

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ (Packaging) หมายถึง ภาชนะหรือโครงสร้างที่ทำจากวัสดุใดๆ ที่นำมาใช้สำหรับการห่อหุ้ม บรรจุเพื่อป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ รักษาสภาพสินค้าให้คงอยู่ในสภาพที่ดี เป็นตัวกั้นผลิตภัณฑ์ไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศภายนอก และป้องกันคุ้มครองผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในจากความเสียหายด้วยเหตุต่างๆ ทั้งทางสภาพแวดล้อม มนุษย์ สัตว์ และการขนส่ง เพื่อให้สินค้าคงสภาพที่สมบูรณ์เหมือนเมื่อออกจากแหล่งผลิตให้ได้มากที่สุด [1-2]

โดยจากข้อมูลสินค้าเกษตรกรรมส่งออก [3] พบว่าประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการส่งผลิตผลทางการเกษตรจำหน่ายทั้งในและนอกประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ดังนั้นจึงมีความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์สำหรับผักผลไม้ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามผักผลไม้ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ยังคงสามารถเกิดความเสียหายในระหว่างการขนส่งและการวางจำหน่ายได้เช่นกัน [4]

โดยทั่วไปความเสียหายที่จะเกิดกับผลิตภัณฑ์มีได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ความเสียหายทางกายภาพ เป็นความเสียหายในลักษณะของการชำรุดแตกหัก การขูดขีด การแตกสลาย ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้ายสินค้าและการเก็บรักษา
2. ความเสียหายทางเคมี เป็นความเสียหายที่เกิดจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีในสินค้า ซึ่งถ้าบรรจุภัณฑ์ไม่ดีพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการบูดเน่า เกิดเชื้อรา การเปลี่ยนแปลงของกลิ่น สี รส ความสดของอาหาร เป็นต้น [1] การเกิดฝ้าหรือหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ (รูป 1.1) เป็นสาเหตุสำคัญอันหนึ่งของการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์และมีลักษณะปรากฏที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค [4] เนื่องจากสาเหตุดังนี้

1.1.1 การหายใจและการคายน้ำของผักและผลไม้ [4]

ผักและผลไม้หลังจากการเก็บเกี่ยวขึ้นส่วนของพืชเหล่านั้นยังคงมีชีวิตอยู่ ดังนั้นผักและผลไม้จะเกิดกระบวนการที่เรียกว่า การคายน้ำ (Transpiration) และการหายใจ (Respiration) ดังรูป



รูป 1.1 ฝ้าและหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ (ก) บรรจุภัณฑ์เห็ดหูหนู (ข) บรรจุภัณฑ์สาระแหน่



รูป 1.2 การคายน้ำและการหายใจของพืชในบรรจุภัณฑ์ [5]

1.1.1.1 การหายใจ (Respiration)[1]

กระบวนการหายใจของพืชเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอาหารที่สะสมในเซลล์พืช ได้แก่ แป้ง น้ำตาล และกรดอินทรีย์ เป็นต้น เพื่อสร้างพลังงาน ดังแสดงในสมการ



พลังงานที่ได้จากการหายใจของพืชในสภาพที่มีออกซิเจนเพียงพอ (Aerobic respiration) ส่วนหนึ่งนำไปใช้ในเซลล์พืช อีกส่วนหนึ่งจะปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งหากไม่มีการกำจัดออกไป จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณภาพเก็บรักษาของผักและผลไม้สด การหายใจทำให้พืชสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 3-5 โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจของพืช มีดังนี้

1) ความเข้มข้นของออกซิเจน

อัตราการหายใจของพืชจะแปรผันตามความเข้มข้นของออกซิเจน แบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) อัตราการหายใจของพืชจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง แต่ถ้าความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงต่ำเกินไป พืชจะหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการหมัก (Fermentation) และให้แอลกอฮอล์ (Alcohol) และแอลดีไฮด์ (Aldehyde) ทำให้กลิ่น รส ผิดปกติ และได้พลังงานน้อยลง พืชจึงต้องหายใจเพิ่มขึ้น การใช้อาหารในเซลล์จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อายุการเก็บของพืชย่นสั้นลง โดยความเข้มข้นขั้นต่ำของออกซิเจนที่พืชแต่ละชนิดต้องการแสดงดังตาราง 1.1

ตาราง 1.1 ความเข้มข้นขั้นต่ำของออกซิเจนที่พืชต้องการสำหรับการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน [1]

ความเข้มข้นขั้นต่ำของออกซิเจน (%)	ผัก/ผลไม้
1	แอปเปิ้ล บร็อกโคลี่ เห็ดลูกแพร์ ผลไม้ที่ถูกตัดและผัก
2	กะหล่ำปลี แคนตาลูป กระหล่ำดอก ถั่วเขียว เซอร์รี ข้าวโพดหวาน ถั่วเขียว ถั่วลิสง มะละกอ ลูกพีช ลูกแพร์ สับปะรด พลัมและสตอเบอรี่
3	อโวคาโด แตงกวา พริกและมะเขือเทศ
5	หน่อไม้ฝรั่ง มะนาว ส้ม ถั่วแขก มันฝรั่งและมันเทศ

2) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

ถ้าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงๆ (ตั้งแต่ร้อยละ 1) จะชะลอการหายใจของพืชได้ อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงเกินไป อาจทำให้เกิดเมทาบอลิซึมและการหายใจที่ผิดปกติ เป็นสาเหตุให้พืชเสื่อมสภาพและเน่าเสียเร็วยิ่งขึ้นโดยความเข้มข้นสูงสุดของคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชทนทานได้ แสดงในตาราง 1.2

ตาราง 1.2 ความเข้มข้นสูงสุดของคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชทนทานได้ [1]

ความเข้มข้นสูงสุดของ คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ผัก/ผลไม้
2	แอปเปิ้ล ถั่วฝักยาว ผักกาดหอมจีน องุ่น พริกหวาน มันเทศและมะเขือเทศ
5	แอปเปิ้ล อโวคาโด กะหล่ำปลี แครอท กะหล่ำดอก กีวี่ มะม่วง ส้ม มะละกอ ถั่ว ลูกพีช ลูกพลัม หัวไชเท้า
10	หน่อไม้ฝรั่ง บร็อคโคลี่ แดงกวา องุ่น ถั่วเขียว สับปะรด มันฝรั่ง
15	บลูเบอร์รี่ แคนตาลูป เชอร์รี่ ข้าวโพดหวาน ราสเบอร์รี่ ผักขมและสตอเบอรี่

3) เติลีน

เเทลิโนเป็นฮอร์โมนที่พืชสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุกและการเน่าเสีย เเทลิโนสามารถเร่งการหายใจและการสุกของพืชได้ แม้มีความเข้มข้นต่ำมาก ระดับ 0.1 ppm การสังเคราะห์เเทลิโนของพืชจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง

4) อุณหภูมิ

กระบวนการหายใจและเมแทบอลิซึมต่างๆ ในพืชถูกควบคุมด้วยเอนไซม์หลายชนิด และอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในพืชเป็นฟังก์ชันแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิและอธิบายได้โดยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการ

$$d(\ln k)/dT = E_a/RT^2$$

โดยที่

k หมายถึง อัตราการเกิดปฏิกิริยา

T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

E_a หมายถึง พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy)

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

อัตราการหายใจและเมแทบอลิซึมต่างๆ ในพืชจะลดลง เมื่ออุณหภูมิเก็บรักษาลดลงทำให้อายุการเก็บผักและผลไม้สดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป อาจเป็นผลเสียต่อพืชได้ เช่น การเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ซึ่งผักและผลไม้จะมีลักษณะเป็นรอยช้ำ เนื้อนุ่ม

น้ำผิปกติ สีผิปกติ การสุกไม่สม่ำเสมอ และการเน่าเสียเร็วขึ้น จึงต้องกำหนดอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาให้เหมาะสมกับผักและผลไม้สดแต่ละชนิด

5) รอยชำรุดที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ

เช่น แรงบีบ แรงกด แรงกระแทก เป็นต้น จะทำให้อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของพืชสูงขึ้น อายุการเก็บจึงลดลง ดังนั้นขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่การเก็บเกี่ยว การขนส่งและการจัดจำหน่ายถึงผู้บริโภค จะต้องมีการบรรจุผักและผลไม้สดที่ดี สามารถป้องกันแรงกระทำต่างๆ เหล่านี้ได้

1.1.1.2 การคายน้ำ (Transpiration) [1, 4]

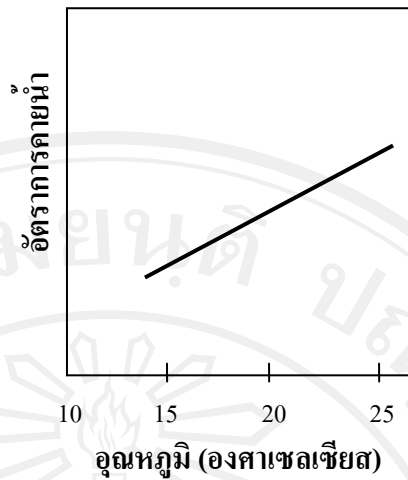
ในกระบวนการคายน้ำจะมีการระเหยน้ำออกจากใบและช่องเปิดที่มีอยู่ ซึ่งการสูญเสียไอน้ำภายในผักและผลไม้เกิดจากการแพร่ของไอน้ำซึ่งมีอยู่ในเซลล์พืชมากกว่าไอน้ำในบรรยากาศ การคายน้ำจะผ่านทางปากใบเป็นส่วนใหญ่ ระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สดจะมีการคายน้ำตลอดเวลา ทำให้น้ำหนักลดลง เสียเวลา ความกรอบลดลง คุณภาพของเนื้อสัมผัส กลิ่น รสลดลง การสูญเสียน้ำหนักจากการคายน้ำนี้เมื่อมีค่าประมาณร้อยละ 3-10 ของน้ำหนัก จะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยปัจจัยที่มีผลต่อการคายน้ำของผักและผลไม้สดมีดังนี้

1) ปริมาณของออกซิเจน

อากาศปกติจะมีออกซิเจนอยู่ร้อยละ 20-21 ซึ่งมากเกินไปสำหรับการหายใจ การเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะมีผลต่อการหายใจน้อยมาก ในทางกลับกันการลดปริมาณออกซิเจนลงจะมีผลในการลดอัตราการหายใจด้วย

