

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยวแล้วยังคงมีชีวิตอยู่ มีการหายใจ การคายน้ำ และกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) อื่นๆ ซึ่งหากเกิดในอัตราที่สูงจะทำให้ผักและผลไม้สดเน่าเสียเร็ว [1] ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่จะนำมาใช้บรรจุต้องสามารถระบายอากาศได้เพียงพอ สามารถระบายไอน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหายใจได้อย่างรวดเร็วให้ทันกับอัตราการหายใจของผลิตผลสดเหล่านั้น เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตผลเกิดความเน่าเสียได้ [2]

ในบรรดาพลาสติกที่ใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) นับว่ามีการใช้กันอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของขวด กล่อง ถัง เชือก ตาข่าย ฯลฯ อีกทั้งมีสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดและโครงสร้าง เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นต้น ซึ่ง LDPE เป็นหนึ่งในพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ทั้งในรูปวัสดุอ่อนตัวและภาชนะบรรจุคงรูป โดยสมบัติทั่วไปของ LDPE คือ เหนียว โปร่งแสง ทนต่อแรงดึงขาดได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ จึงเหมาะกับการนำมาทำบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุอาหารและยา แต่ LDPE มีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำทำให้ไม่เหมาะในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตผลสด จึงมีการใช้การเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชหายใจออกมา แต่การเจาะรูนั้นทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม ทำให้ความแข็งแรงลดลง และเกิดการฉีกขาดได้ง่าย นอกจากนี้อาจทำให้จุลินทรีย์ ในอากาศสัมผัสกับผักและผลไม้ได้ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์โดยไม่ต้องทำการเจาะรูที่บรรจุภัณฑ์ [2]

งานวิจัยก่อนหน้านี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มที่มีการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เพื่อบรรจุผลิตผลทางการเกษตร โดยเลือกใช้ LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้มีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำโดยการเติมซีโอไลต์เอ ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง มีรูพรุนและมีสมบัติการดูดซับไอน้ำได้ดีมาผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ แต่การนำเอาซีโอไลต์เอที่มีขั้วมาผสมกับ LDPE ที่ไม่มีขั้วนั้นทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่ดีของซีโอไลต์เอและใส่ซีโอไลต์เอได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างขั้วของฟิล์ม LDPE กับซีโอไลต์เอ [3] งานวิจัยต่อเนื่องจึงมีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการนำเอาซีโอไลต์เอมาเคลือบด้วยกรดสเตียริก เพื่อช่วยในการกระจายตัวของซีโอไลต์เอในฟิล์ม LDPE ให้ดีขึ้น แต่กรดสเตียริกที่ใช้เคลือบผิวของซีโอไลต์เอนั้นเป็นกรดไขมันที่ไม่ชอบน้ำ จึง

ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้นั้นมีความชอบน้ำลดลงและทำหน้าที่เหมือนตัวกัน ทำให้ไอน้ำซึมผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ได้ยากขึ้น[4] และงานวิจัยถัดมามีการใช้ซีโอไลต์เอและแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติมในการปรับปรุงฟิล์มเอทิลีนไวน์ลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) พบว่าฟิล์ม EVA (ปริมาณไวน์ลอะซิเตต (VA) 27.5%) ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีโอไลต์เอมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมากกว่า มีลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์เอที่ดีกว่าและมีสมบัติเชิงกลดีกว่าฟิล์ม EVA ที่ถูกปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต [5] จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ EVA พบว่า พอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA (VA 9%) ที่มีปริมาณของ LDPE สูงมีความเข้ากันได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ EVA สูงและพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมผลึก (Crystalline melting temperature, T_m) ของ LDPE ลดลง เนื่องจากผลการละลายของ EVA หรือ การเกิดผลึกร่วมของ LDPE กับบางส่วนของ EVA [6]

นันทวรรณ ม่วงมี [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วย EVA และซีโอไลต์เอ พบว่า EVA สามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE และเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA และซีโอไลต์เอ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น เนื่องจากความมีขั้วของซีโอไลต์เอและการมีวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EVA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE กับ EVA [8] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ EVA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความมีขั้วที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของน้ำที่มีค่ามุมลดลง โดยที่อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก และปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากงานวิจัยที่ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยใช้เอทิลีนไวน์ลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH) และ EVA ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของ LDPE/EVOH เปรียบเทียบกับ LDPE/EVA พบว่า EVOH สามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์ม LDPE/EVOH และฟิล์มนี้มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและค่ายังมอดุลัสสูงกว่า ฟิล์ม LDPE/EVA เมื่อมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มใกล้เคียงกัน แต่ฟิล์มทั้งสองชนิดมีการซึมผ่านของไอน้ำที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH เกิดการแข่งขันกันระหว่าง สัณฐานวิทยาและความมีขั้ว กล่าวคือ EVOH มีขั้วสูงกว่า EVA แต่ EVOH สามารถเกิดผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ [9] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ LDPE นั้นต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานสูงและมีขั้วสูง

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EVA และเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) พบว่า EVA มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ส่วน EMA มีค่าดังกล่าวดีเยี่ยม งานวิจัยนี้จึงเลือก EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกับ LDPE เพราะ EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า EVA นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีการซึมผ่านไอน้ำซึ่งโคพอลิเมอร์ที่เลือกนำมา

ศึกษาในเชิงเปรียบเทียบคือเอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีหมู่ข้างเคียง (Side group) ที่มีความเกาะเกาะมากกว่า EMA

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ EVA และ EMA [10]

สมบัติ	EVA	EMA
อุณหภูมิในการขึ้นรูป (Processing range), °C	สูงสุด 230	150 - 325
เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)	ต่ำ	ดีเยี่ยม
กัดกร่อน (Corrosive)	กัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน
ว่องไวต่อความชื้น (Moisture sensitive)	ไม่ว่องไวต่อความชื้น	ไม่ว่องไวต่อความชื้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีเพื่อนำไปใช้สำหรับผลิตผลทางการเกษตร โดยทำการปรับเปลี่ยนคู่พอลิเมอร์ผสมเพื่อศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LDPE ซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกนำมาผสมกับ LDPE คือ EMA และ EEA ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีขั้วและมีหมู่ข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ จึงน่าจะทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีความมีขั้วและมีความเป็นอสัณฐานสูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีขึ้นและช่วยกระจายอนุภาคของซีโอไลต์ได้ดี เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจาก LDPE/EVA และมีการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณเท่าๆ กัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำได้ดีจาก LDPE/EMA และ LDPE/EEA ที่มีซีโอไลต์เอ เป็นองค์ประกอบ
2. สามารถเข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลถึงสมบัติของฟิล์มในแง่หมู่ฟังก์ชันของคู่พอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมและผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์ในฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA, LDPE/EEA และ LDPE/EVA ที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ โดยมีการควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกัน

3. ศึกษาผลของลำดับการผสมในพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอและศึกษาผลของ ซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
4. ขึ้นรูปฟิล์มจากกระบวนการกดอัด (Compression molding)
5. ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่อง Cone and plate rheometer และ Capillary rheometer
6. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์มและความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์มด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
7. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และ Dynamic mechanical analysis (DMA)
8. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
9. ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
10. ศึกษาสมบัติพื้นผิวด้วยการทดสอบมุมสัมผัส ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส
11. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตฟิล์มที่มีความสามารถการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดได้นานขึ้น เข้าใจถึงอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม LDPE และนำความรู้ที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว [11]

การรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพที่ดีของผักและผลไม้ไว้ ซึ่งหลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลิตผลนั้นจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่เคยได้รับจากราก แต่การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากผลิตผลนั้นยังคงมีการหายใจและคายน้ำอยู่เหมือนกับขณะที่อยู่บนต้น การสูญเสียน้ำนอกจากจะทำให้น้ำหนักที่จะขายขาดหายไปแล้ว ยังทำให้รูปร่างลักษณะของผลิตผลนั้นเปลี่ยนไปในทางที่แย่ลง ทำให้รสชาติและคุณภาพของผลิตผลนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย การสูญเสียน้ำออกจากพืชนั้นขึ้นกับความชื้นบรรยากาศภายนอก ความชื้นนี้จะแปรผันไปตามสภาพแวดล้อม จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มาของน้ำและอุณหภูมิ ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยว ควรมึวิธีการเก็บรักษาที่ดี เพราะการเก็บรักษาเป็นวิธีการสำคัญในการยืดอายุของผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวให้มีอายุการใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น โดยที่ยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเพียงใดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ [11]

- ความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศปกติจะมีอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% จึงจะมีโอกาสที่บรรยากาศจะรับน้ำได้อีกมาก ส่วนผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 70% และส่วนใหญ่มีน้ำอยู่ถึง 90% ความดันไอน้ำในผลไม้ก่อนข้างสูงเพราะผลไม้เปรียบเสมือนภาชนะปิด ไอน้ำรอบๆ เซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์ ซึ่งอาจถือได้ว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เพราะฉะนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตผลอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับว่าบรรยากาศภายนอกมีความชื้นมากน้อยเพียงใดในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% น้ำยังมีโอกาสสูญเสียดังกล่าวให้กับบรรยากาศได้ เนื่องจากผลิตผลเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจทำให้มีพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้อากาศรับน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

- อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียน้ำ ทั้งนี้เพราะสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะพวกของเหลวและก๊าซ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมาก โอกาสของน้ำที่จะหลุดออกจากผักและผลไม้จึงมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ไม่ได้สูงตามไปด้วย เพราะมีปริมาณโมเลกุลของน้ำอยู่เท่าเดิม แต่ไม่ได้ถูกจำกัดปริมาตรเหมือนในผลไม้ ดังนั้นความ

แตกต่างระหว่างความดันไอน้ำระหว่างภายในผลิตผลกับภายนอกผลิตผลจึงเพิ่มสูงมากขึ้น โอกาสที่ไอน้ำจะออกจากผลิตผลสู่ภายนอกจึงมีมากขึ้น อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษานอกจากจะต้องควบคุมให้ต่ำแล้วยังต้องควบคุมให้สม่ำเสมออยู่ตลอดเวลาด้วย เพราะถ้าหากอุณหภูมิขึ้นลงอยู่เสมอ ผลิตผลจะสูญเสียน้ำออกไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอากาศรอบๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกอากาศจะรับไอน้ำจากผลิตผลได้อีกเรื่อยๆ ทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำไปมาก สภาพในที่เก็บรักษาจะชื้นแฉะทำให้ผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

- การถ่ายเทอากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาจำเป็นต้องมีการระบายถ่ายอากาศ เนื่องจากสภาพบรรยากาศปกติประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดซึ่งชนิดที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการหายใจของผลิตผลคือ ก๊าซออกซิเจน (O_2)

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาในการเก็บรักษาผัก [12-13]

ชนิดของผลิตผล	อุณหภูมิ		ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาที่เก็บรักษาได้
	°F	°C		
หน่อไม้ฝรั่ง	32	0	85-90	3-4 สัปดาห์
บรอกโคลี	32	0	90-95	7-10 วัน
กะหล่ำปลี				
พันธุ์เบา	32	0	90-95	3-6 สัปดาห์
พันธุ์หนัก	32	0	90-95	3-4 สัปดาห์
ดอกกะหล่ำ	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
กระเจี๊ยบฝัก	50	11	85-95	2 สัปดาห์
หอมหัวใหญ่	32	0	70-75	6-8 เดือน
มันเทศ	55-60	13-16	85-90	4-6 เดือน
มะเขือเทศสุก	50	11	85-90	8-12 วัน
แก่-ดิบ	55-70	13-21	85-90	2-6 สัปดาห์
พริกขี้หนู	47-48	8-9	85-90	2-3 สัปดาห์

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงของพืชหลังการเก็บเกี่ยว

ผลิตผลเกษตรสดที่เก็บเกี่ยวมาจากต้นแล้ว ยังมีชีวิตมีการหายใจกระบวนการต่างๆ ทั้งสรีระและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่เช่นเดียวกับระยะที่ยังติดอยู่บนต้น ดังนั้นพืชผลหลังการเก็บเกี่ยว ยังคงมีการหายใจมีการคายน้ำเหมือนกับเมื่ออยู่บนต้น การสูญเสียเนื่องจากการหายใจและการคายน้ำขณะที่ผลิตผลยังอยู่บนต้นเดิมจะถูกชดเชยโดยน้ำที่ดูดจากดินเข้าสู่ภายในต้นและอาหารที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งแร่ธาตุที่ได้จากดิน ส่วนการหายใจและการคายน้ำที่เกิดหลังจากการเก็บเกี่ยว จะถูกชดเชยด้วยอาหารสะสมภายในพืชไม่มีการหามาเพิ่มเติมจากภายนอกและใช้ความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อเท่านั้น ทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่า เทียนและเน่าเสียในที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีและชีวเคมีที่เกิดขึ้นกับผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพต่อผลิตผลเกษตรสด การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีผลทำให้คุณภาพดีขึ้นหรือเลวลง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในพืชหลังเก็บเกี่ยวมีหลายประการดังต่อไปนี้ [14]

2.1.1.1 การหายใจ [15]

ผัก ผลไม้ และผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิดเป็นสิ่งมีชีวิต การเก็บเกี่ยวออกจากต้นไม่ทำให้กระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหยุด ดังนั้นผลิตผลทางการเกษตรทุกชนิดภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีชีวิตอยู่ ประกอบด้วยเนื้อเยื่อและเซลล์ที่มีชีวิต การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวังและต้องคำนึงเสมอว่ากำลังปฏิบัติต่อสิ่งมีชีวิต

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ต้องการพลังงานจำนวนหนึ่ง เพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับเมตาโบลิซึมของเซลล์ จึงมีการหายใจเอาก๊าซออกซิเจนเพื่อนำไปออกซิไดส์สารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ภายในเซลล์ให้เป็นพลังงานเพื่อให้กระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ดำเนินต่อไปทำให้ดำรงชีวิตอยู่ได้

การหายใจของผลิตผลสดมี 3 ขั้นตอน [16] คือ

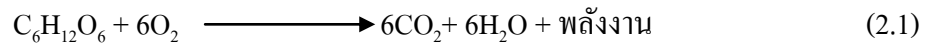
1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตพวกที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายๆ โมเลกุลให้กลายเป็นโมเลกุลเดี่ยว
2. ขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นให้เป็นกรดไพรูวิก
3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานซึ่งเกิดในการหายใจของผลิตผลหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ

ชนิดของการหายใจมี 2 ชนิด [15] คือ

1. การหายใจที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

การหายใจที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของน้ำตาล ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ในปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีกรดอินทรีย์ต่างๆ เอนไซม์ และ

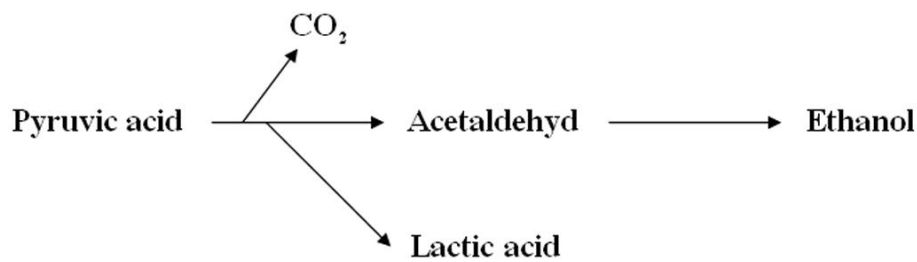
โคเอนไซม์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในการใช้ออกซิเจนผ่าน Respiration chain การออกซิเดชันของน้ำตาลที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สรุปได้สมการดังนี้



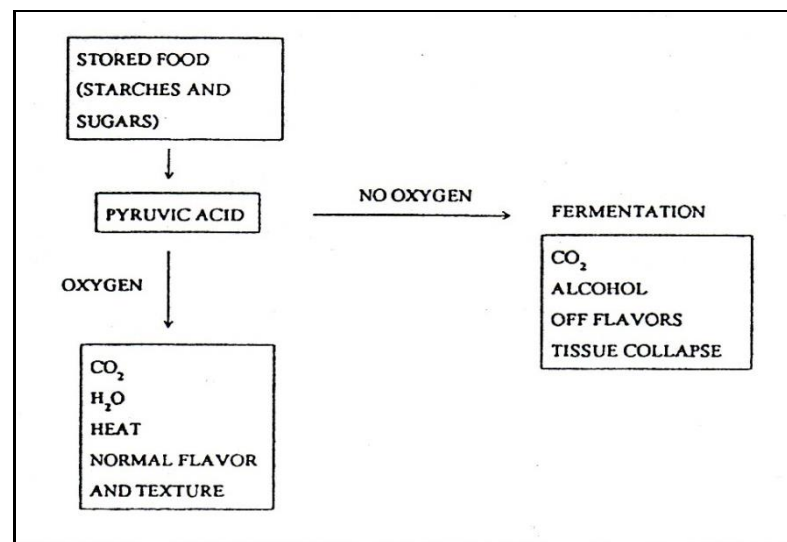
พลังงานที่เกิดขึ้นอยู่ในรูป ATP (Adenosine triphosphate) โดยที่การหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนสมบูรณ์จะได้ปริมาณ ATP ต่อโมเลกุลน้ำตาลมากกว่าการหายใจในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนน้อยหรือไม่มีก๊าซออกซิเจน

2. การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

การหายใจชนิดนี้บางที่เรียกว่า การหมัก (Fermentation) เป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้ในจำนวนจำกัด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการสลายน้ำตาลกลูโคสให้เป็นกรดไพรูวิก แต่กรดไพรูวิกจะถูกเปลี่ยนต่อเป็นกรดแลคติกหรือเป็นสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น อะซิตัลดีไฮด์และเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน [15]



ภาพที่ 2.2 แผนผังแสดงการหายใจของพืชโดยสังเขป ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [16]

การหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะให้พลังงานน้อยกว่าการหายใจที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งโดยปกติผลผลิตจากการเกษตรทุกชนิดจะมีการหายใจที่ใช้ออกซิเจน แต่ในการเก็บรักษาบางสภาวะที่มีการลดปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปกติ ทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศอาจมีไม่เพียงพอที่จะรักษาระดับของการหายใจที่ใช้ออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้ออกซิเจนในปริมาณจำกัดได้ ความเข้มข้นที่ต่ำสุดของออกซิเจนที่จะทำให้เกิดการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนนั้น จะผันแปรไปตามชนิดของเนื้อเยื่อ พันธุ์ ความแก่อ่อน และอุณหภูมิ

รูปแบบการหายใจของพืชแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของพืช [14] ดังต่อไปนี้

1. Climacteric fruit คือ ผลไม้ที่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกอัตราการหายใจจะสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการหายใจนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงมากด้วย เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนเข้าสู่ระยะเสื่อมสลาย ฉะนั้นผลไม้พวกนี้สามารถเก็บแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น มะเขือเทศ มังคุด ละครุด กล้วย ทูเรียน

ตารางที่ 2.2 อัตราการหายใจของผลไม้บางชนิดประเภท Climacteric [14]

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

2. Non-climacteric fruit คือผลไม้ที่ไม่มีการสุกเมื่อแก่จัด หลังจากผลแก่จัดจะมีอัตราการหายใจต่ำลงในระยะเก็บเกี่ยว หลังการเก็บเกี่ยวแล้วผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ อัตราการหายใจค่อนข้างที่จะคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงระยะเสื่อมสลาย รสชาติคงที่ อายุการเก็บรักษาค่อนข้างยาว ฉะนั้นถ้าเก็บเกี่ยวผลที่ยังไม่แก่จัดเต็มที่ จะได้ผลไม้ที่มีรสชาติเหมือนเดิมตลอดไป จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด เช่น ส้ม สับปะรด มะนาว เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ แตงกวา

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดประเภท Non-climacteric [14]

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

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจ [15]

1) อุณหภูมิ

อัตราการหายใจของสิ่งมีชีวิตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเรียกว่า Optimum temperature หลังจากจุดนี้ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีก อัตราการหายใจจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่การหายใจหยุด เรียกจุดของอุณหภูมิที่ทำให้ผักและผลไม้หยุดหายใจว่า Thermal death point การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้หลังเก็บเกี่ยว

ในด้านการจัดการการหลังการเก็บเกี่ยวได้มีการคัดแปลงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตผล เพื่อให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจและกระบวนการเมตาโบลิซึมเกิดขึ้นในระดับต่ำ

2) ก๊าซเอทิลีน

การให้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกจะมีผลต่ออัตราการหายใจของผลไม้แตกต่างกัน คือ ถ้าเป็นผลไม้จำพวก Non-climacteric การให้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกจะเร่งอัตราการหายใจให้เพิ่มสูงขึ้น ยิ่งเพิ่มปริมาณของเอทิลีนให้มากขึ้น อัตราการหายใจยิ่งสูงขึ้นจนเกิดเป็น Climacteric peak ได้เช่นเดียวกับผลไม้จำพวก Climacteric แต่เอทิลีนไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของผลไม้จำพวก Climacteric เอทิลีนมีผลเพียงช่วยเลื่อน Climacteric peak ของผลไม้จำพวก Climacteric ให้เกิดเร็วขึ้นทำให้จุดเริ่มต้นของการสุกเกิดได้เร็วขึ้น แต่เอทิลีนไม่มีผลในการเร่งอัตราการหายใจถึงแม้จะเพิ่มปริมาณของเอทิลีนให้มากขึ้น

3) ส่วนประกอบของก๊าซในบรรยากาศ

การคัดแปลงบรรยากาศของสภาพแวดล้อมที่ใช้เก็บรักษาผลิตผลเป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งนิยมปฏิบัติกันเพื่อควบคุมอัตราการหายใจ และกระบวนการเมตาโบลิซึมของผลิตผล ประโยชน์ของการคัดแปลงสภาพบรรยากาศนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซในบรรยากาศ

— ปริมาณของก๊าซออกซิเจน เมื่อมีปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศลดลงจากปกติจนถึง 2-3% อัตราการหายใจจะลดลง ในการเก็บรักษาผลิตผลนั้นเมื่อควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนให้ต่ำลงแล้ว อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจะต้องเหมาะสมด้วย ในเนื้อเยื่อที่มีกระบวนการเมทาโบลิซึมสูงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงการลดปริมาณออกซิเจนลงอาจจะเพิ่มอัตราการหายใจได้ เมื่อใช้วิธีวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา ทั้งนี้เพราะเมื่อลดปริมาณออกซิเจนลง เซลล์จะมีปริมาณของ ATP มากขึ้นแต่เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีน้อยมากกรดไพรูวิกจึงไม่สามารถเปลี่ยนให้เป็นการ์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานได้ แต่จะเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลซึ่งมีพิษต่อพืช ดังนั้นการคัดแปลงปริมาณของออกซิเจนให้น้อยเกินไปจึงอาจก่อให้เกิดผลเสียได้

— ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไปในสภาพบรรยากาศที่เก็บรักษาผลิตผลอาจจะก่อให้เกิดเอทานอลได้ การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการหายใจลดลง

4) ภาวะความเครียด (Physical stress)

การเกิดความเครียดในผลิตผล เช่น ถูกเชือกจูงลิ้นทรีย์เข้าทำลาย การเกิดบาดแผลต่างๆ ส่งผลให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น โดยมักจะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของก๊าซ เอทิลีนซึ่งผลิตผลปลดปล่อยออกมาด้วย

5) ส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผักและผลไม้

เนื่องจากผักและผลไม้แต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างแตกต่างกัน ทำให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจแตกต่างกัน อัตราการหายใจจะสูงหรือต่ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบทางเคมีเสมอไป เช่น มันเทศ มีคาร์โบไฮเดรตสูงแต่มีอัตราการหายใจต่ำ ส่วนผักกาดหอมซึ่งมีปริมาณน้ำสูงถึง 90% แต่มีอัตราการหายใจสูงกว่ามันเทศ เป็นต้น

โครงสร้างและส่วนต่างๆ ของพืชมีอัตราการหายใจแตกต่างกัน ส่วนของพืชที่มีอัตราการหายใจสูง มักเป็นพวกเนื้อเยื่ออ่อน (Young tissues) เช่น ยอด หน่อ ดอกและผลอ่อน ยกตัวอย่างเช่น หน่อไม้ฝรั่ง บรอกโคลีและข้าวโพดอ่อน เป็นต้น

พืชที่เป็นหัวจะมีอัตราการหายใจต่ำ เช่น มันเทศ มันฝรั่ง หัวหอมและหัวกระเทียม เป็นต้น ส่วนผลแก่บางชนิดมีอัตราการหายใจต่ำ เช่น พริกทอง และพริก เป็นต้น สำหรับพวกที่มีอัตราการหายใจปานกลาง ได้แก่ ผลไม้แก่ที่ยังไม่สุก และผักใบต่างๆ

6) ช่วงการเจริญเติบโตในระยะที่เก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้ ภายหลังจากการตัดออกจากต้นจะมีการหายใจสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดและระยะความแก่อ่อนของผักและผลไม้ นั้น ผักและผลไม้ที่ยังอ่อนจะมีอัตราการหายใจสูงเมื่อเข้าสู่ระยะแก่ อัตราการหายใจจะลดลง การลดลงจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของผักหรือผลไม้ เช่น ผลไม้จำพวก Non-climacteric นั้น อัตราการหายใจจะลดลงไปเรื่อยๆ จนเนื้อเยื่อเสียสภาพ

ส่วนผลไม้จำพวก Climacteric จะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลไม้เริ่มสุกแล้วจึงลดลงจนเนื้อเยื่อเสื่อมสภาพเช่นเดียวกัน

7) ปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยว

อัตราการหายใจของผลิตผลแต่ละชนิดในแต่ละแหล่งหรือในแต่ละฤดูจะผันแปรออกไป ซึ่งการผันแปรนี้เป็นผลมาจากสภาพดินฟ้าอากาศ ตลอดจนการเกษตรกรรมต่างๆ เช่น แอปเปิล ที่ปลูกภายใต้สภาพที่มีแคลเซียมต่ำ จะมีการหายใจที่สูงกว่าพวกที่ปลูกภายใต้สภาพที่มีแคลเซียมเพียงพอ เป็นต้น

2.1.1.2 การคายน้ำ [15]

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเฉพาะในเซลล์ของผักและผลไม้มีปริมาณน้ำสูงมาก เนื้อเยื่อของผักและผลไม้มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 80-90% ดังนั้นการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหาย มีการสูญเสียน้ำหนักและมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปถ้าผักและผลไม้มีการสูญเสียน้ำไปเพียง 5% จะทำให้ผักและผลไม้ห่อหุ้มมีคุณภาพลดลงและอาจขายไม่ได้ราคา ถ้าผักและผลไม้อยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีลมพัดจะยิ่งเร่งให้เกิดการเหี่ยวได้เร็วขึ้นภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง

การสูญเสียน้ำยังอาจทำให้ลักษณะเนื้อของผลิตผลเปลี่ยนไปด้วยและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีบางอย่างที่ทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพ เช่น มีสีหรือรสชาติที่เปลี่ยนไป นอกจากนั้นการสูญเสียน้ำยังอาจทำให้เกิดความเสียหายทางอ้อมได้ เช่น ผลิตผลบางชนิดที่บรรจุใส่ภาชนะแน่นพอดี แต่เมื่อเกิดการการสูญเสียน้ำไปจะทำให้ผลิตผลไม่แน่นพอดี เกิดการเคลื่อนไหวของผลิตผลภายในภาชนะบรรจุอาจทำให้เกิดรอยแผลจากการเสียดสีได้

ในทางตรงกันข้าม ถ้าผักและผลไม้อยู่ในสภาพเปียกหรือมีน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียได้เช่นเดียวกัน เพราะการเปียกจะทำให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ทำให้ผักและผลไม้เกิดการเน่าเสียเร็วขึ้นหรือทำให้เกิดการแตกได้ เช่น การแตกของผลมะเขือเทศและผลเชอร์รี่ เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำมีบทบาทอย่างมากมาต่อคุณภาพของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเซลล์ของพืช ดังนั้นพืชจึงต้องมีวิธีป้องกันการสูญเสียน้ำโดยควบคุมการปิดเปิดของปากใบ และการมีคิวติเคิลเคลือบที่ผิว เป็นต้น การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้จะสูญเสียน้ำในรูปของไอน้ำ โดยทั่วไปอากาศแห้งจะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% คาร์บอนไดออกไซด์ 0.03% และก๊าซอื่นๆ อีกประมาณ 1% สำหรับอากาศชื้นจะประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ความชื้นในอากาศหมายถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในรูปของไอน้ำในอากาศ ปริมาณไอน้ำในอากาศผันแปรได้จากศูนย์

ถึงมากที่สุด เมื่ออากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำซึ่งจะผันแปรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันด้วย ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 30°C อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะมีปริมาณไอน้ำ 4% การระเหยของน้ำกลายเป็นไอน้ำเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ต้องใช้พลังงาน

ปริมาณความชื้นหรือไอน้ำในอากาศแสดงในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) หมายถึง อัตราส่วนของความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน และมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความดันไอน้ำในอากาศ}}{\text{ความดันไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \times 100 \quad (2.2)$$

อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำมาวางไว้ในอากาศในภาชนะปิด ปริมาณไอน้ำในอากาศที่อยู่ในภาชนะจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์และในอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกัน จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุล คือ เมื่อจำนวนของน้ำในรูปไอน้ำเคลื่อนที่เข้าและออกเท่ากัน ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุลนี้ เรียกว่า Equilibrium relative humidity (ERH) ซึ่งเป็นสมบัติของผลิตภัณฑ์และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น น้ำบริสุทธิ์จะมี ERH 100%

ผักและผลไม้มีปริมาณน้ำสูงอยู่ภายในเซลล์ได้ด้วยความดันออสโมซิสภายใน เซลล์น้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำอิสระ มีเพียงส่วนน้อยที่อยู่ร่วมกับสารประกอบ และน้ำที่อยู่ในเซลล์ของพืชยังมีสารต่างๆ ละลายอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อความดันไอของน้ำ ดังนั้นเมื่อนำผักและผลไม้ไปใส่ไว้ในภาชนะปิด อากาศที่อยู่ภายในจะไม่สามารถอิ่มตัวด้วยไอน้ำได้ เนื่องจากในน้ำมีสารละลายอยู่ และรวมอยู่กับสารประกอบ ดังนั้นสำหรับผักและผลไม้สดจะมี ERH ประมาณ 97% การที่ ERH ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากบางส่วนของน้ำใช้เป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่อยู่ภายในเซลล์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ Water activity และ Water potential ดังนั้น Water activity และ Water potential เป็นการแสดงถึงสภาวะพลังงานของน้ำภายในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และเป็นตัวชี้บ่งสภาวะของน้ำภายในเซลล์ว่ามีเพียงพอที่จะใช้ในกระบวนการต่างๆ ของเซลล์มากน้อยเพียงใด การวัดค่าเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพราะ Water activity และ Water potential ที่ลดลงจำนวนเล็กน้อย จะสมดุลพอดีกับค่า ERH ที่ลดลงด้วย ถ้า ERH ลดลงเหลือ 95% จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้ แต่การลดการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิดอาจต้องการ Water activity และ Water potential ที่ต่ำกว่าปกติเพื่อทำให้ ERH ลดลงน้อยกว่า 85%

2.1.1.3 การสุก [15]

การสุกของผลไม้เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งทางสรีรวิทยา ทางกายภาพ และทางเคมี เป็นกระบวนการที่มีปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เกิดขึ้นมากมายภายในเซลล์ของเนื้อผลไม้

