

วารสารปริทรรศน์

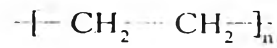
2.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends) [2]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิด ขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งอาจอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกัน จึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ และความเค้นสะสม (stress concentration) จากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) หรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (*in-situ* chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีพื้นฐานวิทยาและสมบัติที่เหมาะสม

2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [3-6]

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดจากเอทิลีนมอนอเมอร์ (ethylene monomer) มาต่อกันเป็นสายยาวแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุด เพราะมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ได้แก่ ราคาถูก มีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อสารเคมี ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ง่าย

พอลิเอทิลีนได้จากการพอลิเมอไรซ์เอทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สด้วยกระบวนการแบบรวมตัว (addition polymerization) โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีทั้งแบบเชิงเส้น (linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (branched) ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ กล่าวคือ พอลิเอทิลีนแบบเชิงเส้นสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบมากกว่าพอลิเอทิลีนแบบกิ่งก้านสาขา จึงเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกได้มากกว่า เป็นเหตุให้มีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว จุดอ่อนตัว และความแข็งตึง (stiffness) สูงกว่า

การแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนในปัจจุบันจะแปรตามความหนาแน่น (density) ซึ่งแบ่งได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene, MDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) มาตรฐาน ASTM ได้จำแนกพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นได้ 4 ประเภท ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM

ชนิดของพอลิเอทิลีน	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ชื่อที่เรียก
1	0.910 – 0.925	Low Density Polyethylene
2	0.926 – 0.940	Medium Density Polyethylene
3	0.941- 0.959	High Density Polyethylene
4	0.960 ขึ้นไป	High Density Polyethylene

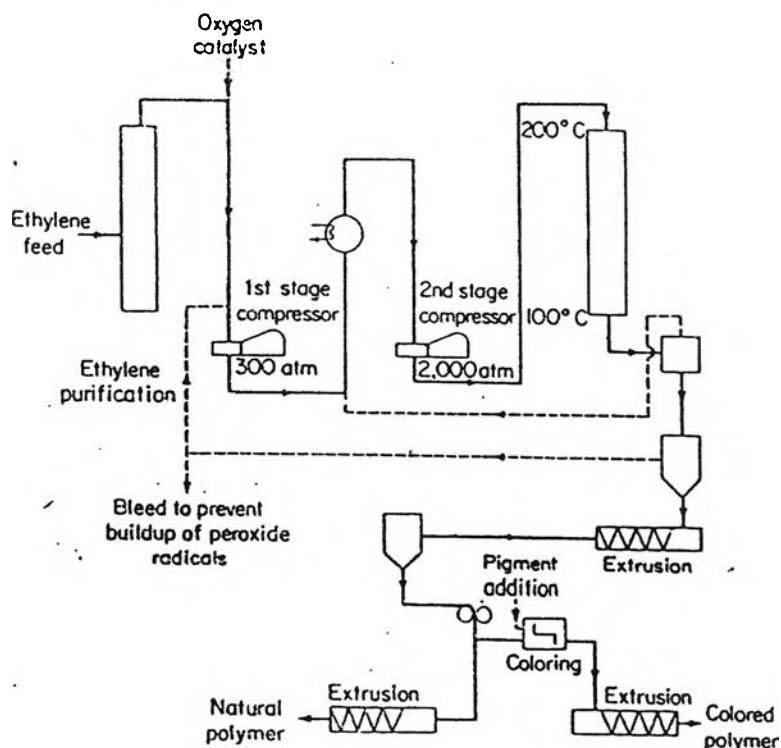
ต่อมาได้มีการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene, VLDPE) ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.910 กรัม/ลบ.ซม. ออกมาอีกด้วย

2.2.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า เมื่อปี ค.ศ. 1939 โดยบริษัทอิมพีเรียลเคมีคัลอินดัสตรี (ICI) ประเทศอังกฤษ ในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในทางการค้าจะใช้กระบวนการความดันสูง (high pressure process) ปกติใช้ความดัน 1,000-3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิ 80-300 องศาเซลเซียส กระบวนการพอลิเมอไรเซชันเริ่มต้นจากการใส่เอทิลีนมอนอเมอร์ และตัวเริ่มปฏิกิริยาซึ่งจะแตกตัวให้ฟรีเรดิคัล (free radical) ซึ่งได้แก่ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) อะโซบิสไอโซบิวไทโรไนไตรล์ (azobis-isobutyronitrile) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น ใช้น้ำหรือของเหลวเฉื่อย (inert liquid) เช่น เบนซีน ไหลผ่านท่อเพื่อช่วยระบายความร้อน มอนอเมอร์จะเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 แล้วแยกพอลิเอทิลีนออกจากเอทิลีนมอนอเมอร์ แล้วนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้มาอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็ก ๆ และตัดเป็นเม็ดต่อไป

ลักษณะเฉพาะของการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำภายใต้ความดันสูง คือ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก ปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ จึงกล่าวได้ว่าการใช้มอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ทำปฏิกิริยาที่ความดันสูงๆ จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีกิ่งก้านสาขา ซึ่งกิ่งก้านสาขาที่เกิดขึ้นจะไม่ยาวนักมีคาร์บอนเพียง 2-4 อะตอม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเริ่มปฏิกิริยา ตัวย้ายโซ่ (chain transfer agent) และการใส่ตัวเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ทำให้การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ความหนาแน่นต่ำ แผนภาพแสดงการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดันสูง แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

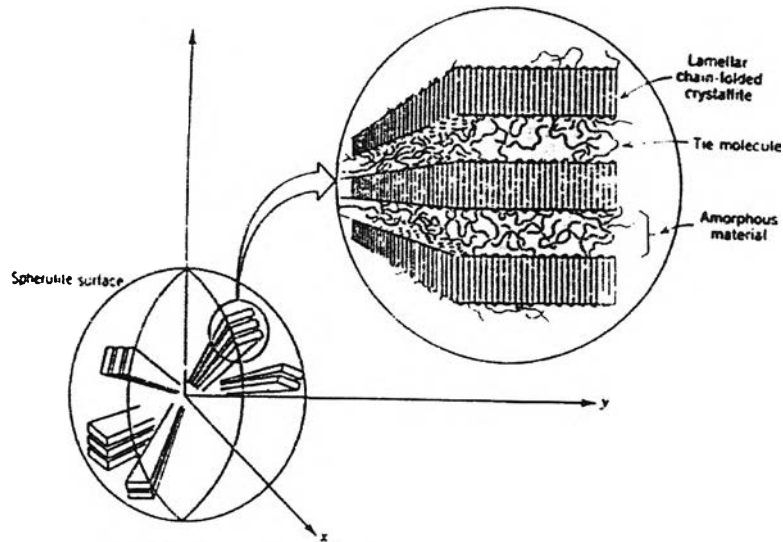


รูปที่ 2.2 แผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดันสูง

2.2.2 โครงสร้างและสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแยกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักมากมาย ซึ่งจะมีทั้งกิ่งสั้น (short chain branch, SCB) และกิ่งยาว (long chain branch, LCB) กระจายปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่สม่ำเสมอ พอลิเอทิลีนจะค่อนข้างใส และมีความเหนียวพอสมควร นอกจากนี้ สมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) ปริมาณการเกิดผลึก (crystallinity) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution) อีกด้วย

เมื่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอยู่ในสถานะของแข็ง จะมีโครงสร้างเป็นสเฟียรูไลต์ (spherulite) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์จะพับไปพับมาในบริเวณที่เกิดผลึกและมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (platelet) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ (lamellar) บริเวณอสัณฐานซึ่งเกิดจากกิ่งก้านสาขาสั้นๆ (SCB) ไปรบกวนการพับไปพับมาของโมเลกุล รายละเอียดโครงสร้างของสเฟียรูไลต์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รายละเอียดโครงสร้างของสเฟียรูไลต์

ขนาดและการกระจายของสเฟียรูไลต์นั้น มีผลต่อสมบัติทางแสงของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีผลึกน้อยมากจะมีความใสมาก พวกที่มีผลึกปานกลาง เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีลักษณะขุ่นและเริ่มทึบแสง ส่วนพอลิเมอร์ที่มีผลึกมากๆ และมีการจัดเรียงตัวของผลึกดี จะทึบแสง เนื่องจากผลึกขัดขวางทางเดินของแสงและทำหน้าที่กระจายแสง นอกจากนี้จะผลิตเป็นฟิล์มหรือแผ่นบางๆ ซึ่งจะทำให้แสงสามารถผ่านได้บ้าง