2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ในผักและผลไม้ โดยอุณหภูมิช่วงที่เหมาะสมในการหายใจอยู่ระหว่าง 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อผักและผลไม้ถูกตัดออกมาจากต้น จะขาดการส่งน้ำ ปากใบจะปิดแต่การหายใจยังคงมีอยู่ อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากไม่มีการช่วยลดความร้อน ซึ่งความร้อนมาจากสภาวะแวดล้อม และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของพืช จะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช ดังนั้นจึงควรเก็บผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำ จากการคายน้ำ พบว่าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส อัตราการหายใจจะเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า ดังนั้นจะส่งผลให้มีไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วยดังรูป 1.3



รูป 1.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายน้ำกับอุณหภูมิ [6]

3) รอยชำที่มาจากแรงกระทำต่างๆ เช่น แรงกด แรงกระแทก เป็นต้น หรือเกิดจากการตัดหรือการหั่น จะเร่งอัตราการคายน้ำของพืช

4) สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สด

อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นผักใบทั่วไปจึงเหี่ยวเฉาได้ง่ายกว่าผลไม้และพืชหัวดังแสดงในตาราง 1.3

ตาราง 1.3 สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้

ผัก/ผลไม้	พื้นที่ผิวต่อปริมาตร
ผักใบ เช่น คื่นช่าย กวางตุ้ง	500-100
ผลไม้ขนาดเล็กๆ เช่น มะยม	5-10
ผลไม้ขนาดกลาง เช่น สตอเบอรี่	2-5
พืชหัว เช่น มันเทศ เผือก	0.5-1.5
ผลไม้เนื้อแน่น เช่น กะหล่ำปลี	0.5-1.5
ผักและผลไม้เนื้อแน่น เช่น กะหล่ำปลี	0.2-0.5

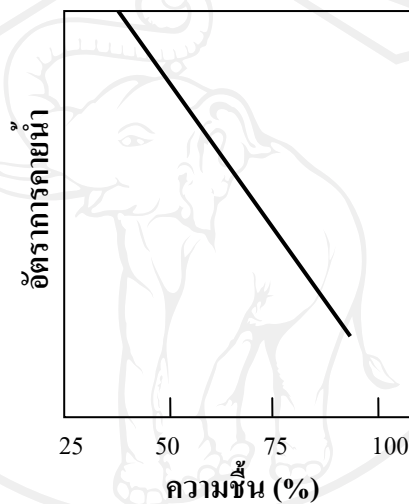
5) สารเคลือบผิว

ผักและผลไม้สดหลายชนิดจะมีไขเป็นสารเคลือบผิวตามธรรมชาติ ช่วยลดการคายน้ำ ทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น มะนาว องุ่น แอปเปิ้ล และส้ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามไขธรรมชาติเหล่านี้มักถูกทำลายไปบ้างระหว่างเก็บเกี่ยว และเก็บรักษา และพืชบางชนิดมีไขน้อยมาก ทำให้

อัตราการคายน้ำของพืชยังสูงอยู่ จึงมีการใช้สารเคลือบหรือการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก หรือฟิล์มธรรมชาติกับพืชที่ต้องเก็บไว้นานๆ

6) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศ

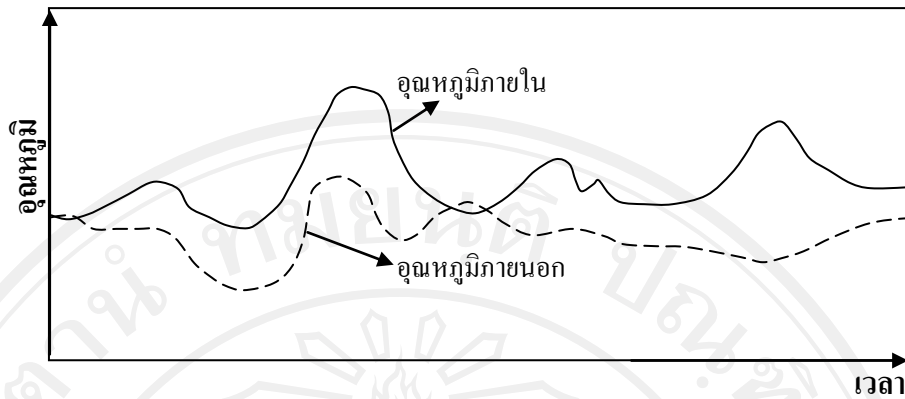
ความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการสูญเสียน้ำของพืช อัตราการคายน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช โดยปกติผักและผลไม้จะมีปริมาณน้ำในเซลล์ร้อยละ 80-95 หากความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์มาก การคายน้ำจะลดลง ดังรูป 1.4 โดยทั่วไปควรเก็บผักและผลไม้สดในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงๆ และที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องระวังการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ผักและผลไม้เน่าเสียเร็วขึ้น



รูป 1.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายน้ำกับความชื้น [6]

1.1.2 ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์ [7-8]

นอกจากการหายใจและการคายน้ำจะส่งผลให้เกิดฝ้าและหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์แล้ว ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษาก็มีผลด้วยเช่นกัน การแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ แต่ผักและผลไม้ยังคงมีการหายใจ การคายน้ำและกระบวนการเมตาบอลิซึมอื่นๆ อยู่ จึงทำให้อุณหภูมิภายในบรรจุภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก (ตามรูป 1.5) จึงทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง กลายเป็นฝ้าและหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ขึ้น



รูป 1.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในบรรจุภัณฑ์และภายนอกบรรจุภัณฑ์ที่เวลาต่างๆ[7]

จากที่กล่าวมาข้างต้นคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สด นอกจากจะขึ้นกับสายพันธุ์และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวแล้ว ยังขึ้นอยู่กับบรรจุและการขนส่ง ดังนั้นภาชนะบรรจุจึงมีบทบาทสำคัญต่อการยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้ด้วยเช่นกัน [1] วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์มีหลายชนิด อาทิเช่น กระดาษ แก้ว โลหะ และพลาสติก เป็นต้น

พลาสติกนิยมนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากพลาสติก มีน้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถปรับปรุงให้มีสมบัติตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุอื่นๆ เช่น แก้ว หรือ โลหะ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้หลายลักษณะ เช่น รูปทรงแข็งแรงแบบขวด ลัง กล่อง หรือให้เป็นวัสดุรูปทรงอ่อนตัวเพื่อนำมาทำเป็นซอง หลอด และถุง เป็นต้น นอกจากนั้นสามารถพิมพ์ตกแต่งให้สวยงามได้ จึงทำให้การนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้งานบรรจุภัณฑ์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด[9]

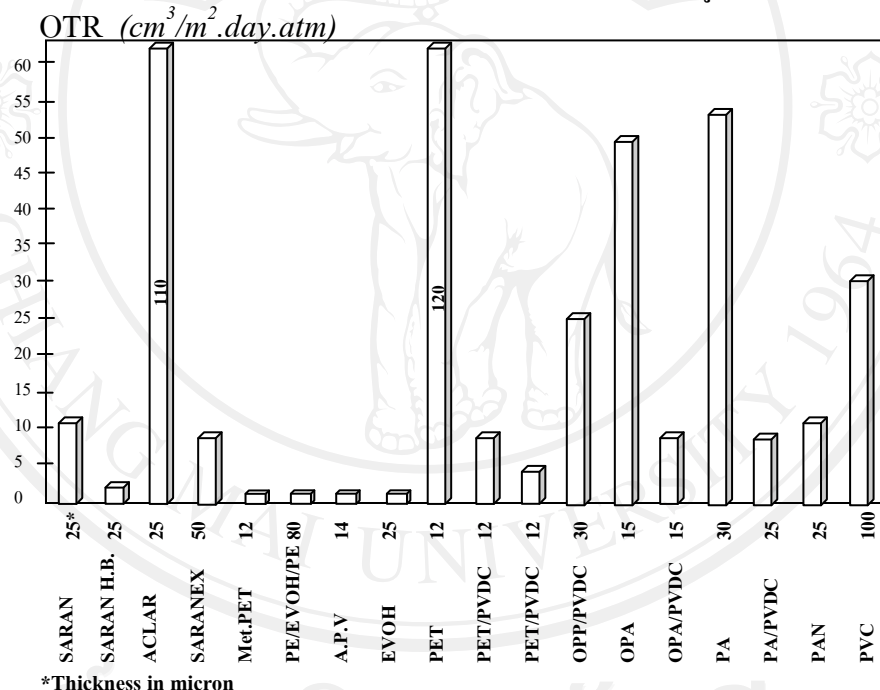
การเลือกวัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สดเพื่อรักษาคุณภาพและเพิ่มอายุเก็บรักษา จะต้องพิจารณาสมบัติที่สำคัญ ดังนี้คือ

1.2.1 การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) [1, 9-10]

วัสดุสำหรับบรรจุผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าออกได้เหมาะสม และสอดคล้องกับอัตราการหายใจของพืช เพื่อป้องกันมิให้ปริมาณออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุมีน้อยเกินไป จนกระทั่งพืชขาดออกซิเจนสำหรับการหายใจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมาจะต้องระบายออกจากภาชนะบรรจุได้พอสมควร เพื่อป้องกันการสะสมจนกระทั่งมีความเข้มข้นสูง

เกินจนทำลายเซลล์ของพืชได้ อัตราการหายใจของพืชมีความแตกต่างกันมากขึ้นกับสายพันธุ์ความแก่ อ่อน สรีระของพืช สภาพทางกายภาพของพืช และอุณหภูมิเก็บรักษาจึงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะพืชแต่ละชนิด

การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพื่อเลือกชนิดของวัสดุบรรจุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก (High gas barrier) ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) ไม่เกิน $2 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$ สำหรับผักและผลไม้สดและเนยแข็งชนิดที่มีเชื้อรา (Blue cheese) ต้องใช้วัสดุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี โดยทั่วไปค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะมีค่าตั้งแต่ $2,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day}.\text{atm}$ และค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆแสดงดังรูป 1.6



รูป 1.6 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ 23°C, 0% RH

1.2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซ [9-10]