ซึ่งผลไม้แต่ละชนิดอาจมีปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นบางอย่างเหมือนกันและบางอย่างไม่เหมือนกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของผลไม้มีดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของผลไม้ดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้
- การเปลี่ยนคุณภาพของรสชาติ
- การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของผนังเซลล์
- มีการสังเคราะห์โปรตีนขึ้นมาใหม่
- มีการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์
- มีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของกรดอะมิโน
- ผลไม้บางชนิดมีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น
- มีการเปลี่ยนแปลงของ Tissue permeability
- ผลไม้พวก Climacteric ขณะสุกจะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น
- ขณะผลไม้สุกจะมีก๊าซเอทิลีนปล่อยออกมา
- มีวิตามินบางชนิดเปลี่ยนไป

การที่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของผลไม้จะช่วยให้เลือกระยะเวลาในการเก็บผลไม้ได้เหมาะสมและปฏิบัติต่อผลไม้ได้ถูกต้อง เช่น อาจเร่งผลไม้สุกเร็วขึ้นหรือชะลอให้ผลไม้สุกช้าลงได้

2. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก และความแน่นเนื้อ (Firmness) ซึ่งจะผันแปรไปตามชนิดของผลไม้และระยะการสุก

3. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เป็นผลของกระบวนการเมทาโบลิซึม ภายในเซลล์ ผลไม้ในระยะการเจริญเติบโต เมทาโบลิซึมภายในเซลล์จะเป็นการสังเคราะห์มากกว่า การสลายเซลล์ของผลไม้จำเป็นต้องใช้พลังงานสูง ทำให้มีอัตราการหายใจสูง เมื่ออัตราการเจริญเติบโตช้าลง อัตราการหายใจของผลไม้จะค่อยๆ ลดลงด้วย

สำหรับผลไม้จำพวก Climacteric ซึ่งมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เมื่อผลไม้เริ่มสุกเนื่องจากในกระบวนการสุกมีปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เกิดขึ้นมากมายซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกของผลไม้ [15]

1. ออกซิเจน

ปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศมีผลต่อการสุกของผลไม้ การเพิ่มปริมาณของออกซิเจนให้สูงกว่าบรรยากาศ อาจเร่งหรือไม่มีผลต่อการสุกของผลไม้ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ การลดปริมาณของออกซิเจนในอากาศลง มีผลทำให้การสุกของผลไม้ช้าลง เพราะอัตราการ

หายใจและเมทาโบลิซึมภายในเซลล์เกิดช้าลง ชะลออัตราการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ให้ช้าลง การสังเคราะห์เอทิลินลดน้อยลงและลดความไวของผลไม้ต่อการทำงานของ เอทิลินให้ช้าลงด้วย ปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ยับยั้งการสุกโดยไม่มีผลต่อสรีรวิทยาที่สำคัญของผลไม้ คือ ประมาณ 3-5%

2. คาร์บอนไดออกไซด์

การเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการหายใจช้าลง ยับยั้งการสังเคราะห์เอทิลินและการทำงานของเอทิลิน

3. ก๊าซเอทิลิน

เอทิลินเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่ง มีความสำคัญมากต่อสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน โดยเฉพาะเป็นสารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสุกของผลไม้ จึงเรียกเอทิลินว่า Ripening gas เอทิลินยังทำให้เกิดความผิดปกติแก่ใบผักและดอกไม้ด้วย

การให้ก๊าซเอทิลินจากภายนอกแก่ผลไม้ดิบจะช่วยเร่งให้ผลไม้สุกเร็วขึ้นและมีสีผิวสม่ำเสมอขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสุก คือประมาณ 20-22°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมประมาณ 85-90%

กลไกที่เอทิลินเร่งการสุกของผลไม้ เกิดขึ้นโดยเอทิลินช่วยเลื่อนจุดเริ่มต้นของการสุกหรือเลื่อน Climacteric peak ให้เร็วขึ้น แต่เอทิลินไม่มีผลต่ออัตราเร็วของกระบวนการสุก ตัวอย่างเช่น ถั่วลิสงดิบที่แก่จัดเมื่อตัดมาจากต้นปล่อยให้สุกจะใช้เวลา 8 วัน จึงเริ่มสุกและใช้เวลาประมาณ 3 วัน จึงจะสุกเหมาะแก่การบริโภคได้ ถ้านำถั่วลิสงดิบนี้มาบ่มให้สุกเร็วขึ้นด้วยเอทิลิน ถั่วลิสงจะเริ่มสุกในวันที่ 4 ซึ่งจะสุกเร็วกว่าปกติ 4 วัน แต่อัตราการสุกของถั่วลิสงยังคงเป็น 3 วันเท่าเดิม จนกว่าจะสุกบริโภคได้ การให้ก๊าซเอทิลินแก่ผลไม้ที่เริ่มเกิด Climacteric peak แล้วเอทิลินจะไม่มีผลต่อการสุกของผลไม้เลย

4. อุณหภูมิ

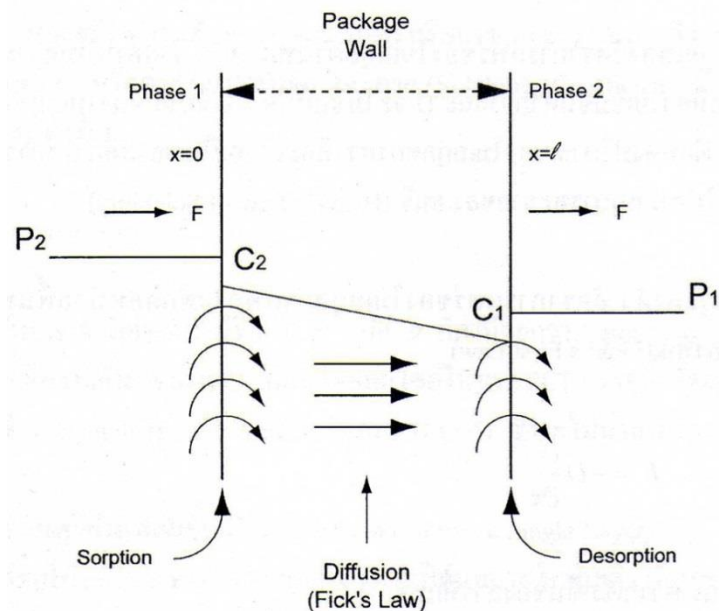
อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่สูงหรือต่ำเกินไปมีผลต่ออัตราการสุกและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีระหว่างการสุกของผลไม้ ผลไม้จะสุกช้าลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิต่อการสุกของผลไม้ผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ เช่น แอปเปิลจะสุกที่อุณหภูมิ 0-4°C ส่วนการสุกจะผิดปกติถ้าเก็บรักษาถั่วลิสงไว้ต่ำกว่า 12°C หรือสูงกว่า 30°C และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 30°C การสังเคราะห์ไลโคพิน (รงควัตถุสีแดง) ของมะเขือเทศจะถูกยับยั้ง อุณหภูมิยังมีผลต่ออัตราการหายใจ การสังเคราะห์เอทิลินและการทำงานของเอทิลินอีกด้วย

2.2 การซึมผ่าน [1]

การซึมผ่าน (Permeation) หมายถึง กระบวนการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ ไอ หรือของเหลวผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรน

นั้นๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่า Permeant และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรนหรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้เรียกว่า Permeability

การซึมผ่านเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติก ทั้งประเภทแผ่นฟิล์ม ภาชนะบรรจุอ่อนตัวและภาชนะบรรจุคงรูป จากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก ทำให้ก๊าซ ไอและสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถละลาย (Dissolve) เข้าไปในพลาสติกได้ โมเลกุลที่ละลายเข้าไปนี้จะแพร่ผ่าน (Diffuse) พลาสติกโดยกระบวนการที่เรียกว่า Activated diffusion process หรือ Molecular diffusion process เพื่อสร้างสมดุลของศักย์ทางเคมี (Chemical potential) ของโมเลกุลนั้นและแพร่จากที่มีศักย์สูงกว่าไปสู่ที่มีศักย์ต่ำกว่าจนกระทั่งผ่านพลาสติกไปอีกด้านหนึ่ง (Desorp หรือ Evaporate)



ภาพที่ 2.3 กระบวนการซึมผ่านพลาสติกของก๊าซหรือไอ [1]

2.2.1 สมการการแพร่และการดูดซับ [1]

อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของโมเลกุลต่างๆ ที่สถานะคงตัว หรือ Permeability coefficient หรือนิยมเรียกว่า Permeability และเขียนด้วยสัญลักษณ์ P_m (บางครั้งใช้ P) P_m นี้เป็นผลลัพธ์ของ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient หรือ D) กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient หรือ S) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$P_m = D \times S \quad (2.3)$$

D เป็นค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านเมมเบรน จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และ D จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลที่แพร่

S เป็นค่าที่แสดงปริมาณของโมเลกุลของสารที่ละลายในเมมเบรน ที่สภาวะสมดุล

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก [1]

ก. โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกมีผลต่อทั้งค่า D และ S นั่นคือผลโดยตรงต่อค่า Pm ของพลาสติกนั้นๆ ตารางที่ 2.4 แสดงผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนโดย X จะเป็นโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพลาสติก ค่าอัตราการซึมผ่านที่แสดงนี้เป็นค่าสัมพัทธ์ที่เปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกที่มี X เป็นหมู่ (-OH)

ตารางที่ 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน [1]

Structure	X	Relative Pm (O ₂)
$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ [-\text{C} & -\text{C}-]_n \\ & \\ \text{H} & \text{X} \end{array}$	-OH	1 ^a
	-CN	4
	-Cl	800
	-F	1,500
	-COOCH ₃	1,700
	-CH ₃	15,000
	-C ₆ H ₅	42,000
	-H	48,000

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

ข. สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of plastic)

สัณฐานวิทยาของพลาสติก หมายถึง โครงสร้างทางกายภาพของพลาสติกที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณกึ่งผลึก (Semi-crystalline region) อยู่ด้วยกัน โดยการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้มาจากการจัดระเบียบโมเลกุล (Orientation) ทางเคมีและการจัดระเบียบโมเลกุลทางกายภาพ ความสำคัญของสัณฐานวิทยาต่อการซึมผ่านพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นสำคัญคือ

1) สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ (Symmetry and polarity of monomer) จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) พลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีความสมมาตรหรือมีความสมมาตรน้อยกว่า นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำกว่าด้วย ตัวอย่าง PE มีโครงสร้างสมมาตรกว่ายาง ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของ PE จึงต่ำกว่ายาง

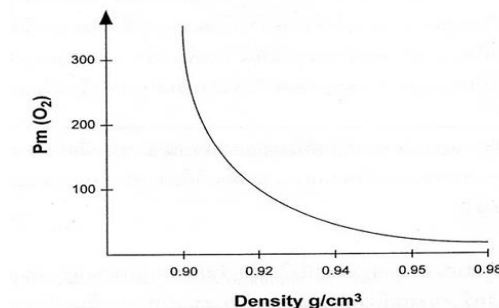
2) การจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุล จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีระดับของความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายลดลง นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกจะขัดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่เข้ามา ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางวกวน (Tortuous path) เป็นผลให้แพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลามากขึ้น

ตารางที่ 2.5 ผลของการจัดระเบียบโมเลกุลต่อค่า P_m (O_2) ของพลาสติก [1]

Polymer	Degree of orientation	P_m (O_2) (cc.mm/m ² .atm.day ที่ 23°C)
Polypropylene (PP)	0	57
	300%	30
Polystyrene (PS)	0	160
	300%	114
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	0	3.8
	500%	1.9

ตัวอย่าง พิล์มโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่ผ่านการจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุล ที่ 90°C และ 115°C จะมีความเป็นผลึกร้อยละ 22 และ 31 ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์ม PET ตัวอย่างแรกมีค่าเป็น 4 เท่าของตัวอย่างที่สอง ผลของการจัดระเบียบสายโซ่โมเลกุลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซแสดงในตารางที่ 2.5

3) ความหนาแน่น (Density) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นของพลาสติกชนิดหนึ่งๆ จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน กระบวนการแปรรูป โดยเฉพาะจะทำให้เย็นและกระบวนการจัดระเบียบโมเลกุล อัตราการซึมผ่านของก๊าซจะลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกจะแปรผันตรงกับระดับความเป็นผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.4 และตารางที่ 2.6



ภาพที่ 2.4 ค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนกับค่าความหนาแน่นกับสำหรับพลาสติก PE [1]

ตารางที่ 2.6 ผลของระดับของความเป็นผลึกต่อค่า Pm (O₂) ของพลาสติก [1]

Polymer	% Crystallinity	Pm (O ₂) cc.mm/m ² .atm.day ที่ 23°C
Low density polyethylene	50	182
High density polyethylene	80	42
Nylon 66 (Soaked)	20	3
Nylon 66 (Annealed)	40	0.6

ค. วัตถุเติมแต่งในพลาสติก (Plastic additive)

1) พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงไปในพลาสติก โดยทั่วไปจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของพลาสติกนั้นสูงขึ้น (แต่อาจมีข้อยกเว้นสำหรับพลาสติกไซเซอร์บางประเภท) เช่น การเติมยางใน PVC อาจทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มเป็น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไซเซอร์ใน PVC อาจทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มได้ถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นนิยมเรียก Hydrophilic plastic เช่น Nylon และ Ethylene vinyl alcohol (EVOH) เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูง จะดูดซับน้ำเข้าไปในพลาสติกได้ น้ำส่วนนี้จะทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2) ตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรต่อรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไททาเนียมไดออกไซด์ และทัลคัม จะมีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาดและรูปร่างของสาร อย่างไรก็ตามตัวเติมส่วนใหญ่จะทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

3) สารคู่ควบ (Coupling agent) ใช้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับตัวเติม เช่น ทิทาเนต (Titanate) และซิลเลน (Silane) จะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซลดลงได้

ง. สมบัติของสารแพร่

ขนาด รูปร่างและสภาพผิวของสารแพร่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะแพร่ได้เร็วกว่าพวกที่มีโมเลกุลใหญ่ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.7 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าทั้งออกซิเจนและไนโตรเจน แต่ค่าอัตราการซึมผ่านกลับสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลมีผลต่อการแพร่ แต่ไม่มีผลกับการละลาย จากตารางที่ 2.8 จะพบว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าก๊าซอื่นมาก ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าก๊าซอื่นไปด้วย

สารแพร่ที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรงจะแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลเป็นวงหรือเป็นกิ่งก้าน และสารที่มีขั้วจะแพร่ผ่านแผ่นพลาสติกที่มีขั้วได้ดี โมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะแพร่ผ่านพลาสติกที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าพลาสติกที่มีขั้ว

ตารางที่ 2.7 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ [1]

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

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การละลายและค่าอัตราการซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน ของ LDPE ที่ 25°C [1]

Gas	$D \times 10^6$ cm ² /S	$S \times 10^2$ ml (STP)/ml.atm	$Pm \times 10^{10}$ ml (STP).cm/cm ² .s.cm.Hg
CO ₂	0.37	25.8	12.6
O ₂	0.46	4.78	2.88
N ₂	0.32	2.31	0.969

จ. อุณหภูมิ

ค่าการซึมผ่าน การแพร่ และการละลายจะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียล ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ดังนี้คือ

$$Pm = Pm_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (2.4)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (2.5)$$

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{E_S}{RT}\right) \quad (2.6)$$

Pm_0, D_0, S_0 หมายถึง ค่าคงที่ของการซึมผ่าน การแพร่และการละลาย ตามลำดับ

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

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

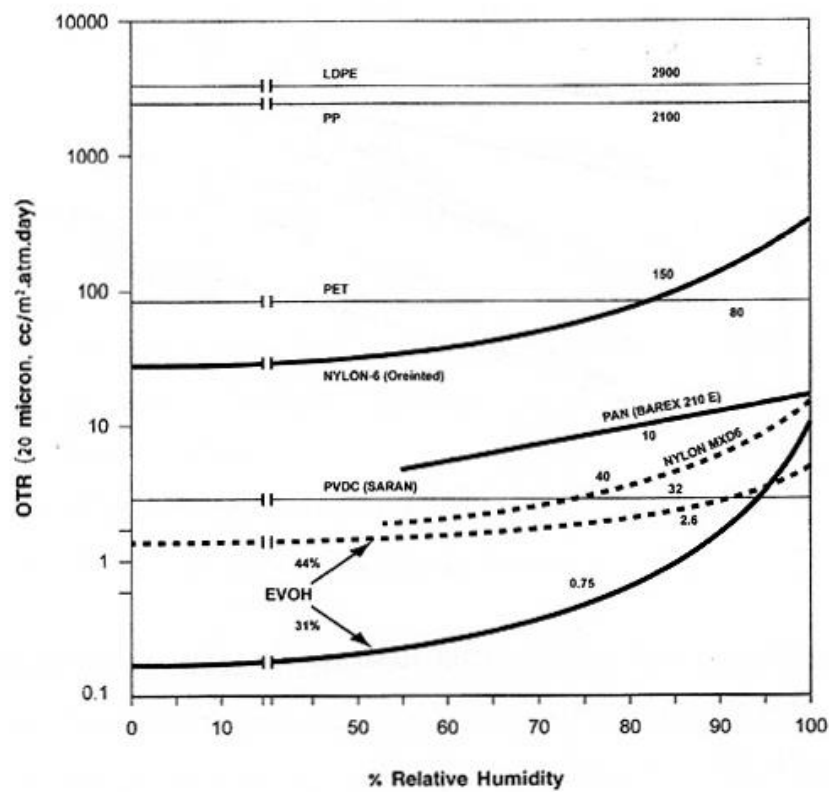
T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

การใช้สมการของอาร์เรเนียสอธิบายผลของอุณหภูมิต่อการซึมผ่านจะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงค่าอุณหภูมิ โดยจะใช้สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างและไม่อยู่ในช่วงเดียวกับค่า T_g ของพลาสติกนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g พลาสติกจะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายยาง (Rubbery state)

โมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้มาก ทำให้การแพร่และการซึมผ่านของก๊าซเกิดได้ง่าย ค่า E_p และ ค่า E_D จึงต่ำทำให้ค่า P_m มีค่าสูง (สมการที่ 2.4) ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของพลาสติก จะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า คล้ายแก้ว (Glassy state) การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพลาสติกเกิดได้ยากขึ้น และมีค่า E_p และ E_D สูงทำให้มีค่า P_m มีค่าลดลง

ฉ. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พลาสติกบางชนิดสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย (Hydrophilic plastic) เช่น EVOH และ Nylon ความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้มากขึ้น การซึมผ่านของก๊าซจึงสูงขึ้น ซึ่งน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้ E_p ลดลง ค่า P_m จึงสูงขึ้น พลาสติกพวกนี้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง การซึมผ่านของก๊าซจะสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.5 สำหรับพลาสติกที่ไม่ดูดน้ำหรือความชื้น เรียก Hydrophobic plastic เช่น LDPE, PP และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVDC) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ



ภาพที่ 2.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน สำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [1]

2.2.3 การตรวจวัดการซึมผ่าน [1]

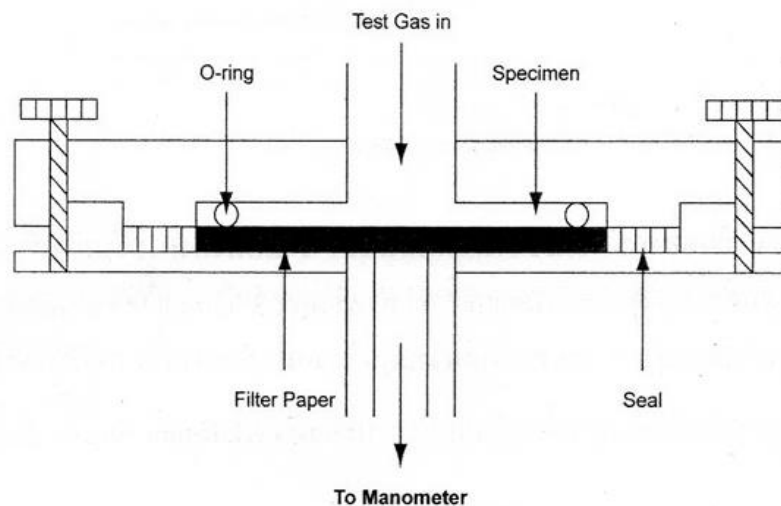
การตรวจวัดการซึมผ่าน (Permeation measurment) การแพร่ และการละลายของสาร สำหรับพลาสติก อาศัยหลักการตรวจวัดการถ่ายเทมวลของสารนั้นผ่านพลาสติก ซึ่งอาจใช้การ

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความดันหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร หรือการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอื่นที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถ่ายเทผ่านพลาสติกมา

2.2.3.1 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ

ก. วิธีการตรวจวัดความดันที่เพิ่มขึ้น (Pressure increase method)

จากหลักการของก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) ค่าความดันของก๊าซจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซนั้นๆ เมื่ออยู่ในปริมาตรคงที่และอุณหภูมิคงที่ วิธีการตรวจวัดนี้จึงใช้วิธีการตรวจวัดความดันของก๊าซที่ซึมผ่านพลาสติกจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซได้ การตรวจวัดนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1434 นิยมเรียกวิธีนี้ว่า Manometric method ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซผ่านพลาสติกด้วยวิธี Manometric method [1]

นำฟิล์มพลาสติกทดสอบวางบนกระดาดกรองเพื่อช่วยพยุงฟิล์มให้สามารถทนทานต่อความดันที่ใช้ได้ ปิดชุดทดสอบให้สนิทด้วยวงแหวน เรียก O-ring ผ่านก๊าซทดสอบไปที่ด้านหนึ่งของพลาสติก โดยทั่วไปใช้ความดัน 1 บรรยากาศ อีกด้านหนึ่งของพลาสติกจะเป็นสุญญากาศและต่อเข้ากับมาโนมิเตอร์ ก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านพลาสติกไป จะทำให้ความดันในมาโนมิเตอร์สูงขึ้น นำค่าความดันที่เพิ่มขึ้นนี้มาเขียนกราฟกับเวลา เมื่อถึงสถานะคงตัวจะได้กราฟเส้นตรง หาความชันของกราฟและนำไปคำนวณหาอัตราการซึมผ่านตามสมการที่ 2.7

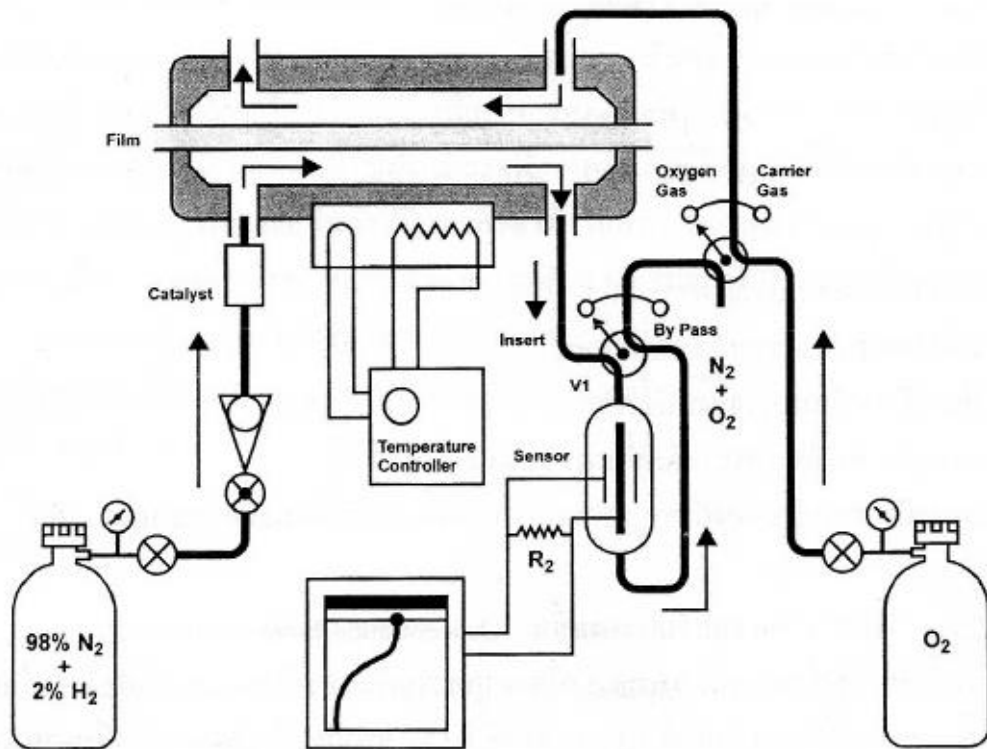
$$P_m = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \frac{V}{T} \times \frac{273}{760} \times \frac{l}{A \times (p_1 - p_2)} \quad (2.7)$$

T	หมายถึง อุณหภูมิขณะตรวจวัด, K
V	หมายถึง ปริมาตรของเซลล์ทดสอบ
l	หมายถึง ความหนาของฟิล์มพลาสติก

- A หมายถึง พื้นที่ของฟิล์มพลาสติกที่มีการซึมผ่าน
 p_1, p_2 หมายถึง ความดันของก๊าซทดสอบและความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก

ข. วิธีตรวจวัดความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (Concentration increase method)

วิธีนี้นิยมเรียกว่า Isostatic method เนื่องจากความดันของก๊าซทดสอบและก๊าซเฉื่อยที่เป็นตัวพา (Sweep gas) ซึ่งอยู่คนละด้านของพลาสติกจะมีค่าเท่ากัน ก๊าซทดสอบจะซึมผ่านพลาสติกมายังอีกด้านที่มีก๊าซเฉื่อย โดยมีความแตกต่างของความดันย่อย (Partial pressure) ของก๊าซทดสอบเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force)



ภาพที่ 2.7 แผนภูมิการตรวจวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ตามมาตรฐาน ASTM D3985 [1]

ปริมาณก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านมานี้ สามารถตรวจวัดได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การใช้ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) การวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) การใช้เทคนิคกัมมันตรังสี (Radiation technique) และการใช้อิเล็กโทรดเฉพาะ (Special electrode) เป็นต้น การตรวจวัดนี้เป็นไปตาม ASTM D3985 ดังแสดง แผนภูมิการตรวจวัดในภาพที่ 2.7

การตรวจวัดปริมาณก๊าซทดสอบที่ซึมผ่านพลาสติกมาอยู่ในก๊าซเฉื่อย จะใช้วิธีที่แตกต่างกันดังกล่าวนมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้ขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้ โดยทั่วไปผู้ผลิตเครื่องมือนิยม

ที่จะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแปลงค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ และแสดงค่าผ่านเครื่องบันทึกหรือจอแสดงค่าวิธี Isostatic method สามารถใช้งานได้กว้างขวางกว่า Monometric method ด้วยเหตุผล 2 ประเด็นสำคัญ คือ

- 1) สามารถปรับความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซทดสอบและก๊าซเฉื่อยได้ ทำให้สามารถใช้ตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซสำหรับพลาสติกที่ไวต่อความชื้น เช่น EVOH, Nylon และ Cellophane ได้
- 2) สามารถใช้ตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของตัวอย่างที่เป็นภาชนะบรรจุขึ้นรูป เช่น ขวด ถ้วย ถาด เป็นต้น โดยต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมจากผู้ผลิตเครื่องมือ

2.2.3.2 การตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การแสดงค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation) มีดังนี้

- Water vapor transmission rate หรือ WVTR

$$WVTR = \frac{\text{weight of water vapor}}{\text{area} \times \text{time}} \quad (2.8)$$

$$WVTR = \frac{Q}{A \times t} \quad (2.9)$$

WVTR นิยมแสดงเป็นหน่วย $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$

- Water vapor permeability หรือ WVP

$$WVP = WVTR \cdot \frac{1}{\Delta p} \quad (2.10)$$

$$WVP = \frac{Q}{A \times t} \cdot \frac{1}{\Delta p} \quad (2.11)$$

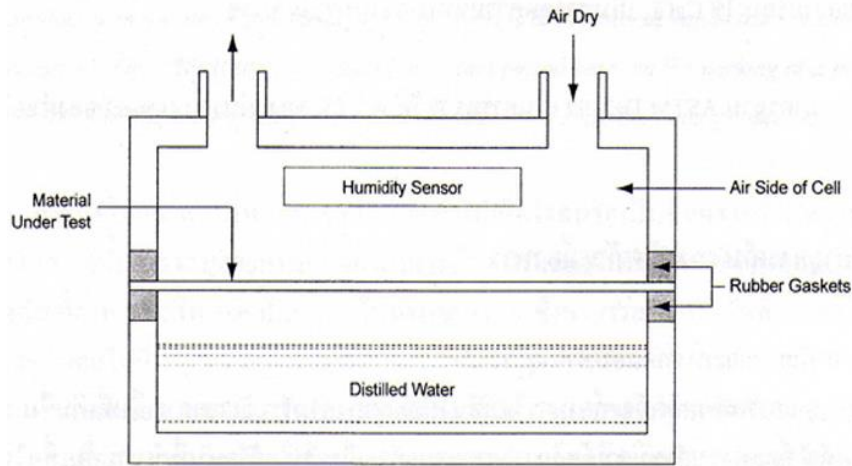
WVP แสดงเป็นหน่วย $\text{g} \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{cm Hg}$

- Permeance หรือ $\frac{WVP}{l}$

$$\text{Permeance} = \frac{WVTR}{\Delta p} \quad (2.12)$$

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

Q	หมายถึง	น้ำหนักของไอน้ำ
A	หมายถึง	พื้นที่ของฟิล์มพลาสติกที่มีการซึมผ่าน
l	หมายถึง	ความหนาของฟิล์มพลาสติก
Δp	หมายถึง	ผลต่างของความดันของก๊าซทดสอบกับความดันอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติก



ภาพที่ 2.8 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด WVTR [1]

จากภาพที่ 2.8 ในเซลล์ทดสอบส่วนล่างจะบรรจุน้ำกลั่น เพื่อปรับสภาพอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% แผ่นฟิล์มทดสอบจะถูกตรึงแยกส่วนล่างและส่วนบนของเซลล์ทดสอบ ด้านบนจะผ่านอากาศแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดก่อนเริ่มทำการทดสอบ เมื่อไอน้ำซึมผ่านฟิล์มขึ้นมาอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไอน้ำ (Humidity sensor) จะทำงาน ทำให้สามารถหาค่า WVTR ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ การตรวจวัดวิธีนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F372 และ ASTM F1249

2.3 บรรจุภัณฑ์สำหรับรักษาคุณภาพพืช [17]

ฟิล์มสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นกับการนำไปใช้งานที่ต่างๆ กัน ที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ฟิล์มประเภทนี้สามารถให้ไอน้ำ และก๊าซผ่านไปได้ นิยมใช้กันมากในการปิดด้านบนของถาดโฟมที่ใส่ผลไม้สด แต่ฟิล์มชนิดนี้ไม่เหมาะในการทำถุง
- พอลิพรอพิลีน (Propylene, PP) มีลักษณะโปร่งใสกว่าพวก LDPE สามารถทำเป็นถุงได้และใช้ทำถาด สามารถใช้ความร้อนปิดผนึกได้
- เซลโลเฟน (Cellophane) มีใช้กันอยู่หลายชนิด อาจใช้ปิดด้านบนของถาดโฟม ทำเป็นถุง มีลักษณะโปร่งแสง ไม่สามารถทำให้ติดกันด้วยความร้อน ยอมให้ความชื้นผ่านได้

– Rubber hydrochloride หรือ Pliofilm เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก ป้องกันการผ่านของไอน้ำได้ดีใช้เป็นถุงบรรจุผัก และผลไม้สดที่มีน้ำหนักมากๆ อากาศและความชื้น ผ่านไปได้ยากมาก ถ้าใช้ต้องมีการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและความชื้น

ในปัจจุบันมีการใช้แผ่นพลาสติกห่อผลิตผลกันมากขึ้น โดยแผ่นพลาสติกจะช่วยในการป้องกันและรักษาผลิตผลให้อยู่ได้นาน โดยทั่วไปแผ่นพลาสติกจะช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมรอบๆ ผลิตผล (Microclimate) เหมาะสมต่อการเก็บรักษาทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสมบัติด้านการซึมผ่าน

