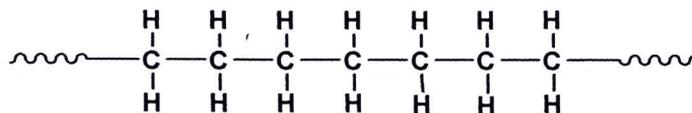


บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 พลาสติกชีวภาพ

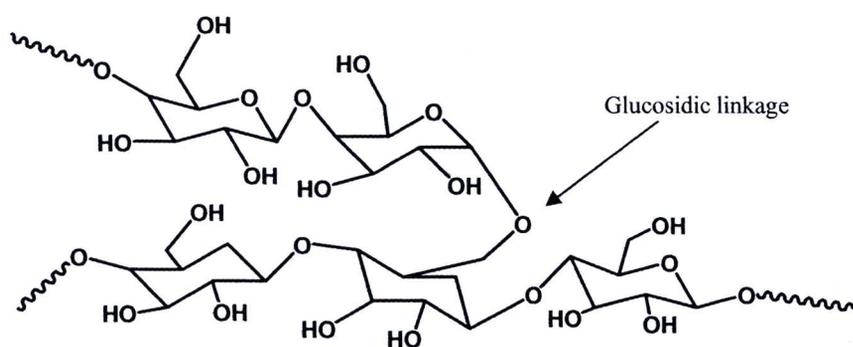
พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) หมายถึงพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ กล่าวคือเป็นพลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ดังกล่าว [17] สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต คือพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวล (bio-based biodegradable plastics) [3] ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกประเภทหลัง กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น ทั้งนี้วัตถุดิบชีวมวล (biomass) ที่นำมาใช้ผลิตพลาสติกชีวภาพได้มาจากผลผลิตทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวและอ้อย เป็นต้น

คำว่า “ย่อยสลายทางชีวภาพ” มีความหมายว่า วัสดุสามารถย่อยสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงได้โดยกิจกรรมทางชีวภาพของจุลินทรีย์ [18] ดังนั้นวัสดุดังกล่าวจึงไม่คงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน ในขณะที่พลาสติกสังเคราะห์โดยทั่วไปส่วนใหญ่ เช่น พอลิเอทิลีน (รูปที่ 2.1) จะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อกันของคาร์บอนเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง จึงส่งผลให้โครงสร้างดังกล่าวใช้เวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นเวลายาวนาน ในทางตรงกันข้ามพบว่าพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เช่น TPS, PLA เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์ดังกล่าวจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) และประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ตามลำดับ (รูปที่ 2.2) ซึ่งพันธะดังกล่าวจะมีความแข็งแรงน้อยและสามารถแตกตัวได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จึงส่งผลให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้รวดเร็ว

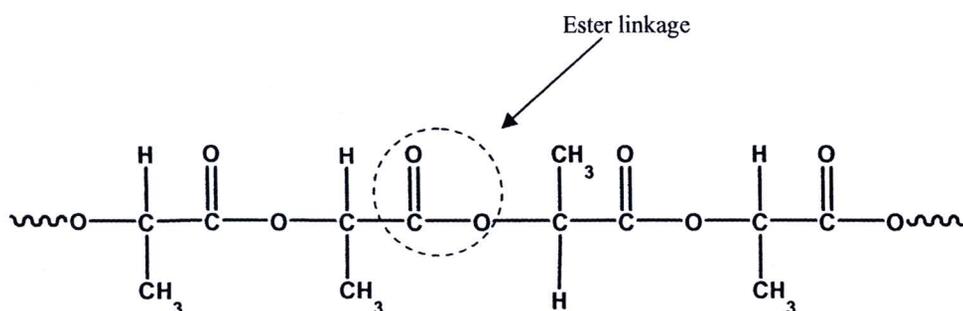


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน

ก



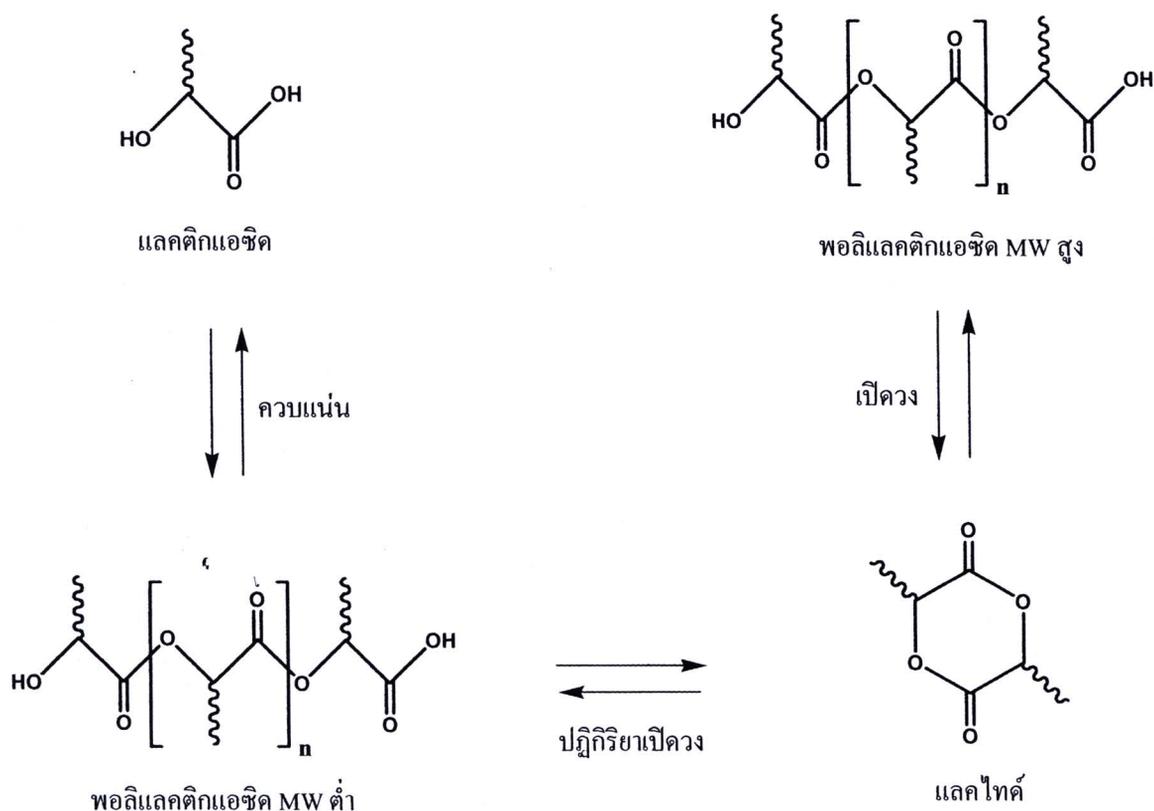
ข



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ ก) TPS ข) PLA

2.2 พอลิแลคติกแอซิด

PLA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกประเภทอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้และได้จากการสังเคราะห์โดยผ่านปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (รูปที่ 2.3) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนั้น PLA ยังอาจจะสังเคราะห์ได้จากกลไกปฏิกิริยาแบบเปิดวง (Ring opening polymerization) ของแลคไทด์ ซึ่งจะ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า [19]