นอกจากนี้ ขนาดของผลึกและการกระจายขนาดของผลึก ยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อีกด้วย กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กจะมีความต้านแรงกระแทกได้สูงกว่า ขาดยากและเหนียวกว่าพอลิเมอร์ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่

กึ่งยาวๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกและความหนาแน่นน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะกึ่งยาวๆ จะเพิ่มการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (entanglement) ซึ่งเมื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกึ่งยาวๆจำนวนมากไปผ่านกระบวนการเป่าฟิล์ม จะทำให้เสถียรภาพของลูกโป่ง (bubble stability) เพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกึ่งยาวๆ จำนวนน้อย กล่าวคือ ลูกโป่งไม่แตกง่ายในขณะเป่าฟิล์ม



โดยสรุปสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคือ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910-0.925 กรัม/ลบ.ซม. มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก เป็นพอลิเมออร์อสัณฐาน มีความใส อ่อนตัว ทนแรงดึงและแรงกระแทกพอสมควร มีการไหลตัวดี พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำไปทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ถุงพลาสติก ผ้าพลาสติก ทำของใช้ในบ้านในครัว ของเด็กเล่น ใช้หุ้มลวดไฟฟ้า และใช้ในงานก่อสร้าง เป็นต้น

2.3 แป้ง (starch) [6-9]

แป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งพืชสังเคราะห์และเก็บในส่วนต่างๆ ที่บริเวณราก เมล็ด และผลของพืชในรูปเม็ดแป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่เกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว เมื่อเติมกรด หรือเอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้ จะทำให้แป้งถูกย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลและกลูโคส

แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัม/ลบ.ซม. เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-1,000 ไมโครเมตร

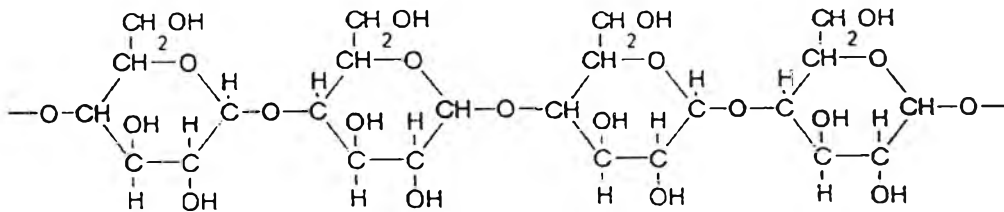
หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบด้วย C H และ O ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ ต่อกันด้วยพันธะของกลูโคส แป้งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกตินในอัตราส่วนที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยส่วนมากเป็นอะไมโลเพกติน ปกติแป้งจะมีอะไมโลสประมาณร้อยละ 20-30 และมีอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 70-80

แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคส หน่วยของกลูโคสที่อยู่ในแป้งจัดเป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสนั้นหายไปขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบขั้น (step polymerization) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคส แต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้ง เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งพันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ได้โดยกรด

แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) คือ แป้งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2-8 เม็ดมารวมตัวกัน แต่ละเม็ดมีความยาวตั้งแต่ 5-35 ไมครอน เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านแบนไม่สม่ำเสมอ เม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน และในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลส ร้อยละ 18 และมีอะไมโลเพกตินร้อยละ 82 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีค่าประมาณ 2.10×10^5 และ 3.0×10^6 ตามลำดับ

2.3.1 อะไมโลส (Amylose)

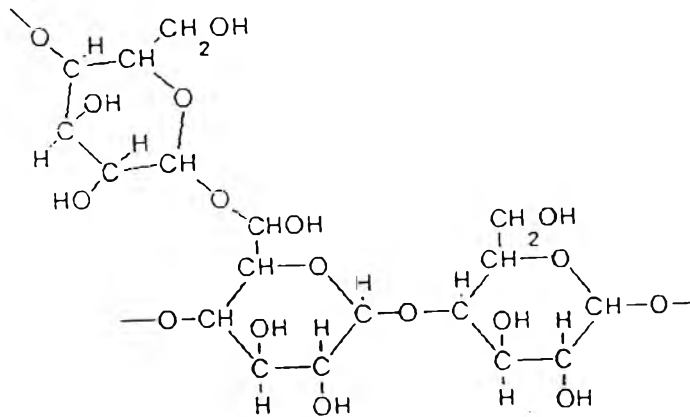
อะไมโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่สายตรง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง α 1,4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.4 น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไปตั้งแต่ 2,000-500,000 โดยทั่วไปอะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่จะกระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นไมเซลล์ การจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบ และไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกจากเม็ดแป้ง และเมื่อเย็นตัวลงโมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกัน กรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งต่ำ อะไมโลสจะตกตะกอน (precipitation) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูงโมเลกุล อะไมโลสจะรวมตัวกันทำให้เกิดเจล (gelling) เมื่ออะไมโลสรวมกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ในแป้งมีอยู่ประมาณ 20-25%



รูปที่ 2.4 โครงสร้างอะไมโลส

2.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่กิ่ง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง α 1,4-glycosidic linkage ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างสายโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α 1,6-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า มีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ และว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่มีอะไมโลเพกตินปริมาณสูง แป้งสุกมีลักษณะใส เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีลักษณะใหญ่และมีกิ่งก้านมาก ทำให้การจับกันของโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีโอกาสน้อย โดยทั่วไปอะไมโลเพกตินจะไม่ละลายน้ำ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย $\geq 1,000,000$ เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง ในแป้งมีอยู่ประมาณ 75-80%



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะไมโลเพกติน

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะและสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

ตารางที่ 2.2 ลักษณะและสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรง	1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันและมีกิ่งก้านสาขาแต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
2. ละลายน้ำได้ดี	2. ละลายน้ำได้น้อย
3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดน้อยและขุ่น	3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดมากและใส
4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	4. ให้สีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน
5. ต้มแล้วทิ้งไว้จับตัวเป็นก้อน	5. ต้มแล้วทิ้งไว้ไม่จับตัวเป็นก้อน
6. จัดเรียงตัวเป็นผลึก	6. จัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน

สมบัติทั่วไปของแป้งธรรมชาติ คือ ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ดูดน้ำไว้ประมาณร้อยละ 25-30 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้ง จะมีทั้งส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ และส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในส่วนที่เป็นระเบียบคลายความหนาแน่นลง เป็นผลให้โมเลกุลของแป้งสามารถรับน้ำได้มากขึ้น แป้งจะพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งสูงกว่าจุดพองตัวของแป้ง แป้งจะแตกตัว ทำให้ละลายน้ำได้

สมบัติที่สำคัญมากที่สุดของแป้ง คือ การเกิดความหนืดเมื่อรวมตัวกับน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ในแป้ง กล่าวคือ น้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบได้ ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการพองตัว อุณหภูมิในช่วงนี้ เรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) ณ อุณหภูมินี้ โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นระเบียบจะคลายตัวลง เกิดการดูดน้ำได้เป็นสารละลายแป้งที่มีความหนืดและใสขึ้น ความหนืดของแป้งเป็นผลมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืด

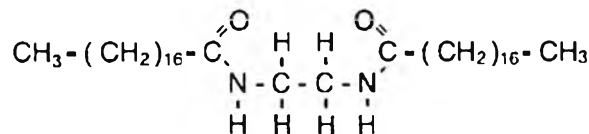
2.4 เอทิลีนบิสสเตียราไมด์, (Ethylene -bis- stearamide, EBS WAX) [10-11]

เอทิลีนบิสสเตียราไมด์หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าอีบีเอสแว็กซ์เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นจากกรดสเตียริกทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไดเอมีน ด้วยปฏิกิริยา dehydration condensation โดยใช้วัตถุดิบส่วนหนึ่งจากธรรมชาติ เนื่องจากกรดสเตียริกนั้นได้มาจากน้ำมันปาล์ม โดยสูตรโมเลกุลของเอทิลีนบิสสเตียราไมด์แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโมเลกุลของเอทิลีนบิสสเตียราไมด์

โดยมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 600 มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเอทิลีนบิสสเตียราไมด์

ลักษณะทางกายภาพของอีบีเอสแว็กซ์นั้นจะมีทั้งที่เป็นเม็ดและเป็นผงสีขาว มีขนาดตั้งแต่ 1350-45 ไมโครเมตร มีกลิ่นน้อยมากหรือแทบจะไม่มีกลิ่นเลย

เนื่องจากอียิปเอสเว็กซ์เป็นสารโมเลกุลต่ำที่มีขั้ว จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมากมาย เช่น เป็นสารหล่อลื่นทั้งภายในและภายนอก สารป้องกันการติดกันของฟิล์ม สารเพิ่มความเงา และ สารช่วยการพิมพ์ติดของสี เป็นต้น

เนื่องจากในสูตรโครงสร้างของอียิปเอสเว็กซ์นั้นมีทั้งส่วนที่มีขั้ว และส่วนที่ไม่มีขั้วเป็นสายยาว ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงใช้อียิปเอสเว็กซ์เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างพลาสติกกับแป้งให้สามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยหมู่เอไมด์ของอียิปเอสจะเข้ากันได้ดีกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง และส่วนที่เป็นสายยาวของอียิปเอสเว็กซ์จะเข้ากันได้ดีกับส่วนที่เป็นสายยาวของพลาสติก และจากสมบัติที่สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ของอียิปเอส จะช่วยในกระบวนการผลิตอันเนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแป้งอีกด้วย

2.5 การสลายตัวของพลาสติก [6]

2.5.1 ลักษณะการสลายตัวของพลาสติก

การสลายตัวตามธรรมชาติของพลาสติกสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การสลายตัวโดยสภาวะแวดล้อม (environment degradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ จากผลของสภาวะแวดล้อม ได้แก่ แสงอาทิตย์ ความร้อน น้ำ และอากาศ เป็นต้น
2. การสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ หรือแสงที่มีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation)
3. การสลายตัวโดยการทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนหรือโอโซนในอากาศ (oxidation degradation)
4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัวจากการย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลโดยจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และเชื้อรา

2.5.2 การสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติก

การสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติก เป็นการสลายตัวเนื่องจากสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ ได้แก่ จุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรียและเชื้อรา สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีความสามารถในการย่อยสลายสารได้หลายประเภท และสามารถปรับความสามารถนี้ได้มาก เพราะสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสลายได้หลายชนิด ขณะเดียวกันก็เกิดมีจุลินทรีย์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ อัน

เนื่องมาจากผลของการผ่าเหล่า และกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก จุลินทรีย์ที่เหมาะสมต้องมีปริมาณอยู่พอเพียง และควรมีอยู่มากกว่า 1 ชนิด การที่จุลินทรีย์จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาพแวดล้อมจะต้องมีอุณหภูมิและระดับความชื้นที่พอเหมาะสม มีออกซิเจนและมีสารอาหารพอเพียง ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์สามารถใช้พอลิเมอร์เป็นแหล่งของธาตุคาร์บอน แต่ก็จำเป็นต้องหาธาตุอื่นมาใช้ด้วย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และโลหะอื่นๆ ส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้มักจะไม่ได้อยู่ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ จึงจำเป็นต้องหาจากสภาพแวดล้อม

การย่อยสลายพลาสติกโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้น เมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์ และเอนไซม์นี้จะผ่านไปถึงพลาสติกได้ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์ดังกล่าวจะย่อยสลายโมเลกุลของพอลิเมอร์ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ เพื่อทำการย่อยให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กต่อไปอีก

จากขั้นตอนของการย่อยสลายข้างต้น จะเห็นว่าพลาสติกส่วนใหญ่มีสมบัติที่ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เพราะไม่เปียกน้ำ ไม่ยอมให้น้ำผ่านเข้าออก และไม่เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ จึงทำให้โอกาสที่เอนไซม์เข้าย่อยสลายน้อยลง ดังนั้น การย่อยสลายพลาสติกประเภทนี้จึงต้องเริ่มที่ผิวด้านนอกก่อน ซึ่งการแบ่งพลาสติกออกเป็นชั้นเล็กๆ จะช่วยให้กระบวนการย่อยสลายนี้เกิดเร็วขึ้น

พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่จะไม่ถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต ยกเว้นกับพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ในสายโซ่โมเลกุลหลัก เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyesters) และพอลิยูรีเทน (polyurethanes) เป็นต้น นอกจากนี้ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับการปรับเปลี่ยนแล้ว เช่น เรยอน (rayon) เซลลูโลสแอซีเตต (cellulose acetate) เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) และ ไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (hydroxypropyl cellulose) เป็นต้น จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้

ความสามารถของการย่อยสลายจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกนั้นเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 500 เท่านั้น ที่เชื้อราสามารถย่อยสลายได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการย่อยสลายกับน้ำหนักโมเลกุล มีสิ่งที่ควรกล่าวถึง 2 ประการ ประการแรกคือ ถ้านำพอลิเมอร์มาทำการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเคมี (เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุล) จะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายขึ้น ประการที่สอง ถ้าพอลิเมอร์มีช่วงการกระจายตัวของน้ำหนักกว้าง อัตราเร็วของการย่อยสลายจะลดลง เมื่อโมเลกุลขนาดเล็กถูกย่อยสลายไปแล้ว

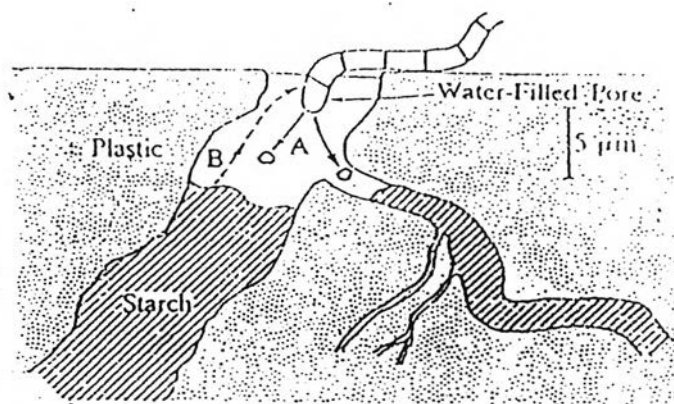
2.5.3 แนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ 3 แนวทาง คือ

1. พัฒนาวิธีการในการปรับปรุงพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ให้มีสมบัติดีขึ้นเหมาะกับการใช้งาน
2. เตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่ย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิต โดยพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สังเคราะห์ขึ้นมาและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายมีหลายชนิด เช่น acrolein-arylic acid polymer, polyamidotriazoles, polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid esters และ acrylonitrile copolymer ที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว
3. ใช้สารที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายไม่ได้ เป็นการเติมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegrading additive) ลงในพลาสติกสังเคราะห์ โดยแนวทางนี้เป็นแนวทางที่ใช้ในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ในงานวิจัยนี้

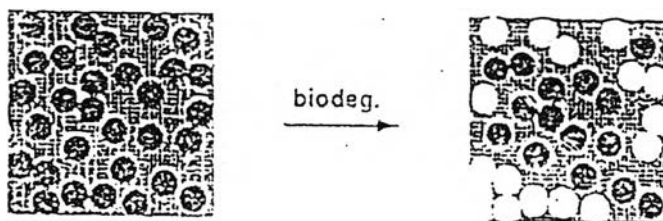
ซึ่งการเพิ่มสารที่ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์เข้าไปในพลาสติก อาจทำโดยใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและมีเป็นจำนวนมากในประเทศมาผสมกับวัสดุสังเคราะห์ เพื่อให้เกิดการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย และเชื้อรา โดยการย่อยสลายจะเกิดจากการที่จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์ออกมาในระหว่างการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) เพื่อย่อยสลายอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (ในกรณีของ aerobic) หรือโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่น (ในกรณีของ anaerobic)

กลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่ผสมด้วยสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นแรกที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์นี้จะย่อยโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง จนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อถูกย่อยสลายต่อไป ทำให้เม็ดแป้งหายไปจากเนื้อของพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ทำให้พลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 กลไกการย่อยสลายแป้งในพลาสติกโดยจุลินทรีย์

A: Diffusion of amylase to starch
 B: Diffusion of digestion products to fungus



รูปที่ 2.9 การหายไปของเม็ดแป้งในพลาสติก

ขั้นที่สอง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะหรือน้ำในดิน เกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์ขึ้น สารดังกล่าวจะเข้าไปกระตุ้นโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เกิดการแตกตัว ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง จุลินทรีย์จึงสามารถเข้าไปย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

อัตราเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพจะขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ เกลือของโลหะ สารอาหารที่อยู่ในดิน รวมไปถึงความหนาของผลิตภัณฑ์



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Goheen และคณะ [12] ได้ทดลองเตรียมฟิล์มพลาสติกจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมแป้งข้าวโพดในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปฝังดินเป็นเวลา 8 เดือน โดยติดตามการสูญเสียแป้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเมทริกซ์ด้วยเทคนิค FTIR จากการทดลองพบว่า ไม่มีความแตกต่างระหว่างอัตราการย่อยสลายระหว่างการทดลองทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งในช่วง 40 วัน แรก มีการสูญเสียแป้งจากฟิล์มพลาสติกอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกับฟิล์มที่มีปริมาณแป้งมากๆ (52 และ 67% โดยน้ำหนัก) ขณะที่ฟิล์มซึ่งมีปริมาณแป้งต่ำ (< 30% โดยน้ำหนัก) จะมีการสูญเสียแป้งช้ากว่าและบางครั้งอาจเกิดไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ ยังสรุปว่าปริมาณสารอินทรีย์ในดิน มีผลต่ออัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเล็กน้อยภายหลังจากทดลองได้ 1 เดือน

Arvanitoyannisa และคณะ [13] ได้ทดลองผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันและแป้งข้าวเจ้า โดยใช้แป้งในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 20 30 และ 40 ทำการผสมสูตรต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีด จากนั้นขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยใช้เครื่องกดอัด จากการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกั้นแก๊ส พบว่า ที่ปริมาณแป้งมากกว่าร้อยละ 30 จะมีสมบัติเชิงกลต่ำลง โดยมีสมบัติการสกัดกั้นแก๊สต่ำลงเมื่ออัตราส่วนของแป้งเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไป

Pedroso และคณะ [14] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของขึ้นททดสอบ ที่เตรียมจากการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการรีไซเคิลมาผสมกับแป้งข้าวโพด โดยเปรียบเทียบกับเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำใหม่ผสมแป้งข้าวโพด โดยใช้แป้งข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการผสมสูตรต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีด และขึ้นรูปขึ้นงานเป็นแผ่นด้วยเครื่องกดอัด ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อผสมแป้งข้าวโพดเข้าไปจะทำให้ค่าดัชนีการไหลและค่าความต้านแรงดึงลดลง แต่โมดูลัสมีค่าสูงขึ้น โดยดัชนีการไหลลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมแป้งเข้าไปในปริมาณร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากสัณฐานวิทยาพบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวโพดมีความเข้ากันได้ต่ำ

จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่ไม่ดี จึงทำให้สมบัติเชิงกลของขึ้นททดสอบลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งจะผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ยาก เพราะแป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำ ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนมากมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาและวิจัยในการพยายามที่จะเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์สังเคราะห์และ แป้ง ซึ่งได้แก่

Nakamura และคณะ [15] ได้ศึกษาและพัฒนาพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้ง เพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยผสมกับแป้งชนิดต่างๆ ทั้งที่มีการดัดแปรโครงสร้างและไม่มีการดัดแปร ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 20 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ยังใช้น้ำมันพืช และแคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และมีการให้แรงเฉือนระดับสูงเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดฉีด จากการทดสอบสมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลาย พบว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งดัดแปรด้วยกรดอะดีพิค ทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายดีกว่าแป้งชนิดอื่นๆ

Birkiaris และคณะ [16] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพลาสติกไฮดรอกซีอะคริลิกปริมาณต่างๆ กัน โดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีหมู่แอนไฮไดรด์ 0.4 และ 0.8 โมล% เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของพลาสติกไฮดรอกซีอะคริลิก จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า เมื่อปริมาณหมู่แอนไฮไดรด์ในสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้การกระจายพลาสติกไฮดรอกซีอะคริลิกในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีโครงสร้างละเอียดมากกว่า จึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความต้านแรงดึงมีค่าสูง ซึ่ง พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมชนิดที่มีหมู่แอนไฮไดรด์ 0.8 โมล% จะมีความต้านแรงดึงสูงกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่าการใส่สารช่วยผสมทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าที่ไม่ใส่สารช่วยผสมเล็กน้อย

Thakore และคณะ [17] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/สตาร์ช และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/สตาร์ช/ สตาร์ชอะซีเตต (STAc) ซึ่งพอลิเมอร์ผสมทั้งสองมีปริมาณแป้งมากที่สุดถึง 30% โดย STAc จะมีความไม่ชอบน้ำ จึงเข้าร่วมตัวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้ดี จากการผสม SATAc 10% ทำให้แป้งกระจายตัวในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้ดีขึ้น และเมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้านแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านแรงกระแทกลดลง ซึ่งการเติม STAc เข้าไปในแป้งทำให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการยืดตัว ณ จุดขาด และความเหนียว ซึ่งพบว่าการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและ STAc ในอัตราส่วน 90/10 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม การเติม STAc จะทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าการใช้แป้งเพียงอย่างเดียว