สมบัติการซึมผ่านของฟิล์มขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตพอลิเมอร์ เช่น พอลิเมอร์กิ่งผลึก ในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนที่เป็นผลึก เป็นส่วนที่ไม่ยอมให้ก๊าซหรือไอน้ำซึมผ่าน และส่วนที่เป็นอสัณฐานสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นส่วนที่ก๊าซหรือไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) การเคลื่อนที่ของสายโซ่จะถูกจำกัด ปริมาตรอิสระ (Free volume) จะถูกจำกัดเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอิสระ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญมากต่อความสามารถของโมเลกุลที่จะแพร่ผ่านวัสดุความแตกต่างของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ขึ้นกับ

- ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการซึมผ่านของก๊าซ
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์
- อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ต่อการละลายได้ของก๊าซในส่วนที่เป็นอสัณฐานของสายโซ่พอลิเมอร์

ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงถ้าส่วนของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยการยืด (Stretching) ฟิล์มเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกและลดความสามารถในการซึมผ่านลง

2.3.1 ความต้องการทางบรรจุภัณฑ์ของผักและผลไม้สด [1]

การเลือกวัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องพิจารณาสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

ก. สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าออกได้เหมาะสม และสอดคล้องกับอัตราการหายใจของพืช เพื่อป้องกันมิให้ปริมาณออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุมีน้อยเกินไป จนกระทั่งพืชขาดออกซิเจนสำหรับหายใจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมาจะต้องระบายออกจากภาชนะบรรจุได้พอควร เพื่อป้องกันการสะสมจนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงเกินไปจน

ทำลายเซลล์ของพืชได้ อัตราการหายใจของพืชมีความแตกต่างกันมากขึ้นกับสายพันธุ์ ความแก่อ่อน สรีระของพืช สภาพทางกายภาพของพืช และอุณหภูมิเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะของพืชแต่ละชนิด

ข. สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราการหายใจ และการคายน้ำของพืช พืชที่หายใจเร็วจะคายน้ำออกมามาก ภาชนะบรรจุต้องยอมให้ไอน้ำผ่านออกไปได้ดี เพื่อป้องกันการสะสมของไอน้ำภายในภาชนะ จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวแล้วกลั่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะทำให้พืชเน่าเสียได้เร็วขึ้น หากพืชหายใจช้า ภาชนะบรรจุควรให้ไอน้ำผ่านได้น้อย เพื่อป้องกันการเหี่ยวเฉาของพืช ในกรณีที่วัสดุบรรจุโดยเฉพาะพลาสติกที่นิยมใช้มาก มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ อาจจะต้องเจาะรูช่วยระบายไอน้ำ หรือเคลือบสารประเภทป้องกันการเกิดหยดน้ำ เรียกว่า Anti-fogging agent ที่ผิวด้านในของฟิล์ม

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [18]

ชนิดของพลาสติก	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ O_2 (cc.25 $\mu m/m^2$.atm.day)	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO_2 (cc.25 $\mu m/m^2$.atm.day)
PET	52-130	180-390
PVC	620-2,248	4,263-8,138
LDPE	3,900-13,000	7,000-77,000
PP	1,300-6,400	7,700-21,000
PS	10,000-260,000	2,600-7,700

ตารางที่ 2.10 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [19]

ชนิดของพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (cc/25 $\mu m/m^2$.day ที่ 38°C, 90%RH)
PET	16-20
PVC	80-500
HDPE	4.7
LDPE	16-24
PP	11

ค. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ และสามารถป้องกันแรงกระทำจากภายนอก ที่จะทำให้ผักและผลไม้ช้ำและเน่าเสียได้ สมบัติเชิงกลนี้ขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้สด ผักและผลไม้ที่มีเนื้ออ่อนและเกิดรอยช้ำได้ง่าย เช่น องุ่น สตอเบอรี่ ผักใบชนิดต่างๆ ย่อมต้องการภาชนะบรรจุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าผักและผลไม้เนื้อแข็ง หรือผลไม้ที่มีเปลือกแข็ง เช่น ส้มโอ มังคุด จิง ข่า เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบและขนาดของภาชนะยังมีส่วนต่อการเลือกวัสดุบรรจุ เช่น การบรรจุ องุ่นสด 500 กรัม ในถุงพลาสติกเจาะรู จะต้องเลือกพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึงขาดได้ดี ในขณะที่การบรรจุในถาดเทอร์โมฟอร์มพร้อมฝาปิด ต้องเลือกพลาสติกที่มีความแข็งแรง (Stiffness) เพื่อความคงรูปของภาชนะบรรจุ น้ำหนักบรรจุที่เพิ่มขึ้น จะต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย

ง. สมบัติทนทานต่อน้ำ (Water resistance)

วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้จะต้องทนทานน้ำได้ดีระหว่างการขนส่งและจัดจำหน่าย ภาชนะบรรจุผักและผลไม้สดมักสัมผัสกับน้ำ เช่น น้ำจากการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศ น้ำจากการฉีดหรือการพรมเพื่อรักษาความสด หากวัสดุนั้นดูดซับน้ำได้ จะต้องยังคงความแข็งแรงได้เพียงพอสำหรับการใช้งาน โดยทั่วไปมักเลือกใช้พลาสติกที่มีค่าการดูดซับน้ำต่ำจึงไม่มีปัญหา ในขณะที่กระดาษจะดูดซับได้มาก จึงมักเคลือบกระดาษและกล่องกระดาษด้วยพลาสติก

จ. สมบัติทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ

เนื่องจากการเก็บรักษาผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดอายุการเก็บได้ วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สดจึงต้องทนทานอุณหภูมิต่ำได้ดี สมบัติทางการบรรจุบางสมบัติของพลาสติกจะขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น สมบัติด้านการซึมผ่าน ความแข็งแรง เป็นต้น จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับกระดาษเคลือบไข ต้องเลือกชนิดและความหนาของไขให้เหมาะสมที่อุณหภูมิต่ำๆ ไขบางชนิดอาจแตกเป็นชั้นเล็ก และหลุดออกมาได้

ฉ. ความยืดหยุ่น (Flexibility) ของขนาดและรูปร่าง

เนื่องจากผักและผลไม้มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอ การออกแบบภาชนะบรรจุภัณฑ์และการเลือกใช้วัสดุบรรจุจะต้องสามารถปรับขนาดและรูปร่างได้พอสมควร ให้เข้ากับขนาดและรูปร่างของผักและผลไม้ได้ง่าย เช่น กล่องบรรจุสับปะรดทั้งผล ควรออกแบบให้มีมิติภายนอกคงที่เพื่อความสะดวกในการขนส่งและการจัดการ แต่มีมิติภายในกล่องควรปรับเปลี่ยนได้พอควรให้เหมาะสมกับขนาดของสับปะรดแต่ละผลที่บรรจุ

ช. ความโปร่งใส (Transparence)

ผู้บริโภคส่วนใหญ่ต้องการมองเห็นและสัมผัสผักและผลไม้สดก่อนตัดสินใจซื้อ และบางครั้งต้องการเลือกด้วย วัสดุและภาชนะบรรจุต้องโปร่งใส เพื่อให้ผู้บริโภคมองเห็นสินค้าได้

ชัดเจน และควรมีการออกแบบที่ย่อมให้มีการสัมผัสหรือเลือกสินค้าได้บ้าง เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค แต่ควรมีขอบเขตจำกัดด้วยเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการสัมผัส การจับ การบีบ การตกกระแทก และการลักขโมย

ข. ส่งเสริมการตลาด

ภาชนะบรรจุที่เลือกใช้นอกจากจะทำหน้าที่ด้านเก็บรักษาแล้ว ควรส่งเสริมการจัดการและการตลาดด้วย เช่น กล่องกระดาษหรือลังไม้ที่ใช้ขนส่งผลไม้ ควรออกแบบทั้งโครงสร้างและกราฟิกให้สามารถใช้เป็นภาชนะสำหรับการจำหน่ายปลีกได้ เช่น ถุงตาข่ายบรรจุส้ม 1 กิโลกรัม จะออกแบบให้มีแถบคล้ายริบบิ้นติดที่หัวและท้ายถุง เพื่อหิ้วถุงได้สะดวก และสื่อสารข้อมูล เป็นต้น

2.3.2 การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

ผลิตภัณฑ์จะเก็บรักษาได้ดีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% การเก็บรักษาในภาชนะบรรจุที่ใช้แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติก จะเกิดการสะสมความชื้นเพิ่มขึ้นอาจสูงถึง 100% จึงต้องเจาะรูถุงพลาสติกเพื่อให้ไอน้ำภายในถุงพลาสติกได้ระบายออกไป เป็นการช่วยปรับความชื้นภายในถุงพลาสติกให้เหมาะสม ดังนั้นการเก็บผักและผลไม้ไว้ในภาชนะที่เหมาะสมจะยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นาน

แผ่นพลาสติกหรือถุงพลาสติกที่ใช้นั้น ควรมีรูระบายอากาศ การบรรจุในถุงควรมีรูอย่างน้อย 2-4 รู ขนาด $1/4$ - $1/8$ นิ้ว เพื่อระบายอากาศผลิตภัณฑ์จะไม่ขาดก๊าซออกซิเจน และไม่เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่วางขายในสภาพที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งการเก็บรักษาในสภาพถุงที่ไม่มีรูอาจเกิดผลดี เพราะเกิดสภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติขึ้นมาได้ แต่ควรระมัดระวังการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติหรือมีรสชาติแปลกกอสอลเกิดขึ้น [19]

สมบัติของฟิล์ม พลาสติกประเภทที่ไม่มีการเจาะรู (Continuous films) และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก (Microperforation) แสดงในตารางที่ 2.11 เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีอัตราการหายใจแตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการหายใจสูงมักมีอายุการเก็บรักษาสั้น การยืดอายุและรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ ต้องอาศัยสมบัติของวัสดุที่นำมาทำเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของฟิล์มพลาสติก ดังนั้นฟิล์มพลาสติกเพื่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ จึงเป็นฟิล์มที่ควรมีสมบัติยอมให้ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซ เอทิลินและความชื้น แพร่ผ่านด้วยอัตราที่เหมาะสม โดยสามารถดัดแปลงสภาวะบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุ (Modified atmosphere, MA)

สภาวะบรรยากาศดัดแปลงในภาชนะบรรจุ (MA) ส่งผลต่อการชะลอการหายใจ การคายน้ำ ลดการเสื่อมสภาพ ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งความสามารถใน

การเลือกก๊าซแต่ละชนิดให้แพร่ผ่านด้วยอัตราที่แตกต่างกันของฟิล์ม MA เป็นผลมาจากการควบคุมโครงสร้างของพอลิเมอร์ ได้แก่ การควบคุมการกระจายตัวของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อปรับแต่งโครงสร้างหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาค ซึ่งมีผลต่อการผ่านของก๊าซในฟิล์มที่ยอมให้ผ่านได้สูง และมีผลต่อสมบัติการควบคุมความสามารถในการเลือกผ่านของก๊าซ (Perm-selectivity, P)

ตารางที่ 2.11 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีเจาะรู และฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก
[21-22]

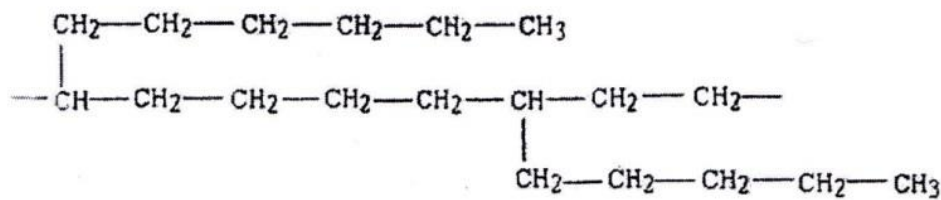
สมบัติ	ฟิล์มพลาสติกที่ไม่มีการเจาะรู	ฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูขนาดเล็ก
อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซ	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์	ก๊าซผ่านทางเนื้อพอลิเมอร์และผ่านทางรูที่ถูกเจาะ
ความสามารถในการซึมผ่าน	CO ₂ มากกว่า O ₂ 2-8 เท่า	CO ₂ มากกว่า O ₂ 0.77 เท่า
อุณหภูมิ	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO ₂ และ O ₂ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซ CO ₂ และ O ₂ ไม่มีผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์	มาก, ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณการเจาะรู

หลักการและความแตกต่างในการดัดแปลงสภาวะบรรยากาศ เมื่อเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกพบว่า สภาวะบรรยากาศในฟิล์มพลาสติกที่มีการเจาะรูจะไม่เกิดการดัดแปลงจึงไม่เหมาะสมต่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ มีการซึมผ่านของทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสภาวะบรรยากาศในฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซผ่านได้น้อย (Barrier films) จะเกิดสภาวะบรรยากาศดัดแปลง แต่มีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำเกินไป และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไป อาจเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนผลิตผลมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติได้ สำหรับสภาวะบรรยากาศในฟิล์ม MA ค่าความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มสามารถปรับให้เข้ากับอัตราหายใจของผลิตผล ส่งผลต่อการควบคุมสัดส่วนของก๊าซภายในภาชนะบรรจุ โดยสามารถดัดแปลงสภาวะบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน ซึ่งสามารถชะลออัตราการหายใจและการเสื่อมสภาพ ทำให้รักษาคุณภาพผลิตผลและยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตผล อุณหภูมิการเก็บรักษา และลักษณะการบรรจุด้วย

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ LDPE [23]

LDPE เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มหด ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดีทนต่อการทิ่มทะลุ และการฉีกขาด พร้อมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE สามารถปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของ LDPE [24]

2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE [24]

- มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับ HDPE
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
- ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นมันเงาดี และมีความเป็นฝ้าต่ำ
- เป็นฉนวนไฟฟ้า (Dielectric property) ที่ค่อนข้างดี

LDPE มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะราคาไม่แพง ทนต่อสารเคมีทั้งกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย มีความยืดหยุ่นและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้

ตารางที่ 2.12 สมบัติทั่วไปของ LDPE [24]

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	90-800
ความแข็งแรงกระแทก	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน [24]

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดที่บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องแบกรับน้ำหนักมากๆ ได้แก่

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมอบึง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลผลิตทางการเกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย ฯลฯ
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ กระดาษชำระ ฯลฯ
- ฟิล์มหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้

รัดสินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนส่งเป็นหน่วยใหญ่

2. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นิ่มเล็กน้อย งานฉีดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง

3. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์ม บนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ขนมอบบี้ ซึ่งต้องการสมบัติป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ

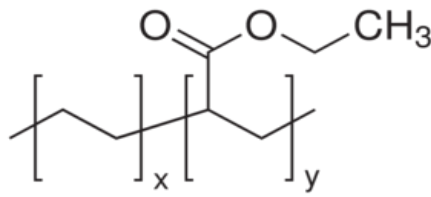
5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยานยนต์ ตลอดจนถึงงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

2.5 พอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีน (Ethylene copolymer)

2.5.1 เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA)

2.5.1.1 ลักษณะทั่วไปของ EEA [25]

เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-ethyl acrylate copolymer, EEA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate, EA) โดยทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เชนผ่านกลไกอนุมูลอิสระ (Free-radical polymerization) ในเครื่องปฏิกรณ์พอลิเอทิลีนความดันสูง (High pressure polyethylene reactor) โดยเอทิลอะคริเลตเป็นส่วนที่ให้ความมีขี้และความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณ EA จะทำให้ EEA มีขี้ ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความหยุ่นตัว (Resilient) ที่มากขึ้น ซึ่งความมีขี้ที่มากขึ้นของ EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดและการรับหมักของพื้นผิว



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของ EEA [26]

2.5.1.2 สมบัติบางประการของ EEA [27]

- ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 0.93
- มอดุลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 28-52 MPa
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด เท่ากับ 11-14 MPa
- ความต้านทานแรงกดอัด ณ จุดครากหรือจุดขาด เท่ากับ 21-25 MPa
- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 700-750%
- ค่าความแข็งแรงกด Shore D เท่ากับ 27-38
- ค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 0.04% โดยน้ำหนัก
- ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกโดยชิ้นงานไม่มีรอยบากหนา 1/8 นิ้วเท่ากับ

450-550 v/mi

- อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป
 - สำหรับเทคนิคกดอัด เท่ากับ 93-149°C
 - สำหรับเทคนิคการฉีดขึ้นรูป เท่ากับ 121- 260°C

2.5.1.3 สมบัติในการใช้งานของ EEA เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE [25]

- มีความต้านทานต่อการแตกเพิ่มขึ้น
- ความสามารถในการทนการล้าจากการโค้งงอเพิ่มขึ้น
- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น
- สมบัติที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น
- อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลง

2.5.1.4 การประยุกต์ใช้งาน [25]

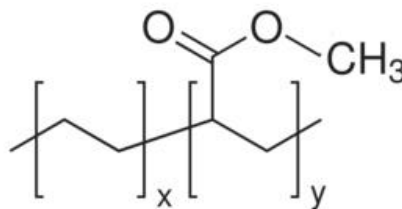
EEA copolymer เข้ากันได้ดีกับพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE), LDPE, LLDPE, HDPE และ PP เป็นต้น และสามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดรีด (Extrusion), กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป EEA มีการประยุกต์ใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น

- มักใช้เป็นชั้นยึดติด (Tie layer) ในฟิล์มแบบหลายชั้น (Multilayer films)
- ผสมกับพอลิเมอร์อื่นเพื่อปรับปรุงความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature toughness) และความต้านทานต่อการแตก (Stress crack resistance)
- กาวแบบหลอมขณะร้อน (Hot-melt adhesive) และ วัสดุยาแนวรอยต่อ (Sealants)
- แผ่นลามิเนต (Laminate sheet)
- ส่วนประกอบสายไฟและสายเคเบิล (Wire and cable compound)
- ชิ้นส่วนที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปและอัดรีด
- สายยางและท่อที่มีความยืดหยุ่น (Flexible hose and tubing)

2.5.2 เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EMA)

2.5.2.1 ลักษณะทั่วไปของ EMA [25]

เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-methyl acrylate copolymer, EMA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง เอทิลีนกับ เมทิลอะคริเลต (Methyl acrylate, MA) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันภายใต้ความดันสูง โดยมีการนิคมอนอเมอร์เมทิลอะคริเลต นิดเข้าไปยังถังปฏิกิริยาที่มีก๊าซเอทิลีนเพื่อผลิตโคพอลิเมอร์แบบ สุ่ม



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของ EMA [28]

2.5.2.2 สมบัติบางประการของ EMA [29]

- ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 0.942-0.945
- โมดูลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 83 MPa
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และจุดขาด เท่ากับ 11 MPa
- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 740%
- อุณหภูมิในการขึ้นรูปในกระบวนการอัดรีด เท่ากับ 93-327°C

2.5.2.3 สมบัติในการใช้งาน EMA เปรียบเทียบกับ LDPE [25]

- โมดูลัสของการโค้งงอลดลง

- อุณหภูมิของการอ่อนตัว (Vicat softening temperature) ลดลงจาก 90°C เป็น 59°C
- ค่าของความคงทนต่อสภาพแวดล้อม (Environmental stress crack resistance, ESCR) เพิ่มขึ้น

2.5.2.4 การประยุกต์ใช้งาน [25]

EMA เป็นหนึ่งในอัลฟาโอเลฟินโคพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน เช่น

- ใช้เป็น Tie layer เพื่อเพิ่มการยึดติดกับพอลิโอเลฟิน, ไอโอโนเมอร์ (Ionomer), พอลิเอสเทอร์ (Polyester), พอลิคาร์บอเนต (PC), EVA, PVDC, เอทิลีนอะคริลิก-แอซิดโคพอลิเมอร์ (EAA), PET ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPET) และ PP ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPP)
- ท่อที่มีความยืดหยุ่นที่มีความต้านทานต่อการแตกและความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature impact strength) ที่ดี
- EMA ถูกนำมาผสมกับ LDPE, PP, PS, Nylon และ PC เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงกระแทก ความเหนียว สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิว และการยึดติดเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความแข็งแรงลดลง
- นิยมใช้ใน Extrusion coating เพราะ EMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

2.5.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA)

2.5.3.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA [30]

เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตด (Vinyl acetate, VA) โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตด โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่าของกรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulfates โดยมีไวนิลอะซิเตดเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดความยืดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก พบว่าถ้าปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

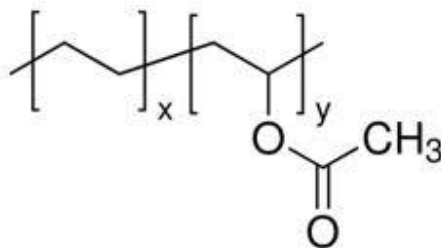
2.5.3.2 สมบัติบางประการของ EVA [30]

- มีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 0.926-0.95
- จุดเปราะ (Brittle Point) อยู่ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -70°C
- จุดอ่อนตัว (Softening Point) อยู่ระหว่าง 60-80°C

- ค่าความแข็งกด Shore D เท่ากับ 90-95
- ค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 2.9-19.6 MPa
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 500-700%
- สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเน

เทตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีความโค้งงอที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
- ทนต่อสภาวะการใช้งาน การชะล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ดี โดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของ EVA [31]

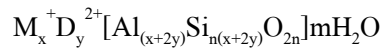
2.5.3.3 การประยุกต์ใช้งาน [30]

- EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive) และใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์
- EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
- ใช้ในงานผลิตรองเท้า เบาะรองนั่ง ฉนวนสายไฟและสายเคเบิล
- ปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส และมีความมันวาว

2.6 ซีโอโลต์เอ [32-33]

ซีโอโลต์ เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูปพหุสามมิติ และมีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 ตัวล้อมรอบ การแทนที่ Si ด้วย Al ทำให้เกิด

ความไม่สมดุลของประจุ จึงต้องมีประจุบวกเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของประจุ สูตรทางเคมีของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



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

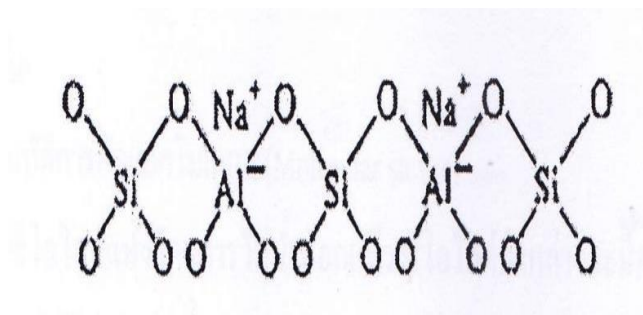
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมาก ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ในโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันซึ่งมีไอออนประจุบวกและโมเลกุลของน้ำอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ลักษณะของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันของซีโอไลต์จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร

2.6.1 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

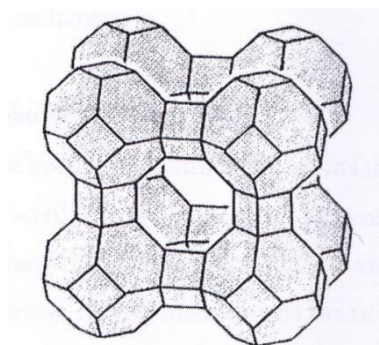
ซีโอไลต์เอ มีสูตรทางเคมีคือ $Na_{12}[(AlO_2)_2(SiO_2)] \cdot 27H_2O$ โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเท่ากับ 4.2 อังสตรอม

2.6.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

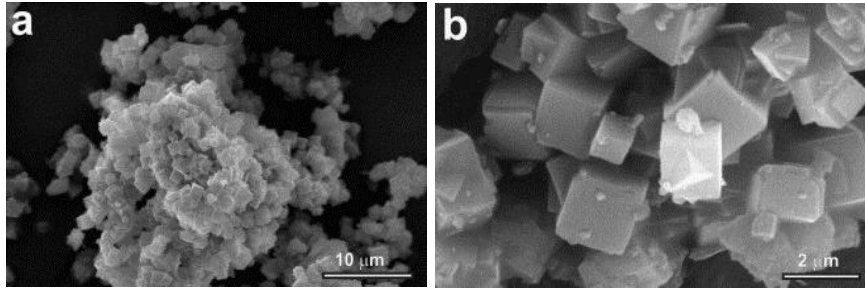
ซีโอไลต์เอ มีวิธีการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเจลคล้ายซีโอไลต์อื่นๆ ทั่วไปโดยใช้อะลูมินา (นิยมใช้โซเดียมอะลูมินेट) และซิลิกา (นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต) ผสมกันในสารละลายที่ทำให้เป็นเจลซึ่งสารละลายเหล่านั้นได้แก่ สารละลายของอัลคาไล เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) เอมีน หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจลแล้ว จะนำเจลที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70-300°C จะได้ผลึกของซีโอไลต์ในรูปแบบของโซเดียมไอออน (Na^+)



ภาพที่ 2.13 Frame work ของซีโอไลต์เอ [33]



ภาพที่ 2.14 โครงผลึกของซีโอไลต์เอ [34]



ภาพที่ 2.15 ภาพขยายของซีโอไลต์เอ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

2.6.3 สมบัติของซีโอไลต์เอ

- สารดูดน้ำ (Desiccants)

เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้ซีโอไลต์เอมีความมีขั้วสูงจึงสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ดี เช่น น้ำ และเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี

- การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchangers)

เนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วจึงทำให้ดูดซับน้ำได้ดี น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่ถูกละลายในซีโอไลต์เอ โดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลา ดังสมการ



ไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นๆ ที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยาลักษณะนี้จะเกิดเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูงซึ่งดูดซับน้ำได้ดี เช่น ซีโอไลต์เอ

- สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieves)

เมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้ว ซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับความเป็ขั้วของซีโอไลต์และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เช่น ซีโอไลต์เอซึ่งมีขั้วสูง (มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ) สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูง ส่วนซีโอไลต์ที่มีขั้วต่ำจะดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วต่ำด้วยเหตุนี้ ซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการคัดแยกโมเลกุล

2.6.4 การนำซีโอไลต์เอไปใช้งาน

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างแบบซูเปอร์เคจ (Supercage) เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Specio-specific catalysis) พื้นที่ภายในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนั้นมีมากในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร ขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะมีความเฉพาะเจาะจง

(Selective) ในการจำกัดขนาดของโครงสร้างที่จะเข้าออกของซีโอไลต์ นอกจากนี้ยังใช้งานอย่างกว้างขวางในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนสาร และแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกด้วย และเนื่องจากการที่ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงและมีขนาดรูพรุนจำนวนมาก

2.7 พอลิเมอร์ผสม [25-26]

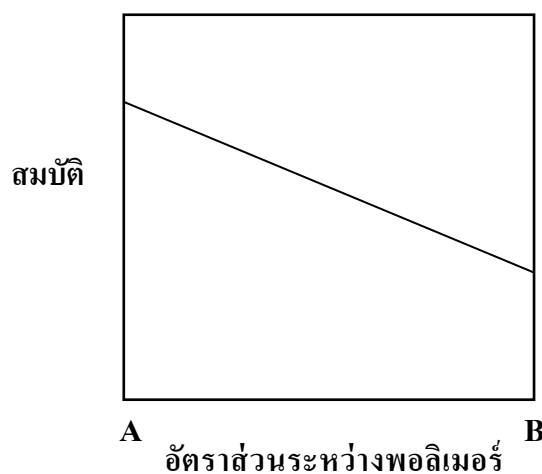
พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการผสมพอลิเมอร์เพื่อเตรียมวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะได้จากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้ากันเพื่อปรับปรุงสมบัติซึ่งไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันของการผสมเป็นหลัก ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ดี จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกันอย่างชัดเจน โดยแต่ละวัฏภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ค่อนข้างต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

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

ถ้าพอลิเมอร์ผสมซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลและเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible)

2. พอลิเมอร์ไม่ผสมเข้ากัน (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

ΔG_{mix} คือ พลังงานอิสระกิบส์ในการผสม

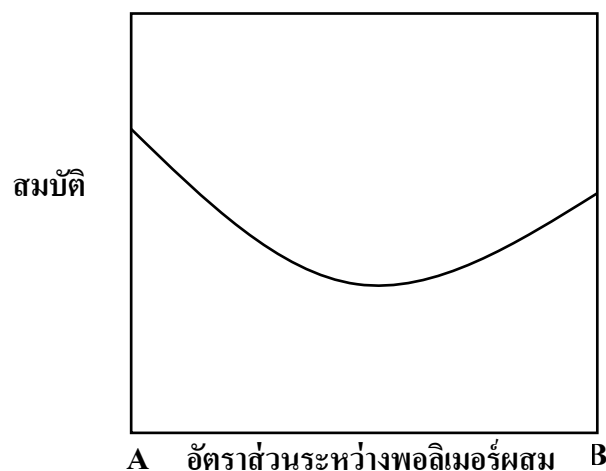
ΔH_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค คือ พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสม เรียกว่า วัฏภาคหลัก (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า วัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดไม่ผสมเข้ากันและแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคโดยระหว่างวัฏภาคอาจจะมีการดึงดูดระหว่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเสียสภาพได้แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมากๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจจะลดต่ำมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีไม่ผสมเข้ากันได้ (Immiscible)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.S Borah และ T.K. Chaki [38] ทำการศึกษา พฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต (Dynamic rheology) พื้นฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของ LDPE/EMA ในอัตราส่วน 60/40 โดยมีการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (0, 1, 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก) ทำการเตรียมฟิล์มด้วยการกดอัด พบว่าปริมาณของ LLDPE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนัก เพราะ LLDPE-g-MA ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ของ EMA และ LDPE มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลเชิงพลวัต เช่น โมดูลัสสะสม (Storage modulus) สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก และสมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Initial decomposition temperature, IDT) อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) มีค่าสูงขึ้น อีกทั้ง LLDPE-g-MA ยังส่งผลให้วัฏภาคกระจาย EMA ใน LDPE/EMA มีขนาดเล็กลง เนื่องจาก LLDPE-g-MA ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension) EMA และ LDPE นอกจากนี้ยังยับยั้งการเกิดการกลับมารวมตัวกันของวัฏภาคกระจาย (Coalescence) ทำให้ได้พื้นฐานวิทยาที่เสถียร

A.E. Bishara และ H. I. Shaban [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/EMA ในอัตราส่วน 75/25 w/w ทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) พบว่าเมื่อเติม EMA (มีปริมาณเมทิลอะครีเลต 9 wt% และ MFI 2.6 g/10 min) ลงใน PP (มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) 68,000 และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) 380,000) ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PP จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัว (Initial degradation temperature, IDT) และพบว่าความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะ PP มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้าง (Broad MWD) ซึ่งเมื่อเติม EMA ที่มีความหนืดสูงลงไปใน PP จึงส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ EMA ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงกระแทก และการดึงยืด ณ จุดขาด ของ PP/EMA สูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงทั้งที่จุดครากและจุดสุดท้ายและยังโมดูลัสลดลง เนื่องจาก EMA เป็นวัฏภาคที่นุ่มกว่าวัฏภาคของ PP นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการใช้พอลิพรอพอลินต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) ซึ่งเป็นสารช่วยผสม พบว่าการใช้ PP-g-MAH จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกล เนื่องจาก PP-g-MAH จะทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PP/EMA มีความแข็งแรงมากขึ้น และ PP-g-MAH จะทำให้ความหนืดของระบบมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการยึดติดระหว่างวัฏภาค PP และ EMA

S.A. Mousavi และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeation) ของฟิล์ม PE และฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณไวโนลอะซิเตต (VA) 18 และ 28% โดยน้ำหนัก จาก