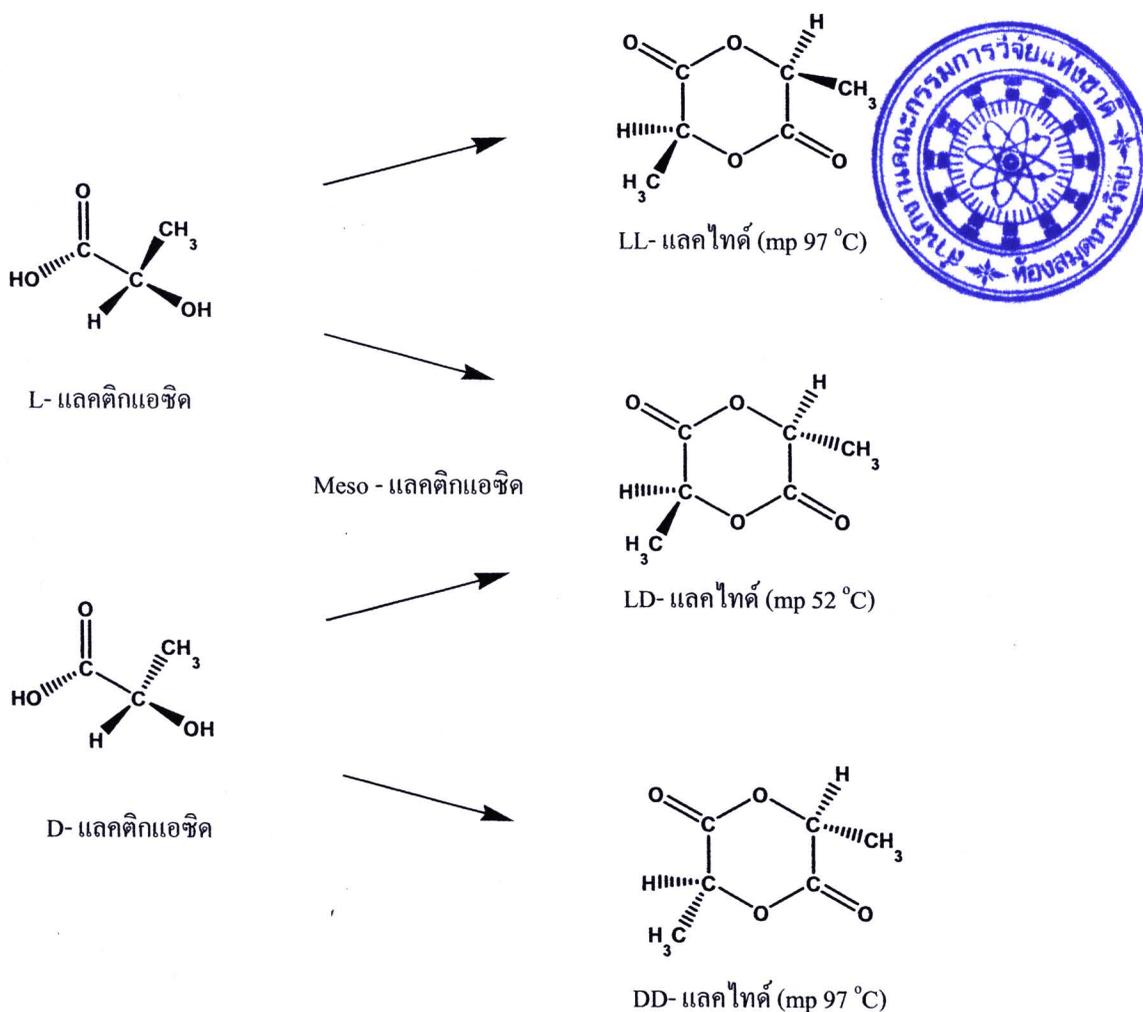
รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [20]

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ลักษณะใสและมีความแข็งแรงเปราะเมื่อเทียบกับอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ชนิดอื่นๆ ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและสังเคราะห์มาจากวัตถุดิบที่ได้จากน้ำมัน เช่น พอลิคาโปแลคโตน (PCL), พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเลฟทาเลต (PBAT), เป็นต้น [21-22] โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของ PLA ที่สูง ซึ่งอยู่ในช่วง 350 – 2,800 เมกกะปาสกาล ค่าความแข็งแรงขณะยืดดึง (tensile strength) สูงประมาณ 10-60 เมกกะปาสกาล ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ 45-65 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ประมาณ 150-160 องศาเซลเซียส [23] จึงทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวสามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปและใช้งานในสถานะอุณหภูมิห้องได้ดี ด้วยสมบัติข้างต้นทำให้ PLA เริ่มถูกมาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น อย่างไรก็ตาม PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความไวต่อน้ำและความชื้น โดยจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้โมเลกุลสั้นลงได้

ในด้านของโครงสร้างทางเคมีแบบสเตอริโอเมอร์ (Stereo chemistry) ของ PLA พบว่ามีความหลากหลายที่เกิดจากทิศทางการวางตัวของอะตอมในแลคติกมอนอเมอร์ เช่นแบบ L-Lactic acid, แบบ D-Lactic acid (รูปที่ 2.4) ซึ่งจะส่งผลให้ PLA ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างได้ 3 แบบ

โดยโครงสร้าง 2 แบบแรก คือ poly(L-lactic acid), poly(D-lactic acid) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกและมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่เหมือนกัน ส่วนโครงสร้างแบบที่ 3 คือ poly (D, L lactic acid) หรือ poly (meso-lactic acid) หรือเรียกว่าเป็น racemic polymer พอลิเมอร์ดังกล่าวจะได้มาจากของผสมที่มี L-lactic acid และ D-lactic acid และจัดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานซึ่งจะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี

นอกจากนั้น ปริมาณหรืออัตราส่วนของหน่วยซ้ำแบบ L และ D ใน PLLA และ PDLA ก็จะมีผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณของหน่วยซ้ำแบบ D ที่เพิ่มขึ้น จะไปลดความเป็นผลึกและจะส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเปลี่ยนไป ดังนั้นการควบคุมของหน่วยซ้ำแบบ L และ D จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ



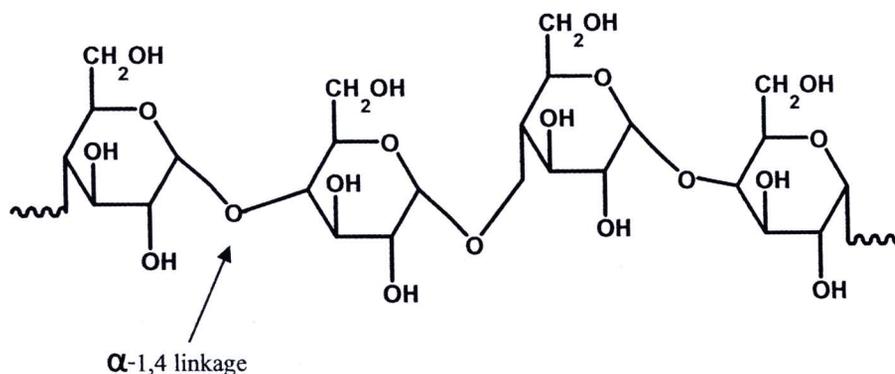
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PLA ในรูปแบบต่างๆ [24]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่.....-3 08 2555.....
 เลขทะเบียน.....248099.....
 เลขเรียกหนังสือ.....

2.3 แป้ง

แป้งเป็นวัสดุชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีการผลิตปริมาณสูง เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ราคาไม่แพง สามารถย่อยสลายได้รวดเร็ว จึงทำให้ในปัจจุบันมีการนำแป้ง มาใช้ในการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาอนุภาคของแป้งพบว่าแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 ตามลำดับ มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และมีหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - กลูโคซิดิก โดยโมเลกุลแป้งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน [25, 26]

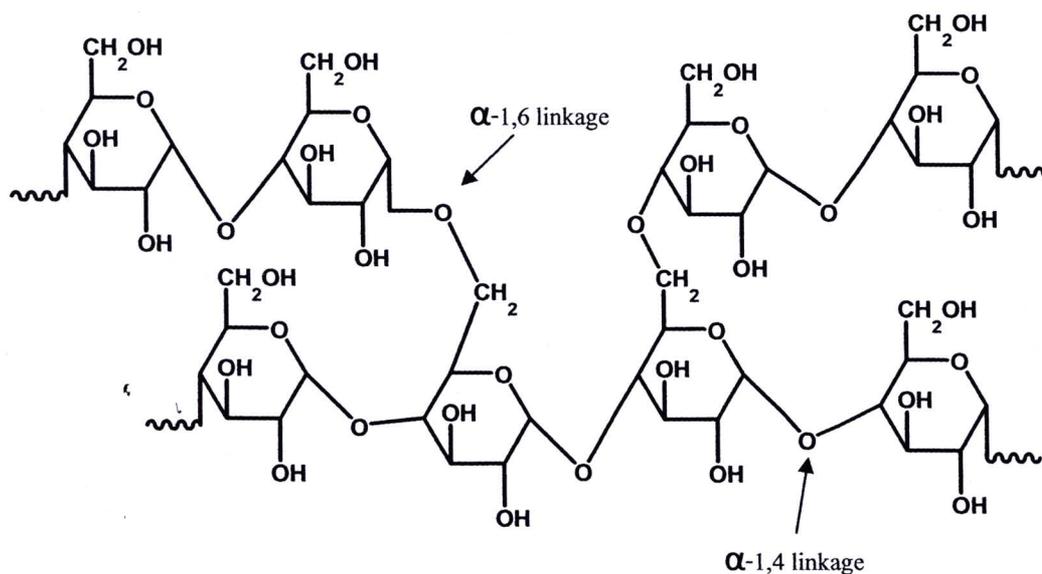
อะไมโลส (รูปที่ 2.5) เป็นลักษณะสายโซ่ของแป้งที่มีการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่ตรง โดยจะมีการเชื่อมต่อกันของหน่วยพื้นฐานด้วยพันธะ α - กลูโคซิดิก ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ซึ่งปริมาณอะไมโลสในแป้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง กล่าวคือ แป้งที่ผลิตจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง ประมาณ 28% ส่วนแป้งผลิตจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาจะจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% นอกจากนั้นเนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลสที่มีความเป็นกิ่งสาขาน้อย จึงส่งผลทำให้มีแนวโน้มเกิดการคืนตัวของแป้งสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะไมโลส

อะไมโลเพคติน (รูปที่ 2.6) เป็นลักษณะสายโซ่ของแป้งที่มีการจัดเรียงตัวทั้งสายโซ่ตรงและสายโซ่ที่มีความเป็นกิ่งสาขา โดยจะมีการเชื่อมต่อกันของหน่วยพื้นฐานด้วยพันธะ α - กลูโคซิดิก ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1, 4 และที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1, 6 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ตามลำดับโดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างแบบอะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าโครงสร้างแบบอะไมโลสประมาณ

1,000 เท่า ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็น โครงสร้างหลักของ เม็ดแป้งและเป็นส่วนที่ทำให้แป้งมีการคืนตัวต่ำ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะไมโลเพคติน

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างแป้งที่มีโครงสร้างเป็น โซ่ตรง (อะไมโลส) กับแป้งที่มีโครงสร้างเป็น โซ่กิ่ง (อะไมโลเพคติน) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [27]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 10-60 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง



2.3.1 แป้งเทอร์โมพลาสติก

TPS เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานหรือพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีความเป็นขั้วสูงเนื่องจาก โครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซีเป็นจำนวนมาก ซึ่งแป้งดังกล่าวจะเกิดจากการหลอมเป็นเจลเมื่อทำการผสมแป้งเข้ากับสารเสริมสภาพพลาสติกในเครื่องอัดรีด โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 140 – 160 องศาเซลเซียส ความดันและแรงเฉือนสูง ซึ่งแป้งดังกล่าวจะมีทั้งลักษณะที่อ่อนนุ่มและแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติก การให้แรงเฉือนหรือการให้ความร้อนในขั้นตอนการผลิต [28] โดยสารเสริมสภาพพลาสติกที่ใช้ในการผลิต TPS ได้แก่ น้ำ กลิเซอรอล เป็นต้น ซึ่งสัดส่วนในการเติมสารดังกล่าวที่สามารถทำให้แป้งมีความเป็น TPS ต้องเติมมากกว่าร้อยละ 15 – 20 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามในการผลิตจริง พบว่าจะมีปัญหาในเรื่องเทคนิคการควบคุมปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติก เนื่องจากน้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส และความหนืดของ TPS ที่สูงเกินไปในขณะหลอมเหลว แต่ก็สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น