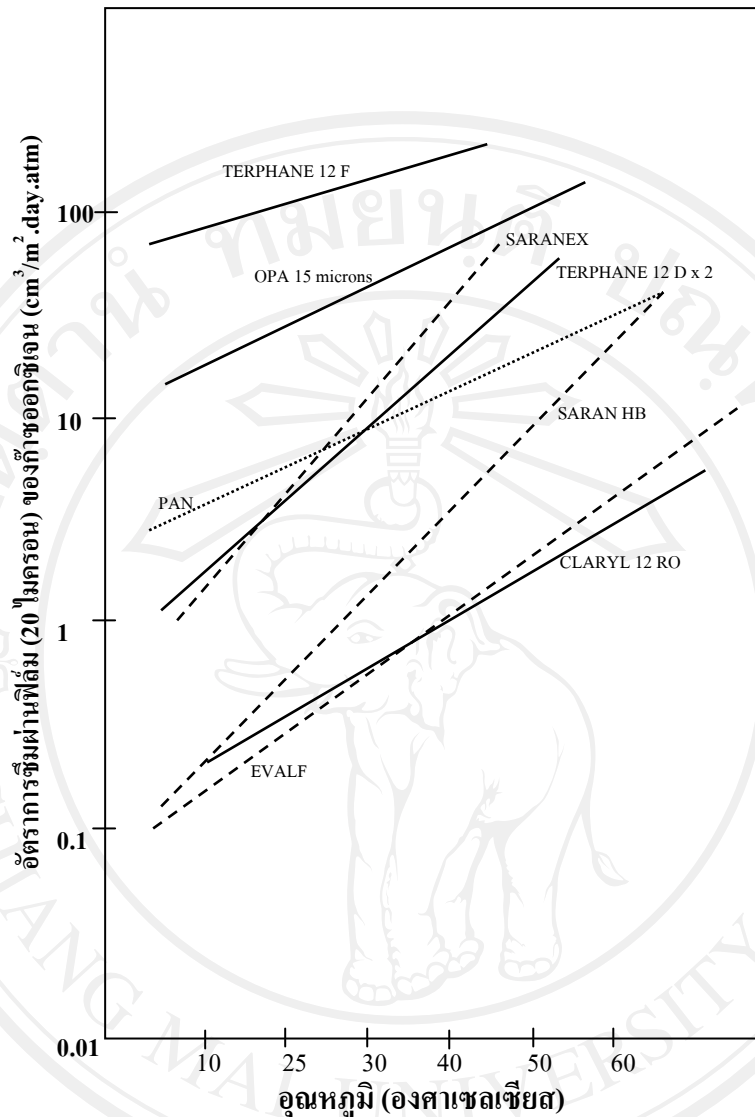
อัตราการซึมผ่านก๊าซของวัสดุหรือภาชนะบรรจุที่เลือกใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการรักษาคุณภาพและเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดยได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพลาสติก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในรูป 1.7 และปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้น มีความสำคัญมากที่สุดต่อการเลือกวัสดุบรรจุเพื่อใช้ในสภาวะการเก็บที่มีอุณหภูมิและความชื้นแตกต่างกันไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร



รูป 1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซ [9]

1.2.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซ [9]

ในการศึกษาอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซชนิดต่างๆ จะต้องมีการกำหนดให้ ฟิล์มพลาสติกจะต้องปราศจากตำหนิ เช่น รูรั่ว รอยขีดข่วน หรือ คราบสกปรก รวมทั้งฟิล์มพลาสติกและก๊าซจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากัน รูป 1.8 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะเห็นว่า อัตราการซึมผ่านของก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและผลของอุณหภูมิต่ออัตราการซึมผ่านก๊าซนี้ จะแตกต่างกันไปตามชนิดของฟิล์มพลาสติก



รูป 1.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร [9]

1.2.1.3 ผลของความชื้นต่ออัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซ [9]

การแบ่งประเภทฟิล์มพลาสติกตามความสามารถในการดูดซับความชื้น จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. พลาสติกที่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Plastic) หมายถึง พลาสติกที่ไม่ดูดซับความชื้น แม้จะอยู่ในสถานะที่มีความชื้นสูงเช่น สัมผัสกับอาหารเปียกหรืออยู่ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ คุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ และความแข็งแรงจะ

ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นของสภาพแวดล้อม พลาสติกประเภทนี้ เช่น PP PE PET และ PVDC เป็นต้น

2. พลาสติกที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic plastic) หมายถึง พลาสติกที่สามารถดูดซับความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้ทำให้การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ และความแข็งแรงลดลง De Leiris(1986) กล่าวว่าน้ำที่พลาสติกดูดซับเข้าไบนั้นจะทำหน้าที่คล้ายสารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) เป็นผลให้โมเลกุลของพลาสติกมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มด้วย จึงทำให้ความสามารถในการป้องกันก๊าซและไอน้ำและความแข็งแรงของพลาสติกลดลง พลาสติกประเภทที่สำคัญ เช่น Polyamide โดยเฉพาะ Nylon 66 EVOH และ Cellophane (Cellophane ไม่ได้เป็นพลาสติก แต่มักจะนำมากล่าวอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากการใช้งานทางการบรรจุคล้ายคลึงกับฟิล์มพลาสติก)

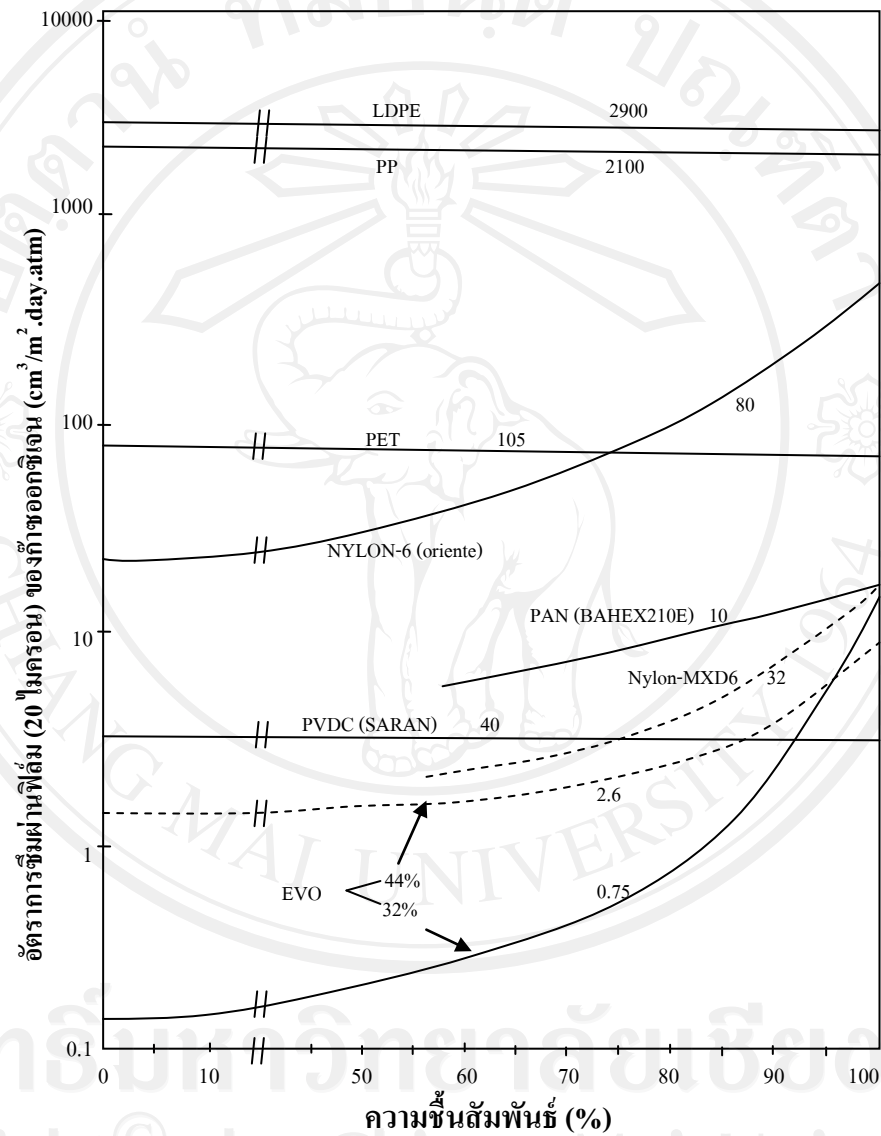
คุณสมบัติทางการบรรจุของฟิล์มประเภทนี้สามารถเปลี่ยนกลับมาเหมือนเดิมได้เมื่อฟิล์มสูญเสียไอน้ำส่วนเกินนี้ไป

การลดผลกระทบของความชื้นสำหรับ Hydrophilic plastic อาจทำได้โดยการเคลือบด้วยพลาสติกที่ไม่ดูดซับน้ำหรือความชื้น เช่น PVDC เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดอัตราการซึมผ่านของก๊าซได้อีกด้วย หรืออาจทำเป็นฟิล์มหลายชั้นโดยลามิเนชันหรือโคเอกซ์ทรูชันโดยฟิล์มไม่ดูดซับน้ำอยู่ด้านนอก ชั้นกลางเป็นฟิล์มที่ดูดซับน้ำได้ เช่น K-ON/PE PVDC coated Cellphane PP/EVOH/PP PP/EVOH/PE และ PS/EVOH/PE และรูป 1.9 แสดงผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มชนิดต่างๆ

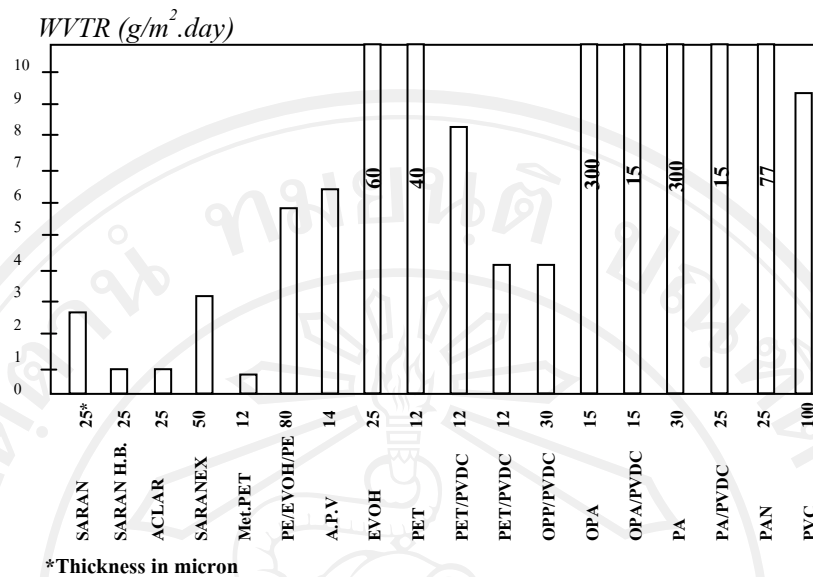
1.2.2 การซึมผ่านของไอน้ำ [1, 9-10]

