็งแรงของฟิล์มให้อยู่ในค่าที่ยอมรับได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. “บรรจุภัณฑ์เอกทีพี: สิ่งประดิษฐ์ของไทย.” 2551. [Online]. Available: <http://www4.eduzones.com/jade/3518>.
- [2] เนตรนภา ลามอ และเบญจวรรณ ตานนท์. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์โซเดียมเอ.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [3] นันทวรรณ ม่วงมี. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [4] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และสถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. “ราคามัดพลาสติกต่างประเทศ.” 2554. [Online]. Available: <http://plastic.oie.go.th/PlasticPriceInter.aspx>.
- [5] สมชาย กล้าหาญ. “วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน.” ภาควิชาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543
- [6] Dirim S., Esin A. and Vayindirli A. “A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolite for the Packaging of Fruits and Vegetables: Film Preparation.” Journal of Food Engineering. Vol.63. 2004. pp. 9-13
- [7] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. “หลักการทั่วไปของการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว ผัก ผลไม้ และดอกไม้เพื่อการส่งออก.” 2554. [Online]. Available: [http://www.tistr-foodprocess.net/vegetable/vegetable\\_home/veg\\_home2.html](http://www.tistr-foodprocess.net/vegetable/vegetable_home/veg_home2.html).
- [8] Pantastico E.B. “Postharvest physiology Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruits and Vegetable.” Westport CT. The AVI Publishing Company Inc. 1975.
- [9] จริงแท้ ศิริพานิช. “สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [10] Biale J.B. and Young R.B. “In Recent Advances in the Biochemistry of Fruits and Vegetable.” New York: Academic Press. 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหนังสือและโฮมเพจ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. “การควบคุมการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว.” 2554. [Online]. Available: <http://www2.swu.ac.th/royal/book5/b5c2t5.html>.
- [12] ดนัย บุญยเกียรติ และ นิธิยา รัตนานนท์. “การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ไอเดียสโตร. 2535.
- [13] Paine F.A. and Paine H.Y. “A Handbook of Food Packaging.” USA: Chapman & Hall. 1992.
- [14] Shewfelt R.L. and Bruckner B. “Fruits and Vegetable Quality.” Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc. 2000.
- [15] Billmeyer F.W. “Textbook of Polymer Science.” New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [16] ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับบริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด. “การสัมมนาเรื่อง HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย.” กรุงเทพฯ 2532.
- [17] วันชาติ ปรีชาติวงศ์. “พอลิเมอร์ (Polymer).” สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. 2554. [Online]. Available: <http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>.
- [18] วนิตา แซ่ลิ่ม. “สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [19] Brydson J.A., “Plastic Materials.” 7<sup>th</sup> ed. Oxford: Butterworth Heinemann. 1999.
- [20] ตะวัน สุขน้อย. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาซีโอไลต์และสารประกอบที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [21] Gates C.B. “Catalytic Chemistry.” Toronto: Wiley&Sons. 1992.
- [22] Woodward P. “Solid State Chemistry.” 2011. [Online]. Available: [http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem\\_754.htm](http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem_754.htm).
- [23] Volker B., Taunusstein, Germany “Natural Zeolites-Morphology.” 2012. [Online]. Available: [http://www.zeolitecollection.eu/Zeolites\\_Morphology/Morphology.html](http://www.zeolitecollection.eu/Zeolites_Morphology/Morphology.html).
- [24] Tanyapanyachon S. “The Preparation of Zeolite A Composite membrane for Ethanol/ethylene/water separation.” M.D. Thesis of Science in Petrochemicals and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Hydrocarbon Chemistry, School of Graduate studies, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2001.
- [25] สุภารัตน์ รักชลธี. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการบรรจุหีบห่อ.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [26] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. “การขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด.” 2554. [Online]. Available: [archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0352pp\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0352pp_ch2.pdf).
- [27] Chytiri S., Goulas A.E., Riganakos K.A. and Kontominas M.G. “**Thermal, mechanical and permeation properties of gamma-irradiated multilayer food packaging films containing a buried layer of recycled low-density polyethylene.**” Radiation Physics and Chemistry. Vol.75. 2006. pp. 416-423.
- [28] Compan V., Andrio A., Lopez M. L. and Riande E. “**Effect of annealing on the permeation characteristics of gases of coextruded LLDPE films.**” Polymer, Vol.37(26). 1996. pp.5831-5837.
- [29] Mousavi S. A., Gholizadehb M., Sedghia S., Chenarc M.P., Barmalad M. and Soltania A. “**Effects of preparation conditions on the morphology and gas permeation properties of polyethylene (PE) and ethylene vinyl acetate (EVA) films.**” Chemical Engineering Research and Design. Vol.88. 2010. pp.1593-1598.
- [30] Kim J.H., Ha S. Y., Lee Y. M. “**Gas permeation of poly(amide-6-*b*-ethylene oxide) copolymer.**” Journal of Membrane Science. Vol.190. 2001. pp.179–193.
- [31] Poon B.C., Chum S.P., Hiltner A. and Baer E. “**Adhesion of polyethylene blends to polypropylene.**” Polymer. Vol.54. 2004. pp. 893-903.
- [32] Faker M., Aghjeh R., Ghaffari M. and Seyyedi A. “**Rheology, morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends.**” Polymer. Vol.44. 2008. pp.1834-1842.
- [33] Marais S., Bureau E., Gouanve F., Salem E.B., Hirata Y., Andrio A., Cabot C. and Atmani H. “**Transport of water and gases through EVA/PVC blend films- permeation and DSC investigations.**” Polymer Testing. Vol.23. 2004. pp. 475-486.
- [34] Sadeghi M., Khanbabaie G., Amir H. and Khatt S. “**Gas permeation properties of ethylene vinyl acetate-silica nanocomposite membranes.**” Journal of Membrane Science. Vol.322. 2008. pp. 423-428.