2.3.2 แป้งดัดแปลง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย จึงมีการนำมาใช้ในชีวิตประจำวันมากมายไม่ว่านำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมอาหารหรือวัสดุ แต่เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของแป้ง เช่น มีช่วงความหนืดที่แคบ มีความคงทนต่อแรงเฉือนและแรงกระทำต่างๆต่ำ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้อุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปลงสมบัติบางประการของแป้งให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี ทนความชื้นได้ดีขึ้น มีการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ลดลง และสามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์หรือสารเคมีอื่นๆ ได้ดีขึ้น

2.3.2.1 ประเภทของการดัดแปลงแป้ง

การดัดแปลงแป้งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ ประเภทแรกเป็นการดัดแปลงทางกายภาพซึ่งการดัดแปลงแป้งด้วยวิธีนี้จะไม่ทำให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนแปลงแต่เป็นเพียงการทำให้ลักษณะทางกายภาพของแป้งเปลี่ยนไป เช่น การทำให้แป้งเกิดเจล (gelatinization), การลดขนาดของเม็ดแป้งทางกล (ball milling), การอบอ่อน (annealing) เป็นต้น ประเภทที่สองเป็นการดัดแปลงทางเคมีซึ่งการดัดแปลงแป้งด้วยวิธีนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างสารเคมีกับแป้ง จึงส่งผลทำให้โครงสร้างของแป้งเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น การเกิดอนุพันธ์ของแป้ง (derivatization), การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (acid thinning), การเกิดออกซิเดชัน (oxidation) และเกิดการแตกตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) เป็นต้น ส่วนประเภทที่สามเป็นการดัดแปลงทางเทคโนโลยีชีวภาพซึ่งจะเป็นการดัดแปลงพันธุกรรมของแป้งให้มีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินได้ตามที่ต้องการ [29]

2.3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่แทนที่ของแปงัดแปลง

ปริมาณหมู่แทนที่ที่สามารถแสดงด้วยค่า Degree of Substitution (DS) ซึ่งหมายถึงจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซีต่อจำนวนหน่วยกลูโคส (สมการที่ 2.10) ซึ่งเมื่อพิจารณาการแทนที่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโมเลกุลของแปงพบว่า จะเกิดการแทนที่ได้เต็มที่ 3 ตำแหน่ง คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ดังนั้นถ้าหมู่ไฮดรอกซีทั้ง 3 ตำแหน่งถูกแทนที่ทั้งหมด จะมีค่า DS เท่ากับ 3 ถ้าถูกแทนที่ 2 และ 1 ตำแหน่ง ก็จะมีค่า DS เท่ากับ 2 และ 1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า DS จะบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซีที่ถูกแทนที่เท่านั้นแต่ไม่บอกถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่

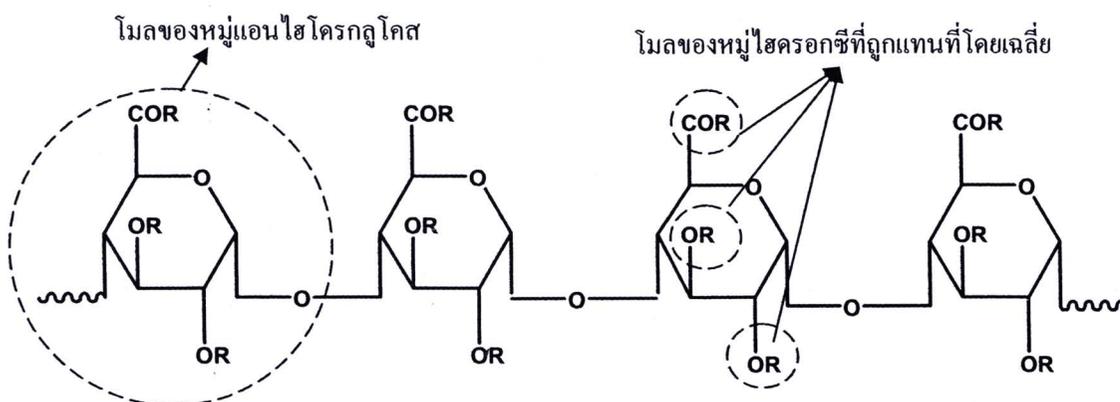
ระดับการแทนที่ (Degree of substitution)

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซีที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ย}}{\text{โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคส}} \quad (\text{สมการที่ 2.10})$$

มีค่ามากที่สุด = 3

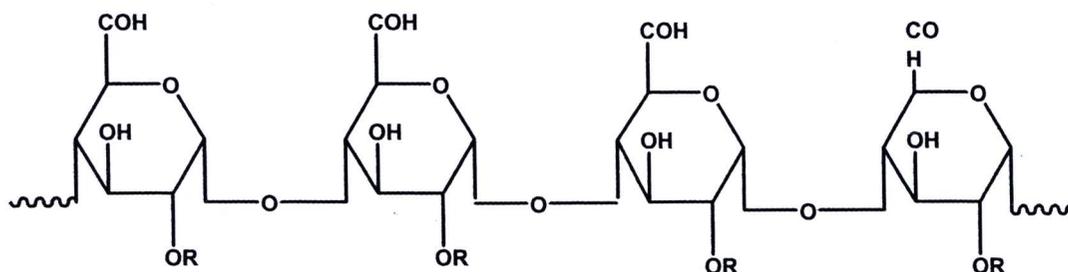
ตัวอย่างแสดงการคำนวณระดับการแทนที่

รูปที่ 2.7 แสดงหมู่แอนไฮโดรกลูโคสที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 3 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถคำนวณระดับการแทนที่ได้ ดังนี้ โดยถ้ากำหนดให้โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคสมี 10 หมู่ จะมีโมลของหมู่ไฮดรอกซีที่ถูกแทนที่เฉลี่ย 30 ตำแหน่ง ดังนั้นเมื่อคำนวณตามสมการที่ 1 จะได้ปริมาณหมู่แทนที่ (DS) เท่ากับ 3



รูปที่ 2.7 หน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคสใน โมเลกุลแปงที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 3 ตำแหน่ง

รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างแอนไฮโดรกลูโคสที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 1 ตำแหน่ง ซึ่งจะมีโมลของหมู่ไฮดรอกซีที่ถูกแทนที่เฉลี่ย 1 ใน 3 หรือคำนวณตามสมการที่ 3.0 จะได้ปริมาณหมู่แทนที่ (DS) เท่ากับ 1



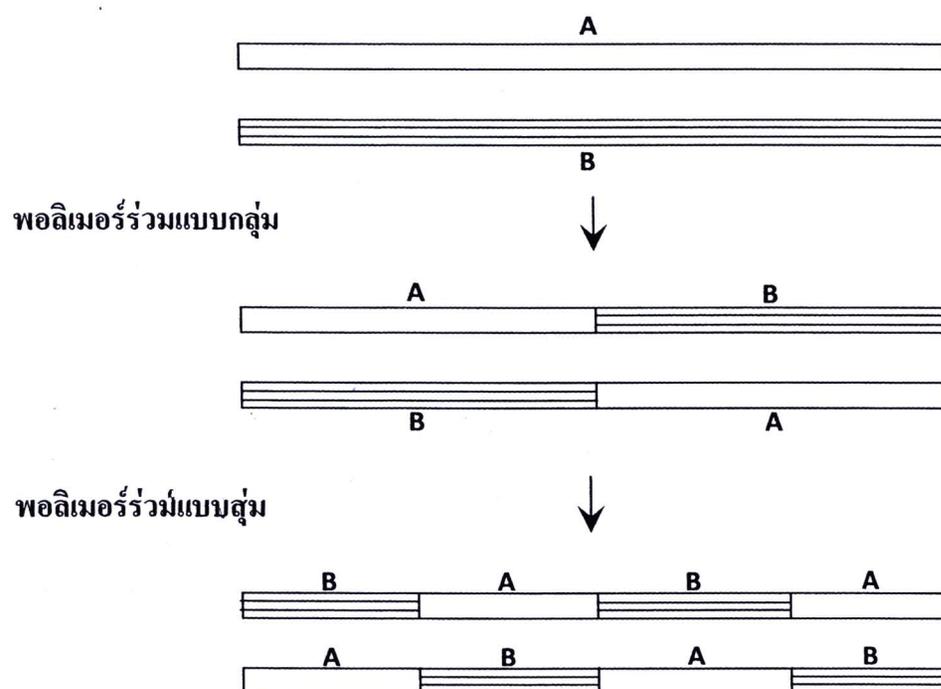
รูปที่ 2.8 หน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลแป้งที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 1 ตำแหน่ง

2.4 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม (Transreactions in blends)

การผสมพอลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลว เป็นไปได้ว่าในระหว่างการผสมอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีไปด้วย จะเรียกการผสมแบบดังกล่าวว่า reactive blending ตัวอย่างเช่น ในการผสมพอลิสไตรีนกราฟมาเลอิค แอนไฮไดรด์เข้ากับ ไนลอน-6 ซึ่งหมู่แอนไฮไดรด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนบริเวณปลายสายโซ่ [30] ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาก็จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการผสมและปริมาณตัวเร่ง กล่าวคือถ้าระยะเวลาสั้น อุณหภูมิสูง และปริมาณตัวเร่งมาก ก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนของสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวแล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี สันฐานวิทยา และพฤติกรรมที่เชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม [31]

รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนของสายโซ่พอลิเมอร์ จะเห็นว่าโครงสร้างทางเคมีจะเปลี่ยนจากพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) และเมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเรื่อยๆ ก็จะมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer) ในที่สุด

พอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนสายโซ่พอลิเมอร์ [31]

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเกิดกับพอลิเมอร์ผสมได้หลายประเภท เช่น การเกิดการแลกเปลี่ยนสายโซ่ระหว่างพอลิเอไมด์กับพอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์กับพอลิเอสเทอร์ หรือพอลิเอไมด์กับพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น ในกรณีของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์กับพอลิเอสเทอร์ (PLA ผสมกับ MTPS)

ดังนั้นปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในระหว่างการผสมพอลิเมอร์ดังกล่าวคือ ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (เป็นการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลกับพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ ซึ่งไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดการแลกเปลี่ยนโครงสร้างไปจับกับออกซิเจนของพอลิเอสเทอร์ และหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเอสเทอร์จะแลกเปลี่ยนโครงสร้างไปจับกับออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิล ดังสมการที่ 2.11) ปฏิกิริยาที่สองคือ ปฏิกิริยาอะซิโดไลซิส (เป็นการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกกับพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกจะเกิดการแลกเปลี่ยนโครงสร้างไปจับกับออกซิเจนของพอลิเอสเทอร์ และหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเอสเทอร์จะแลกเปลี่ยนโครงสร้างไปจับกับออกซิเจนของหมู่กรดคาร์บอกซิลิก ดังสมการที่ 2.12) และปฏิกิริยาสุดท้ายคือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (เป็นการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเอสเทอร์ตัวแรกจะเกิดการแลกเปลี่ยนโครงสร้าง

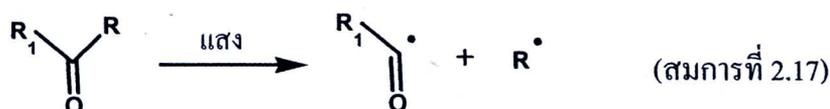
2.5.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation plastics)

เป็นวิธีการย่อยสลายพลาสติกโดยไม่ต้องพึ่งพาลินทรีย์ โดยการย่อยสลายวิธีดังกล่าวจะเป็นการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเริ่มจากพอลิเมอร์ (RH) แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ เมื่อถูกชักนำจาก initiator (สมการที่ 2.14) จากนั้นอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็นแอลคิลเปอร์ออกซิล (สมการที่ 2.15) ต่อจากนั้น แอลคิลเปอร์ออกซิลจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เริ่มต้น (RH) และสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ (สมการที่ 2.16) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับออกซิเจนได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมากขึ้นจึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวเกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสายโซ่ที่มีขนาดสั้นลง [33]



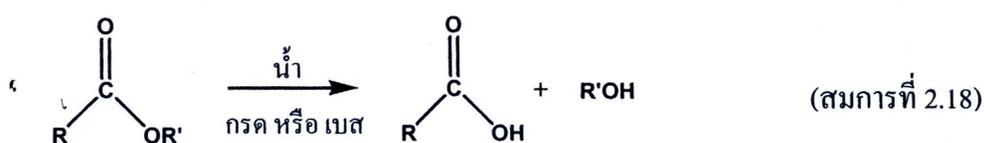
2.5.3 การย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics)