การศึกษาฟิล์ม PE พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์ม PE จะทำให้สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและการละลาย (Solubility) ของ O_2 และ CO_2 ลดลง แต่พบว่าฟิล์ม PE มีการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusivity) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ CO_2 ในฟิล์มทั้งสองชนิด พบว่าก๊าซ CO_2 มีความสามารถในการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ O_2 เนื่องจาก ก๊าซ CO_2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางจลนศาสตร์ (Kinetic diameter) ที่เล็กกว่า O_2 และมีความสามารถในการรวมตัวกัน (Condensability) สูงกว่า จึงส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านก๊าซที่มากกว่าจากการศึกษาฟิล์ม EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ VA จะส่งผลให้การซึมผ่านของ CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีหมู่ VA ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วจึงเกิดการดูดซับและส่งผ่านโมเลกุลของก๊าซ CO_2 ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น

นันทวรรณ ม่วงมี [7] ทำการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ โดยใช้อัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 100/0, 85/15, 80/20 และ 75/25 โดยมีการใช้ซีโอไลต์เอ เป็นสารตัวเติม 0-25 % โดยน้ำหนัก ผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าโดยใช้อุณหภูมิที่หัวคาย $170^{\circ}C$ จากการศึกษาผลของกระบวนการผสมสูตรฟิล์มที่เตรียมจากสูตรเข้มข้น (Masterbatch) ของ EVA กับซีโอไลต์เอ พบว่าอนุภาคของซีโอไลต์เอมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE, EVA และซีโอไลต์เอพร้อมกัน และจากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EVA ที่มีต่อฟิล์ม LDPE/EVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้นเนื่องจากการเติม ซีโอไลต์เอเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งในชิ้นงานและแรงกระทำระหว่างซีโอไลต์เอกับวัฏภาค EVA เป็นแรงระหว่างขั้วที่เกิดที่พื้นผิวเท่านั้นทำให้การยึดเกาะไม่ดี เมื่อมีการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานจึงเกิดช่องว่างระหว่างซีโอไลต์เอกับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้มีการรับแรงดึงลดลงและขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอและ EVA ในปริมาณสูง ทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) สูงด้วย เนื่องจากความมีขั้วของซีโอไลต์เอทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของไอน้ำได้ดีและไอน้ำสามารถผ่านส่วนอสัณฐานของ EVA ได้ดีกว่าอสัณฐานของ LDPE และ WVP มีค่าเพิ่มเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น โดยในฟิล์มที่มีอัตราส่วน LDPE/EVA เป็น 80/20 โดยน้ำหนัก (LE(80/20)) มีค่า WVP มากกว่าฟิล์ม LDPE 29% และเมื่อเติมซีโอไลต์เอ 25% โดยน้ำหนักในสูตรฟิล์ม LE(80/20) ทำให้ค่า WVP สูงขึ้นจากฟิล์ม LE(80/20) 60% และสูงกว่าฟิล์ม LDPE 106% และจากการทดสอบฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุมะเขือเทศ พบว่าฟิล์มสูตร LE(80/20)Z25 มีมวลไอน้ำกักเก็บสะสมอยู่น้อย จึงสามารถเก็บรักษามะเขือเทศได้นานขึ้น

ณัฐริกา ใจสมบุญ [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Linear low density polyethylene (LLDPE) ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ โดยการศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม

LLDPE/EVA เป็น 100/0, 90/10, 80/20 และ 75/25 ทำการผสมสูตรพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นฟิล์มแบบเป่าโดยใช้อุณหภูมิที่หัวคาย 200°C พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากฟิล์มมีข้อที่ตื้นขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและยังมอดูลัสมีแนวโน้มลดลงจากฟิล์ม LLDPE เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอในฟิล์ม LLDPE/EVA โดยใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA เป็น 80/20 โดยใช้ซีโอไลต์เอ 0-25% โดยน้ำหนัก การผสมสูตรเตรียมจากสูตรเข้มข้นของ EVA กับซีโอไลต์เอ และทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคกดอัด พบว่าฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite A มีการกระจายตัวของซีโอไลต์เอดี โดยส่วนใหญ่ซีโอไลต์เอกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ EVA จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอทุกสูตรใกล้เคียงกันกับสูตรที่ไม่ใส่ซีโอไลต์เอ (LLDPE/EVA เป็น 80/20) และจากการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LLDPE/EVA/Zeolite A พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูงขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์เอมากขึ้น เนื่องจากไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ดีในวัฏภาคอสัณฐานของ EVA เพราะมีสมบัติมีข้อเหมือนกันและการใช้ซีโอไลต์เอที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีข้อสูงจึงช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดีและช่วยเหนี่ยวนำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับฟิล์ม ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดสอบมุลัมผัสไอน้ำที่ลดลง และจากการทดสอบฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุพริกสด พบว่าปริมาณไอน้ำกักเก็บที่คงเหลือในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงในบรรจุภัณฑ์ที่มี EVA และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เอสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)

จิตรรา ศักดาพิสุทธ์ และคณะ [9] ได้ปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE ด้วย EVOH เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA โดยการสังเคราะห์ EVOH จาก EVA ที่มีไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 18.0% และ 27.5% โดยน้ำหนัก ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้ EVOH ที่มีไวนิลแอลกอฮอล์ (VOH) เท่ากับ 10.0% และ 16.2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เตรียมสูตรพอลิเมอร์ LDPE/EVOH และ LDPE/EVA ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม LDPE/EVOH และ LDPE/EVA โดยควบคุมจำนวนหมู่ฟังก์ชันให้ใกล้เคียงกัน โดยใช้อัตราส่วน 100/0, 90/10, 85/15 และ 80/20 พบว่า EVOH และ EVA มีการกระจายตัวดีในทุกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และ EVOH ในฟิล์ม LDPE/EVOH สามารถเกิดผลึกได้ในขณะที่ EVA ในฟิล์ม LDPE/EVA ไม่เกิดผลึกได้ฟิล์ม LDPE/EVA ที่มีความนิ่ม เสียรูปได้ง่ายกว่าฟิล์ม LDPE/EVOH และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVOH ส่งผลให้มอดูลัสของฟิล์ม LDPE/EVOH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม EVOH ซึ่งมีหมู่

ไฮดรอกซิลในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นและทำให้ฟิล์มเสียรูปได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดึงยึด ณ จุดครากและการดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และการเพิ่มปริมาณ EVOH เป็นการเพิ่มความมีขั้วให้แก่ฟิล์ม LDPE/EVOH ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสไอน้ำที่ลดลง แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVA กับ LDPE/EVOH พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำไม่แตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์ม LDPE/EVOH มีผลึกเกิดขึ้นทั้งใน LDPE และ EVOH ส่วนในกรณีของฟิล์ม LDPE/EVA แม้ว่าจะมีขั้วต่ำกว่า แต่ EVA ไม่สามารถเกิดผลึกได้ จึงให้ความเป็นอสัณฐานที่มากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เอ (20% โดยน้ำหนัก) พบว่าซีโอไลต์เอส่วนมากจะอยู่ในวัฏภาคของ EVOH และมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มเป็นก้อนมากกว่าที่จะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวและการมีซีโอไลต์เอไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ค่าความสามารถในการดึงยึดลดลงและมีค่ายังมอดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เอมีอันตรกิริยาที่ดีกับ EVOH ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้นและเสียรูปได้ยากขึ้น และจากการเติมซีโอไลต์เอซึ่งเป็นสารที่มีรูพรุนและมีขั้วสูงลงในฟิล์ม LDPE/EVOH ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าเพิ่มขึ้น

พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต้ดี [5] ได้ทำการศึกษการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม EVA (VA 18%) ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ 10% โดยน้ำหนัก โดยการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม พบว่าสารตัวเติมไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ EVA จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อมีการผสมสารตัวเติม ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม EVA ที่ไม่มีการใส่สารตัวเติม เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคไม่แข็งแรงและรอยต่อระหว่างวัฏภาคเป็นเสมือนจุดสะสมความเค้นของชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อออกแรงดึงจึงเสียสภาพเร็วกว่าฟิล์มที่ไม่มีการใส่สารตัวเติม โดยฟิล์มที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าฟิล์มที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม ด้านสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด พบว่า เมื่อมีการผสมสารตัวเติมไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงฉีกขาด ส่วนความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีการใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม นั้นมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่ใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีความชอบน้ำสูง และน้ำสามารถซึมผ่านทางรูพรุนของซีโอไลต์เอได้

S. Marais และคณะ [41] ได้ทำการศึกษการซึมผ่านของไอน้ำ แก๊ส CO_2 และแก๊ส O_2 ของแผ่นฟิล์ม EVA ที่มีปริมาณ VA ต่างกัน โดยขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้เทคนิคการหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเป็นผลึกของ EVA ลดลง ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ดีขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group)

เพิ่มขึ้นทำให้ความมีขั้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ลงไปใน EVA พบว่าเมื่อปริมาณ PVC เพิ่มขึ้นการซึมผ่านของน้ำไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากหมู่ VA เกิดแรงกระทำกับหมู่ฟังก์ชันของ PVC ซึ่งจะปลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่จะไปเกิดอันตรกิริยากับน้ำ สำหรับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 พบว่าปริมาณ VA ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ เนื่องจากปริมาณ VA เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ EVA เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีโอกาสที่เกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ที่มีขั้วสูงขึ้น

K.G. Gravalos และคณะ [42] ได้ทำการศึกษา In situ compatibilization ของพอลิเมอร์ผสม PET/Ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA) โดยการเกิดผ่านทางปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของหมู่เอสเตอร์ (Acrylate ester group) ของ EEA กับ หมู่ฟังก์ชัน $-\text{OH}$ และ $-\text{COOH}$ ของ PET ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองนำไปสู่การต่อกิ่ง (Grafting) ที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PET/EEA จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาสถานะในการผสม พบว่าที่อุณหภูมิ 290°C และใช้เวลาในการผสม 25 นาที จะทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดและการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงสุด จากการศึกษาผลของอัตราส่วน PET/EEA ที่ 100/0, 95/5, 15/85, 25/75, 50/50, 75/25 และ 0/100 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จะทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นและอัตราส่วน PET/EEA ที่ 85/15 จะให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และการดึงยืด ณ จุดขาด สูงที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า T_m ของ PET มีค่าลดลง เนื่องจากการเติม EEA เป็นการรบกวนการเกิดผลึกของ PET และพบว่า T_m ของ EEA มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่ามีการเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างรอยต่อของวัฏภาค EEA กับ PET

I.C. McNeill และ M.H. Mohammed [43] ได้ทำการศึกษา เสถียรภาพทางความร้อนของ EEA ที่มีการผสม CaCO_3 ซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ (Inorganic filler) โดยมีการใช้ CaCO_3 3 ชนิดคือ ชนิด Whiting, ชนิด Calcite ซึ่งมีขนาดอนุภาค 1.5, 0.9 และ $5\ \mu\text{m}$ และชนิด Precipitated โดย CaCO_3 ที่ใช้มีการใช้ในรูปแบบที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) พบว่า CaCO_3 ชนิด Calcite ทำให้ EEA มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าการใช้ CaCO_3 ชนิด Whiting และ Precipitated และการใช้อนุภาค CaCO_3 ที่มีการเคลือบด้วย Stearic acid จะเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ EEA โดย CaCO_3 จะป้องกันการเกิดกรดอะซิติก (Acetic acid) และกรดโพรพาโนอิก (Propanoic acid) โดยการเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (Acid groups) ของ Stearic acid

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์นั้นนิยมทำมาจาก LDPE และ LLDPE แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้ได้

เลือกใช้ LDPE ในการทำการทดลอง เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำกว่า LLDPE จึงเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเสียหายทางความร้อนของโคพอลิเมอร์ ซึ่งค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำนั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้โดย การเพิ่มส่วนวิธาคอสถฐานที่มีขั้ว และ/หรือเพิ่มสภาพขั้วให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ โดยการผสมกับ Ethylene copolymer เช่น EVA และ EVOH เป็นต้น เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วจะช่วยให้ Copolymer กระจายตัวได้ดีในวิธาค LDPE และส่วนที่มีขั้วจะช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ แต่งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า EVOH สามารถเกิดผลึกได้ จึงส่งผลให้ฟิล์ม LDPE/EVOH มีค่าการซึมผ่านไอน้ำไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE/EVA นอกจากนี้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเติมซีโอไลต์เนื่องจากซีโอไลต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนที่มีขั้วสูงและมีความชอบน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE โดยทำการผสมกับ EMA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วและมีเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่า EVA และได้มีการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ EMA, EEA และ EVA ร่วมกับการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความชอบน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรด LD1905F จากบริษัท ไทยโพลิเอทิลีน จำกัด
2. เอทิลีนเมทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene methyl acrylate copolymer, EMA) เกรด Elvaloy[®] AC 1224 จากบริษัท คูปองท์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) เกรด AMPLIFY[™] EA 101 จาก บริษัท ดาวเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
4. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เกรด UL00728CC จากบริษัท Exxon Mobile Chemical จำกัด
5. ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) เกรดการค้า จากบริษัท ฟิกิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
6. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) บริษัท CARLOERBA จำกัด
7. ไซลีน (Xylene) บริษัท CARLOERBA จำกัด
8. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LDPE*

สมบัติ	LD1905F	หน่วย
อัตราการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	5.00	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.919	g/cm ³
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	MD:-**,TD:9.81**	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Tensile elongation at break)	MD:400**, TD:700**	%
จุดหลอมเหลว (Melting point)	108	°C

หมายเหตุ **ฟิล์มหนา 38 µm MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร, TD: ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของเอทิลีนโคพอลิเมอร์*

สมบัติ	EMA	EEA	EVA	หน่วย
หมู่แทนที่/ปริมาณ ในโคพอลิเมอร์	MA/24.0	EA/18.5	VA/27.5	%wt
ครรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	2.0	6.0	7.0	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.944	0.931	0.952	g/cm ³
จุดหลอมเหลว (Melting point)	91	97.8	70	°C

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Zeolite A*

สมบัติ	Zeolite A	หน่วย
ลักษณะ	ผงละเอียด	-
สี	ขาว	-
ความเป็นผลึก	99	%
ความหนาแน่น (Bulk density)	366	g/L
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	2-5 และ <10 (90%)	µm
ความแข็ง	4-5	Mohs

หมายเหตุ *ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) บริษัท CHAREON TUT จำกัด รุ่น MX500-D75L90
2. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine) บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น Bosco A600
4. เครื่องวัดความหนืดแบบกรวยและแผ่นเรียบ (Cone and plate rheometer) บริษัท UBM จำกัด รุ่น MR500
5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer) บริษัท UBM จำกัด รุ่น Rheogel-E4000
6. เครื่องวัดความหนืดแบบแคปิลลารี (Capillary rheometer) บริษัท Yasuda Seiki Seisakusyo จำกัด รุ่น Capillary rheometer 140 SAS-2002

7. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410LV
9. เครื่องฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FTIR Spectrum Gx
10. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท NETZSCH จำกัด รุ่น DSC 204 F1 Phoenix®
11. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation analyzer) บริษัท Illinois Instrument จำกัด รุ่น 7002
12. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส บริษัท Dataphysics จำกัด รุ่น Contact angle system OCA
13. เครื่องบีบลม บริษัท Hitachi จำกัด รุ่น BEBICON 400
14. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 g
15. ตู้อบลมความร้อน
16. ไมโครมิเตอร์
17. กระบอกใส่ไนโตรเจน
18. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า
19. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
20. เครื่องกรองสุญญากาศ
21. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
22. คีม

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสม โดยทำการผสมดังตารางที่ 3.4 การผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณพอลิเมอร์ผสมรวม 300 กรัม เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C ความเร็วรอบ 60 rpm และเวลาที่ใช้ในการผสม 20 min

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียด เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

3.3.2 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ

3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมผ่านสูตรเข้มข้น

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีซีโอไลต์เอเป็นองค์ประกอบ โดยการผสมผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing) ของ EMA/Zeolite A โดยศึกษาในสูตร L80M20Z20 (งานวิจัยนี้เลือกใช้ซีโอไลต์ 20% โดยน้ำหนัก) ซึ่งการเตรียมสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A

เตรียมได้โดยนำซีโอไลต์เอไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาผสมกับ EMA ที่อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก ทำการเขย่าเพื่อให้เข้ากัน โดยการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C ความเร็วรอบ 60 rpm และเวลาที่ใช้ในการผสม 20 min แล้วนำสูตรเข้มข้นที่เตรียมได้มาบด เพื่อเตรียมสำหรับผสมสูตร L80M20Z20

การเตรียมพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 ผ่านสูตรเข้มข้น ทำได้โดยชั่ง LDPE, ซีโอไลต์เอ และสูตรเข้มข้นของ EMA/Zeolite A ดังตารางที่ 3.5 โดยในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องเหมือนด้านบน

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียดเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมสูตรทั้งหมดโดยน้ำหนัก

สูตรที่	สูตร	ปริมาณสาร (%)			
		LDPE	EMA	EEA	EVA
1	LDPE	100	-	-	-
2	L90M10	90	10	-	-
3	L80M20	80	20	-	-
4	L70M30	70	30	-	-
5	L60M40	60	40	-	-
6	L80V20	80	-	-	20
7	L70E30	70	-	30	-

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบและปริมาณสารที่ใส่ในเครื่องผสมของพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)			ปริมาณสารที่ใส่ในเครื่องผสมรวม 300 กรัม (กรัม)		
	LDPE	EMA	Zeolite A	LDPE	สูตรเข้มข้น EMA/Zeolite A	Zeolite A (ใส่เพิ่ม)
L80M20Z20 (Masterbatch mixing)	64	16	20	192	48	12

3.3.2.2 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอด้วยการผสมแบบครั้งเดียว

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอด้วยการผสมแบบครั้งเดียว (One shot mixing) ทำได้โดยเตรียม LDPE, เอทิลีนโคพอลิเมอร์ (EMA, EEA หรือ EVA) และ Zeolite ให้ได้สัดส่วนของ LDPE/EMA/Zeolite A, LDPE/EEA/Zeolite A หรือ LDPE/EVA/Zeolite A ตามตารางที่ 3.6 โดยในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 300 กรัม นำส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงไปในเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 140°C ความเร็วรอบ 60 rpm และเวลาที่ใช้ในการผสม 20 min นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้เป็นเม็ดละเอียดเพื่อเตรียมสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอ (โดยน้ำหนัก)

สูตร	ปริมาณของ Zeolite A	ปริมาณสาร (%)			
		LDPE	EMA	EEA	EVA
L100Z20	20	100	-	-	-
L80M20Z20	20	64	16	-	-
L80V20Z20	20	64	-	-	16
L70E30Z20	20	56	-	24	-

3.3.3 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีกดอัด

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปฟิล์ม โดยตั้งสภาวะของเครื่องกดอัดดังนี้ เพื่อควบคุมความหนาให้ได้ 50-70 μm โดยใช้น้ำหนักพอลิเมอร์ผสมในแต่ละครั้งประมาณ 1 กรัม ใช้อุณหภูมิในการกดอัด 170°C และอุณหภูมิในการเย็นตัว $15 \pm 5^\circ\text{C}$ เวลาในการกดอัด 5 min เวลาในการเย็นตัว 5 min และความดันในการกดอัด 1800 psi

3.3.4 ความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มทุกชนิดที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้ไมโครมิเตอร์ ประมาณ 50 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.3.5 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

นำแผ่นฟิล์มเรียบที่เตรียมได้มาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) โดยใช้ Transmission mode ในช่วงเลขคลื่น

370 cm^{-1} ถึง 4,000 cm^{-1} จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มระหว่าง Absorbance ของพีค C=O Stretching ที่ 1714 cm^{-1} กับพีค Absorbance ของ C-H Rocking ที่ 720 cm^{-1} เพื่อหาการมีอยู่ของพีคของหมู่ C=O Stretching ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

3.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Capillary rheometer

ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสม ที่สภาวะแรงเฉือนสูงด้วย Capillary rheometer โดยทำการวัดในช่วงอัตราเฉือน (Shear rate) 0–1000 s^{-1} เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของอัตราเฉือน (log shear rate) กับ log ของความหนืดเฉือน (log shear viscosity) โดยใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้ อุณหภูมิ 190°C ใช้สายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm และความยาวสาย 1 mm

3.3.7 การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วย Cone and plate rheometer

ทำการวัดค่ามอดุลัสสะสม (G') และค่ามอดุลัสสูญเสีย (G'') ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Cone and plate rheometer เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวของแผ่นฟิล์มพลาสติกหนา 1 mm โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ความถี่เชิงมุมในการทดสอบอยู่ในช่วง 0.01–100 rad/s

3.3.8 การศึกษาสมบัติความร้อนแบบพลวัตด้วย DMA

ทำการวัดค่ามอดุลัสสะสม (E') และค่ามอดุลัสสูญเสีย (E'') และ $\tan \delta$ ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) ใน Tension mode สำหรับการทดสอบทำโดยชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาด $1 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$ โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในช่วง -100 ถึง 100°C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 2°C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ความถี่ในการทดสอบ 10 Hz

3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอไลต์ในฟิล์มตัวอย่าง

ทำการหาปริมาณซีโอไลต์ที่มีอยู่ในฟิล์ม ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ตอนที่ 1 นำครุชีเบลแบบถ้วยมาเผาด้วยเตาเผา (Furnace) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600°C หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำครุชีเบลที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่า โดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชีเบล

ตอนที่ 2 นำครุชเบิลที่ผ่านการเผาแล้วมาใส่ชิ้นงานตัวอย่างโดยให้มีปริมาณ 2 ใน 3 ของความสูงครุชเบิล จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งพร้อมทั้งจดบันทึกค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชเบิลก่อนเผา

ตอนที่ 3 นำครุชเบิลที่มีตัวอย่างที่ผ่านการชั่งแล้วมาเผาด้วยตะเกียงเบนเสนจนกระทั่งไม่เห็นเปลวไฟในครุชเบิล จากนั้นทำการทดลองซ้ำตอนที่ 1 ค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชเบิลหลังเผา โดยปริมาณของซีโอไลต์เอในฟิล์มตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

น้ำหนักสารที่เหลือ = น้ำหนักของครุชเบิลหลังเผา – น้ำหนักของครุชเบิล

น้ำหนักสารทั้งหมด = น้ำหนักของครุชเบิลก่อนเผา – น้ำหนักของครุชเบิล

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของซีโอไลต์เอ} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} \times 100}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด}} \quad (3.1)$$

3.3.10 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งน้ำหนักฟิล์มประมาณ 5-10 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการ- ตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [44]

$$\text{Heat of fusion } \Delta H_f (\text{J/g}) = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m) (\text{mJ})}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.2)$$

$$\text{ความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง T_m)

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [45]

3.3.11 การศึกษาสัณฐานวิทยา

3.3.11.1 การกระจายตัวของเอทิลีนโคพอลิเมอร์

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

ไปแช่ในตัวทำละลายในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบแช่ที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยที่ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายเพื่อสกัด EMA หรือ EEA ออกจากชิ้นงาน ตามลำดับ และใช้ไซลีนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นตัวทำละลาย เพื่อสกัด EVA ออกจากชิ้นงาน จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้น นำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EMA, EEA หรือ EVA ด้วย SEM

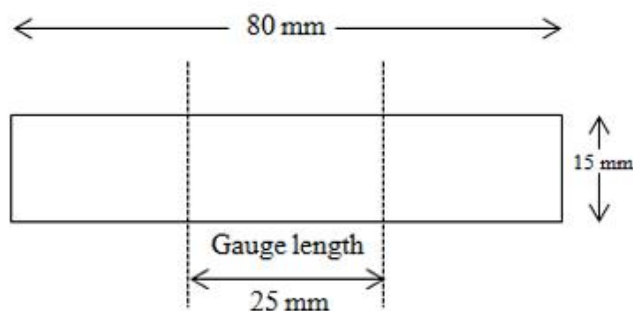
3.3.11.2 การกระจายตัวของซีโอไลต์เอ

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

3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหา ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [46] โดยใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

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



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและค่ายังมอดุลัส สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.5)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (\%Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.6)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break)} = \frac{(l_{\text{at break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.7)$$

$$\text{ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.8)$$

เมื่อ $F_{\text{at yield}}$ = แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดคราก และ $F_{\text{at break}}$ = แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดขาด
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
 $l_{\text{at yield}}$ = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
 $l_{\text{at break}}$ = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
 l_0 = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงขึ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 25 mm

หมายเหตุ ค่ายังมอดุลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1 และ 3% การดึงยืด)

3.3.13 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากกระบวนการกดอัดมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนกแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D624 [47] ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ใช้ Load cell 100 N และความเร็วในการดึง 100 mm/min

3.3.14 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ส่งตัวอย่างทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการหาปริมาณไอน้ำที่ ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่มีหน่วยเป็น $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ ที่อุณหภูมิ 38°C ความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ตามมาตรฐาน ASTM F1249 [48]

3.3.15 การทดสอบมุมสัมผัส

นำพอลิเมอร์ผสมที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดตามหัวข้อที่ 3.3.3 โดยใช้แม่พิมพ์ขนาด $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ แต่ใช้เวลาในการให้ความร้อนและเวลาในการเย็นตัว 10 นาที ทำการตัดชิ้นงานตามขวางเพื่อทดสอบบริเวณพื้นผิวของพื้นที่ภาคตัดขวางหนา 6 mm ใช้ปริมาตรหยดน้ำ $2 \mu\text{L}$ ทำการบันทึกค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system OCA ตามมาตรฐาน ASTM D5946 [49]

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE ต่อเอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EMA) เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันระหว่าง EMA, เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) และเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ในสูตรที่มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน และศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอในปริมาณที่เท่าๆ กัน โดยมีการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มก่อนเลือกบางสูตรของฟิล์มไปทดลองทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสดต่อไป

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA

การศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูป โดยนำพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ โดยใช้สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 65–67 μm

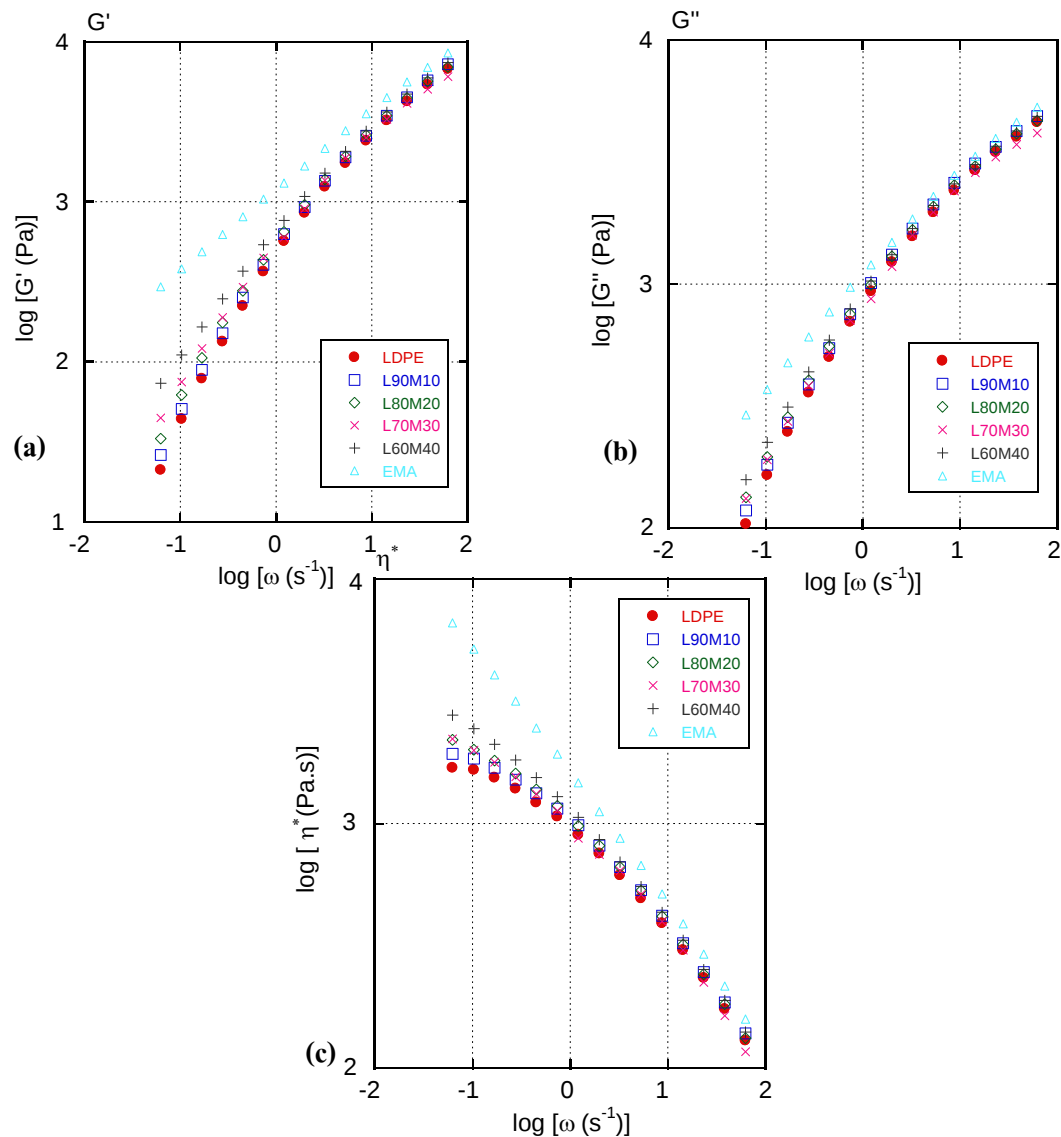
ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA และความหนาของฟิล์ม

สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมโดยน้ำหนัก		ความหนาเฉลี่ย (μm)
	LDPE	EMA	
LDPE	100	0	66 $\pm$ 6
L90M10	90	10	66 $\pm$ 4
L80M20	80	20	65 $\pm$ 6
L70M30	70	30	65 $\pm$ 6
L60M40	60	40	67 $\pm$ 6

4.1.1 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม

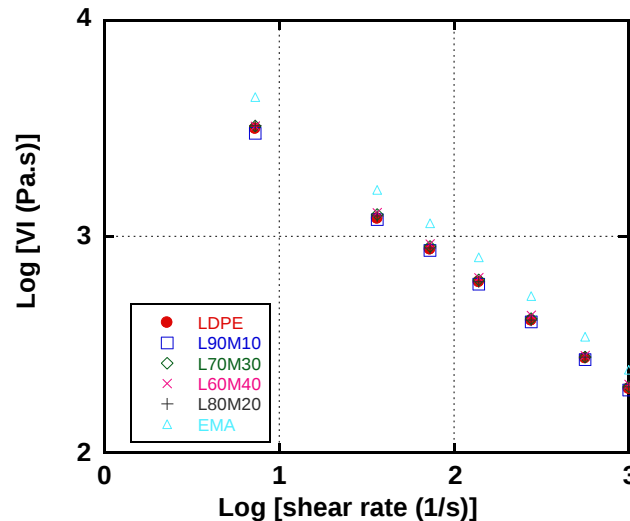
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ด้วยเทคนิค Cone and plate rheometer โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 130°C จากภาพที่ 4.1 แสดงค่ามอดูลัสสะสม (G') ซึ่งแสดงสมบัติส่วนที่เป็น Elastic ของพอลิเมอร์ หมายถึงพลังงานที่พอลิเมอร์

สะสมในระบบและค่ามอดุลัสสูญเสีย (G'') ซึ่งแสดงสมบัติส่วนที่เป็น Viscous ของพอลิเมอร์ หมายถึงพลังงานสูญเสียไปของพอลิเมอร์ในระบบ และ Complex viscosity (η^*)