วัสดุและภาชนะสำหรับบรรจุผักและผลไม้สด จะต้องยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราการหายใจ และการคายน้ำของพืช พืชที่หายใจเร็วจะคายน้ำออกมามาก ภาชนะบรรจุจะต้องยอมให้ไอน้ำผ่านออกไปได้ดี เพื่อป้องกันการสะสมของไอน้ำภายในภาชนะ จนถึงจุดอิ่มตัวแล้วกลั่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะทำให้พืชเน่าเสียได้เร็วขึ้น หากพืชหายใจช้า ภาชนะบรรจุควรให้ไอน้ำผ่านได้น้อย เพื่อป้องกันการเหี่ยวเฉาของพืช กรณีที่ต้องการวัสดุบรรจุที่ป้องกันไอน้ำได้ดี ควรพิจารณาวัสดุบรรจุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability rate, WVPR) ไม่เกิน 4-6 g/m².day ซึ่งการเลือกวัสดุบรรจุจากค่า WVPR ต้องระมัดระวังปัญหาหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุและปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งสองนี้ไปพร้อมกันทำได้ยาก วัสดุบรรจุที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักจะเกิดปัญหาหยดน้ำภายในภาชนะ หรือในทางกลับกัน สำหรับวัสดุบรรจุที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้ มักจะเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งเพราะสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการเติม

สารป้องกันการเกิดฝ้า (Antifogging agent) ในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็กๆ (Perforation) เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกไปจากภาชนะ ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ แสดงในรูป 1.10 [9]



รูป 1.9 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ [9]



รูป 1.10 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำสำหรับฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ 38°C, 90% RH [9]

1.2.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)[1]

วัสดุและภาชนะสำหรับบรรจุผักและผลไม้สด จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ และสามารถป้องกันแรงกระทำจากภายนอก ที่จะทำให้ผักและผลไม้ช้ำและเน่าเสียได้ สมบัติเชิงกลที่ต้องการจะขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้สด ผักและผลไม้ที่มีเนื้ออ่อนและเกิดรอยช้ำได้ง่าย เช่น องุ่น สตอเบอร์รี่ ผักใบชนิดต่างๆ ย่อมต้องการภาชนะบรรจุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าผักและผลไม้เนื้อแข็งหรือผลไม้ที่มีเปลือกแข็ง เช่น ส้มโอ มังคุด ขิง และข่า เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบและขนาดของภาชนะบรรจุยังมีผลต่อการเลือกวัสดุบรรจุ เช่น การบรรจุ องุ่นสด 500 กรัม ในถุงพลาสติกเจาะรู จะต้องเลือกพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึงขาดได้ดี ในขณะที่การบรรจุในถาดเทอร์โมฟอร์มพร้อมฝาปิด ต้องเลือกพลาสติกที่มีความตึงแข็งดี (Stiffness) เพื่อความคงรูปของภาชนะบรรจุ น้ำหนักบรรจุที่เพิ่มขึ้นจะต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.2.4 ความทนทานต่อน้ำ (Water resistance)[1]

วัสดุและภาชนะสำหรับบรรจุผักและผลไม้สดจะต้องทนทานต่อน้ำได้ดีระหว่างการขนส่งและจัดจำหน่าย ภาชนะบรรจุผักและผลไม้สดมักจะสัมผัสกับน้ำ เช่น น้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำ น้ำจากการฉีดหรือพรมเพื่อรักษาความสด หากวัสดุนั้นดูดซับน้ำได้ จะต้องยังคงความแข็งแรงได้เพียงพอสำหรับการใช้งาน โดยทั่วไปพลาสติกที่ใช้มักจะมีค่าการดูดซับน้ำต่ำจึงไม่มีปัญหา ในขณะที่กระดาษจะดูดซับได้มากจึงมักเคลือบหรือลามิเนตกระดาษ และกล่องกระดาษด้วยพลาสติก

1.2.5 ความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ[1]

เนื่องจากการเก็บรักษาผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ วัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้สด จึงต้องทนทานต่ออุณหภูมิต่ำได้ดี สมบัติทางการบรรจุบางสมบัติของพลาสติกจะขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น สมบัติการซึมผ่าน ความตึงเครียดและความใส เป็นต้น จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับกระดาดเคลือบไข ต้องเลือกชนิดและความหนาของไขให้เหมาะสมที่อุณหภูมิต่ำๆ ไขบางชนิดอาจจะแตกเป็นชั้นเล็กๆ และหลุดออกมาได้

1.2.6 ความยืดหยุ่นต่อขนาดและรูปร่าง (Flexibility)[1]

เนื่องจากผักและผลไม้มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอ การออกแบบภาชนะบรรจุและการเลือกใช้วัสดุบรรจุจะต้องสามารถปรับขนาดและรูปร่างได้พอสมควร ให้เข้ากับขนาดและรูปร่างของผักและผลไม้ได้ง่าย

1.2.7 ความโปร่งใส (Transparency)[1]

ผู้บริโภคส่วนใหญ่ต้องการมองเห็นและสัมผัสผักและผลไม้สด ก่อนตัดสินใจซื้อ วัสดุและภาชนะบรรจุจึงต้องโปร่งใส เพื่อให้ผู้บริโภคมองเห็นสินค้าได้ชัดเจน และควรมีการออกแบบที่ยอมให้มีการสัมผัสหรือเลือกสินค้าได้บ้าง เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค แต่ควรมีขอบเขตจำกัดเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการสัมผัส การจับ การบีบ การตกกระแทก และการลักขโมย

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าพลาสติกมีมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งพลาสติกที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไป อาจก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบสำคัญในอนาคตได้ และบรรจุภัณฑ์พลาสติกยังก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากพลาสติกบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ครั้งเดียวทิ้ง ไม่มีการใช้ซ้ำ จึงทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและพลาสติกส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ หรือถ้าย่อยสลายตามธรรมชาติได้ก็ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนาน[11] โดยตัวอย่างระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุชนิดต่างๆ แสดงดังตาราง 1.4 จึงเป็นผลให้มีปัญหาการกำจัดขยะเพิ่มขึ้นทุกปี

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มาประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดและสามารถชะลอการเสื่อมเสียได้ด้วย

ตาราง 1.4 การเปรียบเทียบระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุชนิดต่างๆ[12]

วัสดุ	ระยะเวลาย่อยสลาย
ผ้าฝ้าย	1-5 เดือน
เศษกระดาษ	2-5 เดือน
เชือก	3-14 เดือน
เปลือกส้ม	6 เดือน
ผ้าขนสัตว์	1 ปี
ถ้วยกระดาษเคลือบ	5 ปี
ไม้	13 ปี
กันกรองบูห์รี	15 ปี
รองเท้าหนัง	25-40 ปี
กระป๋องอลูมิเนียม	80-100 ปี
กระป๋องเหล็ก	100 ปี
ขวดพลาสติก	450 ปี
ถุงพลาสติก	450 ปี

1.3 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

จากปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรปิโตรเลียมซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิเมอร์ และปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างมากของปริมาณขยะพอลิเมอร์ ซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลายที่นานมาก[11] สำหรับประเทศไทยปัญหาด้านขยะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณขยะเกิดขึ้นทั่วประเทศถึง 14.63 ล้านตัน[13] จนถึงปี 2553 มีปริมาณขยะเพิ่มขึ้นเป็น 15.1 ล้านตัน[14-15] โดยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ 2549 เท่ากับ 0.47 ล้านตัน ซึ่งวิธีการหลักที่ใช้กำจัดขยะ คือ การนำไปฝังกลบ โดยมีการนำรีไซเคิลเพียงร้อยละ 11 เท่านั้น[16] และแนวทางในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยมีการรณรงค์มากในปัจจุบัน คือ การลดการใช้ (Reduce) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) และการรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งจากแนวทางดังกล่าวทำให้พอลิเมอร์มีการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของสารพิษสู่ธรรมชาติที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมยังคงมีอยู่ ด้วยเหตุนี้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมดังกล่าว

สำหรับคำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น ได้มีหลายองค์กรได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยให้คำจำกัดความที่มีใจความ

แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ หมายถึง พอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการสลายตัวได้ตามธรรมชาติแล้วไม่ให้เกิดสารพิษตกค้าง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวจะถูกย่อยสลายต่อไป จึงไม่เกิดอันตรายและเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม[17] โดยที่ความสามารถในการสลายตัวจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์กล่าวคือพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่กิ่งจะเกิดการสลายตัวได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง [18]

1.3.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้[16]

พลาสติกย่อยสลายได้มีกลไกการย่อยสลายเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1.3.1.1 การย่อยสลายโดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงจะเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงสามารถแตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี โดยจะเกิดการแตกของพันธะ กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ไม่เสถียร ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ และการย่อยสลายนี้จะไม่เกิดภายในบ่อฝังกลบขยะ เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

1.3.1.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

เป็นการย่อยสลายโดยให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการโดยทั่วไปที่ใช้ในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

1.3.1.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายชนิดนี้เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) โดยแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียรซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนบนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

1.3.1.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายประเภทนี้เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือ เอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดราลด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (Non-Catalytic hydrolysis)

1.3.1.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกจะเกิดการย่อยสลายภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในแบบ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์แล้วจากนั้นจะเกิดการย่อยสลายในขั้นที่ 2 จนขั้นสุดท้าย (Ultimate biodegradation) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำเกลือ แร่ธาตุต่างๆ และชีวมวล (Biomass)

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ทางด้านการบรรจุภัณฑ์ ทางเกษตร ทางการแพทย์และสาธารณสุข [19] ในจำนวนของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิเอสเทอร์เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ได้แก่ Poly(lactic acid)(PLA), Poly(glycolic acid) (PGA) และ Poly(*ε*-caprolactone) (PCL) เป็นต้น[20]

1.4 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend)