การย่อยสลายด้วยวิธีนี้มักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกชีวภาพ เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เช่น พอลิเมอร์ที่มีหมู่คีโตนอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถแสดงกลไกการย่อยสลายด้วยแสงดังสมการที่ 2.17 [34] โดยสารเติมแต่งหรือหมู่คีโตนดังกล่าวสัมผัสกับแสงยูวี และจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนตำแหน่งอื่นๆบนสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่อย่างรวดเร็ว



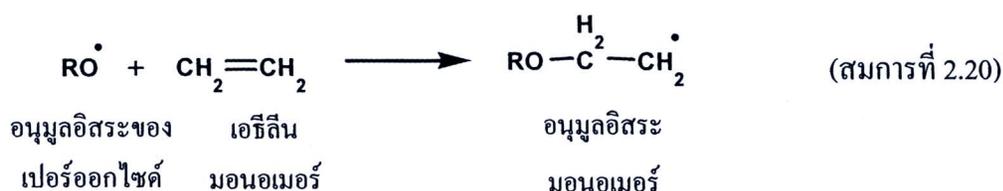
2.5.4 การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

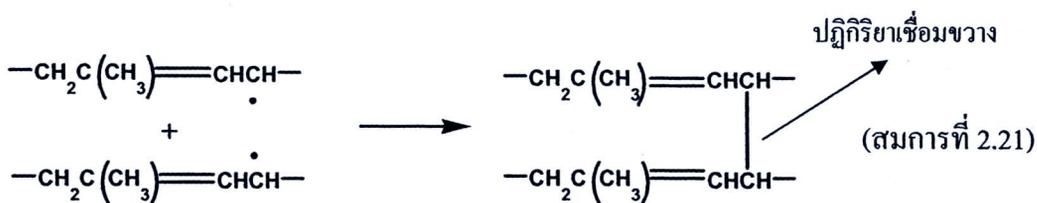
เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิแลคติกแอซิด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจะก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดได้รวดเร็ว เมื่อได้รับอิทธิพลจากตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งจากปฏิกิริยาภายนอกได้แก่ เอนไซม์ต่างๆ เบส และกรด ดังสมการที่ 2.18 [35] ซึ่งเมื่อเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกบริเวณปลายสายโซ่ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน ส่งผลให้สายโซ่เกิดการขาดออกจากกันมากขึ้น



2.6 สารประกอบเปอร์ออกไซด์

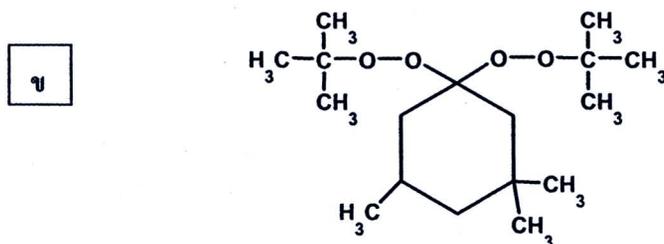
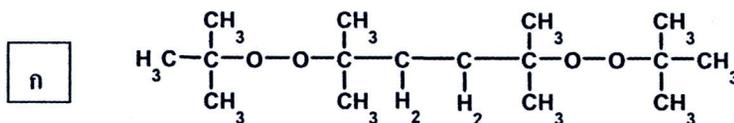
สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างเชื่อมต่อกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจน จึงทำให้สารดังกล่าวเกิดการแตกตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับความร้อน การใช้งานสารประกอบเปอร์ออกไซด์ส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวเริ่มต้นการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 [36] และยังเป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้พอลิเมอร์เกิดโครงสร้างเชื่อมขวาง เช่น การเชื่อมขวางกันของยางธรรมชาติ ดังสมการที่ 2.21 [37] นอกจากนี้สารดังกล่าวยังสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวและการไหลของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว [38, 39] ตัวอย่างของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น 2, 5-dimethyl-2, 5-di-(tert-butylperoxy) hexane, 1, 1-(tert-butylperoxy)-3, 3, 5-trimethylcyclohexane เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้างได้ดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.10 ตามลำดับ [40]





ตารางที่ 2.2 สมบัติของทางกายภาพ ทางเคมีของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [40]

ชื่อทางการค้า	ชื่อสารประกอบเปอร์ออกไซด์	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	Tm (°C)	O ₂ (%)	T _{1/2} (°C), เวลา 1 (min)
Luperox® 101	2,5-dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxy)hexane	290.4	5	11.02	185
Luperox® 231	1,1-(tert-butylperoxy)-3,3,5-trimethylcyclohexane	302.4	-	10.58	155



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ ก) 2, 5-dimethyl-2, 5-di-(tert-butylperoxy) hexane ข) 1, 1-(tert-butylperoxy)-3, 3, 5-trimethylcyclohexanehexane [40]

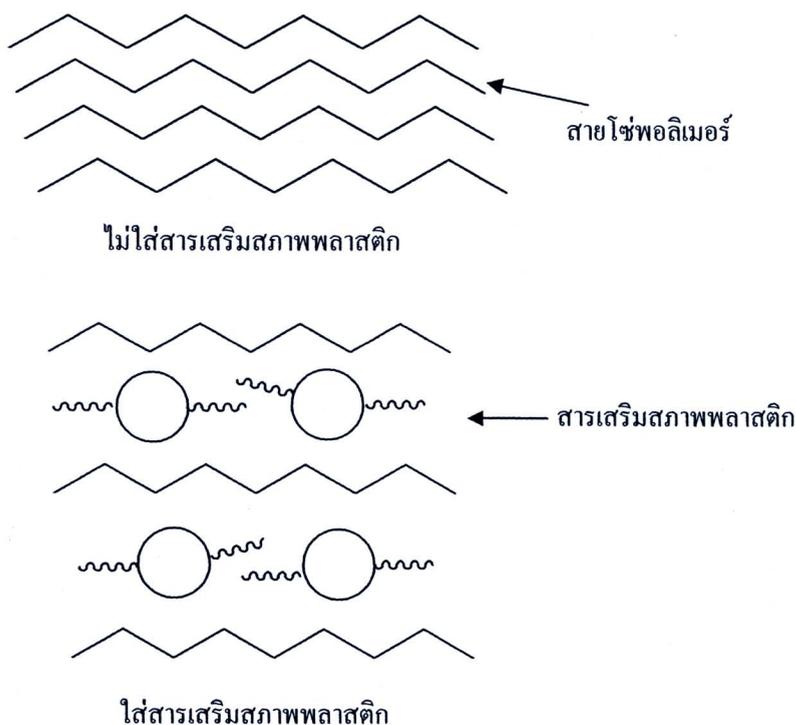
อย่างไรก็ตาม สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีความว่องไวในการแตกตัวสูง ติดไฟและระเบิดได้ง่าย จึงควรเก็บไว้ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำและแสงสว่างน้อย รวมทั้งมีฤทธิ์เป็นกรดและ

อย่างไรก็ตาม สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีความว่องไวในการแตกตัวสูง ติดไฟและระเบิดได้ง่าย จึงควรเก็บไว้ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำและแสงสว่างน้อย รวมทั้งมีฤทธิ์เป็นกรดและมีความสามารถในการกัดกร่อนสูง ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสด้วยอวัยวะต่างๆ การกลืน การสูดดม เนื่องจากเป็นสารที่อันตรายต่อร่างกายสูง [41]

2.7 สารเสริมสภาพพลาสติก

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก จึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัว กระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์เรียกว่า การเสริมสภาพพลาสติก (plasticization) และสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ซึ่งสารเสริมสภาพพลาสติกจะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอและความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์ โดยทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดต่ำลง นอกจากนี้สารเสริมสภาพพลาสติกยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล ลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยสารดังกล่าวจะไม่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์แต่จะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ [42] จึงส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น โดยทฤษฎีการทำงานของสารเสริมสภาพพลาสติกจะทำหน้าที่หลายประเภท เช่น ทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (lubricant theory) โดยไปลดแรงเสียดระหว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านไปมาได้ง่าย ทำหน้าที่ทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (gel theory) โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน ดังนั้นสารเสริมสภาพพลาสติกจะต้องประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว โดยส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับบริเวณที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่ส่วนไม่มีขั้วจะเป็นกำบังให้กับบริเวณส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ส่งผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ (free volume) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ง่ายขึ้น [43]

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทั้งกรณีที่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติกและไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติกพบว่าเมื่อไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติกการจัดเรียงตัวของสายโซ่จะเรียงชิดติดกัน จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้พอลิเมอร์ยืดหยุ่นได้ไม่ดี แต่เมื่อใส่สารเสริมสภาพพลาสติกพบว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์จะอยู่ห่างกันมากขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่าย จึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์ยืดหยุ่นได้มากขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งในกรณีที่ไม่ใส่และใส่สารเสริมสภาพพลาสติก

2.7.1 ชนิดของสารเสริมสภาพพลาสติก

สารเสริมสภาพพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามความยาวของสายโซ่โมเลกุลของสารเสริมสภาพพลาสติก ได้แก่ สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโมโนเมอร์ริก (monomeric plasticizer) และ สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโพลิเมอร์ริก (polymeric plasticizer) [42]

2.7.1.1 สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโมโนเมอร์ริก สามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายกลุ่ม ได้แก่

- **พธาลเอทเอสเทอร์** เป็นกลุ่มที่ใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกมากที่สุด โดยเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่ เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่างพธาลิกแอนไฮไดรด์กับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น กรดซัลฟูริก ซึ่งสารดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นของเหลว มีจุดเดือดสูง ละลายในไขมันได้ดี คงทนต่อความร้อนและแสง ราคาค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดนี้ เช่น dimethyl phthalate (DMP), di-(2-ethylhexyl) phthalate (DOP) เป็นต้น

- **อะดิพาทิก ไดเอสเทอร์** เป็นกลุ่มที่ผลิตจากกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น กรดออกซาลิกหรือกรดซีเลอิก กับแอลกอฮอล์ เช่น di-2-ethylhexyl adipate (DOA) ซึ่งสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดนี้ช่วยปรับปรุงสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ สามารถใช้ในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอาหารได้ แต่ราคาสูง

- **ฟอสเฟต เอสเทอร์** เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่ได้จากการทำปฏิกิริยารวมตัวกันอย่างช้าๆระหว่างฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์ (POCl_3) กับแอลกอฮอล์หรือฟีนอล สารดังกล่าวจะนิยมใช้งานในที่อุณหภูมิสูง แต่สมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ค่อยดี สารเหล่านี้ได้แก่ Trioctyl phosphate (TOP), Tricresyl phosphate (TCP) เป็นต้น

- **พอลิออล** เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซีตั้งแต่สองหมู่ขึ้นไปในสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ กลีเซอรอล (กลีเซอริน) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่สามารถผสมเข้ากับแข็งได้ดี เนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซีเป็นจำนวนมาก และมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี สามารถละลายน้ำได้ ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย [44]

- **อะซิเทต เอสเทอร์** ได้แก่ กลีเซอรอลไดอะซิเทต (ไดอะซิทิน) กลีเซอรอลไตรอะซิเทต (ไตรอะซิทิน) เป็นต้น สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดอะซิติก ซึ่งสารดังกล่าวจะมีลักษณะใส ละลายน้ำได้น้อย ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ในการช่วยการขึ้นรูป เพิ่มสมบัติการไหลและใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ [44]

นอกจากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบความเป็นพิษของสารเสริมสภาพพลาสติกพบว่า สารเสริมสภาพพลาสติกไม่ได้เกิดพันธะเคมีกับสารโซ่ของพอลิเมอร์ แต่จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถเกิดการถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย จากการตรวจสอบขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) [42] พบว่า สารเสริมสภาพพลาสติกโมโนเมอร์หลายชนิด เช่น DMP, DEP, DBP, BBP, DOP จะไม่แสดงความเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน แต่จะแสดงในลักษณะพิษเรื้อรัง เป็นผลให้เกิดอาการตกเลือดในปอด ตับโต เป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย ทำให้เกิดมะเร็ง เกิดการกลายพันธุ์ และทารกในครรภ์มีรูปร่างผิดปกติได้

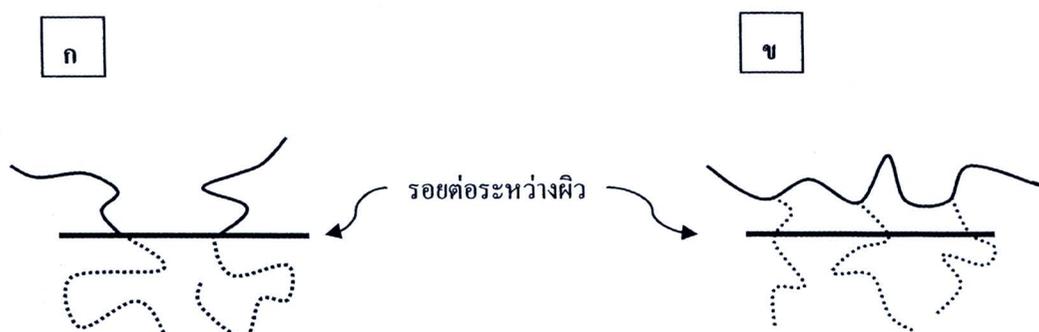
2.7.1.2 สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโพลีเมอร์

ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดไคเบซิก เช่น กรดอดิพิกกับไกลคอล เช่น โพรพิลีนไกลคอล ซึ่งจะได้สารเสริมสภาพพลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโมโนเมอร์ และจะมีโอกาสหลุดออกจากพลาสติกได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม ราคาของสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดนี้จะมีราคาที่สูงกว่าชนิดโมโนเมอร์

2.8 สารเสริมสภาพเข้ากันได้

สารเสริมสภาพเข้ากันได้ คือ สารที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมเพื่อทำให้แรงดึงผิวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดลดลง ลดการรวมตัวกันของพอลิเมอร์เฟสกระจายตัวและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังนั้นจึงทำให้ของพอลิเมอร์เฟสกระจายตัว สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เฟสหลักได้ดีและมีขนาดอนุภาคเล็กลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติเชิงกล เช่น การยึดตัวของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

สารเสริมสภาพความเข้ากันได้อาจจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมีลักษณะเป็น พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม หรือ พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ เป็นต้น ซึ่งในหนึ่งสายโซ่จะมีพอลิเมอร์อยู่ 2 ชนิด โดยโครงสร้างลักษณะดังกล่าวจะทำให้สามารถยึดเหนี่ยวพอลิเมอร์ ณ บริเวณรอยต่อระหว่างผิว เข้าด้วยกันได้ดีขึ้น ตัวอย่างของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ได้แก่ PLA-g-MA [7], PCL-b-PS, SEBS และ Hydrogenated polybutadiene-g-PMMA [45] เป็นต้น

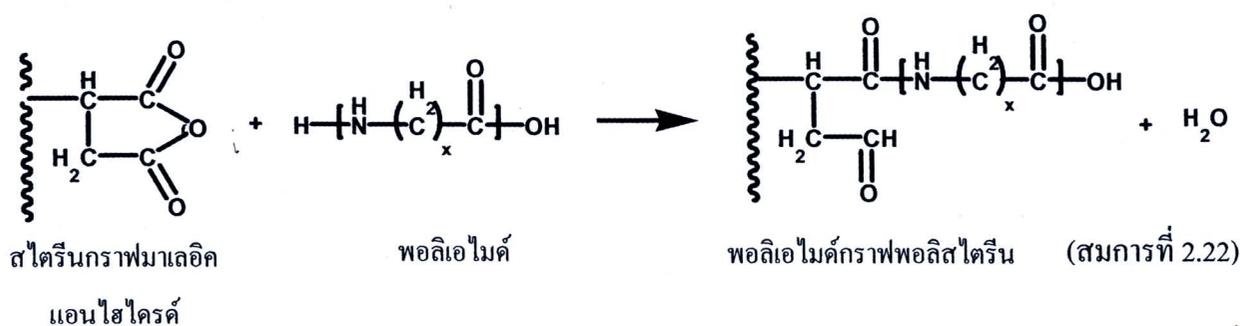


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ

2.8.1 กลไกการเสริมสภาพความเข้ากันได้

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามหน้าที่การเสริมสภาพเข้ากันได้ [34] ได้แก่ กลไกแบบไม่เกิดปฏิกิริยาขณะเสริมสภาพเข้ากันได้ (non-reactive compatibilization) และกลไกแบบที่สองคือ กลไกแบบเกิดปฏิกิริยาขณะเสริมสภาพเข้ากันได้ (reactive compatibilization) โดยในกรณีแรก สารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ต้องการจะผสมให้เข้ากัน โดยจะหันสายโซ่ฝั่งที่เป็นพอลิเมอร์ ประเภทเดียวกันเข้าหากันเพื่อทำการเกี่ยวพันกัน ซึ่งจะเป็นการเสริมสภาพเข้ากันได้ทางกลเท่านั้น โดยไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้องดังรูป 2.12

เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC กับ PS โดยมีสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็น PCL-b-PS ซึ่งจะเห็นว่า PS ที่เป็นเฟสหลัก สามารถผสมเข้ากับ PS ของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ส่วน PCL ในสารเสริมสภาพเข้ากันได้ จะสามารถผสมเข้ากับ PVC เป็นต้น และในกรณีของกลไกแบบที่สอง ตัวอย่างได้แก่ การผสม PA กับ PS โดยใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็น styrene-g-MAH [46] จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการผสมกันสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอไมด์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ขณะผสม แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำดังสมการที่ 2.22 ด้วยปฏิกิริยาดังกล่าวจึงทำให้ PA กับ PS สามารถผสมเข้ากันได้



2.9 การวิเคราะห์ราคาของพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์

ในด้านราคาต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (ตารางที่ 2.3) จะเห็นได้ว่า PE ราคาถูกที่สุด กิโลกรัมละ 50 บาท ในขณะที่ PLA มีราคา กิโลกรัมละ 200 บาท ทำให้ไม่สามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนา Ecoflex และ Ecovio ซึ่งมีสมบัติเชิงกลในด้านการยืดตัวที่ดีขึ้น ไม่แข็งแรง สามารถยืดตัวได้ถึง 560-710 % และ 250-320 % ตามลำดับ [47] แต่ยังคงมีราคาที่สูง ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ MTPS สัดส่วน (70:30) ในงานวิจัยนี้ จากการคำนวณราคาพบว่าจะมีราคาประมาณ กิโลกรัมละ 265 บาท ขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของแป้งที่ใช้ในการผสม (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ดังกล่าวยังมีราคาสูงกว่าราคาของ PLA, Ecoflex และ Ecovio อย่างไรก็ตาม ราคาดังกล่าวเป็นการคำนวณจากปริมาณการสั่งซื้อสารในปริมาณน้อย ซึ่งในอนาคตหากมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เชื่อว่าน่าจะมีราคาที่แข่งขันได้มากขึ้น



ตารางที่ 2.3 ราคาของพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์

ชนิด	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	อ้างอิง
PLA	200	*
PLA คอมปาวด์	327	**
PE	50	[48]
Ecoflex	200	[49]
Ecovio	250	[50]
พอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS	265	**

หมายเหตุ

* โทรสอบถาม บริษัทถุงสด จำกัด กรุงเทพฯ 10400

** ได้จากการคำนวณ