ภาพที่ 4.1 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนต่ำของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 130°C

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA ทำให้ค่า G' และ G'' สูงขึ้นและมีค่ามากกว่า LDPE ทั้งนี้เนื่องจาก EMA มีหมู่ MA ที่มีความเกาะซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่มากขึ้น



ภาพที่ 4.2 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ที่ 190°C

นอกจากนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว LDPE/EMA ด้วยเครื่อง Capillary rheometer โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 190°C แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4.2 พบว่า EMA มีความหนืดที่สูงกว่า LDPE เช่นเดียวกับพฤติกรรมค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนต่ำ ดังภาพที่ 4.1 (c) เนื่องจาก EMA มีหมู่ข้างเคียงที่มีความเกะกะ โดยที่พอลิเมอร์ทุกสูตรแสดงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic นั่นคือเมื่อให้ความถี่ในการให้แรง และ/หรืออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการไหลตามแนวแรงกระทำได้ดีขึ้น โดยที่พอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง LDPE และ EMA จะสังเกตได้จากค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนต่ำ (ภาพที่ 4.1 (c)) ในขณะที่ค่าความหนืดที่สภาวะแรงเฉือนสูงมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากที่สภาวะแรงเฉือนสูง เมื่อให้แรงกระทำอย่างรวดเร็วจะทำให้สายโซ่เกิดการคลายตัวอย่างมากและพร้อมที่จะเสียรูปตามแนวแรงได้ดีขึ้น

ในระบบพอลิเมอร์ผสมปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมการคลายตัว (Relaxation) คือ แรงตึงผิว (Surface tension) และการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (Localized distribution of the dispersed droplets) เป็นไปตามหลักของอัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio)

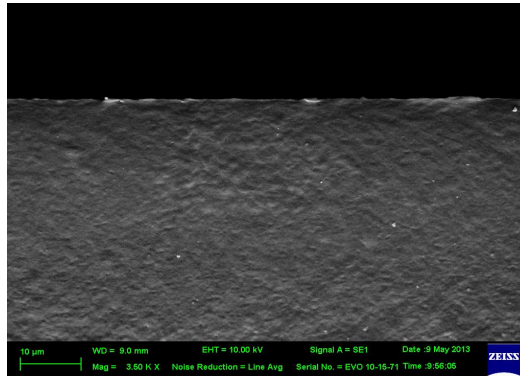
$$\text{Viscosity ratio; } \lambda = \eta_2/\eta_1 \quad (4.1)$$

เมื่อ η_1 คือความหนืดของวัฏภาคหลัก และ η_2 คือความหนืดของวัฏภาคกระจาย

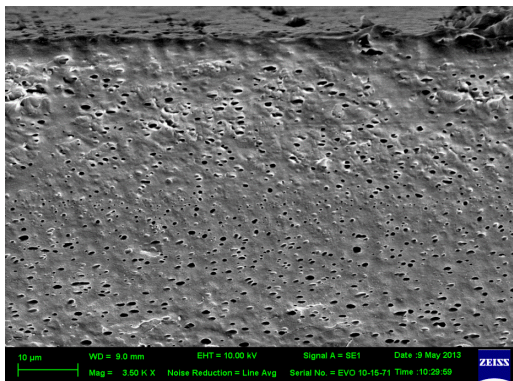
จากสมบัติของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่สภาวะแรงเฉือนต่ำและสภาวะแรงเฉือนสูง พบว่า EMA มีความหนืดที่มากกว่า LDPE จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า $\lambda > 1$ อีกทั้ง EMA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วที่สูงกว่า LDPE จึงส่งผลให้ EMA มีแรงตึงผิวที่สูงกว่า LDPE เมื่อให้แรงกระทำกับ EMA จะเกิดการแตกตัวในลักษณะเป็นเม็ด (Droplet) ซึ่งประพติตัวกลายเป็นเม็ด

ของแข็ง(Particulated solid) กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลัก คล้ายกับกรณีใช้สารเติมแต่งที่เป็นของแข็งใน พอลิเมอร์หลอมเหลว เมื่อให้และปล่อยแรงกระทำกับพอลิเมอร์ผสม วัฏภาค EMA ที่หนืดกว่าจึงไม่เคลื่อนที่ตามวัฏภาค LDPE ในทันที แต่ค่อยๆ คลายแรงและหดสายโซ่กลับมาเหมือนเดิม พฤติกรรมนี้เหมือนผลการทดลองที่พบในงานวิจัยของรุจิเรจ วิวัฒน์านุกุล [50] ที่ศึกษาพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS

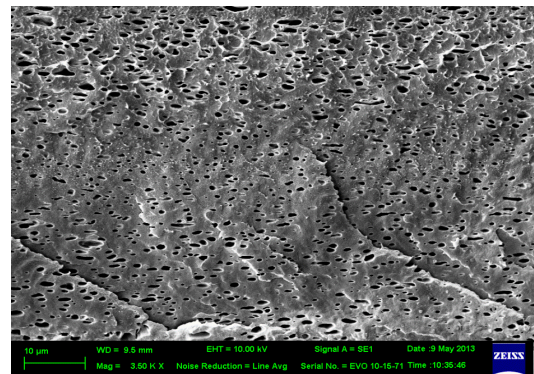
4.1.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม LDPE/EMA



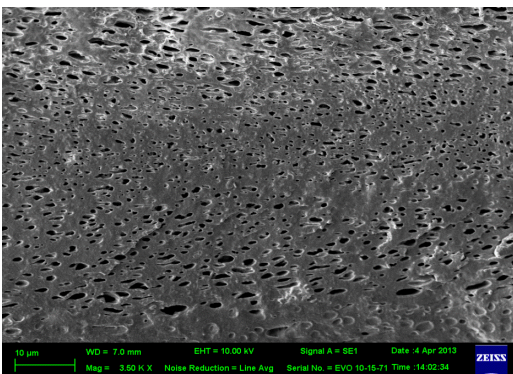
LDPE



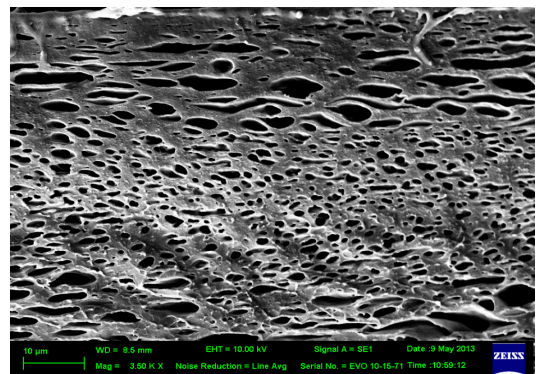
L90M10



L80M20



L70M30



L60M40

ภาพที่ 4.3 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์ม LDPE/EMA ที่มีการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) ($10\ \mu\text{m}$)

การศึกษากระจายตัวของ EMA ในฟิล์ม LDPE/EMA ในอัตราส่วนต่างๆ โดยทำการ สกัด EMA ออกจากฟิล์ม LDPE/EMA ก่อน จึงนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงผลการศึกษาดัง ภาพที่ 4.3 ซึ่งพบว่าฟิล์มสูตร LDPE มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ เพื่อสกัดวัฏภาค EMA ออกนั้นไม่ส่งผลต่อวัฏภาค LDPE ส่วนฟิล์มสูตรที่มี EMA พบช่องว่าง ซึ่ง คือบริเวณของ EMA ที่ถูกสกัดออกไปโดย EMA เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) อยู่ใน LDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการกระจาย ตัว (Distribution) ของ EMA ดี โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าวัฏภาคของ EMA มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก EMA มีความหนืดมากกว่าวัฏภาคหลัก LDPE ($\lambda > 1$) เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือนจาก เครื่องผสมทำให้วัฏภาคของ EMA แยกตัวได้ยากขึ้น

นอกจากนี้สังเกตได้ว่าขนาดของวัฏภาคของ EMA ในบริเวณขอบทั้ง 2 ด้านของ ฟิล์มมีขนาดวัฏภาค EMA ที่ใหญ่กว่าบริเวณตรงกลางของฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากในขณะขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเทคนิคกดอัด EMA ที่ปรากฏอยู่ในบริเวณขอบทั้ง 2 ด้านของฟิล์มเคลื่อนที่รวมตัวกันจากการ ได้รับแรงกดอัด จึงส่งผลให้มีวัฏภาคของ EMA ในบริเวณดังกล่าวมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

ในกรณีฟิล์มสูตร L60M40 พบว่ามีการกระจายตัวของ EMA ที่ดี ซึ่งพบว่าฟิล์มสูตร ดังกล่าวมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่มีความหลากหลาย โดย EMA มีการแตกตัวเป็นวัฏภาคที่มี ขนาดเล็ก และเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคกดอัด EMA ที่อยู่ในบริเวณขอบของฟิล์มเกิดการ เคลื่อนที่มารวมกันส่งผลให้มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่ใหญ่ขึ้น

4.1.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EMA

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/EMA ด้วย DSC แสดงผลการ ทดลองดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ LDPE มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตรฟิล์ม เนื่องจาก LDPE กับ EMA มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี มีความเข้ากันได้ต่ำ ทำให้ไม่ส่งผลต่อขนาดผลึกของ LDPE ฟิล์มทุกสูตรมีขนาดผลึกที่ใกล้เคียงกัน

จากข้อมูล DSC พบว่า EMA มี T_m อยู่ในช่วง 30-110°C และ LDPE มี T_m อยู่ในช่วง 65-125°C ซึ่งมี T_m ปรากฏอยู่ในช่วงเดียวกัน อีกทั้ง EMA สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งสังเกตได้จากเทอร์ โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมปรากฏที่ T_c ของ EMA ที่อุณหภูมิประมาณ 65°C ซึ่งเป็นการ ยืนยันได้ว่า ผลึกที่พบมีความเป็นไปได้ว่าน่าจะมาจากผลึกของทั้งส่วน LDPE และ EMA ปริมาณ ผลึกที่แสดงจึงเป็นผลึกทั้งหมดของเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ โดยความเป็นผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณ EMA ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะฟิล์มสูตร L70M30 และ L60M40 มีค่าความเป็นผลึกต่ำกว่าฟิล์มสูตร อื่นๆ เนื่องจากมี EMA มากขึ้นทำให้ LDPE และ EMA รบกวนความสามารถในการเกิดผลึกซึ่งกัน และกันอย่างชัดเจน

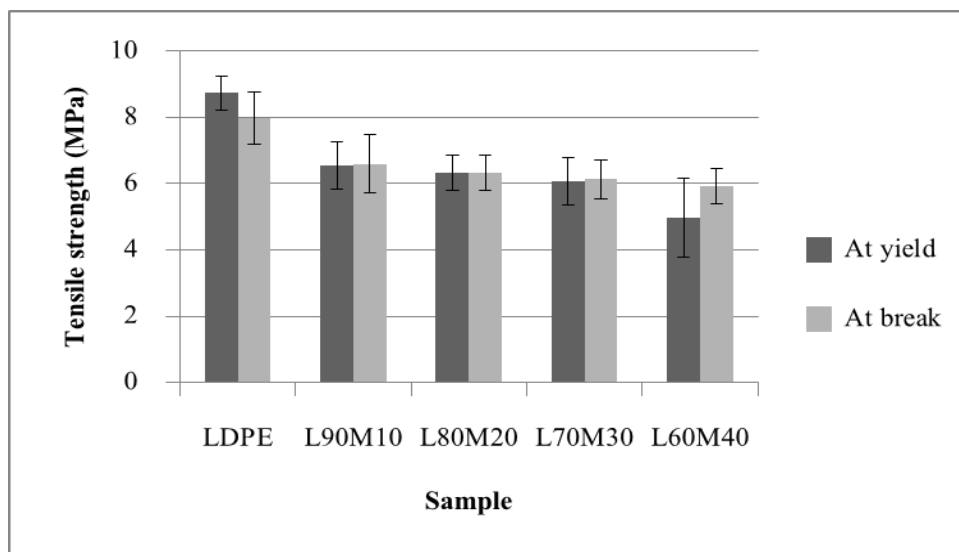
ตารางที่ 4.2 T_m และ T_c ของ LDPE และ EMA และความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในฟิล์ม

LDPE/EMA

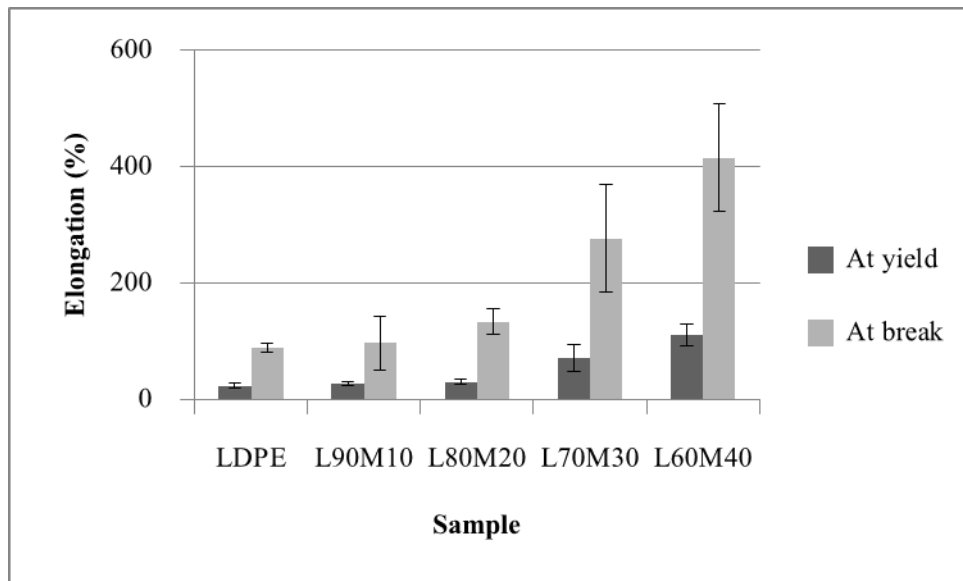
สูตร	T_m (Peak) (°C)	T_c (Peak) (°C)	X_c (%)
L100	112.5	94.3	39
L90M10	111.1	95.7	34
L80M20	111.5	95.5	31
L70M30	111.6	95.5	22
L60M40	110.9	95.8	18
EMA	93.7	66.5	19

4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/EMA

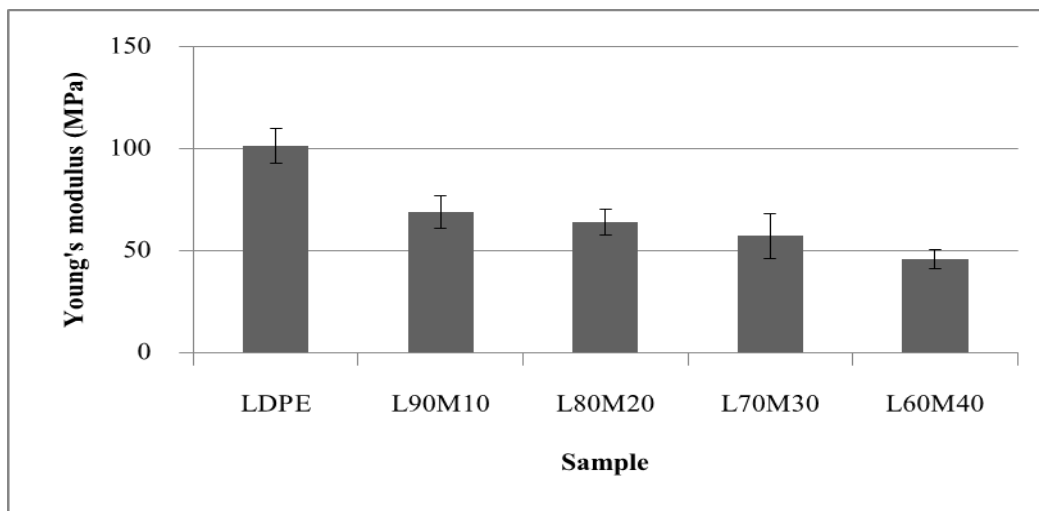
จากภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์ม LDPE/EMA และภาพที่ 4.5 แสดงผลสมบัติความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์ม LDPE/EMA พบว่า LDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบจึงสามารถรับแรงได้มากก่อนเกิดการเสียรูป เมื่อเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และยังมีมอดูลัสลดลง ส่วนการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE/EMA ลดลงจากฟิล์ม LDPE โดยในแต่ละสูตรมีค่าความแข็งแรงนิกษาคใกล้เคียงกันเมื่อ EMA มีปริมาณมากขึ้น เนื่องจาก EMA มีสมบัติคล้ายยางและความยืดหยุ่นทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า LDPE



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์ม LDPE/EMA

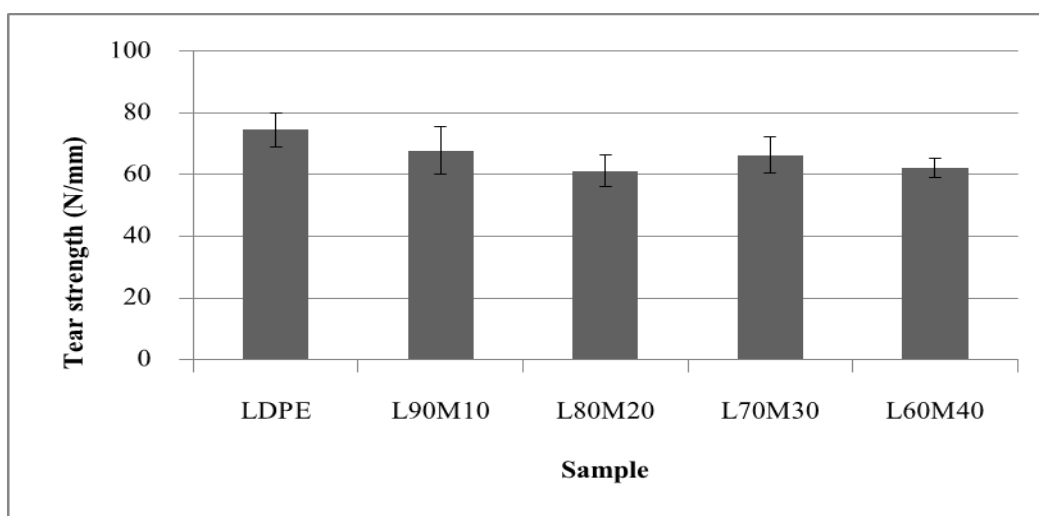


(b) การดัดยั้ง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์ม LDPE/EMA



(c) ยั้ยมอดูลัสของฟิล์ม LDPE/EMA

ภาพที่ 4.4 สมบัติการรับแรงดัดของฟิล์ม LDPE/EMA



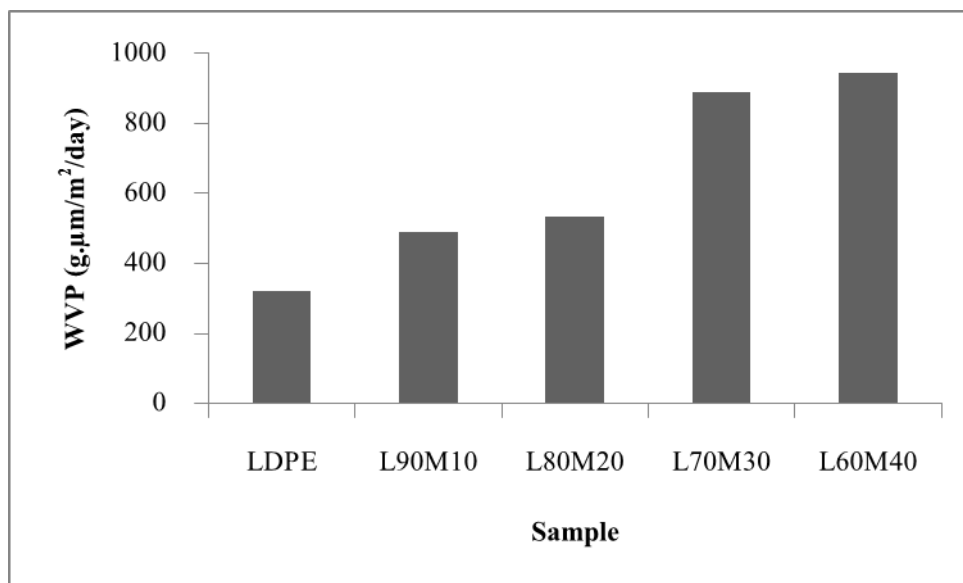
ภาพที่ 4.5 สมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม LDPE/EMA

4.1.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.6 โดยทั่วไปการวัดค่าการซึมผ่านไอน้ำด้วยเครื่อง Water vapor permeability analyzer นิยมรายงานค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeation rate, WVTR) แต่ในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบนั้นมีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อกำจัดปัจจัยในเรื่องความหนา เพราะฟิล์มที่มีความหนาสูงขึ้นจะมีปริมาตรของเนื้อฟิล์มมากทำให้ไอน้ำเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองในรูปของค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permability, WVP) โดยคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$WVP = WVTR \times \text{Film thickness} \quad (4.2)$$

โดยทั่วไปโมเลกุลขนาดเล็กที่อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น ไอน้ำ สามารถซึมผ่านวัสดุภาคอสัณฐานที่มีขั้วของ EMA ได้ดีกว่าวัสดุภาคอสัณฐานที่ไม่มีขั้วของ LDPE เนื่องจากการมีหมู่เมทิลอะคริเลต (MA) ที่มีขั้วของ EMA ทำให้เกิดอันตรกิริยากับไอน้ำได้ดีกว่า LDPE ที่ไม่มีขั้ว จากภาพที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ EMA เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ EMA เป็นการเพิ่มวัสดุภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยสังเกตได้จากผลการทดลอง DSC (ตารางที่ 4.2) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกลดลง



ภาพที่ 4.6 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม LDPE/EMA

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการเติม EMA ลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้พอลิเมอร์มีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเทียบกับ LDPE และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ EMA มีปริมาณมากขึ้น นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่า EMA ที่เติมลงไปในช่วงเพิ่มสภาพขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยขั้วที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดอันตรกิริยาได้ดีกับน้ำและสามารถเหนี่ยวนำไอน้ำให้ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

ผสมได้มากขึ้น โดยฟิล์มสูตร L60M40 มีค่า WVP ที่สูงที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลิกลีน้อยที่สุด (ตารางที่ 4.2) จึงส่งผลให้สูตรดังกล่าวมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าสูตรอื่น

ตารางที่ 4.3 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมผัส: Θ (degree)
LDPE	98.1±1.5
L90M10	83.4±2.1
L80M20	81.7±2.9
L70M30	78.3±2.6
L60M40	77.4±1.7
EMA	77.0±1.7

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA พบว่า ฟิล์มสูตร L90M10, L80M20 และ L70M30 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด อยู่ในช่วงที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด (7 MPa) ซึ่งสามารถเลือกมาทำการศึกษาต่อ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาถึงค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EMA จะทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลง แสดงว่าฟิล์มพอลิเมอร์มีความนิ่มมากขึ้น โดยดูได้จากค่าการดึงยืด ณ จุดครากของสูตร L70M30 ซึ่งมีค่าสูงกว่า L90M10 และ L80M20 อย่างชัดเจน แสดงว่าฟิล์ม L70M30 มีโอกาสที่จะเสียรูปได้ง่ายที่สุด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์สด แม้จะมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L90M10 และ L80M20 ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L90M10 ซึ่งเป็นฟิล์มสูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าความสามารถในการซึมผ่าน ไอน้ำใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร L80M20 แต่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วที่น้อยกว่า จึงน่าจะช่วยในการกระจายตัวของซีโอไลต์เอได้ไม่ดีเท่าพอลิเมอร์สูตร L80M20 ที่มีปริมาณโคพอลิเมอร์ที่มากกว่า เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นวัสดุที่มีขั้วสูงจึงชอบกระจายตัวในวัฏภาคที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ เหมือนกับงานวิจัยของนันทวรรณ ม่วงมี [7] ที่มีการปรับปรุงการซึมผ่าน ไอน้ำของ LDPE ด้วย EVA และซีโอไลต์เอ

4.2 การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ในตอนที่ 4.1 เลือก LDPE/Copolymer ในอัตราส่วน 80/20 มาศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่ส่งผลต่อการซึมผ่านไอน้ำ โดยโคพอลิเมอร์ที่เลือกใช้เพื่อทำการเปรียบเทียบคือ EVA และ EEA ซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณ

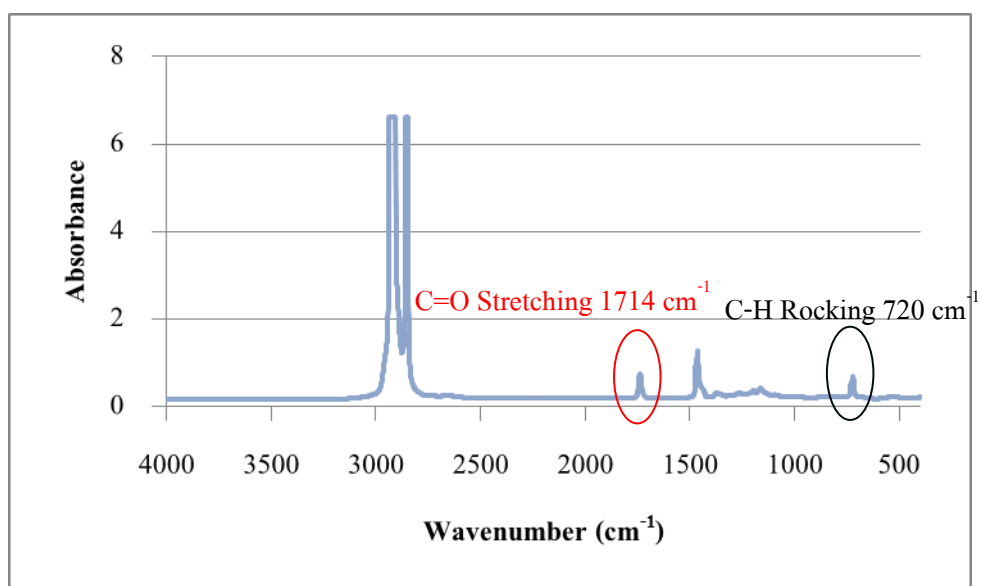
ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่แตกต่างกัน โดย EMA มีปริมาณหมู่ MA 24% และ EVA มีปริมาณหมู่ VA 27.5% แต่ EEA มีปริมาณหมู่ EA 18.5% (ซึ่งมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วน้อยกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่นๆ) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 62-66 μm

ตารางที่ 4.4 สูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/Copolymer และความหนาของฟิล์ม

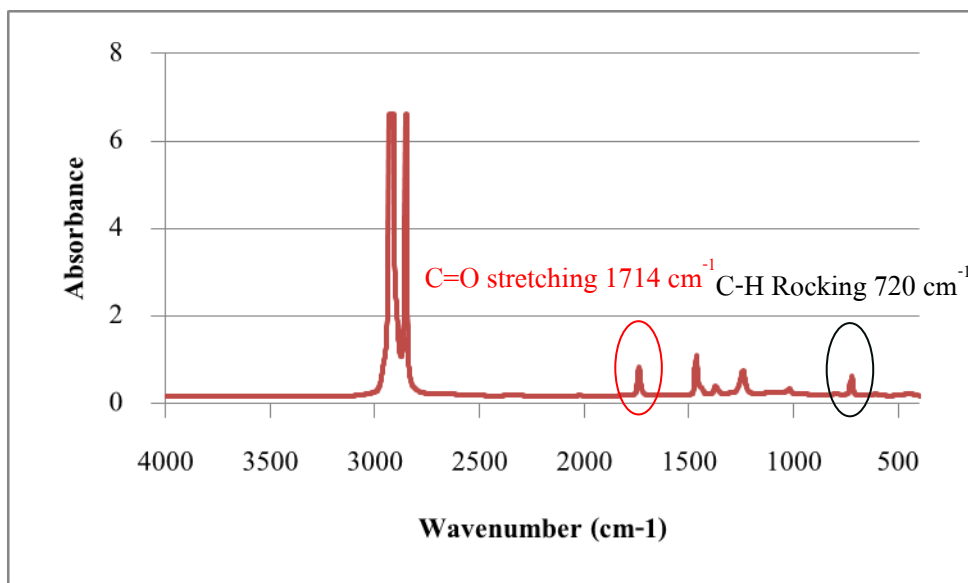
Sample	Composition (%wt)				ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน โดยรวม	Thickness (μm)
	LDPE	EMA	EEA	EVA		
LDPE	100	0	0	0	0.0	66 ± 6
L80M20	80	20	0	0	4.8	65 ± 6
L80V20	80	0	0	20	5.5	62 ± 5
L70E30	70	0	30	0	5.6	62 ± 5

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว

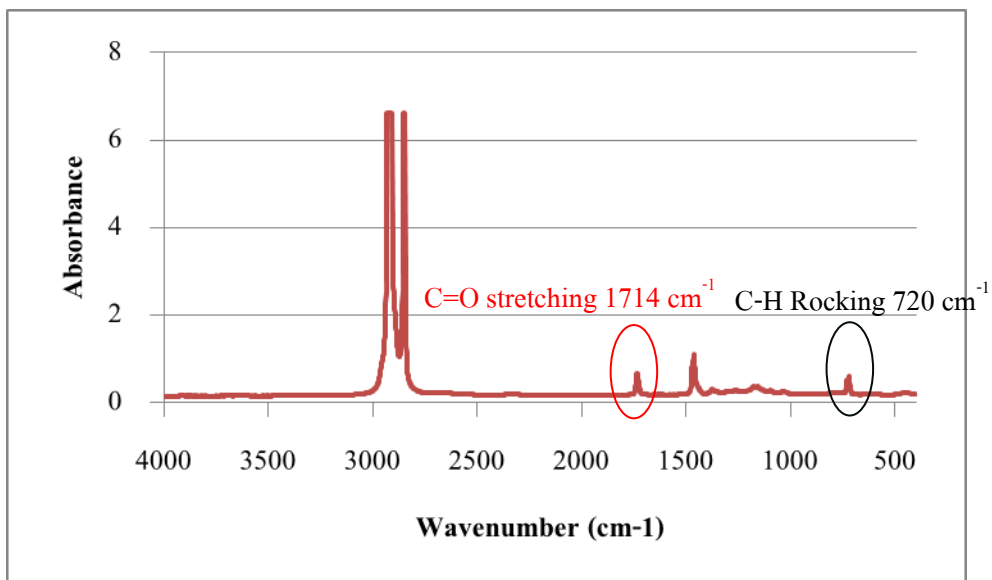
การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ด้วยการศึกษากจาก FT-IR แสดงดังภาพที่ 4.7 (a)-(c) การคำนวณหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) จากค่าการดูดแสงของหมู่ C=O Stretching ที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วซึ่งได้มาจาก EMA, EVA และ EEA ตามลำดับ เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking 720 cm^{-1} ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนของสายโซ่หลัก (Backbone) ของ LDPE, EMA, EVA และ EEA ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



(a) L80M20



(b) L80V20



(c) L70E30

ภาพที่ 4.7 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง FT-IR

จากภาพที่ 4.7 สามารถคำนวณหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index, CI) ซึ่งใช้แสดงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีซ้ำในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมโดยหาได้ ดังสมการที่ 4.3 และแสดงค่าดังตารางที่ 4.5 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าดัชนีคาร์บอนิลที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการยืนยันว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีซ้ำใกล้เคียงกัน