การผสม (Blending) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม อาจจะเป็นการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ หรือ ผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้สมบัติที่หลากหลายตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน อีกทั้งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต [21] การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยไม่ต้องเสียเวลาสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งต้องใช้เวลาและอาจต้องใช้ต้นทุนสูงในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่เกิดจากการผสมมีคุณสมบัติ เช่น ผสมกันแล้วช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strength) มีความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พอลิเมอร์เบลนด์สามารถปรับปรุงโครงสร้างให้บิดโค้งงอแปรรูป (Processability) ให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสมบัติคงตัว (Product uniformity) สามารถเปลี่ยนแปลงสูตรการผสมในการผลิตได้อย่าง

รวดเร็ว และให้อัตราผลผลิตที่มีปริมาณสูงขึ้น (High productivity)[22] นอกจากนี้ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมอีกด้วย

1.4.1 ความเข้ากันได้ (Compatibility) [23]

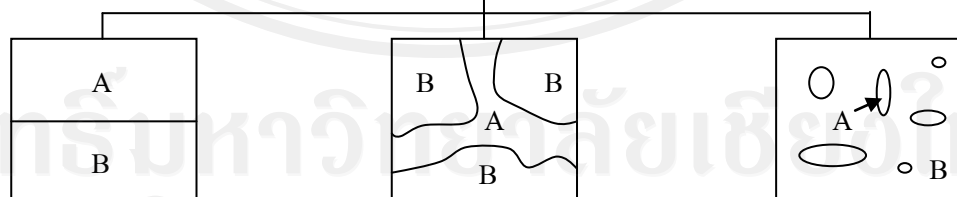
ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิด หรือมากกว่าในระดับโมเลกุล ไม่แสดงการแยกเฟสเมื่อทำการผสม ซึ่งความเข้ากันได้ดีจะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง และสถานะของการผสมโดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิและเวลา

พอลิเมอร์บางชนิดผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันได้เลย (Incompatible blend) บางชนิดมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน (Partially compatible blend) และบางชนิดสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด (Completely compatible blend)

1.4.1.1 ผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ทั้งสองไม่ผสมเข้าด้วยกัน มีขอบเขตการแยกอย่างชัดเจน ไม่มีการผสมกันในระดับโมเลกุลส่งผลให้แรงกระทำระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) ไม่ดี พอลิเมอร์ทั้งสองแยกกันอยู่เป็นผลทำให้ไม่มีการแลกเปลี่ยนสมบัติระหว่างกัน การผสมไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์นั้นๆ เมื่อมีแรงกระทำในขณะที่ใช้งานจะเกิดการแตกหักได้ง่าย

1.4.1.2 ผสมกันแล้วมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน พอลิเมอร์ที่ได้จะมีได้หลายเฟส ซึ่งเป็นระบบบิวิวิพันธ์ (Heterogeneous system) และเกิดขอบเขตขึ้น ซึ่งอาจมีหรือไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสก็ได้ โดยสามารถเกิดสัณฐานวิทยาได้หลายแบบดังนี้

พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้บางส่วน



Heterogeneous multi-phase

Interpenetrating polymer network
(IPN)

Droplet particle in continuous phase

(A = dispersed phase, B = continuous phase)

Heterogeneous multi-phase พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่มีผสมเข้ากันได้ มีการแยกเฟสอย่างชัดเจน

Interpenetrating polymer network (IPN) พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้บางส่วน ซึ่งเป็นการแยกเฟส A กับ B อยู่ด้วยกัน โดยที่เฟส A จะประกอบด้วยพอลิเมอร์ B แต่มีปริมาณที่น้อย

กว่าเรียกเฟส A ว่า A rich phase และเรียกเฟส B ว่า B rich phase เนื่องจากมีพอลิเมอร์ B อยู่มากกว่า A ซึ่งทั้งสองเฟสไม่ได้แยกกันอย่างเด็ดขาดและไม่ได้เป็นเฟสที่มีสารบริสุทธิ์เพียงตัวเดียว

Droplet particle in continuous phase เป็นสัณฐานวิทยาเข้ากันได้บางส่วน โดยมี B rich phase เป็น continuous phase และ A rich phase อยู่ในรูปอนุภาคที่กระจายอยู่ใน B rich phase เรียกว่า dispersed phase

สัณฐานวิทยาแบบเข้ากันได้บางส่วนสัดส่วนทั้ง 2 แบบนี้มีสัณฐานวิทยาที่ต่างกัน และมีสมบัติไม่เหมือนกัน สามารถนำไปใช้งานที่ต่างกันด้วย

1.4.1.3 ผสมกันแล้วรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีเฟสเดียวและเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เห็นขอบเขต (Boundary) ของการแยกเฟสไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ถ้าหากพอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดี สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองอาจจะหักล้างกันหรืออาจเสริมกันก็ได้

การผสมกันของพอลิเมอร์ที่ดีต้องสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด เพราะจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ แต่ถ้าหากการผสมกันของพอลิเมอร์ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้หมดจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน และเฟสแต่ละเฟสของพอลิเมอร์จะเกิดการยึดเหนี่ยวกันของแต่ละเฟส ทำให้พอลิเมอร์มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในต่ำลง และทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีคุณภาพและไม่ควรนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าหากจะทำการเตรียมผสมพอลิเมอร์ต้องคำนึงความเข้ากันได้เป็นสำคัญ

วิธีการวิเคราะห์ถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทำได้หลายวิธี โดยสามารถแบ่งเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

1. วิธีทางตรง

1.1 ดูจากความใส (Transparency) ของฟิล์มแผ่นบาง ซึ่งอาจจะทำการอัดใน bulk หรือหล่อจากสารละลาย แม้ว่าความใสจะเป็นตัวชี้ถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ก็ไม่เสมอไป บางครั้งพอลิเมอร์ทั้งสองอาจเป็น Incompatible แต่มีดัชนีหักเหแสงเท่ากันจึงทำให้ไม่เห็นการแยกเฟส ดังนั้นวิธีนี้จะบอกแน่นอนไม่ได้

1.2 การส่องโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) หากเห็นเป็นเฟสเดียวแสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเข้ากันได้

1.3 พิจารณาจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) วิธีนี้นิยมมากเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ไม่ยุ่งยากเช่น Differential scanning calorimetry, DSC และ

ให้ผลที่แน่นอน การหา T_g นั้นจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยที่ T_g จะเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนสมบัติอย่างชัดเจน หากเป็น Incompatible หรือ Partially compatible blend จะปรากฏค่า T_g สองค่าหรือเป็น broadening ของทั้งสอง T_g

2. วิธีทางอ้อม

2.1 การวัดความหนืด (Viscosity) ของพอลิเมอร์เบลนด์ ผลที่ได้จากวิธีนี้จะไม่ค่อยเห็นได้ชัด

2.2 การวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ซึ่งอาจวัดได้จากความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ซึ่งวิธีนี้เป็นการทดสอบสมบัติหลังจากผสมว่ามีข้อบกพร่อง (Defect) ในการผสมหรือไม่ เช่นถ้าหากเป็น Incompatible มันจะเกิดการแยกเฟสกันทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องของพอลิเมอร์เนื่องจากมันไม่มีแรงกระทำระหว่างเฟส

1.4.2 การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในการพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ [24]

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m$$

โดยที่	ΔG_m	= การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม
	ΔH_m	= การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม
	ΔS_m	= การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
	T	= อุณหภูมิ (K)

โดยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองชนิดจะเข้ากันได้ขึ้นกับค่าของ ΔG_m ของการผสมมีค่าเป็นลบ ($\Delta G_m < 0$) และถ้า ΔG_m เป็นลบแสดงว่า ΔS_m มีค่าที่มากซึ่งหมายความว่า ΔS_m เป็นค่าที่ควบคุมการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ดังนั้น ถ้า

พิจารณาค่า ΔS_m เมื่อ ΔG_m เป็นลบ ค่า ΔS_m ต้องมีค่า ≥ 0 แต่ถ้า ΔS_m มีค่า ~ 0 ตัวที่ควบคุมความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ คือค่า ΔH_m

ถ้าค่า ΔG_m ของการผสมเป็นบวก ($\Delta G_m > 0$) ที่อุณหภูมิหนึ่ง พอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาผสมกันเกิดการแยกเฟส ดังนั้นเพื่อให้การผสมเข้ากันได้ (ค่า ΔG_m ต้องเป็นลบ) ของผสมจะต้องคายพลังงาน ($\Delta H_m < 0$) แต่ถ้าเป็นของผสมที่ดูดพลังงาน ($\Delta H_m > 0$) จะผสมเข้ากันได้ที่อุณหภูมิสูง

1.4.3 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of compatibilization) [25]

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์เบเลนซ์ที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือก ใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

1. การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymers)
2. การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymers)
3. การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (In situ grafting polymerization)

1.4.3.1 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไคบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

1.4.3.2 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลีโอเลฟินส์ (Olefin) โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลีโอเลฟินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

1.4.3.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผลิต (In-situ grafting polymerization) [26-27]

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผลิต หรือ Reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม เช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจะดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (Initiator) ในระหว่าง การผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (Interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

1.4.4 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) [28-29]

สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) คือ สารที่เติมลงไปเพื่อให้พอลิเมอร์มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นได้ดีขึ้น ทนต่อสภาพความเป็นกรด ด่าง และสามารถบิดโค้งให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายขึ้น สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และเกิดพันธะทุติยภูมิกับสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นพันธะอ่อนๆ ได้แก่ พันธะแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ แล้วส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์แยกออกจากกัน หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือ เป็นสารที่ไปลดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวตัวได้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัว เหนียว ยืดหยุ่นดีขึ้นและสามารถขึ้นรูปให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการบิดงอพอลิเมอร์ สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เติมลงไปจะทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวลง โดยไปลด T_g ของพอลิเมอร์และไม่ทำให้พอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์เข้มข้นมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่ถ้าเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ไม่ดี (Poor plasticizer) จะทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เพราะประหยัดสะดวก และต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ได้นาน เพราะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมื่อทิ้งไว้นานๆ ตัวสารเพิ่มความยืดหยุ่น ก็จะหลุดออกจากตัวพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะ แข็งกระด้าง ฉะนั้นจากปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเราควรเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีคุณภาพ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้นาน ตัวสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. จะต้องมีความหนาแน่นโมเลกุลสูง ซึ่งจะต้องสูงกว่าสารละลายเพื่อให้การระเหยของสารเพิ่มความยืดหยุ่นระเหยได้ยาก
2. จะต้องไม่หมัก หรือ บริเวณที่สามารถเกิดพันธะทุติยภูมิกับพอลิเมอร์ได้ดี และแข็งแรง เช่น หมู่เอสเทอร์ ($-\text{COO}-$)
3. ควรมีหมู่แอลคิล (Alkyl) ที่มีสายโซ่ยาวๆ หรือมีกิ่งสาขามาก เพื่อช่วยทำให้เกิดการหล่อลื่นที่ดีกับมวลโมเลกุลในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นได้ดี
4. ควรมีความดันไอต่ำและมีการซึมผ่านที่ต่ำ เพื่อจะได้ไม่หลุดออกจากพอลิเมอร์ได้ง่ายๆ
5. ต้องมีความสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี (High compatibility)
6. ต้องสามารถถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ยาก (Low extractability)
7. ต้องมีความเป็นพิษน้อย หรือไม่มีความเป็นพิษเลย (Low toxicity)
9. ควรมีราคาถูก (Low cost)

สมบัติเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ในการผสมกับพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานเป็นแบบกิ่งผลึก สาร

เพิ่มความยืดหยุ่นจะช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) และในบางกรณียังช่วยลดดีกรีความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ด้วย สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ในบริเวณออสถฐานเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่มีปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในบริเวณของผลึกทำให้เกิดสองบริเวณที่แตกต่างกันหลังจากเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือบริเวณของผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงและบริเวณออสถฐานที่มีการผสมกันเกิดขึ้น แม้ว่าในความเป็นจริงจะเกิดสองบริเวณที่แยกกันที่อัตราส่วนการเติมต่างๆ แต่ก็ มีความเข้ากันได้ เนื่องจากของไหลผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง การหาสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์จะทำได้ยากขึ้นเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่ดีตามความต้องการ [28, 30-31]

1.4.5 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ [32-33]

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบ่งหลักๆ เป็น 2 วิธี วิธีแรกคือ

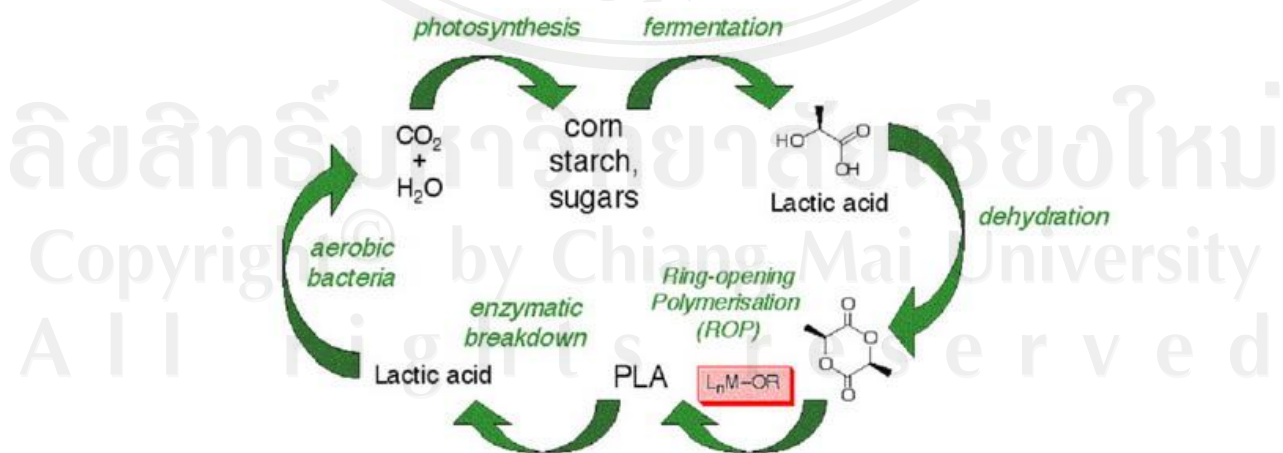
1.4.5.1 การเตรียมในสถานะสารละลาย (Solution blending) โดยละลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกันในตัวทำละลายที่เหมาะสมชนิดเดียวกัน ทั้งไว้นั้นตัวทำละลายระเหยออกจนหมด จะได้พอลิเมอร์เบลนด์เป็นของแข็ง ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ แต่ไม่เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีการที่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก อีกทั้งวิธีการระเหยตัวทำละลายปริมาณมากออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ทำได้ยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ผลของตัวทำละลายที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก จึงต้องมีระบบในการจัดเก็บตัวทำละลายที่ระเหยออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งต้องเพิ่มในส่วนของการจัดการ ทำให้วิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยวิธีนี้ไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเหตุผลหลักในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่สูงดังกล่าว

1.4.5.2 การเตรียมโดยการหลอมผสม (Melt blending) โดยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงกว่า T_g ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ณ อุณหภูมิดังกล่าว พอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะที่อ่อนนุ่ม ทำให้สามารถผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันได้ การผสมด้วยวิธีนี้นักทำโดยใช้เครื่องมือ เช่น Barbender melt mixer ซึ่งขนาดเล็กใช้ปริมาณพอลิเมอร์เพียง 30 กรัม Small-scale mixer สำหรับผสมตัวอย่างในหน่วยกรัม Twin screw extruder ที่พัฒนาโดยเพิ่มส่วนของการหมุนผสม และ เครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับสารขนาดมากกว่า 500 กรัม เป็นต้น การผสมด้วยวิธีการหลอมผสมสามารถเตรียมตัวอย่างขนาดใหญ่เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM ได้ โดยตัวอย่างสามารถขึ้นรูปเป็นแบบแผ่นโดยใช้การอัดรีด (Compression mold) หรือเป็นแบบเส้นโดยใช้การฉีดเส้น (Injection mold) ซึ่งวิธีการเตรียมพอลิ

เมอร์เบลนด์แบบหลอมผสม มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเตรียมในสถานะสารละลาย คือ สามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในปริมาณมากๆ โดยปราศจากตัวทำละลาย ดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์

1.5. พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) [34-36]

พอลิแลคติกแอซิดบางครั้งอาจเรียกว่า พอลิแลกเตต (Polylactate) หรือ พอลิแลกไทด์ (Polylactide) เป็นพอลิเอสเทอร์แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากย่อยการสลายไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม PLA เป็นผลผลิตมาจากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดนี้สามารถผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมัก(Fermentation) ผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง หัวบีท หรือขยะทางชีวภาพ เป็นต้น จุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดแลคติก ซึ่งกรดแลคติกนี้ถือว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบใหม่ที่สามารถทดแทนการใช้วัตถุดิบจากปิโตรเลียม สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ ไม่มีสิ้นสุดและเป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย [39] กรดแลคติกหลังจากผ่านขั้นตอนการแยกและทำบริสุทธิ์แล้ว จะนำกรดแลคติกไปใช้ในการสังเคราะห์เป็น PLA ซึ่งการสังเคราะห์อาจทำได้โดยการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation polymerization) ของกรดแลคติก ได้ PLA มวลโมเลกุลต่ำ และทำต่อเนื่องด้วยกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนให้เป็น แลคไทด์ (Lactide) จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (Ring opening polymerization) กลายเป็น PLA ที่มีมวลโมเลกุลสูง[38] ดังรูป 1.11



รูป 1.11 การสังเคราะห์ Poly(lactic acid),(PLA) [39]

เนื่องจากอะตอมคาร์บอนบนโมเลกุลของกรดแลคติกมีสมบัติไครัล (Chiral) ทำให้กรดแลคติกที่ผลิตได้มี 2 รูปแบบ คือ แบบ L-lactic เป็นชนิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและเป็นชนิดหลักที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักในอุตสาหกรรม และแบบ D-lactic สามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักหรือกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งเมื่อนำกรดแลคติกแต่ละชนิดมาใช้ในการสังเคราะห์ PLA จะได้ Poly(L-lactic acid), (PLLA) และ Poly(D-lactic acid), (PDLA) ตามลำดับ และในกรณีที่ใช้มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดในการสังเคราะห์จะได้เป็น Poly(DL-lactic acid), (PDLLA) ซึ่ง PLA ในแต่ละรูปแบบจะให้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างกัันดังแสดงในตาราง 1.5 [40]

ตาราง 1.5 ความแตกต่างของ PLLA และ PDLLA

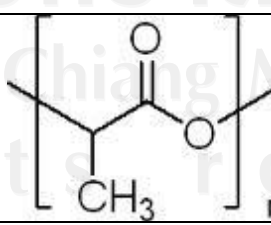
ชนิด PLA	สัณฐานวิทยา	T_g (°C)	สมบัติ
PLLA	พอลิเมอร์กิ่งผลึก	60-65	มีความแข็งแรง มีค่ายังมอดูลัสสูง
PDLLA	พอลิเมอร์อสัณฐาน	55-60	แข็งแรงน้อยกว่า PLLA

ข้อดีของ PLA [39]

1. ผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร ทำให้ไม่มีปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบ
2. ลดการใช้ปิโตรเลียม
3. เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดอัตราการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม
4. ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ

ปัจจุบัน PLA ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์โดยใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่อายุการเก็บรักษาสั้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพของ PLA แสดงในตาราง 1.6

ตาราง 1.6 ข้อมูลการทดลองทางกายภาพสำหรับ PLA [39]