- [35] Gholizadeh M., Razavi J. and Mousavi S.A. **“Gas permeability measurement in polyethylene and its copolymer films.”** Materials & Design, Vol. 28. 2007. pp.2528-2532.
- [36] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.”** ASTM D1238. Annual Book of ASTM Standard. 2010.
- [37] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.”** ASTM E1131. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2008.
- [38] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.”** ASTM E794. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia. 2006.
- [39] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.”** ASTM D882. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia. 1998.
- [40] ISO 15106-1:2003 (E) **“Plastics-Film and Sheeting-Determination of Water Vapour Transmission Rate-Part 1: Humidity Detection Sensor Method.”** Geneva : International Organization for Standardization. 2003.
- [41] Na B., Zhang Q., Zhang G. and Shen K. **“Super polyolefin blends achieved via dynamic packing injection molding: the morphology and mechanical properties of HDPE/EVA blends.”** Polymer. Vol.43. 2002. pp. 7367-7376.
- [42] Rowland M.E., Turley R.R., Hill J.J., Kale L.T., Kummer K.G., Lai S. and Chum, P.S. **“Rheology - modified polyolefins.”** 2012. [Online]. Available: <http://www.freepatentsonline.com/6689851.html>.
- [43] Silverstein R.M., Bassler G.C. and Morrill T.C. **“Spectrometric identification of organic compounds.”** New York: John Wiley & Sons. 2012.

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

### ประวัติการศึกษา

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

### สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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 รักชลธิ์ ชนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดิ์, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธิ์ กังสดาล บัวบุตรา ณัฐนิขารีย์ สิริเจียรนัย และกัญญาวีร์ สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ประมินทร์ ช้างเพชร และประกฤษฏี แสงทองอโณทัย, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธิ์ พงษ์ธร แซ่ฮุย วีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุฒิ, ผลของเถ้าแคลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธิ์ วีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุฒิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของเถ้าแคลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, 51(7), 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

#### การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17<sup>th</sup> –18<sup>th</sup> 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, 30<sup>th</sup> June – 1<sup>st</sup> 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 CaCO<sub>3</sub>-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 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 1<sup>st</sup> KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระพี เจริญนิรันดร์ ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจริญประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤทธิวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.
11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธี นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไดโตนานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, 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 6<sup>th</sup> 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 6<sup>th</sup> 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 6<sup>th</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 CaCO<sub>3</sub>-Filled HDPE Bottles, *The 7<sup>th</sup>*

*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, *ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง*, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.
19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, The 38<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT38), October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E\_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Ruckchonlatee, 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.

#### บทความวิชาการที่เผยแพร่

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

#### งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุขน้อย อิทธิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ *เคมีหลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ* นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

#### งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ (กองบรรณาธิการ) *สาระ...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด* 2549.
2. อิทธิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร สุภารัตน์ รักชลธิ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย *ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. จำนวน 77 หน้า 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้