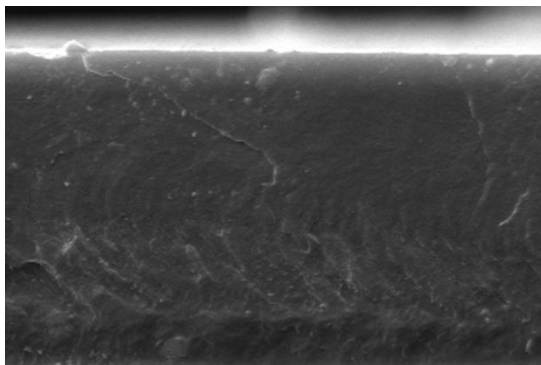
$$\text{ดัชนีคาร์บอนิล (CI)} = \frac{\text{ค่าดูดกลืนแสงของหมู่ C=O stretching ที่ } 1714 \text{ cm}^{-1}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ C-H Rocking ที่ } 720 \text{ cm}^{-1}} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

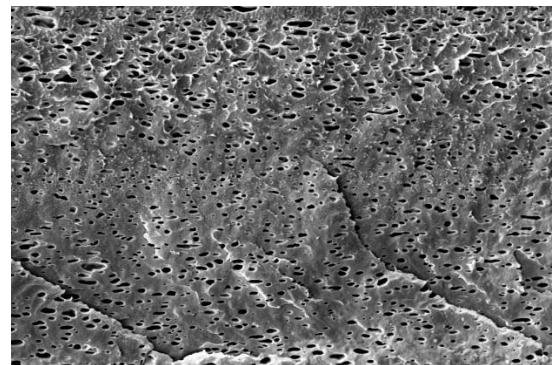
ตัวอย่าง	ดัชนีคาร์บอนิล
L80M20	0.32
L80V20	0.36
L70E30	0.35

4.2.2 การศึกษาผลของการกระจายตัวของ Copolymer ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

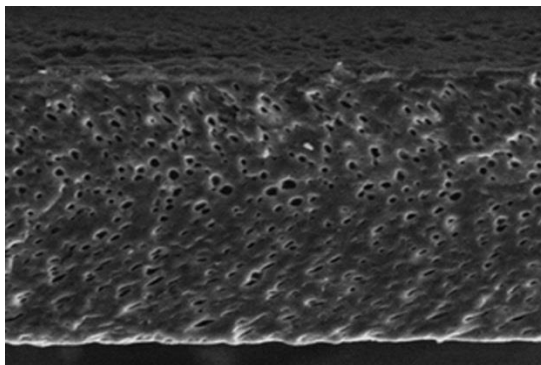
การศึกษาการกระจายตัวของ Copolymer ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยทำการสัปดาห์ภาคการกระจายออกจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนจึงนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงผลการศึกษา ดังภาพที่ 4.8 พบว่าลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังการสัปดาห์ภาคการกระจาย ออกเทียบกับฟิล์ม LDPE มีช่องว่างที่พบในรูปเกือบบริเวณของโคพอลิเมอร์ (EMA, EEA หรือ EVA แล้วแต่สูตร) ที่ถูกสกัดออกซึ่งทำหน้าที่เป็นวิทยาภาคกระจายอยู่ใน LDPE ที่เป็นวิทยาภาคต่อเนื่อง พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีการกระจายตัวของ Copolymer ที่ดีและมีความสม่ำเสมอ



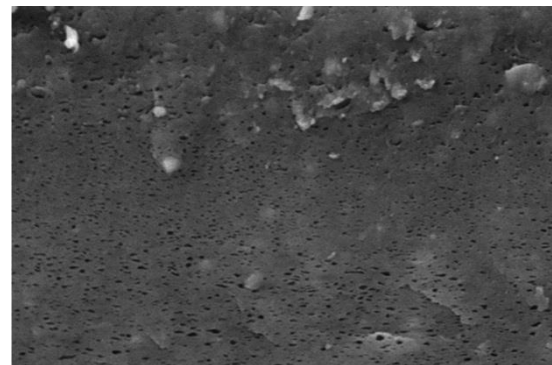
LDPE



L80M20



L80V20



L70E30

ภาพที่ 4.8 ภาพ SEM ของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการสัปดาห์ภาคการกระจายออก (กำลังขยาย 3500 เท่า) ( 10 μm)

ในขณะที่ฟิล์มสูตร L80M20 มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่ใหญ่กว่าฟิล์มสูตร L70E30 เนื่องจาก EMA มีความหนืดที่สูงกว่า LDPE จึงส่งผลให้ EMA นั้นแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กได้ยาก ในขณะที่ EEA มีความหนืดที่ใกล้เคียง LDPE จึงทำให้ EEA สามารถแตกตัวเป็นวัฏภาคเล็กๆ ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ฟิล์มสูตร L70E30 มีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กกว่า

4.2.3 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

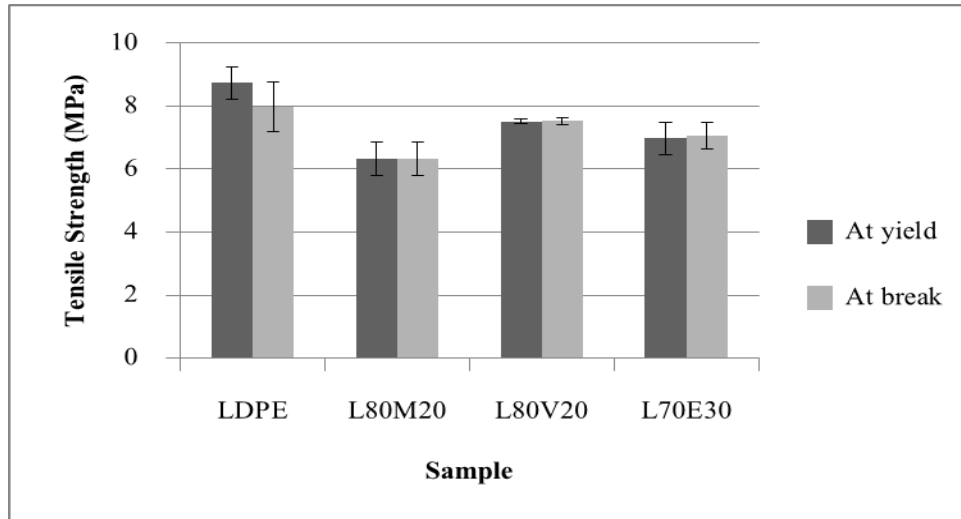
การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วย DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.6 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมี T_m และ T_c ของ LDPE ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก LDPE กับ Copolymer มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดีจึงมีความเข้ากันได้ต่ำ ทำให้ไม่ส่งผลต่อขนาดผลึกของ LDPE จากเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์พบว่า LDPE มี T_m อยู่ในช่วง 65-125°C, EMA มี T_m อยู่ในช่วง 30-110°C, EVA มี T_m อยู่ในช่วง 20-95°C และ EEA มี T_m อยู่ในช่วง 30-120°C ซึ่งมี T_m ปรากฏอยู่ในตารางที่ 4.6 อาจมาจากผลึกของทั้งส่วน LDPE และโคพอลิเมอร์ เมื่อสังเกตจากเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมปรากฏพบ T_c ของโคพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 65°C, 50°C และ 75°C ตามลำดับ จากตารางที่ 4.6 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีความเป็นผลึกลดลงจากฟิล์ม LDPE เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่เติมนั้นเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีกับ LDPE อีกทั้งโคพอลิเมอร์นั้นมีปริมาณที่เยอะซึ่งจะเกิดการรบกวนผลึกซึ่งกันและกันระหว่าง LDPE กับโคพอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีวัฏภาคต่อเนื่องที่สามารถเกิดผลึกได้ลดลง โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรมีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 T_m และ T_c ของ LDPE และความเป็นผลึกรวมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

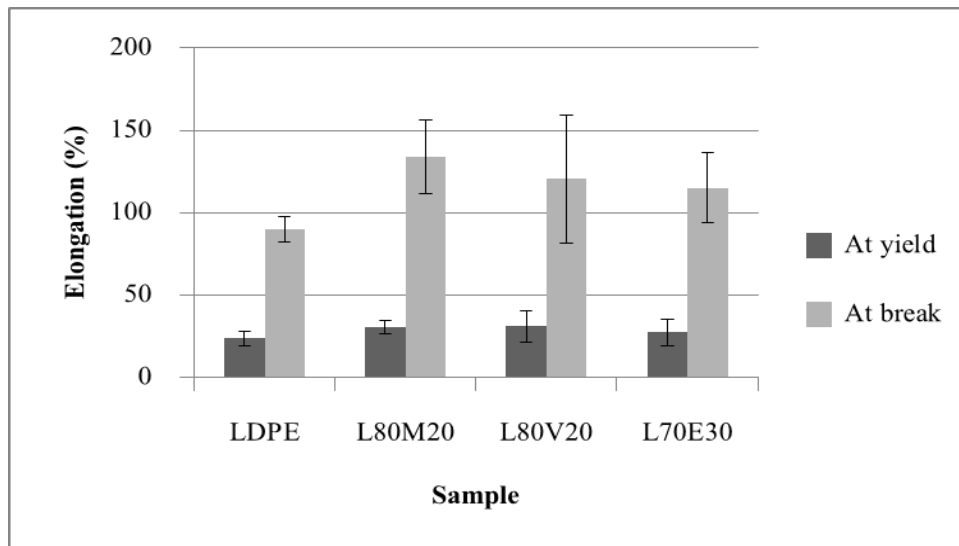
Sample	T_m Peak of LDPE (°C)	T_c Peak of LDPE (°C)	X_c (%)
LDPE	114.2	94.2	38
L80M20	112.0	95.5	31
L80V20	112.3	95.4	29
L70E30	111.3	94.9	29

4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

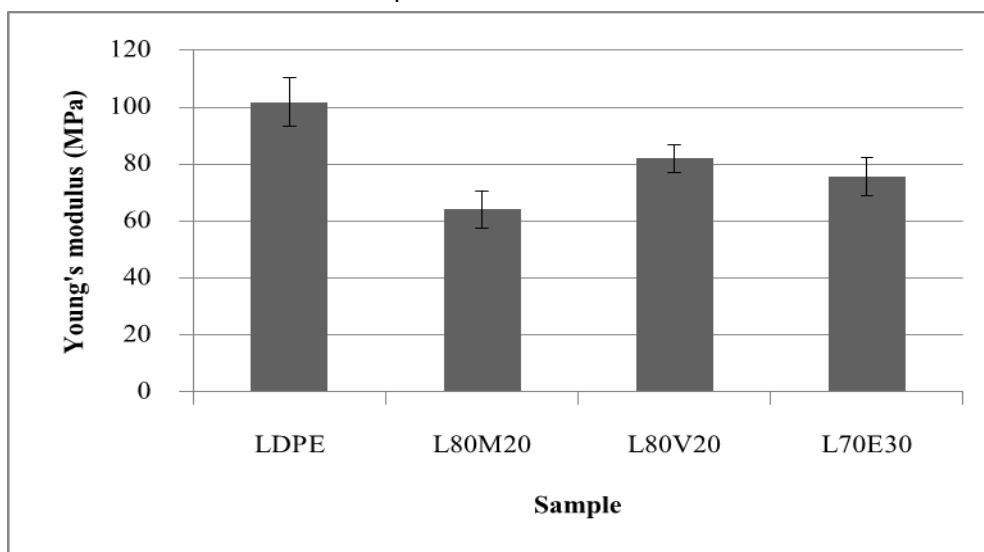
จากภาพที่ 4.9 แสดงสมบัติการรับแรงดึง และภาพที่ 4.10 แสดงความแข็งแรงตึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

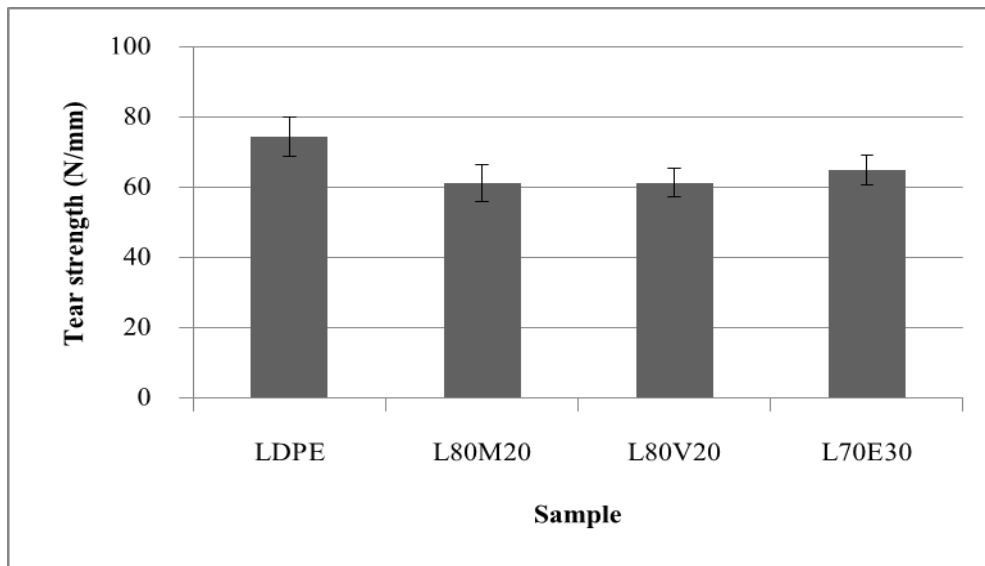


(b) การดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



(c) ย้ํมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



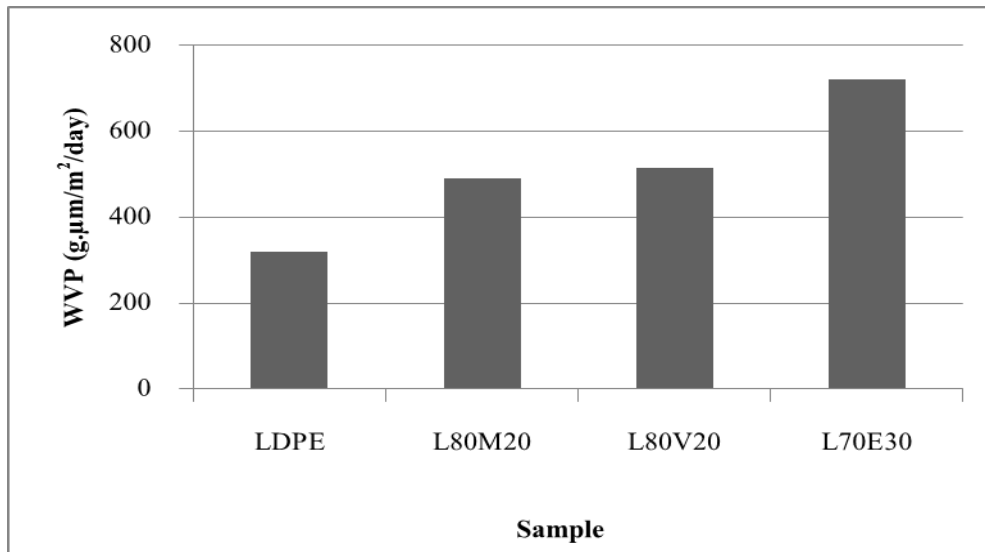
ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และความแข็งแรงฉีกขาดต่ำกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีสมบัติคล้ายยางมีความยืดหยุ่นและนิ่มกว่า LDPE จึงส่งผลให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรมีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน

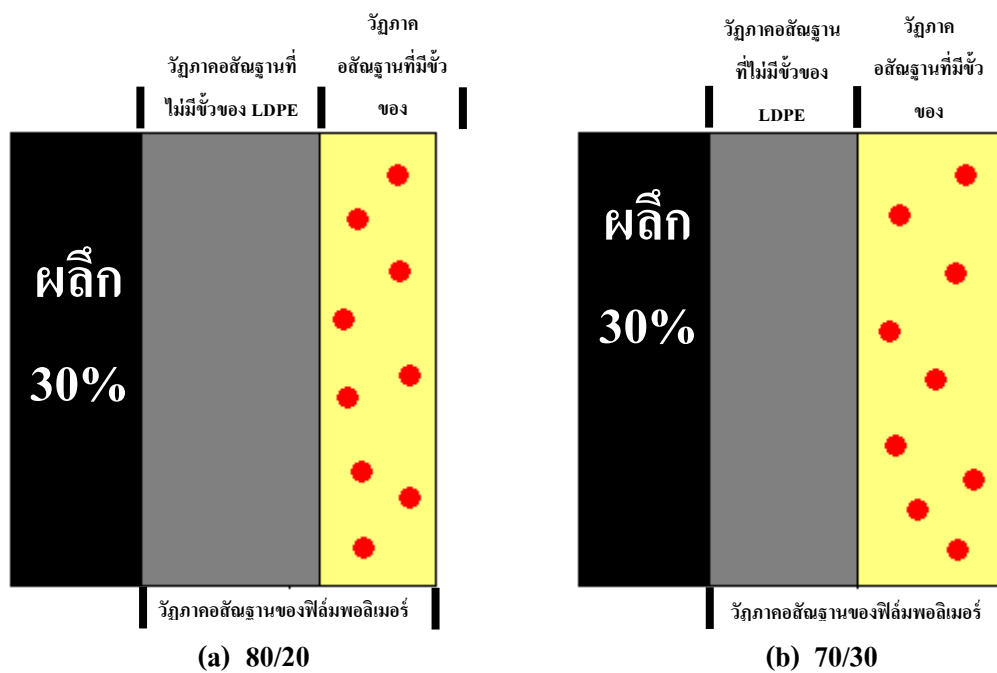
4.2.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ที่มีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อเติมโคพอลิเมอร์ผสมที่มีขั้วลงในพอลิเมอร์ จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจาก การเติมโคพอลิเมอร์ (EMA, EVA หรือ EEA) ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เป็นการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีความชอบน้ำมากขึ้น โดยพบว่าฟิล์มสูตร L70E30 มีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่นทั้งๆ ที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.6) และปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (ตารางที่ 4.5) ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองสัณฐานของฟิล์ม LDPE/Copolymer ที่มีอัตราส่วนต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.12 ภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 2 อัตราส่วนมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่ใกล้เคียงกันและมีปริมาณความเป็นผลึก (30%) นั่นคือมีส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานอยู่พอๆ กัน (70%) อย่างไรก็ตาม ฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 70/30 นั้นมีปริมาณของวัฏภาคอสัณฐานที่มาจากโคพอลิเมอร์มากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 80/20 ซึ่งโดยปกติโมเลกุลของไอน้ำจะซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ได้ดีกว่าวัฏภาค

สัณฐานที่ไม่มีขั้วของ LDPE จึงส่งผลให้ฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วน 70/30 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีอัตราส่วน 80/20



ภาพที่ 4.11 อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.12 แบบจำลองสัณฐานวิทยาของฟิล์ม LDPE/Copolymer ที่มีอัตราส่วนต่างกัน

(● แสดงถึง หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์)

ทั้งนี้แม้ว่าการออกสูตรฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรให้มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน การประเมินสภาพขั้วของฟิล์มทางอ้อมสามารถทำได้โดยการวัดมุมสัมผัสกับน้ำ โดยตารางที่ 4.7

แสดงค่ามุมสัมพัทธ์ของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมที่มีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วใกล้เคียงกันพบว่า พิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่ามุมสัมพัทธ์ไอน้ำลดลงจากฟิล์ม LDPE แสดงให้เห็นว่า การเติมโคพอลิเมอร์ที่มีขั้วนั้นเป็นการเพิ่มสภาพขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เมื่อทำการวัดค่ามุมสัมพัทธ์ของพอลิเมอร์ พบว่าสภาพขั้วของ EMA>EEA>EVA จึงส่งผลให้สภาพขั้วของพอลิเมอร์ผสม L80M20>L70E30>L80V20 โดยเรียงตามสภาพขั้วของโคพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามจากค่าการซึมผ่านไอน้ำ (ภาพที่ 4.11) กลับพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มสูตร L80M20 นั้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของวิฏภาคอสัณฐานของโคพอลิเมอร์ ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าอิทธิพลของสภาพขั้วของฟิล์มพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.7 ค่ามุมสัมพัทธ์ของน้ำกับพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมพัทธ์: Θ (degree)
LDPE	98.1 $\pm$ 1.5
EMA	77.0 $\pm$ 2.5
EVA	83.1 $\pm$ 3.3
EEA	78.4 $\pm$ 3.4
L80M20	81.7 $\pm$ 2.9
L80V20	88.0 $\pm$ 4.3
L70E30	84.3 $\pm$ 3.0

4.3 การศึกษาผลของลำดับการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ

การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA, LDPE/EVA และ LDPE/EEA เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยมีการควบคุมปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอและผลของลำดับการผสมในสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอ

4.3.1 การศึกษาผลของลำดับในการผสม

งานวิจัยที่ผ่านมาของนันทวรรณ ม่วงมี [7] และณัฐริกา ใจสมบุญ [8] ได้ทำการผสมพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของสกรูเท่ากับ 40 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ส่งผลให้ซีโอไลต์กระจายตัว

ได้ไม่ดี จึงได้ทำการผสมพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอผ่านสูตรเข้มข้นของ EVA/Zelite A ก่อนทำการผสมกับ PE เพื่อทำให้อนุภาคของซีโอไลต์เอกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมได้ดี

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนเครื่องมือผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด จึงได้ทำการศึกษาผลของลำดับในการผสมสูตรพอลิเมอร์ในสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอ โดยทำการศึกษาผลของลำดับในการผสมในสูตร L80M20Z20 ซึ่งใช้การผสม 2 วิธีคือการผสมผ่านสูตรเข้มข้นของ EMA/Zelite A เป็นเวลา 20 นาทีแล้วจึงผสมกับ LDPE อีก 20 นาที และวิธีการผสมแบบพร้อมกันหมดในครั้งเดียวใช้เวลา 20 นาที โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดใช้ความเร็วในการผสม (Rotor speed) ที่ 60 rpm และอุณหภูมิที่ 140°C เหมือนกันทั้ง 2 วิธี ก่อนทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคกดอัดสภาวะเดียวกัน ซึ่งฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 67 μ m แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของ L80M20Z20 โดยน้ำหนักและความหนาของฟิล์มตัวอย่าง

เทคนิค	อัตราส่วนของพอลิเมอร์โดย น้ำหนัก		ปริมาณ Zeolite A (%)	ความหนา (μ m)
	LDPE	EMA		
Masterbatch mixing	80	20	20	67 $\pm$ 7
One shot mixing	80	20	20	67 $\pm$ 7

4.3.1.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้วิธีการเผาพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 600°C โดยแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 พบว่าทั้งสองวิธีการผสมมีปริมาณ ซีโอไลต์เอที่พบมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณซีโอไลต์เอที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองวิธีนั้นได้มีการผสมผ่านเครื่องผสมแบบปิด การควบคุมปริมาณองค์ประกอบทำได้ค่อนข้างแน่นอนและไม่เกิดการสูญเสียสารที่ต้องการผสมไปในระหว่างการผสม

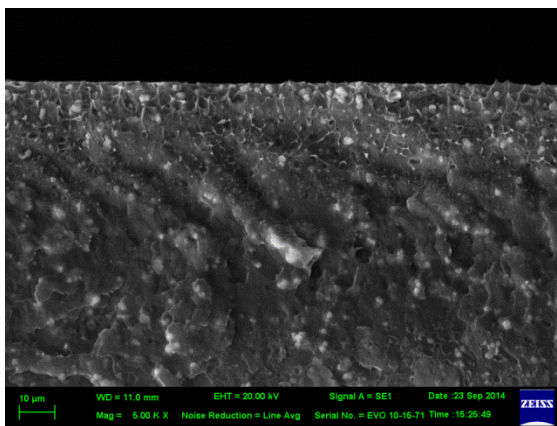
ตารางที่ 4.9 ปริมาณซีโอไลต์เอใน L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

เทคนิค	ปริมาณซีโอไลต์เอ (%wt)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ
Masterbatch mixing	20	20.1 $\pm$ 0.1
One shot mixing	20	21.1 $\pm$ 0.4

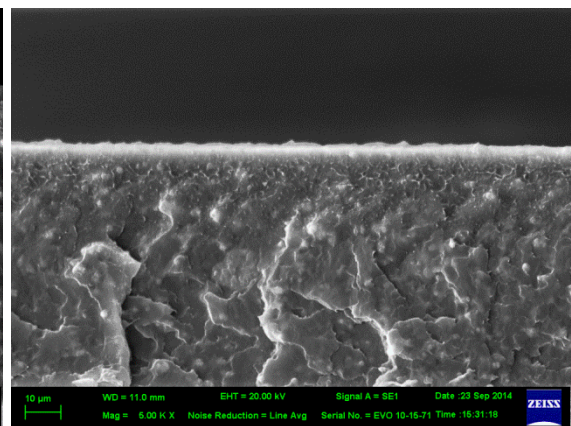
4.3.1.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีลำดับในการผสมต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมจาก 2 วิธี ทั้งก่อนและหลังทำการสกัดวัฏภาคกระจายออกให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองมีปริมาณของ LDPE, EMA และซีโอไลต์เอในปริมาณที่เท่ากัน และได้ทำการการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดซึ่งสามารถควบคุมปริมาณสารและสภาวะในการผสม (อุณหภูมิและแรงเฉือน) ของเครื่องได้อย่างแน่นอน

โดยภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ก่อนทำการสกัดวัฏภาคของ EMA พบว่าฟิล์มที่เตรียมจาก 2 วิธี มีการกระจายตัว (Distribution) ของซีโอไลต์เอดี อนุภาคส่วนใหญ่สามารถแตกกระจายเป็นอนุภาคเดี่ยว (Dispersion) ได้ดี เนื่องจาก EMA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วโดยส่วนไม่มีขั้วของ EMA ทำให้ EMA กระจายตัวได้ดีใน LDPE และส่วนที่มีขั้วของ EMA ช่วยทำให้ซีโอไลต์เอนั้นกระจายตัวได้ดี



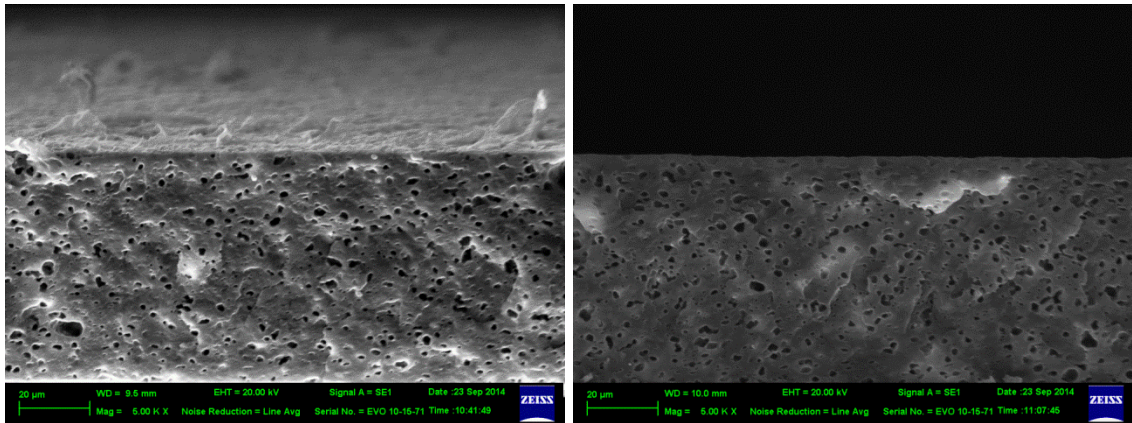
(a) Masterbatch mixing



(b) One shot mixing

ภาพที่ 4.13 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน ก่อนสกัดวัฏภาคกระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) ($10\mu\text{m}$)

จากภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 หลังทำการสกัดวัฏภาคของ EMA ออก โดยช่องว่างที่ปรากฏในรูป แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EMA ซึ่งเป็นวัฏภาคที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องของ LDPE พบว่าฟิล์ม L80M20Z20 จากการผสม 2 วิธี มีการกระจายของ EMA ที่ดีในสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอและไม่พบอนุภาคของซีโอไลต์เอในภาพที่ 4.14 แสดงว่าอนุภาคของซีโอไลต์เอชอบที่จะอยู่ในวัฏภาคของ EMA ที่มีขั้วมากกว่าวัฏภาคของ LDPE ที่ไม่มีขั้ว อนุภาคของซีโอไลต์เอจึงหลุดออกไปกับ EMA ที่ถูกสกัด



(a) Masterbatch mixing

(b) One shot mixing

ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน หลังสกัดวัฏ-
ภาคกระจายออก (กำลังขยาย 5000 เท่า) (|——| 20µm)

4.3.1.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน

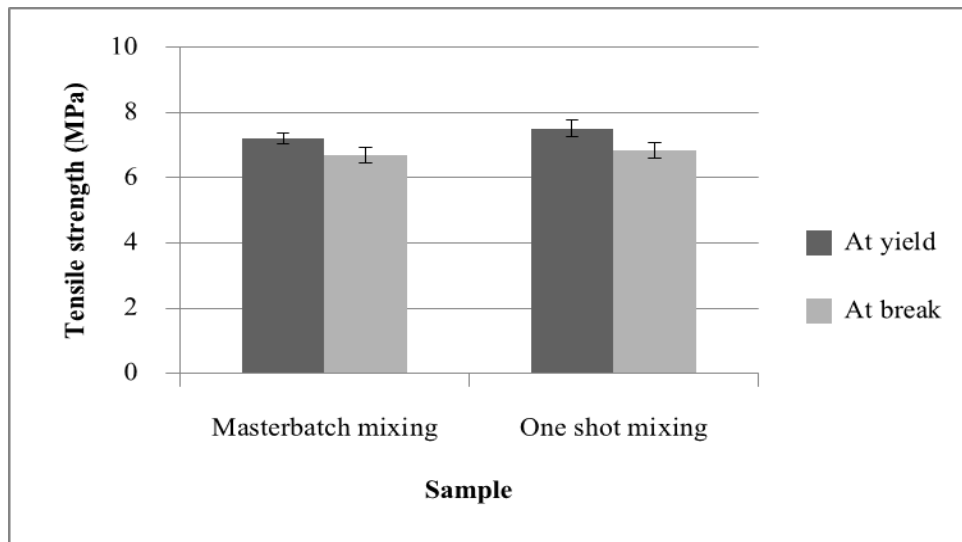
การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการผสมด้วย
วิธีการผสมที่แตกต่างกันด้วย DSC แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และ
อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ที่ Peak ของ LDPE พอลิเมอร์ผสมสูตร L80M20Z20 ทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่าง
กัน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองมีองค์ประกอบของฟิล์มที่เหมือนกัน อีกทั้งฟิล์มทั้งสองมี
การกระจายตัวของซีไอไลต์เอดี ซึ่งซีไอไลต์เอส่วนใหญกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของ EMA
จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE จึงให้ฟิล์มสูตรดังกล่าวมีความเป็นผลึกที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 พฤติกรรมทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ในฟิล์ม L80M20Z20

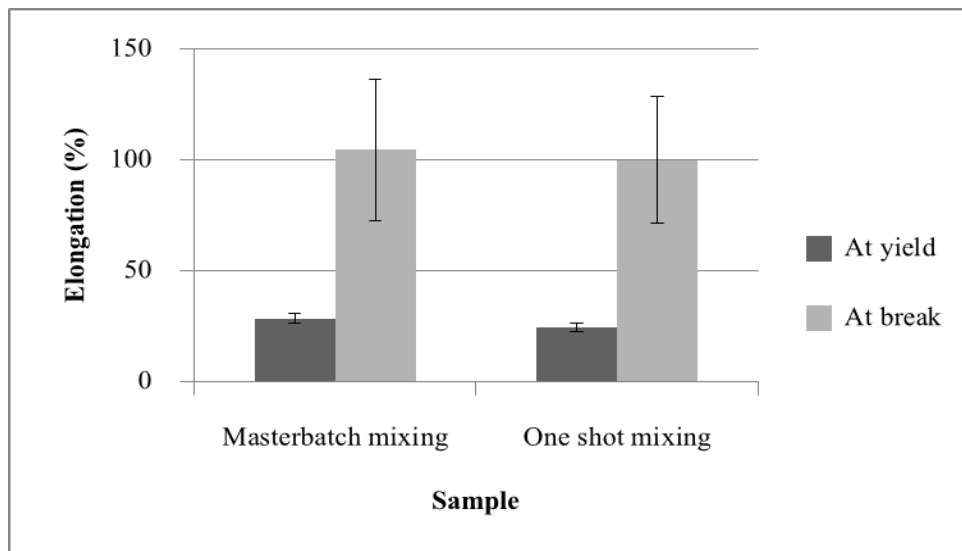
สาร	วิธีผสม	T_m Peak of LDPE (°C)	T_c Peak of LDPE (°C)	X_c (%)
L80M20Z20	Masterbatch mixing	112.6	92.3	29
L80M20Z20	One shot mixing	116.1	93.1	29