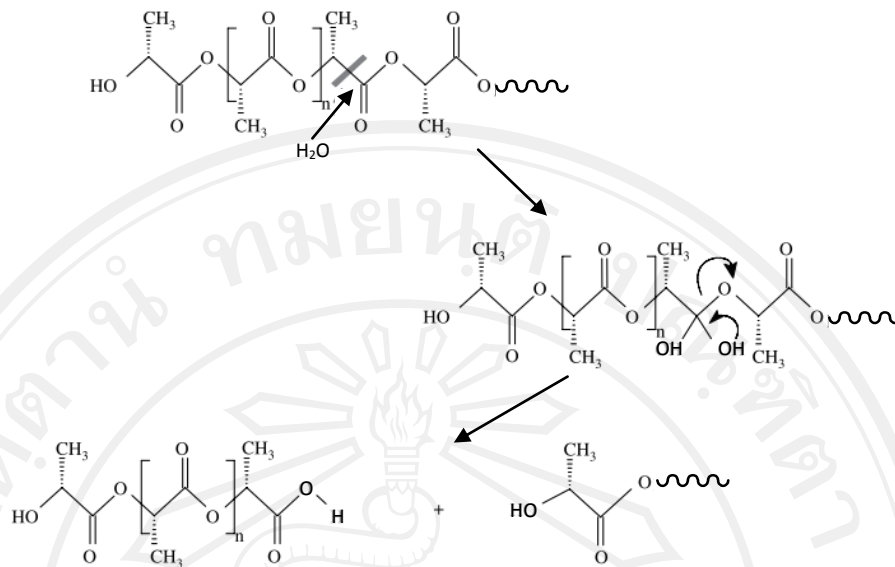
สมบัติของ PLA	
	
T_g (°C)	62.1 ± 0.7
T_m (°C)	150.2 ± 0.5
ΔH_m^c (J g ⁻¹)	93

ตาราง 1.6 ข้อมูลการทดลองทางกายภาพสำหรับ PLA (ต่อ)

สมบัติของ PLA	
เปอร์เซ็นต์ของผลึก (Percent crystallinity, X_c)	29.0 ± 0.5
อัตราการส่งผ่านออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) ^a	56.33 ± 0.12
อัตราการซึมผ่านออกซิเจน (Oxygen permeability rate, OP) ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{kPa}$)	$3.74 \times 10^{-16} \pm 8.64 \times 10^{-18}$
อัตราการส่งผ่านไอน้ำ (Water vapour permeability rate, WVPR) ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) ^a ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg}$) ^a	15.30 ± 0.04 $0.020 \pm 5.26 \times 10^{-5}$
อัตราการซึมผ่านของน้ำไอ (Water vapour permeability, WVP) ($\text{g} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) ^a ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg}$) ^a	$1.53 \times 10^{-7} \pm 4.12 \times 10^{-17}$ $2.01 \times 10^{-10} \pm 5.42 \times 10^{-20}$

^a ความหนาของ 0.0200 ± 0.0002 มิลลิเมตร

การย่อยสลาย PLA มี 2 ระยะ คือ เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ซึ่งอัตราการไฮโดรไลซิสของ PLA ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่างของสภาวะ นอกจากนี้ยังขึ้นกับสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ด้วย เช่น น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก ขนาดและรูปร่างของวัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์ เป็นต้น โดย PLA จะดูดซับน้ำซึ่งจะเกิดการแตกของพันธะเอสเทอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดสั้นลงจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและปฏิกิริยานี้จะถูกเร่งเองโดยอัตโนมัติ (Autocatalyzed) ด้วยกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งที่ได้มาจากการแตกของพันธะเอสเทอร์ ดังรูป 1.12 ซึ่งในขั้นตอนนี้พลาสติกจะแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและชีวมวลในขั้นสุดท้าย [40]



รูป 1.12 การเกิดไฮโดไลซิสของ PLA [40]

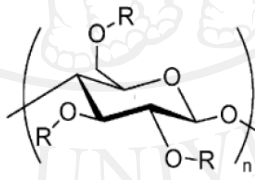
แต่อย่างไรก็ตาม PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งและเปราะ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น การใช้งานเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่จะนำมาใช้ทางด้านบรรจุภัณฑ์ จะต้องมีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิห้อง มีความโปร่งแสง และมีความเป็นผลึกต่ำ รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบราคา PLA กับพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) และ PP พบว่า PLA ยังมีราคาสูงกว่ามาก ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PLA และสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมกับการประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์ จึงต้องทำการผสม (Blending) กับพอลิเมอร์และสารอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้

1.6 เซลลูโลสอะซิเตตบิวทีเรต (cellulose acetate butyrate, CAB)

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้มาจากพืช เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยสายโซ่ยาวของกลูโคส เซลลูโลสจึงเป็นวัสดุที่มีราคาถูก แต่การนำไปใช้เป็นไปได้อย่างยากเพราะไม่ละลายน้ำ ละลายยากในตัวทำละลายทั่วไป เซลลูโลสมีโครงสร้างพื้นฐานวิทยาเป็นผลึก (Crystalline) มีอุณหภูมิสลายตัว (Degradation temperature, T_d) ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปโดยการหลอมได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างเป็นเซลลูโลสเอสเทอร์ เช่น Cellulose acetate (CA), Cellulose acetate propionate (CAP) และ Cellulose acetate butyrate (CAB) [11] ซึ่งในการปรับปรุงโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสเอสเทอร์นั้นทำให้สามารถขึ้นรูปโดยการหลอมได้ มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก อุณหภูมิหลอมผลึกต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัว จึงทำให้สามารถผสมเข้ากันได้กับพอลิเอสเทอร์และพอลิเมอร์อื่นๆ ได้

เซลลูโลสอะซิเตทบิวทิเรท (Cellulose acetate butyrate, CAB) เป็นเซลลูโลสเอสเตอร์ผสม ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่น การยึดติด และความสามารถในการเชื่อมขณะร้อน การทนต่อความชื้น และสมบัติอื่นๆ ให้มีสมบัติความเข้ากันได้และละลายได้ โดย CAB มีสมบัติในการดูดซึมความชื้นต่ำกว่า CA มีพื้นผิวมันวาว มีความโปร่งใสและทนแรงกระแทกสูงมาก นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อสารเคมีที่ดี มีความเหนียวและทนต่อสภาพอากาศมากกว่า CA และ CAP [41-43] สำหรับ CAB ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของ Eastman CAB-500-5 ซึ่งเป็น CAB ที่มีปริมาณของ Butyryl cellulose ester สูงและมีปริมาณของ Hydroxyl น้อย โดยโครงสร้างและสมบัติของ CAB ดังแสดงในตาราง 1.7 เมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะได้ฟิล์มที่อ่อนนุ่มและยืดหยุ่นทั้งที่ไม่เติมหรือเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในการประยุกต์ใช้ CAB ชนิดนี้จะเหมือน CAB อื่นๆทั่วไป ลักษณะเด่นของฟิล์ม CAB จะมีความใส ด้านความชื้นได้ดี ไม่เปลี่ยนสีเมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเลต CAB นี้ใช้เป็นตัวก่อฟิล์ม (Film former) และเป็นตัวเติม (Additive) ให้มีสมบัติต่างๆ เช่น เป็นตัวเคลือบเงาในกระดาษ พลาสติก และ เครื่องหนัง ใช้ในงานเคลือบผิว ชิ้นส่วนรถยนต์และฟิล์มภาพยนตร์ เป็นต้น[44]

ตาราง 1.7 ข้อมูลการทดลองทางกายภาพสำหรับ CAB [44]

สมบัติของ CAB	
 R = CH₃CO (4%), C₃H₇CO (51%), H (1%) Cellulose acetate butyrate	
ปริมาณเฉลี่ย Butyryl (%wt)	51.0
ปริมาณเฉลี่ย Acetyl (%wt)	4.0
ปริมาณเฉลี่ย Hydroxyl(%wt)	1.0
กรดอะซิติกอิสระ (Free acidity)	0.03
Melting range (°C)	165-175
T _g	96
น้ำหนักโมเลกุล, M _n	57,000

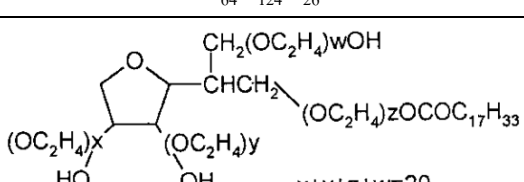
1.7 Tween 80

Tween 80 (T80) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate หรือ Polyoxyethylene (20) sorbitan fatty acid esters เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Non-ionic surfactants) มีโครงสร้างของหมู่ Polyoxyethylene ที่ใหญ่และส่วนหัวมีความมีขั้วสูงและที่อุณหภูมิห้อง Tween 80 เป็นน้ำมันหนืด (Viscous oils) นอกจากนี้ T80 สามารถละลายน้ำได้ 10 % (w/w) ดังแสดงในตาราง 1.8 [45]

T80 ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) อยู่ด้วยกัน โดย T80 มีความสมดุลระหว่างความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic/lipophilic balance, HLB) โดยมีค่า HLB มากกว่า 10 และพบว่าในฟิล์ม Methylcellulose เมื่อ HLB ของ T80 เพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำของฟิล์มจะลดลงอีกด้วย [46] ส่วนมาก T80 จะนิยมใช้ในยาซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว เป็นตัวก่ออิมัลชัน (Emulsifier) และเป็นตัวช่วยในการแพร่กระจาย (Dispersing agent) ในยา อีกทั้งเป็นตัวกำจัดฟอง (Defoamer) และเป็นตัวก่ออิมัลชันในอาหารเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในยา [45] โดยใช้ในการปรับปรุงความเสถียรของยาและอาหารที่อยู่ระหว่างน้ำกับน้ำมัน Water-in-oil-in-water (WOW) โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้อิมัลชันที่อยู่ในน้ำเสถียรในส่วนน้ำมัน (Water-in-oil, WO) และส่วนที่ชอบน้ำ ทำให้อิมัลชันที่อยู่ในน้ำมันเสถียรในส่วนน้ำ (Oil-in-water, OW) [48] นอกจากนี้ยังนิยมใช้อย่างมากในการเป็นสารช่วยในการเปียกผิว (Wetting agent) และสารช่วยในการแขวนลอย (suspending agent) เช่น ในยาฆ่าแมลงชีวภาพ โดย T80 จะช่วยปรับปรุงการแพร่กระจายของยาบนผิวใบไม้ [47] T80 มีความเป็นพิษน้อย สามารถทำให้เกิดการระคายเคืองตา ผิวหนัง ทางเดินหายใจและระบบการย่อยอาหารได้เล็กน้อยเท่านั้น [48]

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ T80 ผสมร่วมกับ PLA และ CAB ซึ่งจะใช้ T80 ในการช่วยลดการเกิดฝ้า (Antifogging agent) และทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์อีกด้วย

ตาราง 1.8 สมบัติต่างๆของ Tween 80 [49]

ชื่อสาร	Tween 80 หรือ Polysorbate 80
IUPAC name	polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate, polyoxyethylene (20) sorbitan fatty acid esters
Molecular formula	$C_{64}H_{124}O_{26}$
Structure	 $x+y+z+w=20$