4.3.1.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับผสมต่างกัน

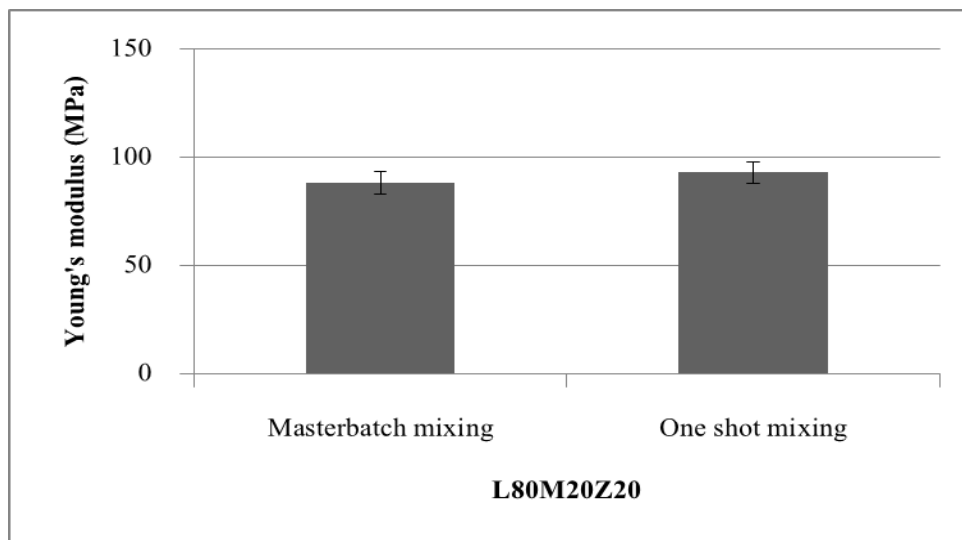
จากภาพที่ 4.15 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีวิธีการผสมที่
แตกต่างกัน พบว่าฟิล์มที่มีวิธีการผสมที่แตกต่างกันมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด, ร้อยละ
การดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด, ยัมมอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟิล์มในแต่
ละสูตรมีปริมาณของ LDPE, EMA และซีไอไลต์เอที่เท่ากัน และมีการกระจายตัวของซีไอไลต์เอ
และ EMA ที่คล้ายกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างกัน



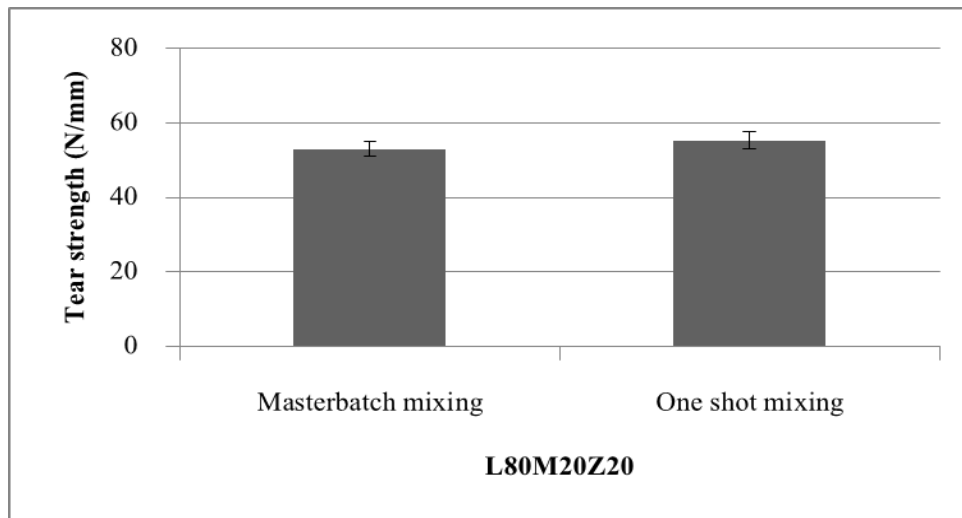
(a) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด



(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด



(c) ย้ํมอดุลัส

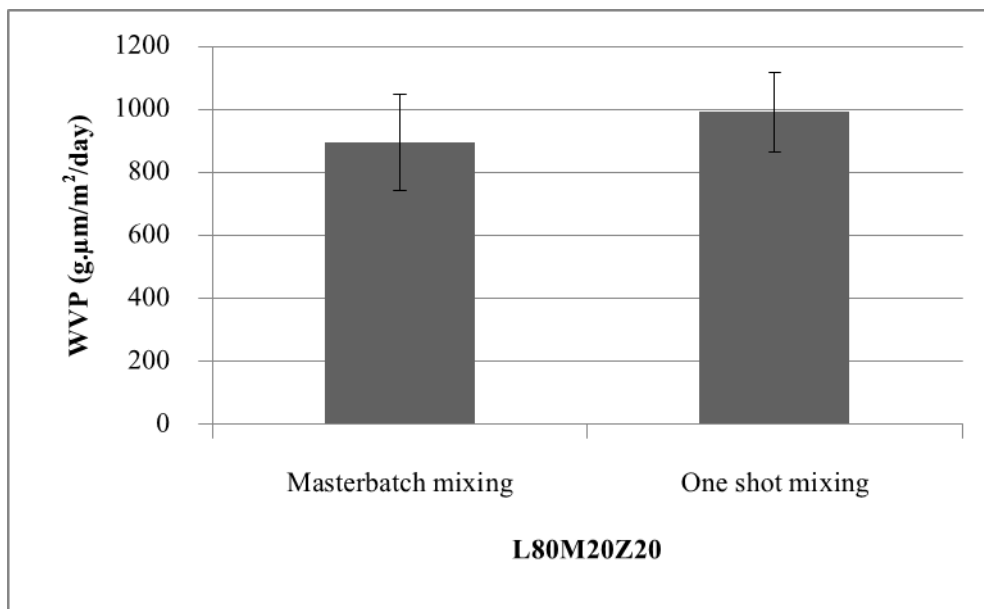


(d) ความแข็งแรงฉีกขาด

ภาพที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

4.3.1.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับการผสมต่างกัน

จากภาพที่ 4.16 พบว่าฟิล์มที่มีลำดับการผสมที่ต่างกันมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณ EMA และซีโอไลต์เอเท่ากัน โดยฟิล์มที่มีลำดับการผสมที่ต่างกันมีลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซีโอไลต์เอที่คล้ายกัน ซึ่งไอน้ำสามารถซึมผ่านในส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานที่มีขั้วของฟิล์มและรูพรุนที่มีขั้วของซีโอไลต์เอได้ดีเหมือนกัน



ภาพที่ 4.16 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม L80M20Z20 ที่มีลำดับในการผสมที่ต่างกัน

จากการศึกษาผลของลำดับของการผสม พบว่าลำดับในการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดที่สภาวะการผสมเหมือนกันคือ ความเร็วในการผสมที่ 60 rpm และอุณหภูมิที่ 140°C ไม่ส่งผลกระทบต่อฐานวิทยาและการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ ทำให้ฟิล์ม L80M20Z20 มีสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมแบบพร้อมกันหมดในครั้งเดียวในการเตรียม พอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอในการศึกษาในตอนต่อไป เนื่องจากการผสมทั้ง 2 วิธีให้ผลการทดลองไม่ต่างกัน และการผสมแบบครั้งเดียวใช้เวลาในการผสม 20 นาที ซึ่งน้อยกว่าการผสมผ่านสูตรเข้มข้น (Masterbatch mixing) (40 นาที) และเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเสียสภาพทางความร้อนอันเนื่องมาจากการสัมผัสกับความร้อนหลายครั้ง

4.3.2 การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ

การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA/Zelite A, LDPE/EEA/Zelite A และ LDPE/EVA/Zelite A โดยที่มีการควบคุมให้มีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วให้ใกล้เคียงกันและทำการขึ้นรูปฟิล์มแบบกดอัด นำเสนอโดยใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.11 ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 62-67 μm

ตารางที่ 4.11 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและความหนาเฉลี่ย

สูตร	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยน้ำหนัก				ปริมาณ ซีโอไลต์เอ (%)	ความหนาเฉลี่ย (μm)
	LDPE	EMA	EEA	EVA		
LDPE	100	0	0	0	-	66 $\pm$ 6
L100Z20	100	-	-	-	20	65 $\pm$ 8
L80M20Z20	80	20	-	-	20	67 $\pm$ 7
L80V20Z20	80	-	-	20	20	62 $\pm$ 5
L70E30Z20	70	-	30	-	20	62 $\pm$ 7

4.3.2.1 การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม

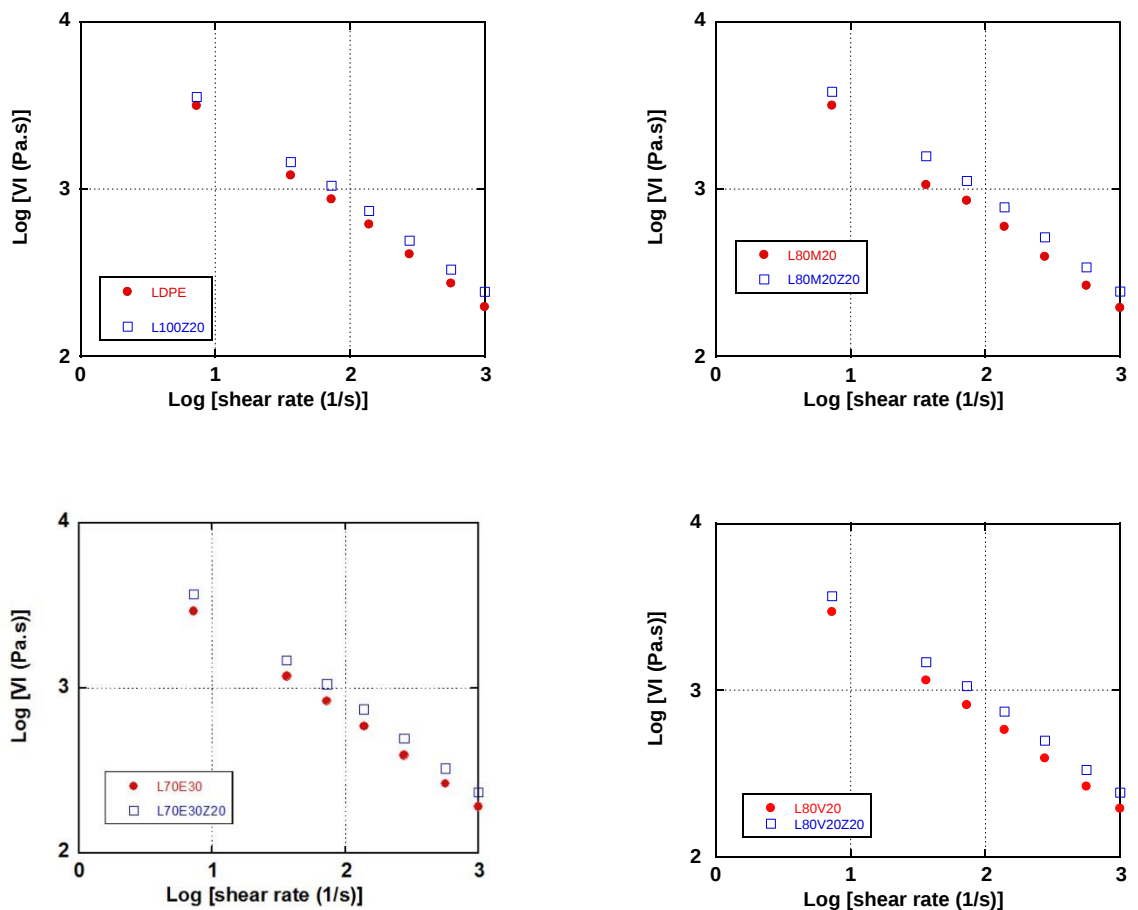
การตรวจสอบปริมาณของซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้วิธีการเผาที่ 600°C โดยแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.12 พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีปริมาณของซีโอไลต์เอ

ใกล้เคียงกับปริมาณซีโอไลต์เอที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรใช้วิธีการผสมผ่านเครื่องผสมแบบปิด จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่เกิดการสูญเสียไปในระหว่างการผสม

ตารางที่ 4.12 ปริมาณซีโอไลต์เอในพอลิเมอร์ผสม

Sample	ปริมาณซีโอไลต์เอ (%)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ
L100Z20	20	19.8 ± 0.0
L80M20Z20	20	20.1 ± 0.1
L80V20Z20	20	20.1 ± 0.0
L70E30Z20	20	20.1 ± 0.1

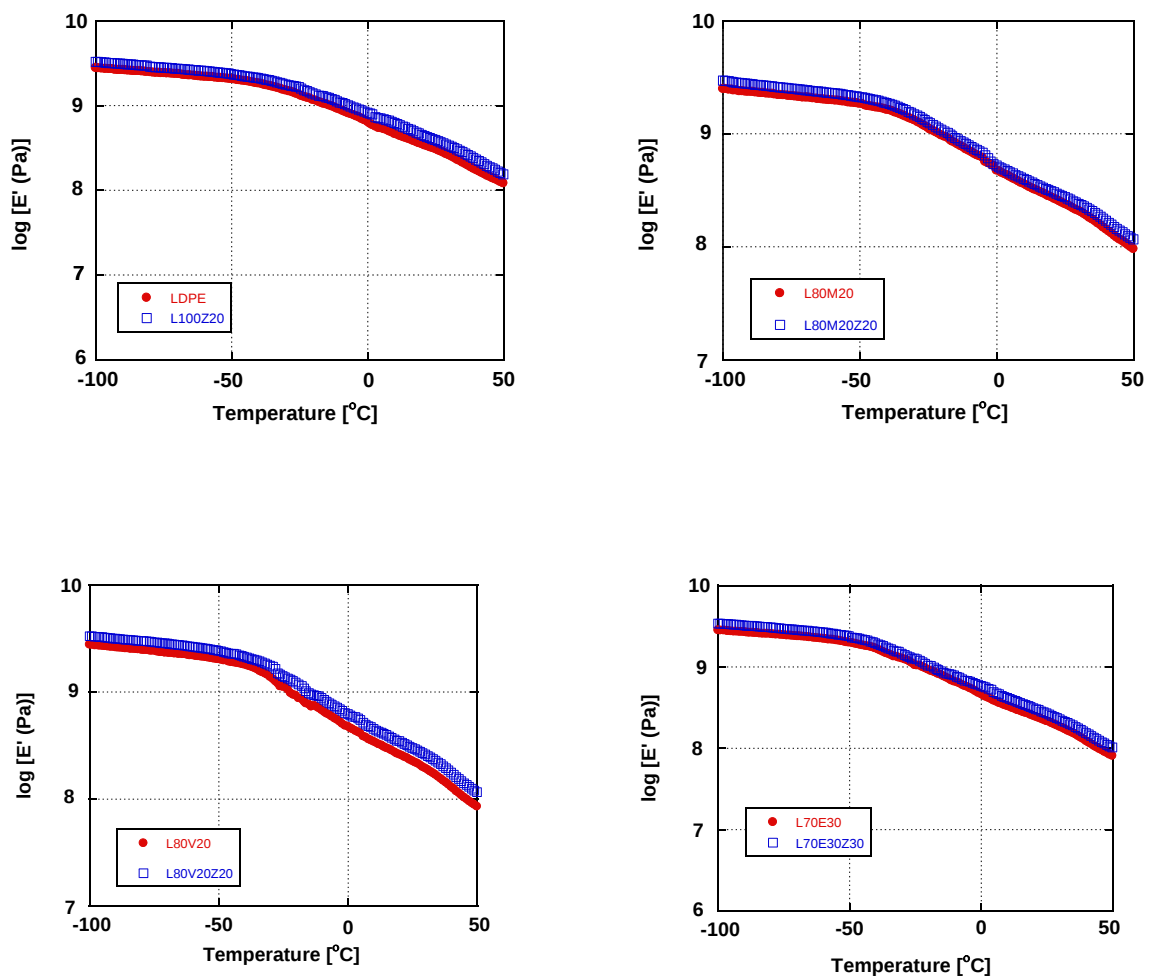
4.3.2.2 การศึกษาสมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูง



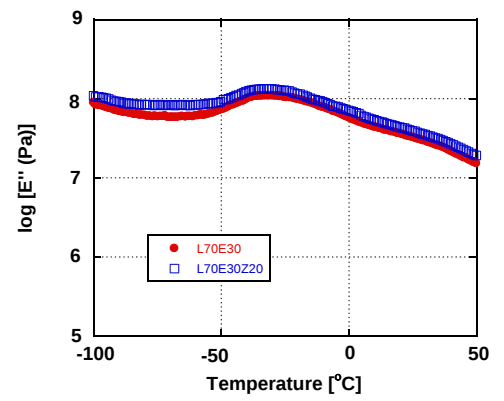
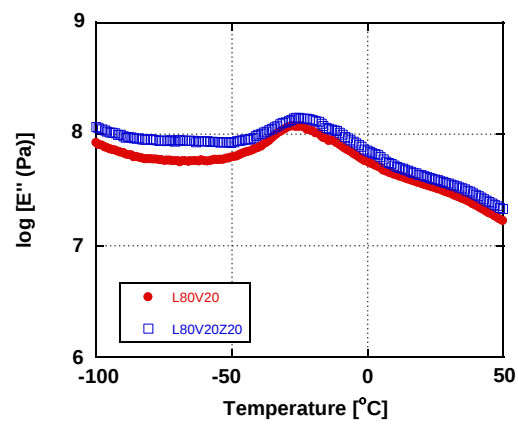
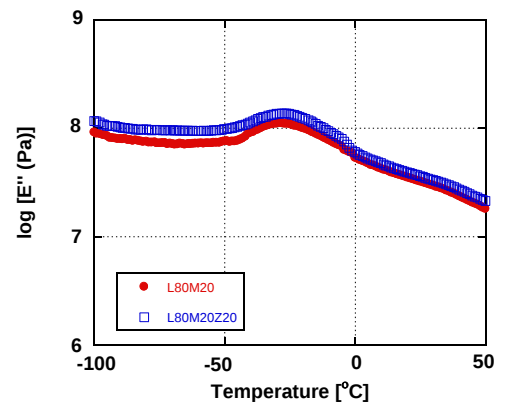
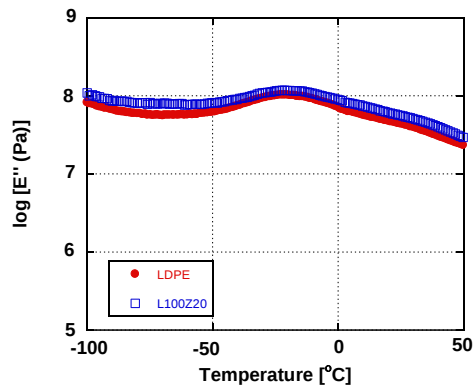
ภาพที่ 4.17 สมบัติการไหลที่สภาวะแรงเฉือนสูงของพอลิเมอร์ที่มีซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาผลของการไหลที่สภาวะแรงเฉือนที่สูงโดยใช้ Capillary rheometer พบว่า เมื่อทำการเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เป็นอนุภาคของแข็งทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ยากขึ้น โดยที่พอลิเมอร์สูตรที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอแสดงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic นั่นคือเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัวได้มากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการไหลตามแนวแรงกระทำได้ดีขึ้น

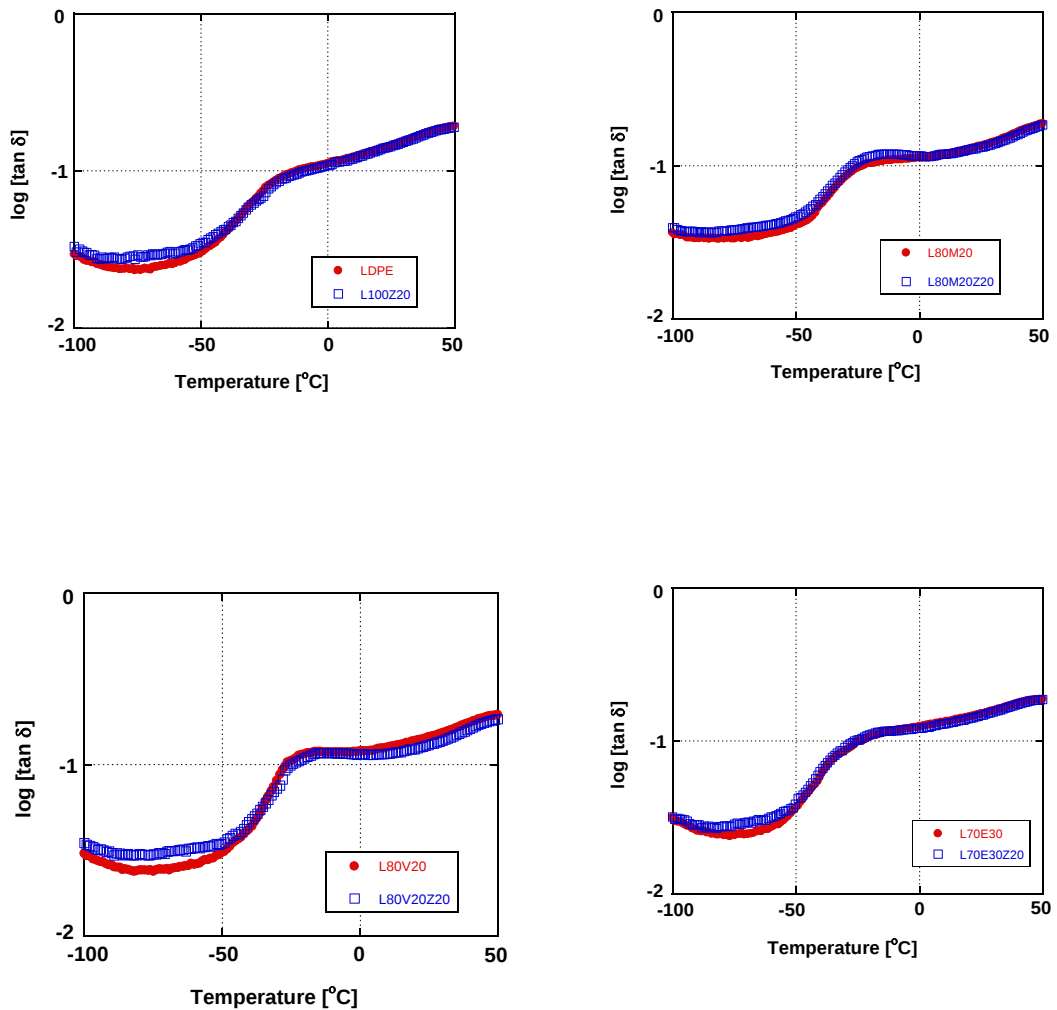
4.3.2.3 พฤติกรรมทางความร้อนแบบพลวัตของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



(a) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ



(b) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสียกับอุณหภูมิ ของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอโลดเ



(c) เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

ภาพที่ 4.18 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม, มอดุลัสสูญเสีย และ $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ ของพอลิเมอร์ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA สามารถใช้หาค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E'), ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและมอดุลัสสะสม (Loss modulus/Storage modulus, E''/E') ได้ค่าเป็น $\tan \delta$

จากภาพที่ 4.18 (a-b) พบว่าเมื่อทำการเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซีโอไลต์เอไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่

พอลิเมอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่จึงส่งผลให้มีค่า E' และ E'' ที่สูงขึ้น

จากภาพที่ 4.18 (c) เมื่อทำการพิจารณาค่า $\tan \delta$ พบว่า $\tan \delta$ ของพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีคาร์บอนิลไอโกลต์เออยู่ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 25°C โดย T_g ของพอลิเมอร์แต่ละตัวแสดงดังตารางที่ 4.13 สามารถบอกได้ว่า T_g ที่พบในภาพที่ 4.16 (c) คือ T_g ของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติมคาร์บอนิลไอโกลต์เอลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมไม่เปลี่ยนแปลงไป นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนิลไอโกลต์เอที่เติมลงไปนั้นไม่เกิดอันตรกิริยากับ LDPE และโคพอลิเมอร์

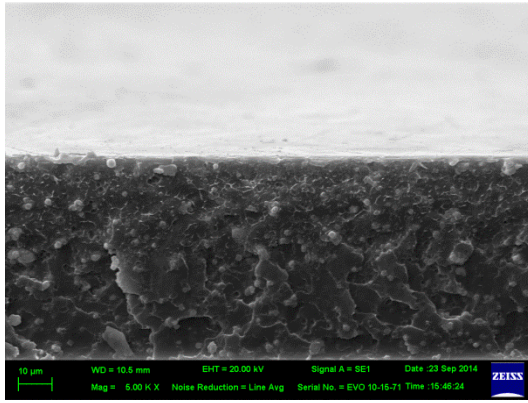
ตารางที่ 4.13 ค่า T_g ของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์	T_g (°C)
LDPE	-75 ถึง 50
EMA	-75 ถึง 50
EVA	-75 ถึง 25
EEA	-75 ถึง 75

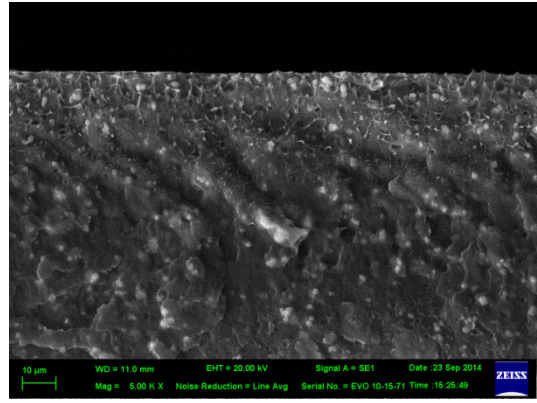
4.3.2.4 การศึกษาการกระจายตัวของคาร์บอนิลไอโกลต์เอในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาการกระจายตัวของคาร์บอนิลไอโกลต์เอในฟิล์ม LDPE/EMA/Zeolite A, LDPE/EEA/Zeolite A และ LDPE/EVA/Zeolite A แสดงดังภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของคาร์บอนิลไอโกลต์เอ พบว่าฟิล์มสูตร L100Z20 มีการกระจายตัว (Distribution) ของคาร์บอนิลไอโกลต์เอดี แต่คาร์บอนิลไอโกลต์เอมีการแตกตัว (Dispersion) เป็นอนุภาคเดี่ยว (Single particles) และเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) แต่เมื่อมีการเติมโคพอลิเมอร์ พบว่าคาร์บอนิลไอโกลต์เอมีการแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ได้ดีกว่า เนื่องจาก EMA, EVA และ EEA ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จึงช่วยให้คาร์บอนิลไอโกลต์เอสามารถกระจายตัวและแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ดีขึ้น

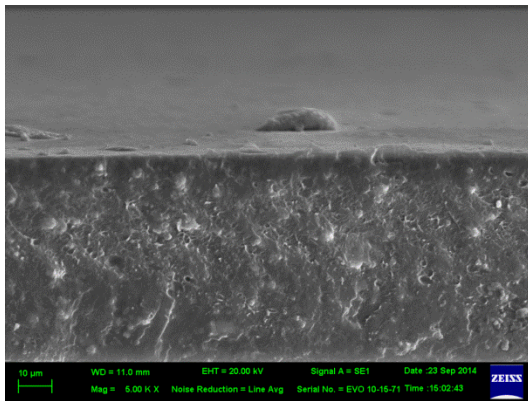
ภาพที่ 4.20 แสดง SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L100Z20 ไม่มี Copolymer เป็นองค์ประกอบ จึงพบช่องว่างที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตรอื่นๆ โดยช่องว่างขนาดเล็กแสดงถึงบริเวณที่เคยมีอนุภาคคาร์บอนิลไอโกลต์เอที่แตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวปรากฏอยู่ ในขณะที่ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงถึงบริเวณที่เคยมีอนุภาคของคาร์บอนิลไอโกลต์เอที่รวมตัวกันปรากฏอยู่ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพก่อนการสกัดของฟิล์มสูตร L100Z20 (ภาพที่ 4.19) พบว่าไม่ปรากฏช่องว่างแสดงว่าสภาวะที่ใช้ในการสกัดวัฏภาคกระจาย ทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาคคาร์บอนิลไอโกลต์เอบริเวณพื้นที่ที่ถูกสกัด เนื่องจากคาร์บอนิลไอโกลต์เอไม่มีอันตรกิริยาที่ดีกับ LDPE



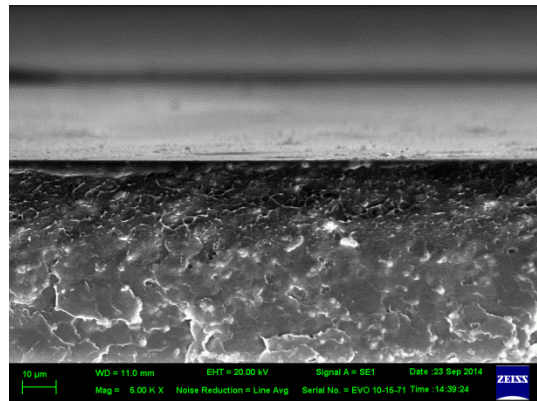
L100Z20



L80M20Z20



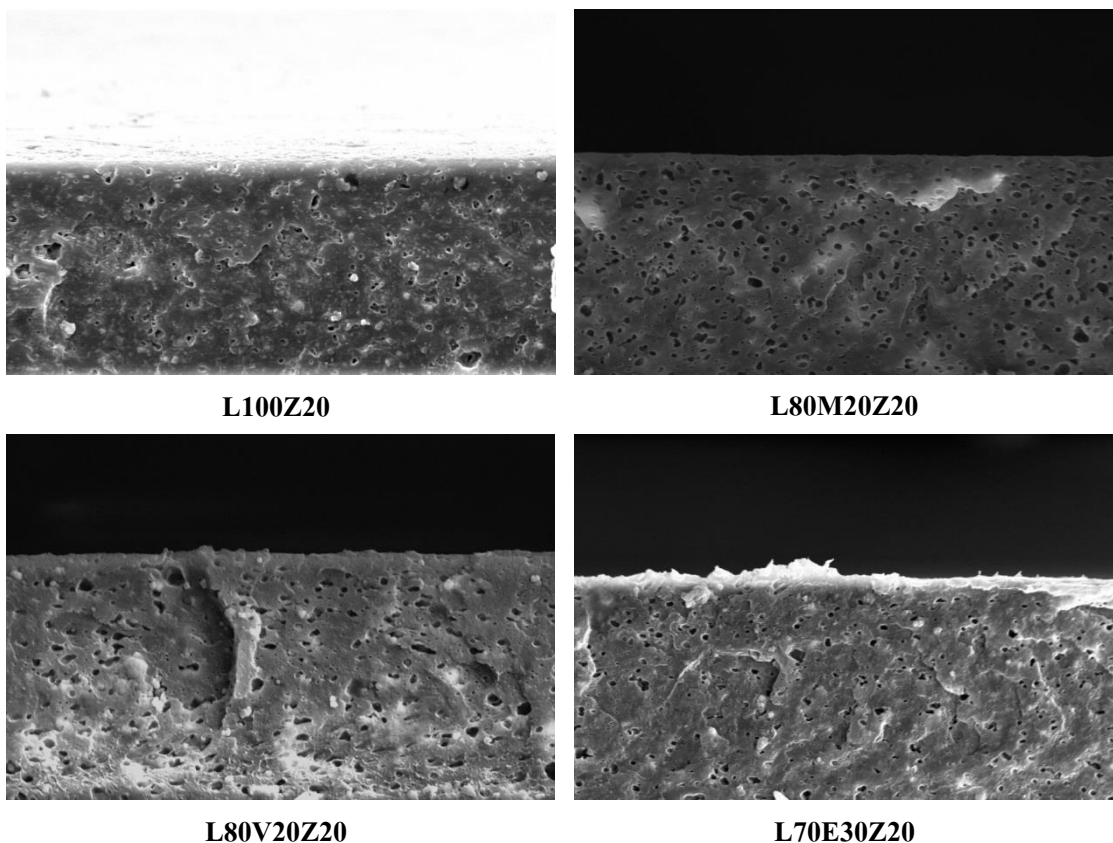
L80V20Z20



L70E30Z20

ภาพที่ 4.19 พื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอ 20% (กำลังขยาย 5000 เท่า) ($10\ \mu\text{m}$)

ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 ที่ผ่านการสกัด EMA, EVA และ EEA ตามลำดับ จะพบช่องว่างซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่เคยมีโคพอลิเมอร์ปรากฏอยู่ โดยโคพอลิเมอร์เหล่านี้สามารถกระจายตัวได้ดีในทุกสูตรฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอ ทั้งนี้เนื่องจาก EMA, EVA และ EEA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วจะช่วยให้ Copolymer กระจายตัวได้ดีใน LDPE และส่วนที่มีขั้วจะช่วยให้ซีโอไลต์เออยู่ในวัฏภาคกระจาย สังเกตได้จากฟิล์มหลังการสกัดสูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 พบว่าภายในช่องว่างบางช่องว่างยังคงมีอนุภาคของซีโอไลต์เอหลงเหลืออยู่ ยังเป็นการยืนยันว่าซีโอไลต์เอชอบอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของ EMA, EVA และ EEA มากกว่าวัฏภาคที่ไม่มีขั้วของ LDPE



ภาพที่ 4.20 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอหลังสกัด (กำลังขยาย 5000 เท่า) ($\overline{\text{—}} = 10 \mu\text{m}$)

4.3.2.5 ผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์

การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ DSC แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

Sample	Zeolite A 0%			Zeolite A 20%		
	T _m Peak of LDPE (°C)	T _c Peak of LDPE (°C)	X _c (%)	T _m Peak of LDPE (°C)	T _c Peak of LDPE (°C)	X _c (%)
LDPE	114.2	94.2	38	112.8	94.9	31
L80M20	112.0	95.5	31	112.6	92.3	29
L80V20	112.3	95.4	29	112.8	93.4	27
L70E30	111.3	94.9	29	113.5	93.4	30

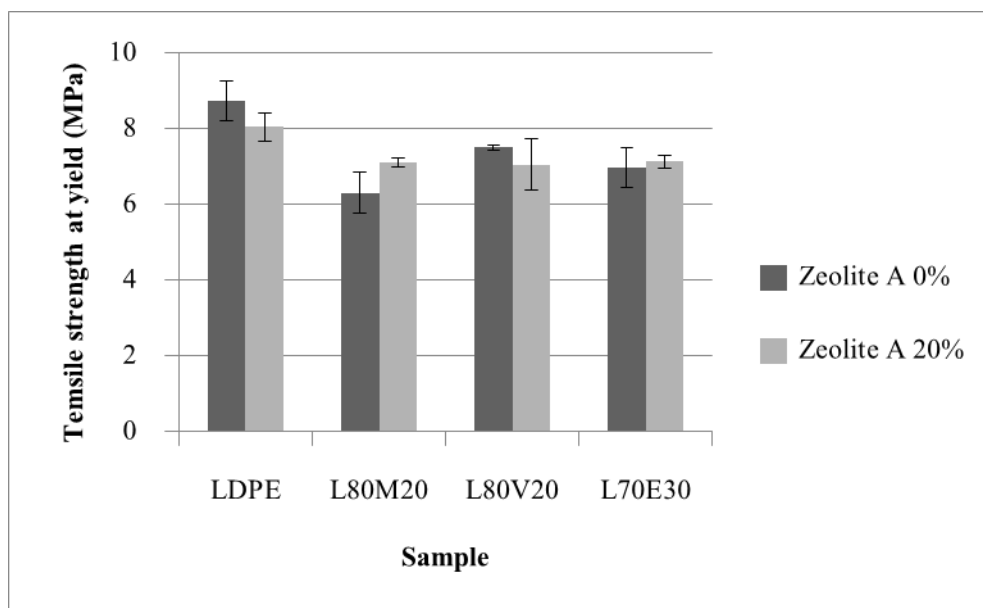
หมายเหตุ ค่า X_c ในสูตรที่มีซีโอไลต์เอคำนวณเทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์เท่านั้น (Normalized value)

จากผลการทดลองพบว่า พิล์มพอลิเมอร์สูตรที่มีการเติมซีโอไลต์เอมี T_m และ T_c ของ LDPE ใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดของผลึกของ LDPE ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่า พิล์มพอลิเมอร์สูตรดังกล่าวมีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน เนื่องจากซีโอไลต์เอที่เติมลงไปนั้น ชอบกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของโคพอลิเมอร์ซึ่งปกติโคพอลิเมอร์ (EMA, EVA หรือ EEA) สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ LDPE ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับ LDPE จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นผลึกอย่างชัดเจน

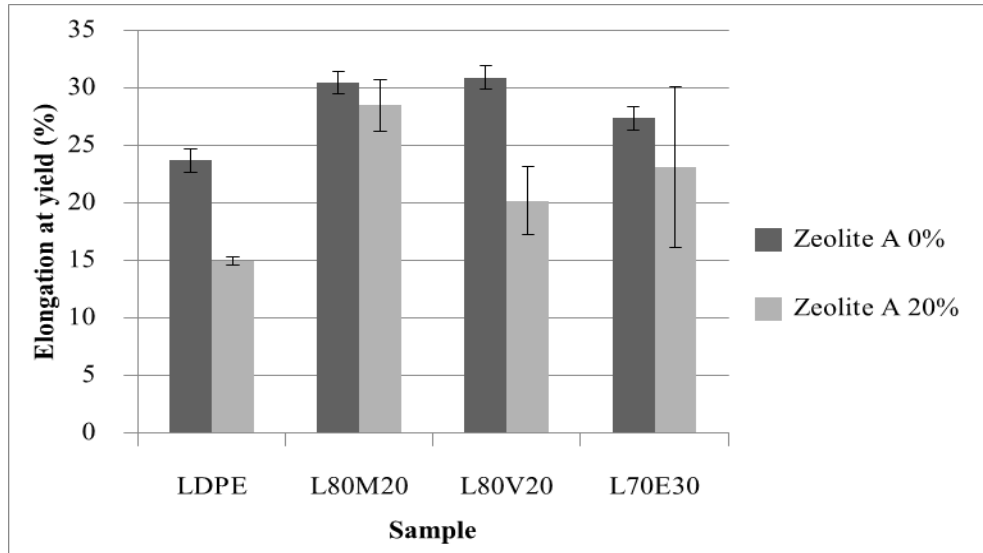
ในกรณีฟิล์มสูตร L100Z20 พบว่าเมื่อทำการเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ จะทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง แสดงว่าซีโอไลต์เอที่เติมลงไปปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ไปรบกวนการเกิดผลึกของ LDPE

4.3.2.6 ผลของการเติมซีโอไลต์เอที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

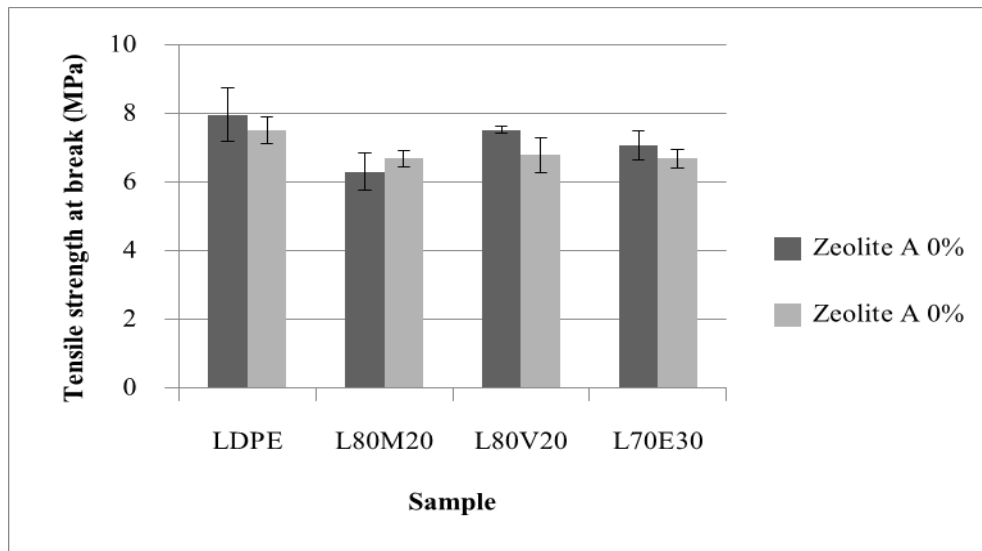
จากภาพที่ 4.21 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าฟิล์มสูตร L100Z20 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด และการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เอที่เติมลงไปนั้นเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีกับ LDPE ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก/ขาด ของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอ 20% มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เอกระจายตัวอยู่ในวัฏภาค EMA, EVA และ EEA (ตามลำดับ) มากกว่าวัฏภาคที่ไม่มีขั้วของ LDPE แต่การมีอนุภาคของแข็งจะทำให้ฟิล์มมีค่าการดึงยืด ณ จุดคราก/ขาด ลดลงเนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่างซีโอไลต์เอและโคพอลิเมอร์



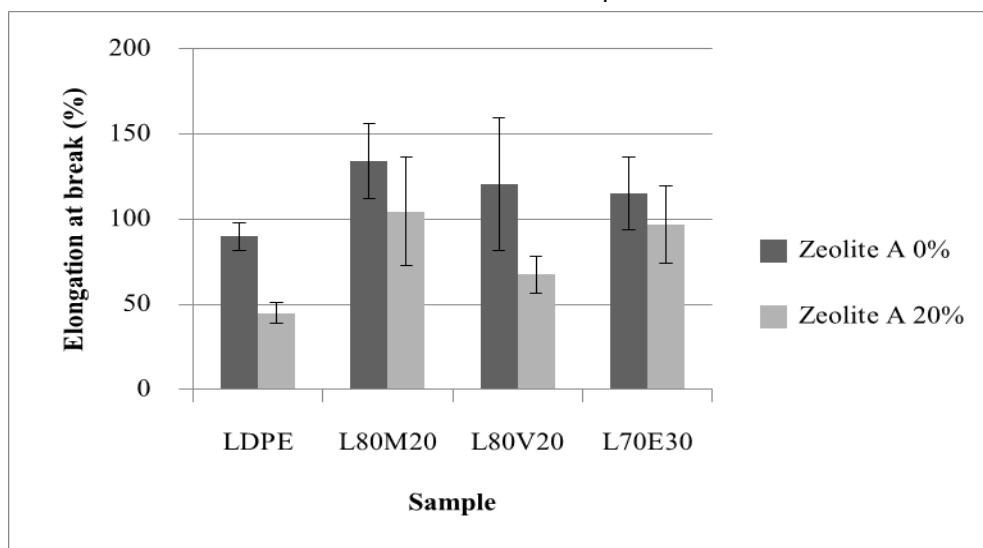
(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



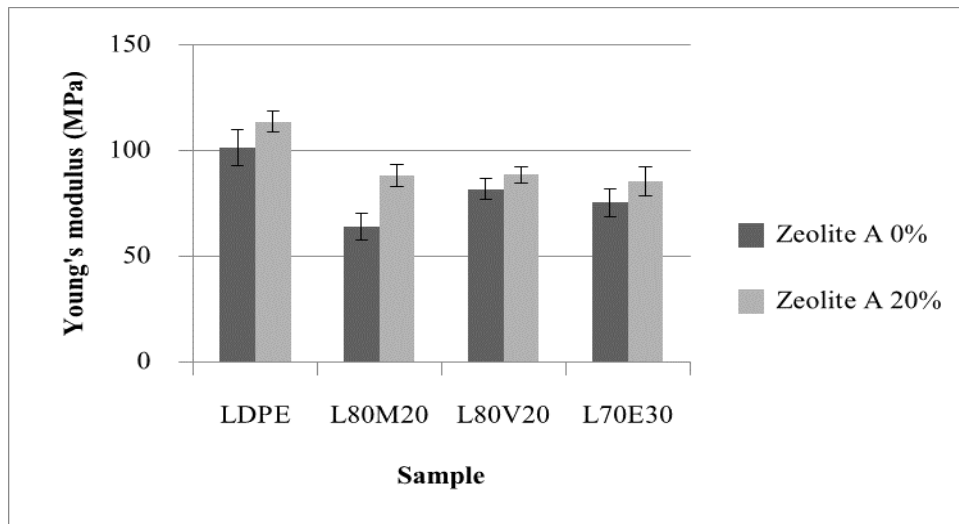
(b) การดิ่งยืด ณ จุดคราก



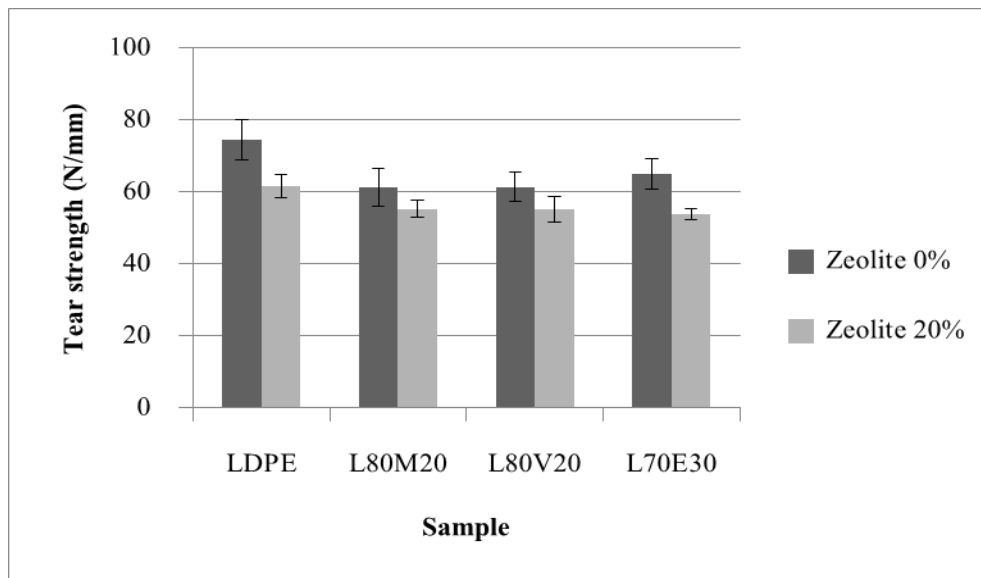
(c) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด



(d) การดิ่งยืด ณ จุดขาด



(e) ค่ามอดุลัสของยัง



(f) ความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

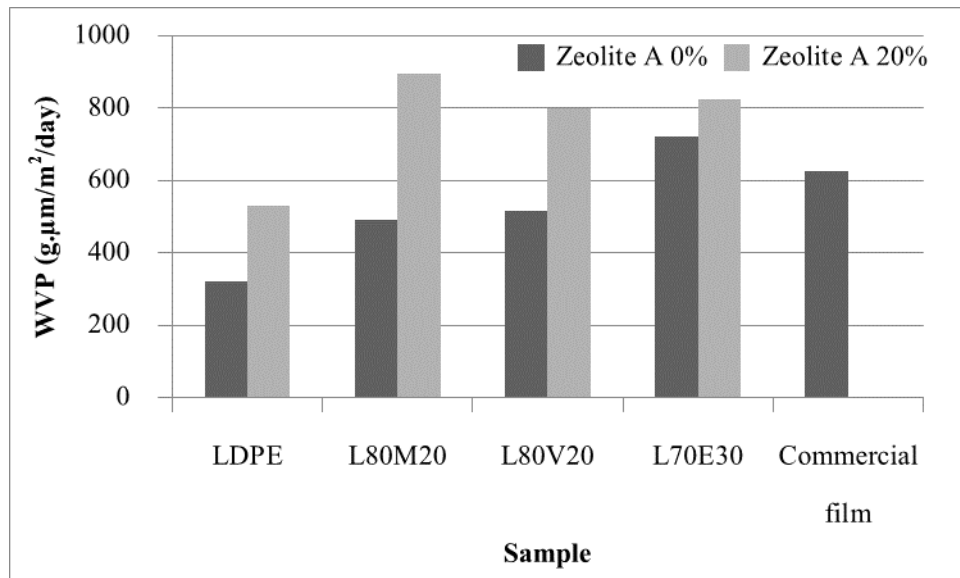
ภาพที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

ค่ามอดุลัสของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกสูตรฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคของแข็งที่มีค่ามอดุลัสที่สูงกว่าพอลิเมอร์ ในขณะที่ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมซีโอไลต์เอเป็นการเพิ่มจุดสะสมของความเค้น (Stress concentrator) จึงทำให้เมื่อฟิล์มพอลิเมอร์ได้รับแรงจึงฉีกขาดง่ายขึ้น

4.3.2.7 ผลของการเติมซีโอไลต์เอต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

จากภาพที่ 4.22 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของทุกสูตรฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมซีโอไลต์เอ เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นอนุภาคที่มีรูพรุนและมีขั้วสูง เมื่อเติมซีโอไลต์เอ

ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสภาพขรุขระที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มสามารถเหนี่ยวนำให้น้ำมาเกาะที่ผิวฟิล์มได้มากขึ้น โดยอนุภาคของซีโอไลต์จะสามารถดูดซับน้ำไว้ที่พื้นผิวแล้วปลดปล่อยน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ออก ทำให้ให้น้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 4.22 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมซีโอไลต์เอเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

ในกรณีของฟิล์มสูตร L100Z20 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากฟิล์ม LDPE เนื่องจากการมีซีโอไลต์เอดังกล่าวข้างต้น และไอน้ำยังสามารถซึมผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์เอที่มีขั้วและ LDPE ที่ไม่มีขั้ว ฟิล์มสูตร L80M20Z20, L80V20Z20 และ L70E30Z20 พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากฟิล์มที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ เนื่องจากการมีซีโอไลต์เอดังกล่าวข้างต้น และเกิดจากการเติมโคพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มฐานที่จับให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งไอน้ำสามารถซึมผ่านฐานที่จับของโคพอลิเมอร์ได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้กับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดที่ระบุว่าสามารถยืดอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีซีโอไลต์เอเป็นองค์ประกอบมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีการขายในท้องตลาด โดยฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีขายในท้องตลาด 43%

จากตารางที่ 4.15 พบว่าอุณหภูมิไอน้ำลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์เอนั้นเป็นการเพิ่มสภาพขรุขระให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยฟิล์มที่มีขั้ว

เพิ่มขึ้นนั้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.15 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมซีโอไลต์เอและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

Sample	Contact angle (θ)	
	Zeolite A 0%	Zeolite A 20%
LDPE	98.1 ± 1.5	75.5 ± 1.2
L80M20	81.7 ± 2.9	71.4 ± 3.5
L70E30	84.3 ± 3.0	72.5 ± 2.7
L80V20	88.0 ± 4.3	79.2 ± 2.7

จากการสังเกตพบว่า LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอ 20% (L100Z20) นั้นมีสภาพผิวที่สูงกว่าพอลิเมอร์สูตร L80V20Z20 แต่กลับมีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ต่ำกว่า (ภาพที่ 4.22) เป็นการยืนยันได้ว่าอิทธิของวัฏภาคอสัณฐานที่มีข้อต่อส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าอิทธิพลของสภาพผิวของฟิล์ม

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยเอทิลีนโคพอลิเมอร์ และซีโอไลต์เอ เพื่องานบรรจุภัณฑ์ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด โดยงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกใช้คือ EMA, EVA และ EEA นอกจากนี้ยังศึกษาผลของลำดับในการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของอัตราส่วน LDPE/EMA พบว่า EMA กระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ LDPE โดย EMA ช่วยเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานและความมีขี้วให้แกฟิล์มพอลิเมอร์ผสม การเพิ่มปริมาณ EMA พบว่าค่าความหนืดของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม, ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมอดุลัสที่ลดลง ที่ปริมาณ EMA มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่ลดลง

2. การศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำโดยมีการควบคุมให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้วให้ใกล้เคียงกัน พบว่า Copolymer ทุกตัว (EMA, EVA และ EVA) สามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาค LDPE โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีปริมาณความเป็นผลึก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ยังมอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่าฟิล์ม LDPE ฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L70E30 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานที่มีขี้วมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

3. การศึกษาลำดับในการผสมและผลของการเติมซีโอไลต์เอ พบว่าลำดับในการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดในสภาวะการผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ที่ 140°C ให้การกระจายตัวของซีโอไลต์เอและปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในฟิล์มเท่ากัน จึงไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม และจากการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์เอ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าซีโอไลต์เอที่เติมลงไปนั้นมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคที่มีขี้วของเอทิลีนโคพอลิเมอร์ แต่ไม่มีอันตรกิริยาที่ดีกับพอลิเมอร์ผสม จึงไม่รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE เมื่อทำการเติมซีโอไลต์เอจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืด, ยังมอดุลัส และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น แต่ไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดเปลี่ยนแปลงไป การเติมซีโอไลต์เอทำให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อพิจารณาค่าซึมผ่านไอน้ำพบว่าฟิล์มที่การเติมซีโอไลต์เอนั้นมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำที่สูงขึ้น

จากงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการซึมผ่านผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มวัฏภาคอสัณฐานที่มีขี้้วและการเติมซีโอโลต์เอให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ โดยพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์สูตร L80M20Z20 มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LDPE 180% และมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดที่ระบุว่าสามารถยืดอายุในการเก็บรักษาได้ 43%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์โดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบเป่า เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์
2. ปรับปรุงความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) มีความแข็งแรงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] จามทิพย์ ภู่วโรดม. “การบรรจุอาหาร.” กรุงเทพฯ : เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์, 2550.
- [2] เนตรนภา ลามอ และเบญจวรรณ ดานนท์. “สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเอเททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซีโอไลต์เอ.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] สุภารัตน์ รักชลธิ์, กังสดาล บัวบุตร, ณัฐนิชา ศรีเจียรนัยและกัญญาวีร์ สุวรรณชัย. “สมบัติของฟิล์มพอลิเอเททิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์เอ”. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 30(4) (2545) 262-270.
- [4] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย. “การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอัดรีดพอลิเอเททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [5] พรพรรณ มั่นประสิทธิ์ และภาสินี แต้ดี. “การเตรียมและทดสอบสมบัติของเอเททิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [6] C. Li, Q. Kong, J. Zhao, D. Zhao, Q. Fan and Y. Xia. “Crystallization of partially miscible linear low-density polyethylene/poly (ethylene-co-vinyl acetate) blends.” **Material Letters** 58 (2004) 3613-3617.
- [7] นันทวรรณ ม่วงมี. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [8] ณัฐริกา ใจสมบุญ. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลแอลดีพีอีด้วยอีวีเอและซีโอไลต์เอ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [9] จิตรา ศักดาพิสุทธ์, เมธาวิ อุดตสุรดี และรันตี บุญตา. “การปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแอลดีพีอีด้วยอีวีโอเอชและซีโอไลต์เอ.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง. 2556.

- [10] R.W. Halle. "New Ethylene-Methyl Acrylate Copolymer for Multilayer Flexible Packaging Applications." **Journal of Plastic Film and Sheeting** 5 (1989) 56-65
- [11] สมชาย กล้าหาญ. "วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน." ภาควิชาพืชสวน คณะ
เทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [12] S. Dirim, A. Esin and A. Bayindirli. "A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolite for the Packaging of Fruits and Vegetables : Film Preparation." **Journal of Food Engineering** 63 (2004) 9-13.
- [13] ญาดา จันทรสมบัติ. "ผลของการบรรจุที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาพริกชี้หูสด." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยี
การบรรจุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549.
- [14] จิรา ณ หนองคาย. "เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและดอกไม้." กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แมส
พลับพลึง. 2534.
- [15] ดนัย บุญเกียรติ. "สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวผัก ผลไม้และดอกไม้." คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2540.
- [16] E.B. Pantastico. "**Postharvest Physiology Handling and Utilization of tropical and Subtropical Fruits and Vegetables.**" Westport CT : The AVI Publishing Company
Inc. 1975.
- [17] รุ่งนภา วิสฐุศุครการ. "เอกสารประกอบการสอนการประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหาร." ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [18] D. Zagory and A.A. Kader. "Modified atmosphere packaging of fresh produce." **Food Technology** 42 (1988) 70-77.
- [19] Paine F.A. and Paine H.Y. "**A Handbook of Food Packaging.**" London : Blackie Academic
& Professional. 1992.
- [20] ดนัย บุญเกียรติ และ นิธิยา รัตนานนท์. "การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้." กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2535.
- [21] N. Mir and R.M. Beaudry. "**Modified Atmosphere Packaging.**" 2012. [Online]. Available
: <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/015map.pdf>.
- [22] R.T. Parry. "**Principles and applications of modified atmosphere packaging of food.**" London: Blackie Academic and Professional. 1993.

- [23] มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ “เคมีพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ: โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [24] วันชาติ ปรีชาติวงศ์ “พอลิเมอร์ (Polymer).” สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. 2554. [Online]. Available: <http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>
- [25] Staff of Modern Plastics Magazine. “**Plastics Handbook.**” New York: McGraw-Hill. 1994.
- [26] SIGMA-ALDRICH®. “**Poly (ethylene-co-ethyl acrylate).**” 2013. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/200581?lang=en®ion=TH>.
- [27] eFunda, Inc. “**Ethylene/ethyl acrylate.**” 2013. [Online]. Available: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=4.
- [28] SIGMA-ALDRICH®. “**Poly (ethylene-co-methyl acrylate).**” 2013. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/340502?lang=en®ion=TH>.
- [29] eFunda, Inc. “**Ethylene/methyl acrylate.**” 2013. [Online]. Available: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PE&MinorID=5.
- [30] J.A. Brydson. “**Plastics Materials.**” 7th ed. Oxford: Butterworth Heinemann. 1999.
- [31] SIGMA-ALDRICH®. “**Poly (ethylene-co-vinyl acetate).**” 2013. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/340502?lang=en®ion=TH>.
- [32] ตะวัน สุขน้อย. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาชีโพลีไคต์และสารประกอบที่มีรูปพรุนที่เกี่ยวข้อง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [33] B.C. Gates. “**Catalytic Chemistry.**” New York: John Wiley & Sons. 1992.
- [34] P.M. Woodward. “**Solid State Chemistry.**” 2011. [Online]. Available: http://www.Chemistry.ohio-state.ed/woodward/chem_754.htm.
- [35] A.R Loiola, J.C.R.A. Andrade, J.M. Sasaki and L.R.D. da Silva. “Structural analysis of zeolite NaA synthesized by a cost-effective hydrothermal method using kaolin and its use as water softener.” **Journal of Colloid and Interface Science** 367 (2012) 34-39.
- [36] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. “พอลิเมอร์ผสม.” **วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง** 10(1) (2543) 14-17.
- [37] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “**สารปรับแต่งพอลิเมอร์.**” กรุงเทพมหานคร: บุ๊คเน็ต. 2547.

- [38] J.S. Borah and T.K. Chaki. "Dynamic rheological, morphology and mechanical properties of compatibilized LLDPE/EMA blends." **Journal of Polymer Research** 18 (2011) 907-916.
- [39] A.E. Bishara and H.I. Shaban. "Thermal, Mechanical and Rheological Properties of Polypropylene/Poly (ethyl-co-methyl acrylate) blends." **International Journal of Polymeric Material** 59 (2010) 134-149.
- [40] S.A. Mousavi, M. Gholizadeh, S. Sedghi, M.P. Chenar, M. Barmala and A. Soltani. "Effects of preparation conditions on the morphology and gas permeation properties of polyethylene (PE) and ethylene vinyl acetate (EVA) films." **Chemical Engineering Research and Design** 88 (2010) 1593-1598.
- [41] S. Marais, E. Bureau, F. Gouanve, E.B. Salem, Y. Hirata, A. Andrio, C. Cabot and H. Atmani "Transport of water and gases through EVA/PVC blend films-permeation and DSC investigations." **Polymer Testing** 23 (2004) 475-486.
- [42] K.G. Gravalos, J.K. Kallitsis and N.K. Kalfoglow. "In situ compatibilization of poly (ethylene terephthalate)/poly (ethylene-co-ethyl acrylate) blends." **Polymer** 36(7) (1995) 1393-1399.
- [43] I.C. McNeill and M.H. Mohammed. "Thermal analysis and degradation mechanisms of blends of low density polyethylene, poly (ethylene acrylate) and ethylene ethyl acrylate copolymer with calcium carbonate." **Polymer Degradation and Stability** 49 (1995) 263-274.
- [44] American Standard for Testing and Materials. "**Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.**" ASTM E794-06. Annual Book of ASTM Standard 14.02. Philadelphia. 2012.
- [45] F.W. Billmeyer. "**Text book of Polymer Science.**" New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [46] American Standard for Testing and Materials. "**Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.**" ASTM D882-12. Annual Book of ASTM Standard 08.01. Philadelphia. 2012.
- [47] American Standard for Testing and Materials. "**Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer.**" ASTM D624-00. Annual Book of ASTM Standard 09.01. Philadelphia. 2012.

- [48] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor.”** ASTM F1249-06. Annual Book of ASTM Standard 15.10. Philadelphia. 2006.
- [49] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements”** ASTM D5946-09. Annual Book of ASTM Standard 14.02. Philadelphia. 2009.
- [50] รุจิเรข วิวัฒนานุกูล. **“การศึกษาพอลิเมอร์ผสมของแอลดีพีอี/เอสอีบีเอส เพื่อเพิ่มการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์.”** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.

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

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

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

การเสนอผลงานวิชาการ

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

- 11.ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธิ นวลพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
- 12.Moungmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
- 13.Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
- 14.Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
- 15.Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
- 16.Moungmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
- 17.Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO₃-Filled HDPE Bottles, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.
- 18.สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลดา 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 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38)*, October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The Proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.
21. Chitratanuwatkul, J., Ochaikul, D., Rukchonlatee, S. and Janvikul, W., Studied on Preparation and Antibacterial Activity of Zinc Oxide/Cellulose Composite Films, *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology 2013 (ICEAST 2013)*, August 21-24, The Sukosol, Bangkok, Thailand, 2013.
22. Rukchonlatee, S., Napradit, S., Manuspongthanakul, P., Juntima, S and Sooknoi, T., Effect of LLDPE/LDPE Ratio on Processability and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Films, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID100, pp.114-115, 2013.
23. Pinsakul, S., Rukchonlatee, S., Monvisade, P. and Chaiyanit, V., Modified Plastisol Inks Based on Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Methyl Acrylate Copolymers, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID71, pp.73-74, 2013.
24. Sirichantan, T., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 169-172, 2014.
25. Pinsakul, S., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Potential Use of Modified Plastisol Inks Based on EVA/EVOH, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 174-177, 2014.
26. Uttasuradee, M., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 215-217, 2014.

27. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S., Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/ Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 416-419, 2015.
28. Sahassanon, T. Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Improvement of Ethylene Permeation in LLDPE/SEBS Film with Zeolite Y, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 432-435, 2015.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

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

งานแปลหนังสือ

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

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) **สาระ...อะไรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ** บริษัทอะไรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549.
2. อธิพิล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ จุฬารัตน์ ปรัชญาวรากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์** สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า 2553.