ตาราง 1.8 สมบัติต่างๆของ Tween 80 (ต่อ)

Molar mass (g/mol)	1,310
Boiling point (°C)	148
Density (g/mL)	1.472 (Oily liquid)
Appearance	ของเหลวสีเหลืองใสและหนืด (Amber colored viscous liquid)

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการนำ PLA มาประยุกต์ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลาย เนื่องจาก PLA เตรียมได้จากผลผลิตมูลค่าต่ำและสามารถย่อยสลายตัวได้ทางชีวภาพ โดยบรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก PLA สามารถนำมาใช้แทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอธิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ได้ นอกจากนี้ PLA ยังสามารถต้านจุลินทรีย์ได้ดีกว่า LDPE ดังผลงานวิจัยของ Koide และ Shi (2007) [50] ได้ใช้วิธีการปรับบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยแก๊ส O_2 และ CO_2 และศึกษาผลของจุลินทรีย์และคุณภาพทางเคมีฟิสิกส์ของพริกหยวกเขียว (*Capsicum annuum L.*) เปรียบเทียบกับพริกหยวกที่บรรจุใน LDPE พบว่าพริกหยวกที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันในด้านสี ความแข็งของพริกหยวกและความเข้มข้นของวิตามินซี (Ascorbic acid, ASA) แต่เมื่อเก็บรักษาไว้ที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 7 วัน พบว่าปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform bacteria) ในบรรจุภัณฑ์ PLA ต่ำกว่าบรรจุภัณฑ์ LDPE นอกจากนี้ Del Nobile และคณะ (2009)[51] พบว่าฤทธิ์การต้านจุลินทรีย์ใน PLA และ LDPE จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติของ PLA จะแข็งเปราะ ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการนำ PLA ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือสารเติมแต่งบางชนิด เพื่อพัฒนาความยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Cohn และ Hotovely-Salomon (2005)[52] PLA ได้ถูกเตรียมเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์กับ Polyethylene oxide (PEO) และมี Hexamethylene diisocyanate (HDI) เป็นตัวช่วยในการเชื่อมต่อสายโซ่ใหม่ของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อจากสารละลายโดยมีคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ X-ray พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติเชิงกลดีกว่า PLA มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดประมาณ 30 MPa ค่ายังมอดูลัส 14 MPa และ ค่าการยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 1000% จากงานวิจัยของ Oyama (2009)[53] ได้มีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Poly(ethylene-glycidyl methacrylate) (EGMA) โดยพบว่าเมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล พอลิเมอร์เบลนด์สามารถยืดได้สูงสุด 40 เท่าของ PLA และมีความแข็งแรงมากถึง 50 เท่าของ PLA ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้นี้มีความเหนียว

เนื่องจากการเติม EGMA ทำให้ความเปราะของ PLA ลดลง นอกจากนี้ Hu และคณะ (2003)[54] เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Polyethylene glycol, (PEG) พบว่ามีความเข้ากันได้ เมื่อใช้ PEG ไม่เกิน 30% โดยพิจารณาจากค่า T_g ที่มีเพียงค่าเดียว และเมื่อเติม PEG ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ค่า T_g ลดลง ซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาวัสดุธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส และอนุพันธ์ของ เซลลูโลส ที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ มาผสมกับ PLA ตัวอย่างเช่น Del Nobile และคณะ (2009)[51] ได้ผสมแป้งกับ PLA พบว่าสามารถเข้ากันได้ยาก เนื่องจากไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิว (Interfacial adhesion) ทั้งสองชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการเติมหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive compatibilizer) หรือหมู่ฟังก์ชันเพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิว แต่อย่างไรก็ตามแป้งยังมีสมบัติเชิงกลที่ไม่เหมาะสมและมี T_g ต่ำกว่า T_m ซึ่งเป็นข้อเสียสำหรับการขึ้นรูปโดยวิธีการหลอมผสม อย่างไรก็ตามการใช้เซลลูโลสผสมกับ PLA ยังคงมีปัญหาความเข้ากันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสเอสเทอร์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างไม่เป็นวง และพอลิเมอร์อื่นๆ เพราะตัวมันเองมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่คาร์บอกซิลของเอสเทอร์ได้ ดังนั้น Sealey และคณะ (1996)[55] จึงได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง CAB กับ Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการหลอมละลายโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย ศึกษาความเข้ากันได้ (Miscibility) สมบัติความเป็นผลึกและโครงสร้างเฟส (Phase morphology) พบว่า CAB กับ PHB มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากปรากฏ T_g ค่าเดียว และเมื่อปริมาณของ CAB ใน PHB ลดลง พบว่า T_m มีค่าลดลง T_c สูงขึ้น ซึ่งให้เห็นว่า CAB มีผลต่อการเกิดผลึกของ PHB และเมื่อใช้ CAB น้อยกว่า 50%wt. พบว่าเมื่อเก็บไว้ ณ อุณหภูมิห้อง พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการแยกเฟส โดยมีบางส่วนของ PHB เกิดผลึก ในเวลาต่อมา นอกจากนี้ Tachibana และคณะ (2010)[56] ได้ศึกษาผลของ CAB ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นของ Poly(butylene succinate), (PBS) โดยนำ PBS มาผสมกับ CAB ด้วยวิธีการหลอมละลาย พบว่า CAB ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีสำหรับ PBS อีกทั้งการเติม CAB ทำให้ปริมาณผลึกลดลง และเมื่อเติม 10% CAB ใน PBS พบว่า CAB สามารถชะลอการสลายตัวของ PBS ได้

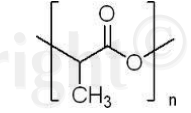
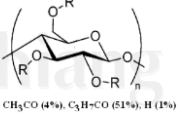
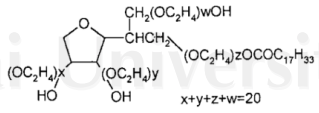
ในการปรับปรุงสมบัติ PLA โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ สุภาพรและคณะ (2553)[49] ศึกษาผลของการเติมสารในกลุ่ม Tween ได้แก่ Tween 20, 40, 60 และ Tween 80 ลงใน PLA โดยการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ให้เป็นฟิล์มด้วยวิธีการหลอมละลายใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย พบว่า PLA ที่

เดิม Tween 80 สามารถยืดได้มากที่สุด และมีความแข็งแรงที่สุด นอกจากนี้มีความสามารถต้านทานการเกิดหยดน้ำและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้สูงสุดด้วย

ในการศึกษาผลของ Tween 80 ที่มีต่อสัณฐานวิทยาและการซึมผ่านของแผ่นเยื่อ Polyethersulfone (PES) โดย Amirilargani และคณะ (2009)[57] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Tween 80 ทำให้ความหนา ความเป็นรูพรุน และการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ (Pure water permeability) ของแผ่นเยื่อ PES เพิ่มขึ้น Brandelero และคณะ (2010)[58] ได้ทำการศึกษาสมบัติความชอบน้ำของพอลิเมอร์เบลนค์ระหว่าง Cassava thermoplastic starch (TPS) และ Poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) โดยใช้ TPS ปริมาณ 50, 65, และ 80 %wt. ใน PBAT และเติม 2 กรัมของ Tween 80 ต่อ 100 กรัมของพอลิเมอร์เบลนค์ แป้ง / PBAT และขึ้นรูปเป็นแผ่น จากนั้นนำไปศึกษาการซึมผ่านไอน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การละลาย และสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยใช้ฟิล์มแป้งที่ไม่เติม Tween 80 เป็นตัวควบคุม พบว่าสมบัติการชอบน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของแป้งที่ผสม การเพิ่มปริมาณแป้งส่งผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำและโครงสร้างมีความอัดแน่นมากขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มที่ผสม Tween 80 จะมีการแพร่ผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) สูงขึ้นกว่าฟิล์มที่ไม่ผสม Tween 80 เนื่องจาก Tween80 จะช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ระหว่างสายโซ่ของแป้ง และฟิล์มที่เติม Tween80 มากขึ้นส่งผลให้ WVP สูง และมีความต้านทานแรงดึงลดลง

1.9 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อพัฒนาสูตรการผลิตพอลิเมอร์เบลนค์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลทางการเกษตรโดยมี PLA เป็นองค์ประกอบหลัก ผสมกับ CAB และ T80 เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานการเกิดฝ้า

พอลิเมอร์เบลนค์		
PLA	CAB	Tween 80
 Poly(Lactic acid)	 Cellulose acetate butyrate	 Polysorbate 80

1.10 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

1.10.1 ได้สูตรการผลิตพอลิเมอร์เบลนค์ชนิดใหม่ระหว่าง PLA, CAB และ T80 ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกล การซึมผ่านไอน้ำและแก๊สที่ดี รวมทั้งต้านทานการเกิดฝ้า

1.10.2 สามารถพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มี PLA เป็นองค์ประกอบหลัก และลดต้นทุนของการนำ PLA ไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลทางการเกษตร

1.11 แผนดำเนินการ ขอบเขตงานวิจัยและวิธีวิจัย

- 1.11.1 สืบค้น ค้นคว้า และ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.11.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของอัตราส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80
- 1.11.3 เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง PLA, CAB และ T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเทคนิคการหล่อจากสารละลาย (Solvent casting technique) เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม
- 1.11.4 วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมได้ ดังนี้
 - 1.11.4.1 ลักษณะความใสของฟิล์ม ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-Visible Spectrometer)
 - 1.11.4.2 ลักษณะพื้นผิวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
 - 1.11.4.3 สมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)
 - 1.11.4.4 สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)
 - 1.11.4.5 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) ด้วยวิธีทดสอบแบบแห้ง (Desiccant method)
 - 1.11.4.6 สมบัติการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability, OP)
 - 1.11.4.7 มุมสัมผัส (Contact angle)
 - 1.11.4.8 สมบัติการต้านการเกิดฝ้าบนฟิล์ม (Antifogging properties) ด้วยวิธีการทดสอบการเกิดฝ้าในสภาวะเย็น (Cold fog test) และทดสอบการเกิดฝ้าในสภาวะร้อน (Hot fog test)
 - 1.11.4.9 ตรวจสอบองค์ประกอบของ T80 ที่อยู่ในฟิล์มด้วยเทคนิค IR
- 1.11.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง