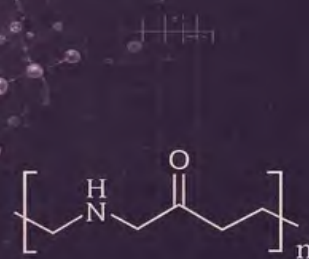
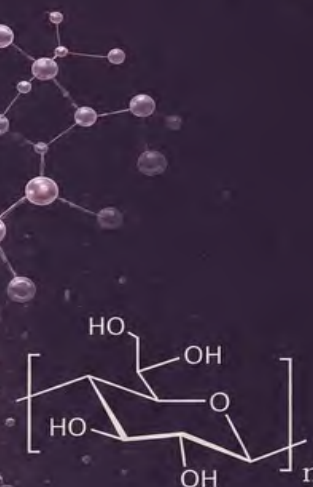
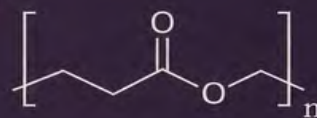


พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ทางชีวภาพ

Biodegradable Polymers



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโนดาษ รัชเวทย์

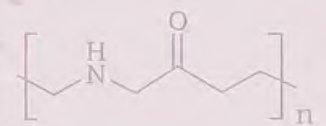
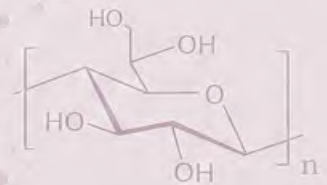
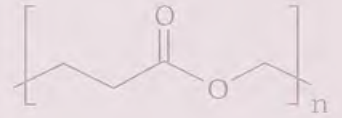
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

2568

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Biodegradable Polymers



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนินดา รัชเวทย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโนดาห์ รัชเวทย์

พิมพ์ครั้งที่ 1 : เดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 จำนวน 200 เล่ม

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

อโนดาห์ รัชเวทย์

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers), พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่ :
ส. อินฟอร์เมชั่น เทคโนโลยี จำกัด, 2568. 708 หน้า.

1. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2. การเตรียมพอลิเมอร์ 3. การประยุกต์ใช้ทาง
การเกษตร อุตสาหกรรมทางการแพทย์ และในชีวิตประจำวัน I. ชื่อเรื่อง

ISBN : 978-616-636-160-5

จัดพิมพ์โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโนดาห์ รัชเวทย์

พิมพ์ที่

ส. อินฟอร์เมชั่น เทคโนโลยี จำกัด 6/8 ถนนหมื่นด้ามพร้าคต

ต. ข้างเฝือก อ. เมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

โทรศัพท์ 053-214405

ราคา 450 บาท

คำนำ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) ได้กลายเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในแวดวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องด้วยความตระหนักที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหามลพิษจากขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก พอลิเมอร์สังเคราะห์แบบดั้งเดิมซึ่งผลิตจากปิโตรเลียมได้สร้างคุณประโยชน์มหาศาลแก่มนุษยชาติในด้านต่าง ๆ แต่ในขณะเดียวกันก็ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงและยาวนาน การพัฒนาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวและมุ่งสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน หนังสือเล่มนี้จะนำเสนอความรู้ที่ครอบคลุมเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเริ่มต้นจากการปูพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับความหมาย ประเภท และความสำคัญของพอลิเมอร์เหล่านี้ ท่านจะได้เรียนรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่มาจากแหล่งธรรมชาติ (Natural Biodegradable Polymers) และพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ (Synthetic Biodegradable Polymers) ซึ่งแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันไป โดยเนื้อหาในเอกสารเล่มนี้จะเจาะลึกถึงโครงสร้างทางเคมีและกลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ ทั้งการย่อยสลายทางเคมี (Chemical Degradation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุเหล่านี้ในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังได้รวบรวมความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ ที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์ เช่น Polylactic Acid (PLA), Polyhydroxyalkanoates (PHAs), และ Polycaprolactone (PCL) เป็นต้น พร้อมทั้งเทคนิคการวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพ และในส่วนท้ายของเอกสาร จะเน้นให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งานจริงของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตั้งแต่การใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร กระจกตา เส้นใย พิล์ม วัสดุใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง พิล์มคลุมดิน ในภาคเกษตรกรรม การห่อหุ้มผลไม้เพื่อยืดอายุการใช้งาน ไปจนถึงการใช้งานขั้นสูงในทางการแพทย์ เช่น ไหมละลาย อุปกรณ์ยึดตรึงกระดูก ท่อนำส่งประสาท และระบบนำส่งยา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพอันมหาศาลของวัสดุประเภทนี้ในการเข้ามาแทนที่พลาสติกแบบดั้งเดิมและสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยผู้เขียนได้นำการวิจัยของผู้เขียน และขอขอบคุณประสบการณ์จากการอ่านงานวิจัยของนักวิจัยชั้นนำในแวดวงนักวิจัยพอลิเมอร์ในประเทศไทย เป็นกรณีศึกษาในเอกสารเล่มนี้ด้วย ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารประกอบการเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจในสาขาวิชาพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจใน

พื้นฐานและแนวทางการพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุเพื่ออนาคตที่ยั่งยืนต่อไป

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และแรงบันดาลใจในการจัดทำเอกสารนี้ รวมถึงคุณพ่อคุณแม่ ผู้เป็นแรงสนับสนุนในทุกด้าน ขออุทิศคุณค่าของเอกสารฉบับนี้แด่ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญในเส้นทางการเรียนรู้ของผู้เขียน และ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

อโนดาซ์ รัชเวทย์

19 ธันวาคม 2568

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
สารบัญ	(3)
สารบัญรูป	(9)
สารบัญตาราง	(19)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความหมายและความสำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	1
1.2 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	3
1.3 การเปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติและการสังเคราะห์	5
1.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
1.5 สมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์สลายตัวได้ทางชีวภาพ	13
1.6 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามกลไกการย่อยสลาย	16
1.7 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพได้ในด้านต่าง ๆ	18
1.8 โอกาสและความท้าทายในอนาคต รวมถึงราคาและการผลิตในเชิงการค้า ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	21
1.9 บทสรุป	25
1.10 คำถามท้ายบท	26
1.11 เอกสารอ้างอิง	26
บทที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	33
2.1 บทนำ	33
2.2 ประเภทพันธะเคมีในพอลิเมอร์	33
2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Natural Biodegradable Polymers)	37
2.4 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการสังเคราะห์ (Synthetic Biodegradable Polymers)	41
2.5 สมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	47
2.6 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากโครงสร้าง	51
2.7 เทคนิควิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	52
2.8 มาตรฐานวิธีการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอุตสาหกรรม (Case Studies)	67
2.10 บทสรุป	68
2.11 คำถามท้ายบท	69
2.12 เอกสารอ้างอิง	71
บทที่ 3 กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ (Mechanisms of Polymer Degradation)	77
3.1 การย่อยสลายทางเคมี (Chemical Degradation)	77
3.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)	90
3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์	94
3.4 บทสรุป	101
3.5 คำถามท้ายบท	101
3.6. เอกสารอ้างอิง	102
บทที่ 4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	107
4.1 หลักการทั่วไปของการสังเคราะห์	107
4.2 การสังเคราะห์ Polylactic Acid (PLA)	109
4.3 การสังเคราะห์ Polyhydroxyalkanoates (PHAs)	113
4.4 การสังเคราะห์ Polycaprolactone (PCL)	120
4.5 การสังเคราะห์ Polybutylene Succinate (PBS)	123
4.6 การสังเคราะห์ Polybutylene Adipate-co-Terephthalate (PBAT)	126
4.7 การสังเคราะห์ Poly(trimethylene carbonate) (PTMC)	130
4.8 การสังเคราะห์ Polyethylene Furanoate (PEF)	146
4.9 การสังเคราะห์ Polyglycolic Acid (PGA)	167
4.10 การสังเคราะห์พอลิเมอร์จากแป้ง (Starch-based Polymers)	173
4.11 การสังเคราะห์ Cellulose Acetate, CA	178
4.12 เทคนิคการสังเคราะห์ขั้นสูง (Advanced Synthesis Techniques) ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	181
4.13 การวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพ (Characterization and Quality Control)	183
4.14 การเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	184
4.15 แนวโน้มและทิศทางการวิจัยในอนาคตของ Biodegradable Polymer	187

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.16 บทสรุป	188
4.17 คำถามท้ายบท	190
4.18 เอกสารอ้างอิง	191
บทที่ 5 การปรับปรุงสมบัติของ Biodegradable Polymers	223
5.1 วิธีการในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	223
5.2 การประยุกต์ใช้งานของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติ (Applications of Modified Biodegradable Polymers)	301
5.3 บทบาทต่อสิ่งแวดล้อมและการจัดการหลังการใช้งาน (Environmental Role and End-of- Life Management)	313
5.4 บทสรุป	316
5.5 คำถามท้ายบท	316
5.6 เอกสารอ้างอิง	318
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในชีวิตประจำวัน	321
6.1 การประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร (Food Packaging)	321
6.1.1 ฟิล์มและถุงบรรจุอาหาร	323
6.1.2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging)	332
6.1.3 บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Packaging)	334
6.1.4 บรรจุภัณฑ์ที่กินได้ (Edible Packaging)	336
6.1.5 บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากเยื่อกระดาษ กระดาษแข็ง แป้ง และเส้นใยธรรมชาติ	344
6.1.6 ถุงซ็อปปิ้งและถุงขยะ	362
6.1.7 ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง	370
6.1.8 ผลิตภัณฑ์สุขอนามัยและเครื่องสำอาง	378
6.1.9 สิ่งทอและเสื้อผ้าที่ย่อยสลายได้	390
6.2 บทสรุป	410
6.3 คำถามท้ายบท	415
6.4 เอกสารอ้างอิง	416

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (I)	429
7.1 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ	429
7.1.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ (Biomedical Applications)	429
7.1.1.1 ระบบนำส่งยา (Drug Delivery Systems)	429
1) ไมโครสเฟียร์และนาโนพาร์ทิเคิล	429
2) อิมพลานต์ (สิ่งที่ฝังไว้ในร่างกาย) และอุปกรณ์นำส่งยา	432
3). ระบบนำส่งยาผ่านเยื่อเมือก	433
7.1.1.2 วิศวกรรมเนื้อเยื่อและการแพทย์ฟื้นฟู (Tissue Engineering and Regenerative Medicine)	433
1) โครงสร้างชั่วคราว (Scaffold) สำหรับการสร้างกระดูก (Bond Tissue Engineering)	433
2) โครงสร้างชั่วคราว สำหรับการสร้างกระดูกอ่อน	442
3) โครงสร้างชั่วคราวสำหรับการสร้างผิวหนัง (Scaffolds for Skin Regeneration)	457
4) โครงสร้างชั่วคราวพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับ วิศวกรรมเนื้อเยื่อหลอดเลือด	467
7.1.1.3 อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Medical Devices)	475
1) ไหมเย็บแผลที่ดูดซึมได้ทางชีวภาพ (Absorbable Surgical Sutures)	475
2) Staple/Stapler และ วัสดุเสริมแนวลาดเย็บ (Staple-line reinforcement)	478
3) กรณีสึกษาและงานวิจัย	478
4) อุปกรณ์ยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	488
5) สเตนต์หลอดเลือดที่ย่อยสลายได้ (Bioresorbable Vascular Scaffolds - BVS)	504
6) การซ่อมแซมเส้นประสาทส่วนปลาย (Peripheral Nerve Repair)	509
7.2 บทสรุป	522
7.3 คำถามท้ายบท	523

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.4 เอกสารอ้างอิง	527
บทที่ 8 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (II)	547
8.1 การประยุกต์ใช้ในการเกษตร (Agricultural Applications)	547
8.2 ประเภทและคุณสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สำคัญ	548
8.2.1 พอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติ (Natural-based Biopolymers)	548
8.2.2 พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Biosynthesis Polymers)	550
8.2.3 พอลิเมอร์สังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Biodegradable Polymers)	550
8.3 การประยุกต์ใช้หลักทางการเกษตร	552
8.3.1 พิล์มคลุมดินย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Mulch Films)	552
8.3.2 วัสดุควบคุมการปลดปล่อย (Controlled-Release Materials)	574
8.3.3 กระถางต้นไม้และภาชนะเพาะกล้าย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Pots and Nursery Containers)	590
8.3.4 ตาข่ายและเชือกทางการเกษตร	598
8.3.5 การเคลือบผิวผลไม้ (Fruit Coating)	613
8.4 กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation Mechanism)	630
8.5 นวัตกรรมและแนวโน้มในอนาคต	632
8.5.1 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer Nanocomposites)	632
8.5.2 การเกษตรแม่นยำสูง (Precision Agriculture)	632
8.6 บทสรุป	633
8.7 คำถามท้ายบท	633
8.8 เอกสารอ้างอิง	634
ดัชนีค้นคำ	651
Index	655
ประวัติผู้เขียน	661

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างทางเคมีของ Polylactic Acid (PLA), Polyhydroxyalkanoates (PHAs) และ Polybutylene Succinate (PBS) ซึ่งเป็นตัวอย่างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์	13
1.2 การย่อยสลายพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยปัจจัยต่าง ๆ	17
2.1 โครงสร้างโคติน ไคโตซาน เซลลูโลส อะไมโลส และ อะไมโลเพคติน	35
2.2 โครงสร้าง Soft Segment และ Hard Segment ของพอลิยูรีเทน	36
2.3 โครงสร้างพันธะไฮโดรเจนและทิศทางการจัดเรียงสายโซ่ของเซลลูโลส I และเซลลูโลส II	38
2.4 โครงสร้างของการต่อพันธะ α -1,4 และ α -1,6 ในอะไมโลส และ อะไมโลเพคติน	39
2.5 โครงสร้างหน่วยซ้ำของ PBAT	43
2.6 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนฟูราโนเอตโดยใช้ FDCA	43
2.7 รูปแบบการนำ PEF ไปใช้ประโยชน์เป็นบรรจุภัณฑ์	45
2.8 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล	46
2.9 สเปกตรัม FTIR ของ PLA PBS และ PLA/PBS blend	53
2.10 สเปกตรัม NMR ของ PLA	55
2.11 สเปกตรัม DSC ของพอลิเมอร์ HPMC และ สารประกอบ FIN	56
2.12 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ HPMC FIN และ ไฮโดรเจล	57
2.13 โปรไฟล์ GPC ของ PBS และ PBS-co-polyols	59
2.14 การเลี้ยวเบนของ XRD สำหรับพอลิเมอร์ HPMC และ FIN	61
3.1 รูปจำลองถึงกลไกการย่อยสลายด้วยน้ำ (Hydrolytic Degradation) ของพอลิเมอร์	80
3.2 กลไกการย่อยสลายด้วยความร้อน (Thermal Degradation) ของพอลิเมอร์	82
3.3 กลไกการย่อยสลายด้วยแสงของพอลิเมอร์	86
3.4 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีพันธะเอสเทอร์ (ก) ซึ่งย่อยสลายได้ง่ายกว่าพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (ข)	95
3.5 บริเวณอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณผลึก (Crystalline region) ในโครงสร้างพอลิเมอร์	96
3.6 โครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงข้าม (cross-linked polymer)	97
3.7 จุลินทรีย์กำลังเจริญเติบโตบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่กำลังย่อยสลาย	99
3.8 แสง UV สามารถกระตุ้นการแตกตัวของพันธะเคมีในพอลิเมอร์	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เส้นทางการสังเคราะห์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตส์หรือ PHAs ในจุลินทรีย์	108
4.2 กระบวนการผลิต Polylactic Acid (PLA) จากของเสียพืช และ การประยุกต์ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติเพื่อสร้างวัสดุทางการแพทย์	111
4.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา ROP ของพอลิแลกติก แอซิด	113
4.4 เส้นทางการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในการสังเคราะห์ Polyhydroxyalkanoates (PHAs) และโครงสร้างทางเคมีของ PHAs ชนิดต่าง ๆ	117
4.5 การสังเคราะห์ PHAs ในจุลินทรีย์	118
4.6 กระบวนการ Ring-Opening Polymerization (ROP) ของ ϵ -Caprolactone เพื่อสังเคราะห์ Polycaprolactone (PCL)	120
4.7 การสังเคราะห์ Polycaprolactone (PCL) โดย Ring-Opening Polymerization (ROP)	122
4.8 การสังเคราะห์ Poly (Butylene Succinate), PBS	124
4.9 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ PBAT	126
4.10 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ PTMC	131
4.11 วิธีการสังเคราะห์ PTMC แบบ Coordination-insertion mechanism	132
4.12 โครงสร้างของมอนอเมอร์ และพอลิเมอร์ ของ PEF	147
4.13 การเปรียบเทียบลักษณะสำคัญของ PEF และ PET	148
4.14 การสังเคราะห์ PEF แบบกระบวนการ Two-Stage melt Polymerization	152
4.15 โครงสร้างทางเคมีของ Polyglycolic Acid (PGA) และ การแสดงหน่วยซ้ำของ พอลิเมอร์และโมเลกุลในรูปแบบ 3 มิติ	167
4.16 โครงสร้างของแป้ง แสดงความแตกต่างระหว่าง amylose (สายตรง) และ amylopectin (กิ่งก้านสาขา)	174
4.17 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส แสดงหน่วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4- Glycosidic	178
4.18 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ cellulose acetate โดยการทำปฏิกิริยา Acetylation	179
5.1 ตัวอย่างโครงสร้างมอนอเมอร์ประเภทต่าง ๆ และ โคพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์ที่ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	226
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน LA:GA กับระยะเวลาการย่อยสลายและอุณหภูมิ Glass Transition ของ PLGA	239

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ภาพจำลองสถานการณ์วิทยาแบบต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วน องค์ประกอบ และ สภาวะการแปรรูป	246
5.4 ผลของอัตราส่วน PLA/PBAT ต่อสมบัติเชิงกล	259
5.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต แสดงการกระจายตัวของสารตัวเติมนาโนในเมทริกซ์พอลิเมอร์	268
5.6 เทคนิคต่าง ๆ ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ได้เช่นกัน	289
5.7 กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ชีวภาพด้วยพลาสมาแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก่อน และ หลังการปรับปรุง	291
5.8 ระบบ Atmospheric Pressure Plasma สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ แสดงกลไกการทำงานและผลที่เกิดขึ้น	292
5.9 กลไกการปรับปรุงพื้นผิว PLA ด้วยเทคนิค photo-activated ClO_2 แสดงการสร้างหมู่คาร์บอกซิลบนพื้นผิว	293
5.10 บทบาทของกรดสเตียริกในการสร้างอนุภาคนาโนเงินบนกราฟีนและการผสมกับ PLA	294
5.11 กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) เปรียบเทียบสมบัติทางกลของ PLA บริสุทธิ์ (เส้นสีแดง) และ PLA ที่ผ่านการทำพลาสติกไซเซชัน	299
5.12 ผลของ PEG ต่อสมบัติต่างๆ ของ PLA	309
6.1 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่ทำจากวัสดุย่อยสลายได้หลากหลายรูปแบบ	322
6.2 กล่องอาหารทำจากเส้นใยพืช (Plant-based Fiber)	323
6.3 อินโฟกราฟิกแสดงแนวทางการแก้ปัญหาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ (การเคลือบหลายชั้นและการเกิดผลึก)	326
6.4 กลไกการเกิดผลึกของ PLA เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความร้อน	327
6.5 สรุปประเภทและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์อาหารชั้นสูง	328
6.6 ถ้วย PLA ขนาด 3.25 oz สำหรับบรรจุอาหารและเครื่องดื่มเย็น	329
6.7 ถ้วย PLA ขนาด 4 oz พิมพ์ลายสีสำหรับเครื่องดื่มเย็น	330
6.8 ถาดอาหาร 3 ช่อง ขนาด $10 \times 7.5 \times 1.5$ นิ้ว ³ เคลือบด้วย PLA	330
6.9 กล่องอาหารจากแป้งข้าวโพดแบบมีช่องแบ่งสำหรับแยกประเภทอาหาร	332
6.10 การเปรียบเทียบกลไกการปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ระหว่างระบบสัมผัสโดยตรงและระบบผ่านช่องว่างเหนืออาหาร	333

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.11 องค์ประกอบของบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่ประกอบด้วยตัวบ่งชี้ความสดใหม่ การวิเคราะห์ข้อมูลผ่านสมาร์ทโฟน และการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี	335
6.12 ตัวอย่างการใช้สมาร์ทโฟนสแกนตัวบ่งชี้บนบรรจุภัณฑ์เนื้อสัตว์เพื่อตรวจสอบ ความปลอดภัยก่อนการบริโภค	335
6.13 นวัตกรรมบรรจุภัณฑ์ที่กินได้ซึ่งผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติคือจากสาหร่ายทะเล ช่วยลดขยะพลาสติกได้อย่างยั่งยืน	337
6.14 การนำฟิล์มบุกมาประยุกต์ใช้ในการห่อผลิตภัณฑ์กaramel (Thai Caramel)	338
6.15 ผลิตภัณฑ์กaramelที่ห่อด้วยฟิล์มบุกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ชั้นนอก	339
6.16 ซองเครื่องปรุงบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตจากแป้งกล้วยและผงบุก	339
6.17 กล่องอาหารกระดาศกราฟแบบพับได้ (Oyster Pail) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่เป็นที่นิยม สำหรับอาหารนำกลับบ้าน (Take-out) ซึ่งมักมีการเคลือบสารกันซึมที่ย่อยสลายได้ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการใช้งาน	347
6.18 ตัวอย่างเส้นใยจากพืชชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือสารเสริมแรงใน การผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล และลดต้นทุน	353
6.19 ตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อขึ้นรูป (Molded Pulp) ที่มีรูปทรงหลากหลาย สามารถผลิตได้จากทั้งเยื่อกระดาษรีไซเคิลและเยื่อพืชธรรมชาติ เช่น ชานอ้อยหรือ ฟางข้าว	354
6.20 เม็ดพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic Pellets) และชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติทางกล ซึ่งเป็นวัตถุดิบและขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาและผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	355
6.21 การจัดแสดงภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อธรรมชาติหลากหลายรูปแบบ สะท้อนให้ เห็นถึง นวัตกรรมและการออกแบบที่สวยงามของบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืน	356
6.22 กล่องอาหารทำจากกระดาศกราฟที่เคลือบผิวภายในด้วยพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ทางชีวภาพ (เช่น PLA หรือ PBAT) เพื่อป้องกันการรั่วซึมของของเหลวและไขมัน	359
6.23 ภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากเยื่อชานอ้อย (Sugarcane Bagasse)	360
6.24 ถุงซอปปิ้งที่ย่อยสลายได้จากแป้งและเมล็ดพืช แสดงให้เห็นถึงแหล่งที่มาของวัตถุดิบ จากพืชและการกลับคืนสู่ธรรมชาติ	364

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.25 ถุงขยะที่ย่อยสลายได้ยี่ห้อ BioBag พร้อมตรา "CERTIFIED COMPOSTABLE" ซึ่งยืนยันการผ่านมาตรฐานสากล	366
6.26 การเปรียบเทียบสภาพของถุงพลาสติกชีวภาพก่อนและหลังการหมักเป็นเวลา 3 วัน	366
6.27 ความแตกต่างของอัตราการย่อยสลายระหว่าง PLA, PBAT/starch และ PHA ภายใต้สภาวะการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 90 วันตามมาตรฐาน ISO 20200	367
6.28 การใช้งานถุงขยะ BioBag สำหรับขยะอินทรีย์ ซึ่งพร้อมสำหรับการนำไปเข้าสู่กระบวนการหมักปุ๋ย	369
6.29 ชุดช้อน ส้อม มีด PLA ที่ย่อยสลายได้ยี่ห้อ Ecovita	371
6.30 ชุดช้อน ส้อม มีดไม้ธรรมชาติ 300 ชิ้น	373
6.31 ชุดช้อนไม้ธรรมชาติ 100 ชิ้น	373
6.32 หลอดดื่ม PLA สีเขียว 400 ชิ้น	375
6.33 ผลิตภัณฑ์สุขอนามัยที่ย่อยสลายได้	379
6.34 ผ้าอ้อมที่ย่อยสลายได้	380
6.35 ผ้าอนามัยที่ย่อยสลายได้ยี่ห้อ Papaya	381
6.36 ขวดและหลอดเครื่องสำอาง PLA ที่ย่อยสลายได้	382
6.37 ชุดขวดเครื่องสำอาง PLA ที่ย่อยสลายได้ยี่ห้อ Seme Packaging	382
6.38 เปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้กับพลาสติกแบบดั้งเดิมใน 4 มิติ (บนซ้าย) ต้นทุนการผลิต, (บนขวา) เวลาการสลายตัวในทะเล, (ล่างซ้าย) ประสิทธิภาพการดูดซับของผ้าอนามัย, และ (ล่างขวา) อัตราส่วนราคาผ้าอนามัย	389
6.39 ผ้า PLA Fiber ที่ใช้ในการผลิตเสื้อผ้า	391
6.40 ผ้าจาก Lyocell Fiber - เส้นใยเซลลูโลสที่ผลิตจากเยื่อไม้	392
6.41 กระบวนการผลิตเส้นใย Viscose (Wet Spinning)	394
6.42 แผนภาพกระบวนการผลิตเส้นใย Modal	395
6.43 แผนภาพกระบวนการผลิต Lyocell แบบวงจรปิด	397
6.44 โครงสร้างเส้นใย Lyocell ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	397
6.45 แนวคิดสิ่งทออัจฉริยะ (Smart Textiles Concept)	400
6.46 เสื้อผ้า TENCEL สำหรับกีฬาประสิทธิภาพสูง (TENCEL Sportswear Performance)	401
6.47 เทคโนโลยีสิ่งทออัจฉริยะที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Smart Textile Electronics)	403

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.48 การประยุกต์ใช้สิ่งทออัจฉริยะในแฟชั่น (Smart Textiles Fashion Applications)	405
6.49 การผลิต Chitosan Fiber	406
6.50 PLA Nonwoven Fabric	407
7.1 ระบบนำส่งยาด้วยนาโนเทคโนโลยีชนิดต่าง ๆ	431
7.2 ระบบนำส่งยาที่ทำจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	432
7.3 การบำบัดพื้นฟูกระดูกด้วย biodegradable scaffolds	434
7.4 การทดลอง "Earmouse" ของ Cao et al. (1997) ที่แสดงการสร้างกระดูกอ่อน รูปหุ่นมนุษย์บนหลังของหนูเปลี่ยนโดยใช้หนัง PGA ที่เพาะเลี้ยงเซลล์กระดูกอ่อนจากวัว	443
7.5 แผนภาพแสดงการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ไคโตซานและกรดไฮยาลูโรนิก ในรูปแบบต่าง ๆ (เช่น ไฮโดรเจล, เส้นใย) สำหรับการสร้างกระดูกอ่อนใหม่	446
7.6 การประยุกต์ใช้ Hyaluronic Acid และ Chitosan ในรูปแบบไฮโดรเจลแบบฉีด	446
7.7 Metal-Polyphenol Coordination Mechanism	452
7.8 Mg-Phenolic Networks Coating	455
7.9 Ferrous-HA Hydrogel for Drug Delivery	456
7.10 ภาพรวมของวิธีการต่าง ๆ ในการเตรียมโครงสร้างนั่งร้านที่มีรูพรุนสำหรับวิศวกรรม เนื้อเยื่อผิวหนัง	458
7.11 สรุปเทคนิคต่าง ๆ ในการผลิตนั่งร้านสำหรับงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มเทคนิคดั้งเดิมและเทคนิคขั้นสูง	458
7.12 ขั้นตอนของเทคนิค Solvent Casting & Particle Leaching	459
7.13 โครงสร้างสองชั้นของ Integra® Dermal Regeneration Template	463
7.14 ภาพตัดขวางทางเนื้อเยื่อวิทยาแสดงการเจริญของเนื้อเยื่อเข้าไปในโครงสร้างชั่วคราว Integra® เมื่อเวลาผ่านไป (A) ภาพวาดโครงสร้างผิวหนังปกติ (B) 1 สัปดาห์หลังการ ปลูกถ่าย (C) 2 สัปดาห์หลังการปลูกถ่าย (D) 4 สัปดาห์หลังการปลูกถ่าย แสดงให้เห็น การสร้างหลอดเลือดและผิวหนังชั้นหนังแท้ใหม่	464
7.15 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงโครงสร้างรูพรุนที่ เชื่อมต่อกันของโครงสร้างชั่วคราวที่ทำจากคอลลาเจนและไคโตซาน ซึ่งเอื้อต่อการ เจริญเติบโตของเซลล์	466
7.16 แนวคิดการสร้างหลอดเลือดเทียมโดยเลียนแบบโครงสร้างสามชั้น ของหลอดเลือดธรรมชาติ	468

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.17 การเปลี่ยนแปลงของหลอดเลือดเทียมที่ปลูกถ่ายในกะ จากซ้ายไปขวา คือ โครงสร้างชั่วคราวเริ่มต้น, หลังปลูกถ่าย 1, 6, 26, 52, และ 104 สัปดาห์	469
7.18 ภาพถ่าย SEM ของเซลล์ L929 และ HUVEC บนนั่งร้าน PCL, PLA, และ คอมโพสิต PLA/PCL หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 วัน	472
7.19 แนวคิดของโครงสร้างชั่วคราวที่สามารถปลดปล่อยเฮพารินเพื่อเพิ่มสมบัติ การต้านการแข็งตัวของเลือด	473
7.20 แนวคิด, โครงสร้าง, และผลการทดสอบของ Bioabsorbable Electrical Stimulation Suture (BioES-suture)	484
7.21 รูปสกรูและแผ่นยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้ในการใช้งานทางคลินิกเทียบกับแผ่นโลหะ และสกรูยึดกระดูก รวมถึงภาพเอกซเรย์แสดงตำแหน่งการติดตั้ง ซ้าย: ภาพเอกซเรย์ข้อเท้า มีแผ่นโลหะและสกรูยึดกระดูก fibula (lateral malleolus) ขวาบน: สกรูกระดูกพลาสติกสีขาว/ใสที่ย่อยสลายได้ (น่าจะเป็น PLLA หรือ PLGA) ขวาล่าง: สกรูกระดูกสีเหลือง (น่าจะมีส่วนผสม hydroxyapatite หรือ calcium phosphate) พร้อมไขควง	489
7.22 โครงสร้างและคุณสมบัติของอุปกรณ์ยึดกระดูกที่ทำจาก PLA	490
7.23 ชุดแผ่นและสกรู LactoSorb® (ตัวอย่างระบบ craniofacial) พร้อมจุด “predetermined breaking point” ของสกรู	492
7.24 สกรูแมกนีเซียมสำหรับยึดเยื่อหุ้มกระดูก	495
7.25 การเปรียบเทียบสกรูยึดกระดูกโลหะและสกรูยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์	497
7.26 การประยุกต์ใช้แผ่นและสกรูยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้ในการยึดตรึงกระดูก กะโหลกศีรษะ	499
7.27 โครงสร้างเทคนิคของ Bioresorbable Vascular Scaffold	505
7.28 Absorb BVS Device รุ่นใหม่	506
7.29 Magmaris Resorbable Magnesium Scaffold	507
7.30 หลักการทำงานของท่อนำประสาท (NGC)	510
7.31 แนวคิดและประเภทของ Nerve guide (nerve guidance conduit) จากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับการซ่อมแซมเส้นประสาทส่วนปลาย	511

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.32 ภาพรวมโครงสร้างเส้นประสาทส่วนปลาย (A), ระดับการบาดเจ็บ (B), ประเภทต่าง ๆ ของ NGCs (C) เช่น ท่อกลวง (Hollow), ท่อหลายช่อง (Multi-channel), ท่อพรุน (Porous), ท่อที่มีสารเติมเต็ม (NGC with fillers) และท่อที่มีร่อง (Grooved), และการปลูกถ่ายท่อเพื่อซ่อมแซมเส้นประสาท (D)	513
8.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทางการแพทย์ที่สำคัญ ได้แก่ 1) PLA, 2) PBAT, 3) PHB, 4) แป้ง, 5) ไคโตซาน	549
8.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ Polylactic Acid (PLA) จากกลูโคสผ่านกระบวนการหมัก, การสร้างแลคไทด์ และพอลิเมอร์เชิงเส้นแบบเปิดวงแหวน	551
8.3 การใช้ฟิล์มคลุมดินในแปลงเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิต	552
8.4 ภาพเปรียบเทียบประโยชน์ของฟิล์มคลุมดินย่อยสลายได้ในการควบคุมวัชพืช รักษาความชื้น ควบคุมอุณหภูมิ และป้องกันการกัดเซาะของดิน	553
8.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์หลักที่ใช้ในการผลิตฟิล์มปกคลุมดินย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	554
8.6 เส้นทางการสังเคราะห์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่สำคัญ	555
8.7 ขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มปกคลุมดิน	569
8.8 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของฟิล์มชนิดต่าง ๆ	571
8.9 โครงสร้างและลำดับการย่อยสลายของฟิล์มหลายชั้น	573
8.10 ขั้นตอน 3 ขั้นตอนของการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยเคลือบ	575
8.11 ตัวอย่างโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบปุ๋ย	576
8.12 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ที่ใช้การเคลือบปุ๋ย	576
8.13 โครงสร้างและหน้าที่ของไฮโดรเจล	577
8.14 กระบวนการโดยสรุปในการทำนาโนแคปซูลสำหรับยาป้องกันกำจัดศัตรูพืชจากไคโตซาน	580
8.15 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของกระบวนการเคลือบเมล็ดพันธุ์ด้วยพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ตั้งแต่การเตรียมเมล็ด การเคลือบ จนถึงประโยชน์ที่ได้รับ	581
8.16 อินโฟกราฟิกสรุปประโยชน์หลัก 5 ประการของการเคลือบเมล็ดพันธุ์ด้วยพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	583
8.17 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการเคลือบเมล็ดพันธุ์	584

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.18 กลไกการดูดซับและปลดปล่อยน้ำของพอลิเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวด (SAP) ในดิน ตั้งแต่สถานะแห้ง การดูดซับน้ำจนพองตัว 100–500 เท่า การกักเก็บน้ำ จนถึง การปลดปล่อยน้ำสู่รากพืช	587
8.19 โครงสร้างทางเคมีของ SAP ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ SAP ฐานแป้ง $(C_6H_{10}O_5)_n$, polyacrylamide เชื่อมขวางกับแป้ง และ SAP ฐานเซลลูโลส $[(C_6H_{10}O_5)_n]$.	588
8.20 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดฐานแป้ง	589
8.21 ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิตกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	591
8.22 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	593
8.23 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ผลิตกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	594
8.24 กระบวนการย่อยสลายของกระถางในดินตามระยะเวลา	595
8.25 กระถางเพาะชำที่ย่อยสลายได้ที่ผลิตจากขุยมะพร้าว และ พีทมอสอัด รวมถึง เยื่อกระดาษรีไซเคิล เพื่อใช้เพาะต้นกล้าอ่อนของพืชใน ตระกูลแตง (Cucurbitaceae) เช่น ฟักทอง, ชูกินี, หรือแตงกวา มะเขือเทศ ดาวเรือง พริก หรือพืชตระกูลถั่ว ต่าง ๆ	597
8.26 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกระถางย่อยสลายได้ในภาคส่วนต่าง ๆ ของการเกษตร	598
8.27 ภาพประกอบแสดงประเภทต่าง ๆ ของตาข่ายและเชือกทางการเกษตรที่ย่อยสลายได้ เช่น ตาข่ายป้องกันลูกเห็บ, ตาข่ายป้องกันนก, ตาข่ายรองรับผลไม้ และเชือกสำหรับผูกพวงพืช	599
8.28 ตาข่ายทางการเกษตรหลายรูปแบบ และ บางแบบย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	600
8.29 เชือกปอ (Jute) ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในการช่วยค้ำจุน และ นำทางการเจริญเติบโตของพืชในแปลงเกษตร	601
8.30 อินโฟกราฟิกเปรียบเทียบคุณสมบัติ โครงสร้าง และระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุ 3 ประเภท ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ, พอลิเมอร์ชีวภาพ และ พลาสติกทั่วไป	602
8.31 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลาย (การสูญเสียน้ำหนัก) ของเชือกประเภทต่าง ๆ หลังผ่านการหมักเป็นเวลา 105 วัน	603
8.32 กระบวนการผลิตเส้นใยแบบ Electrospinning process แบบดั้งเดิม	605
8.33 ตาข่ายเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์; ส่วนประกอบ หน้าที่ และ การประยุกต์ใช้	612

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.34 กลไกการทำงานของฟิล์มเคลือบผิวในการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้	614
8.35 ไดอะแกรมแสดงกลไกการทำงานหลัก 3 ประการของฟิล์มเคลือบผิวผลไม้	616
8.36 รูปต้นบุก และหัวบุกของพันธุ์พื้นเมืองของไทย	617
8.37 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟิล์ม KGM ในการเคลือบกล้วย	618
8.38 สมบัติของวัสดุพอลิแซคคาไรด์ 7 ชนิดที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวผลไม้	620
8.39 ประสิทธิภาพการเก็บรักษาผลไม้ที่ไม่เคลือบ (แฉวบน), เคลือบด้วย ไคโตซาน+เพกติน (แฉวกลาง), และเคลือบด้วย KGM (แฉวล่าง) ในระยะเวลา 21 วัน	621
8.40 กระบวนการเคลือบสตรอว์เบอร์รี่ด้วยฟิล์มโปรตีนไหมบริโคไค้ (Edible Silk Fibroin Coating) และผลลัพธ์การเปรียบเทียบสภาพของผลสตรอว์ เบอร์รี่หลังผ่านไป 7 วัน ณ อุณหภูมิห้อง ระหว่างกลุ่มที่ไม่เคลือบผิว, กลุ่มที่เคลือบ ด้วยฟิล์มที่มีโครงสร้างเบต้า-ชีต 23%, และกลุ่มที่เคลือบด้วยฟิล์มที่มีโครงสร้าง เบต้า-ชีต 58%	622
8.41 ไดอะแกรมเปรียบเทียบเทคนิคการเคลือบผิวผลไม้ 4 รูปแบบหลัก	624
8.42 ภาพรวมวิธีการเคลือบผิวผลไม้แบบต่าง ๆ	625
8.43 ภาพรวมวิธีการเคลือบผิวผลไม้แบบต่าง ๆ	625
8.44 แสดงการเคลือบผลไม้แบบการจุ่ม	626
8.45 สายการผลิตเคลือบผิวส้มในโรงงาน ซึ่งมักใช้เทคนิคการพ่นหรือการทาด้วยแปรงแบบ อัตโนมัติ	626
8.46 เครื่องจักรสำหรับทาขี้ผึ้งบนผลไม้ ซึ่งเป็นเทคนิคดั้งเดิมที่ยังคงใช้งานในบางอุตสาหกรรม	627
8.47 อินโฟกราฟิกแสดงพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพการเคลือบผิวผลไม้	628
8.48 ขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ในดิน	631
8.49 กลไกการไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ในสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA	631
8.50 การเปรียบเทียบโครงสร้างของพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต	632

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์	7
ตารางที่ 1.2 ตารางเปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติและการสังเคราะห์ (เพิ่มเติม)	8
ตารางที่ 1.3 หมู่ฟังก์ชันและกลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	12
ตารางที่ 1.4 ค่าสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	15
ตารางที่ 1.5 ระยะเวลาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	15
ตารางที่ 1.6 ประเด็นเชิงพาณิชย์ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กับ สถานะปัจจุบันและนัยสำคัญ	22
ตารางที่ 2.1 ประเภทพันธะเคมีในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	37
ตารางที่ 2.2 สมบัติของ PET และ PEF ในสถานะอสัณฐาน	44
ตารางที่ 2.3 พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	46
ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	48
ตารางที่ 2.5 ค่าสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	49
ตารางที่ 2.6 ค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	50
ตารางที่ 2.7 ค่าสมบัติการกั้นผ่านของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	51
ตารางที่ 2.8 ขีดความสามารถและข้อจำกัดของเทคนิควิเคราะห์แต่ละชนิด	62
ตารางที่ 2.9 เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	64
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ PBAT PLA และ PHA	129
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและเชิงกลที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ PEF และ PET	149
ตารางที่ 4.3 สรุปเปรียบเทียบสภาวะและคุณลักษณะของการสังเคราะห์ PGA ด้วยวิธีต่าง ๆ	171
ตารางที่ 4.4 สมบัติที่สำคัญของ Polyglycolic Acid (PGA)	172
ตารางที่ 4.5 วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สำคัญ	184
ตารางที่ 4.6 วิธีการสังเคราะห์หลัก มอนอเมอร์เริ่มต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดี ข้อจำกัด น้ำหนักโมเลกุลที่ได้ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	187
ตารางที่ 5.1 การตีความค่า reactivity ratio	233

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.2 สมบัติของ PLGA และ อัตราส่วนของ LA:GA	238
ตารางที่ 5.3 การเติม 3HV เข้าไปเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของ PHB	242
ตารางที่ 5.4 เกณฑ์ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์	251
ตารางที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของ PLA/PBAT blend ในอัตราส่วนต่าง ๆ	259
ตารางที่ 5.6 สมบัติของ PLA/TPS Blends	261
ตารางที่ 5.7 สรุปรูปตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้, กลยุทธ์การเพิ่มความเข้ากันได้, และ การปรับปรุงสมบัติ	263
ตารางที่ 5.8 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญ	266
ตารางที่ 5.9 สมบัติของ nanocellulose ประเภทต่าง ๆ	267
ตารางที่ 5.10 สมบัติทั่วไปของ PLA/Flax Fiber Composites ที่มี % Fiber ที่แตกต่างกัน	279
ตารางที่ 5.11 ผลของ CNC ต่อสมบัติของ PLA	279
ตารางที่ 5.12 สมบัติเชิงกลของ PCL เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณ HA	281
ตารางที่ 5.13 แก๊สที่ใช้ในการทำพลาสมา และ ผลลัพธ์	284
ตารางที่ 5.14 สรุปรูปและเปรียบเทียบเทคนิคการปรับปรุงพื้นผิวที่สำคัญ	294
ตารางที่ 5.15 ผลของ Plasticizer ต่อสมบัติของพอลิเมอร์	296
ตารางที่ 5.16 แสดงเกณฑ์แสดงการจำแนกความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์และ สารเติมแต่งตาม RED value	302
ตารางที่ 5.17 ค่า HSP ของพลาสติกไฮดรอกซีแต่ละชนิด ทดสอบความเข้ากันได้กับ PLA	304
ตารางที่ 5.18 ค่า HSP ของ PLA Glycerol และ Sorbitol	304
ตารางที่ 5.19 ค่า R_a ค่า RED และผลการทดสอบหลังใช้พลาสติกไฮดรอกซีชนิดต่าง ๆ	305
ตารางที่ 5.20 สมบัติของพอลิเมอร์ PLA เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของ PEG	308
ตารางที่ 5.21 สมบัติของ PLA เมื่อมีปริมาณของ OLA ที่แตกต่างกัน	310
ตารางที่ 5.22 สมบัติของ PLA ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของ TEC	311
ตารางที่ 5.23 สมบัติของ PCL ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมปริมาณ ESO ที่แตกต่างกัน	311
ตารางที่ 5.24 สมบัติของแป้งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมปริมาณ Glycerol ที่แตกต่างกัน	312
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ชนิดสำคัญ ได้แก่ PLA, PBAT, และ PHA	322
ตารางที่ 6.2 สมบัติเด่น ข้อจำกัดหลัก และการประยุกต์ใช้ของพอลิเมอร์หลักที่ใช้ใน การทำฟิล์มและถุงบรรจุอาหาร	324
ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติเด่นของฟิล์มบุก เจลาติน และไคโตซาน	341

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบของสมบัติของฟิล์มบุก/แป้งกล้วย ฟิล์มจาก PLA และ ฟิล์มจาก PHB	343
ตารางที่ 6.5 ผลลัพธ์เชิงปริมาณจากการประยุกต์ใช้ฟิล์มไบโอบล็อกได้จากการเก็บรักษาอาหารบางชนิด	344
ตารางที่ 6.6 ประเภทของเยื่อกระดาษ	345
ตารางที่ 6.7 สมบัติทางกายภาพและเคมี ของเยื่อกระดาษ	346
ตารางที่ 6.8 ประเภท องค์ประกอบ ความหนา และการใช้งานของกระดาษแข็ง	346
ตารางที่ 6.9 สมบัติทางกายภาพของกระดาษแข็ง	347
ตารางที่ 6.10 ปริมาณ ผลกระทบ และ ข้อจำกัด ของสารตัวเติมในกระดาษแข็ง	348
ตารางที่ 6.11 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้ง	349
ตารางที่ 6.12 ปริมาณ ผลกระทบ และข้อจำกัดของพลาสติกไฮเซอรต่อสมบัติของแป้ง	350
ตารางที่ 6.13 ปริมาณ ผลกระทบ และข้อจำกัดของเส้นใยบางประเภทต่อสมบัติของแป้ง	350
ตารางที่ 6.14 ประเภท แหล่งที่มา ลักษณะเฉพาะ และตัวอย่างของเส้นใยธรรมชาติ	352
ตารางที่ 6.15 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ	352
ตารางที่ 6.16 สารที่ใช้ ผลกระทบและข้อจำกัด ของวิธีการบำรุงรักษาของเส้นใยธรรมชาติ	354
ตารางที่ 6.17 ชนิด ความหนา ผลกระทบ ข้อดี และข้อเสีย วัสดุเคลือบที่รับประทานได้ต่อสมบัติบรรจุภัณฑ์	357
ตารางที่ 6.18 ความสามารถ และ ระยะเวลาในการย่อยสลายของวัสดุเคลือบชนิดต่าง ๆ	358
ตารางที่ 6.19 ภาพรวมของสมบัติวัสดุเยื่อกระดาษและกระดาษแข็งเคลือบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ กับภาชนะจากแป้งและเส้นใยธรรมชาติ	361
ตารางที่ 6.20 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต	386
ตารางที่ 6.21 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่สำคัญ	387
ตารางที่ 6.22 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผ้าอานามัย	387
ตารางที่ 6.23 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	388
ตารางที่ 6.24 สมบัติของ PLA Fiber เทียบกับ Polyester	390
ตารางที่ 6.25 การเปรียบเทียบลักษณะต่างๆ ของเส้นใย Lyocell, Modal และ Viscose	393
ตารางที่ 6.26 เปรียบเทียบเส้นใยเซลลูโลสสังเคราะห์ Viscose, Modal และ Lyocell โดยสรุป	398

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 6.27 เปรียบเทียบลักษณะต่าง ๆ ของเส้นใ้ผ้าที่ทำจาก Lyocell กับ Polyester	402
ตารางที่ 6.28 การเปรียบเทียบถุงเท้า PLA กับถุงเท้า Polyester/Cotton	408
ตารางที่ 6.29 การคาดการณ์ตลาดสิ่งท่อย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	410
ตารางที่ 7.1 สมบัติเชิงกลระหว่าง scaffold พอลิเมอร์ กับ กระดูกธรรมชาติ	437
ตารางที่ 7.2 ตัวอย่างเพิ่มเติมประเภทของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	439
ตารางที่ 7.3 ตัวอย่างเพิ่มเติมของลักษณะโครงสร้างชั่วคราวของของโครงเลี้ยงเซลล์	440
ตารางที่ 7.4 ตัวอย่างเพิ่มเติมของประเภทโมเลกุลสัญญาณเพื่อสร้างเนื้อเยื่อกระดูกใหม่	441
ตารางที่ 7.5 เปรียบเทียบตัวอย่างชนิดพอลิเมอร์สำหรับนั่งร้านกระดูกอ่อน	445
ตารางที่ 7.6 สรุปการรักษาและฟื้นฟูโรคข้อเสื่อม (Osteoarthritis - OA) และการซ่อมแซมกระดูกอ่อน (Cartilage Repair)	449
ตารางที่ 7.7 เปรียบเทียบกลไกการเกิดเจลทั้งสองกลไก	454
ตารางที่ 7.8 ความสัมพันธ์โครงสร้างพอลิเมอร์กับการใช้งานทางการแพทย์	457
ตารางที่ 7.9 เปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในวิธีการเตรียมโครงสร้างชั่วคราวสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	461
ตารางที่ 7.10 สรุปความสัมพันธ์โครงสร้างซ้ำกับสมบัติสำคัญของไหมเย็บแผลละลายได้ทางชีวภาพบางชนิด	477
ตารางที่ 7.11 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสีย ของไหมเย็บแผลละลายได้ทางชีวภาพ CMUSorb	480
ตารางที่ 7.12 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของการผลิตไหมเย็บแผล PLA เคลือบ Triclosan	481
ตารางที่ 7.13 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของการผลิตไหมเย็บแผล PLC เคลือบ Levofloxacin	482
ตารางที่ 7.14 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของการผลิตไหมเย็บแผลจากแป้งข้าวเจ้า	488
ตารางที่ 7.15 สรุปสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับพอลิเอสเทอร์บางชนิด	491
ตารางที่ 7.16 ความแตกต่างของอุปกรณ์ยึดตรึงกระดูกที่ย่อยสลายได้ (bioresorbable osteo fixation devices) ที่แสดงในรูปที่ 7.23	493
ตารางที่ 7.17 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ 2 ชนิด PLLA และ scPLA	493

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 7.18 สมบัติเชิงกลและการย่อยสลายของวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ยึดกระดูก เทียบกับกระดูกมนุษย์	495
ตารางที่ 7.19 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ยึดกระดูก	496
ตารางที่ 7.20 สมบัติเชิงวัสดุและการใช้งานของสกรูสองชนิดจากรูปที่ 7.25	498
ตารางที่ 7.21 สมบัติของวัสดุสองประเภทที่ใช้เป็นแผ่นและสกรูยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้ ทางชีวภาพในการยึดตรึงกระดูกกะโหลกศีรษะ	500
ตารางที่ 7.22 ปัญหาหลักของสกรูโลหะผสมแมกนีเซียม	501
ตารางที่ 7.23 ปัญหาหลักของสกรูพอลิเมอร์	501
ตารางที่ 7.24 แนวทางและประโยชน์ของวัสดุคอมโพสิต และ ไฮบริด	502
ตารางที่ 7.25 เทคนิคต่าง ๆ ในการปรับปรุงพื้นผิวของสกรู	502
ตารางที่ 7.26 เทคโนโลยีและกลไกที่ใช้ผลิตสกรูที่มีคุณสมบัติอัจฉริยะ	503
ตารางที่ 7.27 การเปรียบเทียบ BVS รุ่นแรกและรุ่นใหม่	506
ตารางที่ 7.28 สมบัติของพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ในการทำ NGCs	517
ตารางที่ 7.29 สรุปข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าประสาทบางส่วนที่ได้รับการอนุมัติ จากองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (FDA) สำหรับการใช้งาน ทางคลินิก	518
ตารางที่ 7.30 สรุปข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการผลิตที่นำเข้าประสาท	520
ตารางที่ 8.1 สรุปเปรียบเทียบสมบัติทุกด้านของพอลิเมอร์ 3 ชนิดดังกล่าวที่ จะนำมาทำฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร	567
ตารางที่ 8.2 การเลือกพอลิเมอร์ตามรอบการเจริญเติบโตของพืช	568
ตารางที่ 8.3 พิจารณาพอลิเมอร์ที่จะใช้ในการเป็นฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร พิจารณาตามงบประมาณ	568
ตารางที่ 8.4 เปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ Konjac Glucomannan (KGM) ในการเคลือบผลไม้ชนิดต่าง ๆ	618
ตารางที่ 8.5 สรุปประเภท ตัวอย่าง และคุณสมบัติเด่นของวัสดุที่นำมา เคลือบผิวผลไม้	619

บทที่ 1

บทนำ

ในช่วงศตวรรษที่ 20 การผลิตพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม (Petrochemical-based Plastics) ได้เติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากต้นทุนต่ำ ความแข็งแรง และการใช้งานที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม พลาสติกเหล่านี้มีโครงสร้างทางเคมีที่เสถียรสูง เช่น มีพันธะโซ่หลักแบบคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) และคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วยากต่อการถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานหลายร้อยปีและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Geyer, Jambeck, & Law, 2017) ในช่วงศตวรรษที่ 21 ความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก นำไปสู่ความสนใจในวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) ซึ่งสามารถสลายตัวผ่านกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้อย่างปลอดภัยและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม พอลิเมอร์กลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาขยะพลาสติกที่สะสมในสิ่งแวดล้อมและลดการพึ่งพาทรัพยากรฟอสซิล ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป (Emadian et al., 2017; Shen et al., 2020)

1.1 ความหมายและความสำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.1.1 ความหมายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) คือ พอลิเมอร์ที่สามารถแตกสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการทำงานของจุลินทรีย์ (microorganisms) เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่ายบางชนิด กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ นี้มักเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เร่งโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ได้แก่ กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ที่ตัดพันธะที่ไวต่อน้ำ เช่น พันธะเอสเทอร์ หรือออกซิเดชัน (oxidation) ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ผลลัพธ์สุดท้ายของการย่อยสลายคือสารประกอบโมเลกุลต่ำที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ (H_2O), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), มีเทน (CH_4), เกลืออนินทรีย์ และมวลชีวภาพ (biomass) (Albertsson & Karlsson, 2020) นิยามตามมาตรฐานสากล ได้แก่

ISO 472:2013 นิยามว่าพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พอลิเมอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และ เคมี จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด สำหรับมาตรฐานทดสอบเพิ่มเติมดูได้ใน ISO 14855-1:2012 (การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอโรบิกในสภาวะคอมโพสต์)

ASTM D6400 (Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted) กำหนดว่าพลาสติกที่ระบุว่าย่อยสลายได้ต้องแสดงให้เห็นว่า สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ผ่านปฏิกิริยาทาง เคมี ชีวภาพ และกายภาพ ภายใต้สภาวะคอมโพสต์ที่กำหนด

โดยสรุป พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงหมายถึงพอลิเมอร์ที่สายโซ่ยาวสามารถแตกออกเป็นมอนอเมอร์หรือโมเลกุลสายสั้นลง รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด ส่งผลให้สมบัติของวัสดุแตกต่างไปจากเดิมอย่างชัดเจน

1.1.2 ความสำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับโลก มีรายงานว่าในปี ค.ศ. 2015 ทั่วโลกมีการผลิตพลาสติกประมาณ 381 ล้านตัน แต่มีเพียง 9% เท่านั้นที่ถูกรีไซเคิล ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่ถูกนำไปฝังกลบหรือทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม (Geyer et al., 2017) พลาสติกสังเคราะห์ทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) ใช้เวลาในการย่อยสลายในสภาพแวดล้อมธรรมชาตินานหลายร้อยปี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกในมหาสมุทร (Marine Debris) และการปนเปื้อนของไมโครพลาสติก (Microplastic) ในห่วงโซ่อาหารของสัตว์น้ำและสิ่งมีชีวิต (Jambeck et al., 2015)

การพัฒนาและการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ โดยมีประโยชน์หลักดังนี้ คือ

ลดปริมาณขยะพลาสติก คือช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกในหลุมฝังกลบ (Landfill) และลดการสะสมของพลาสติกในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ

ลดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติก คือลดความเสี่ยงของการเกิดและการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำและระบบนิเวศ

ลดการพึ่งพาทรัพยากรฟอสซิล เนื่องจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจำนวนมากสามารถผลิตได้จากทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable Resources) เช่น ชีวมวล ซึ่งลดการใช้ปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป

เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถกลับคืนสู่ระบบนิเวศได้

สนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยการส่งเสริมการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของปุ๋ยอินทรีย์หรือพลังงานชีวภาพผ่านกระบวนการหมัก

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์, อุตสาหกรรมการแพทย์, และอุตสาหกรรมเกษตรกรรม (Shen et al., 2020)

1.2 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถจำแนกออกเป็นประเภทหลัก ๆ ตามแหล่งที่มาของวัตถุดิบและวิธีการผลิต ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีและสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์นั้น ๆ ดังนี้

1.2.1 พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้คือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากสารชีวภาพที่พบในธรรมชาติ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพโดยตรง ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง (Linear Polymer) ของหน่วยกลูโคส (Glucose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ beta-(1-4) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช มีความเป็นผลึกสูงและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีและดูดซับน้ำได้ (Klemm et al., 2018)

ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) โดยที่ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบในเปลือกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู และผนังเซลล์ของเชื้อรา ไคโตซานได้จากการดัดแปรไคติน เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอมีนอิสระจำนวนมาก ทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวและย่อยสลายได้ (Dutta et al., 2014)

โปรตีน (Proteins) เช่น เจลาติน (Gelatin), คอลลาเจน (Collagen), เคซีน (Casein) จากนม และไฟโบรอินจากไหม (Silk Fibroin) โปรตีนเป็นพอลิเมอร์ของกรดอะมิโนที่เชื่อมกันด้วยพันธะเพปไทด์ สามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุย่อยสลายได้ในงานบรรจุภัณฑ์และการแพทย์

แป้ง (Starch) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่ประกอบด้วยแอมิโลส (Amylose) และแอมิโลเพกติน (Amylopectin) เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในพืช สามารถนำมาดัดแปลงเป็นเทอร์โมพลาสติกแป้ง (Thermoplastic Starch, TPS) เพื่อใช้ในบรรจุภัณฑ์ (Averous, 2008)

แอลจิเนต (Alginate) คือพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากสาหร่ายทะเล มีสมบัติการเกิดเจลได้ดี นิยมใช้ในการแพทย์และการห่อหุ้มสาร

1.2.2 พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Bio-based Synthetic Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบชีวภาพผ่านกระบวนการหมักหรือการสังเคราะห์ทางเคมี โดยมีโครงสร้างทางเคมีที่ถูกออกแบบมาให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น

พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากการหมักน้ำตาลที่ได้จากพืช เช่น แป้งข้าวโพด หรืออ้อย ให้เป็นกรดแลกติก (Lactic acid) จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-Opening Polymerization, ROP) ของแลกไทด์ (Lactide) PLA มีสมบัติเชิงกลที่ดี คล้ายกับพอลิสไตรีน (Polystyrene) หรือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และสามารถย่อยสลายได้ในสภาวะการทำปุ๋ยหมักทางอุตสาหกรรม (Song et al., 2009)

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตโดยแบคทีเรียบางชนิดภายใต้สภาวะจำกัดสารอาหาร (แต่มีแหล่งคาร์บอนเกินพอ) เพื่อใช้เป็นสารสะสมพลังงานภายในเซลล์ PHA มีคุณสมบัติหลากหลาย ขึ้นอยู่กับชนิดของหน่วยซ้ำ มีบางชนิดที่มีสมบัติคล้ายพอลิพรอพิลีน (PP) และบางชนิดมีความยืดหยุ่นคล้ายยาง (elastomeric) สามารถย่อยสลายได้ในดินและน้ำทะเล (Philip et al., 2007)

1.2.3 พอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเลียมแต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Petroleum-Based Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้สังเคราะห์จากวัตถุดิบปิโตรเคมี แต่มีโครงสร้างทางเคมีที่ถูกออกแบบให้มีพันธะที่ไวต่อการย่อยสลาย (เช่น พันธะเอสเทอร์) ทำให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น

พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) ซึ่งสังเคราะห์จากการพอลิคอนเดนเซชันของกรดซัคซินิก (Succinic Acid) และ 1,4-บิวทานีไดออล (1,4-Butanediol) PBS มีความเหนียวดีและสามารถย่อยสลายได้ในดิน โดยเฉพาะในสภาวะการทำปุ๋ยหมักอุตสาหกรรม มีสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน (PE) (Avérous, 2008).

พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) โดยสังเคราะห์จากการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของ ϵ -คาโพรแลคโตน (ϵ -caprolactone) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จุดหลอมเหลวต่ำ และย่อยสลายได้ช้ากว่า PLA PCL นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์ เช่น ในการผลิตไหมเย็บแผล, วัสดุฝังในร่างกาย, และระบบนำส่งยา (Woodruff & Hutmacher, 2010)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT) เป็นโคพอลิเมอร์แบบส่นที่มีสมบัติยืดหยุ่นและทนทานคล้ายกับพอลิเอทิลีน (PE) หรือพอลิพรอพิลีน (PP) นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้และถุงพลาสติก

1.2.4 พอลิเมอร์ที่สามารถดูดซึมได้ทางชีวภาพ (Bioabsorbable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถย่อยสลายและดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรือสารพิษตกค้าง การย่อยสลายของพอลิเมอร์เหล่านี้ในร่างกายมักจะควบคุมได้และสอดคล้องกับอัตราการฟื้นตัวของเนื้อเยื่อ เช่น

พอลิแลกติกโคไกลโคลิกแอซิด (Poly(lactic-co-glycolic acid), PLGA) เป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันร่วมกันของกรดแลกติกและกรดไกลโคลิก (Glycolic acid) สามารถปรับอัตราการย่อยสลายในร่างกายได้โดยการปรับสัดส่วนของหน่วยซ้ำ (monomer units) นิยมใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น ไหมเย็บแผล, วัสดุปลูกถ่ายในร่างกาย, และระบบนำส่งยา (Makadia & Siegel, 2011)

พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น PCL มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพดีเยี่ยมและอัตราการย่อยสลายที่ค่อนข้างช้าในร่างกาย ทำให้เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุฝังในทางศัลยกรรมกระดูกและวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Woodruff & Hutmacher, 2010)

พอลิไกลโคลิกแอซิด (Poly(glycolic acid), PGA) เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ชนิดแรก ๆ ที่ใช้ในทางการแพทย์ มีอัตราการย่อยสลายที่รวดเร็ว นิยมใช้ในไหมละลายและวัสดุปลูกถ่ายที่ต้องการการสลายตัวอย่างรวดเร็ว

1.3 การเปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ และการสังเคราะห์

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันอย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และกระบวนการผลิต (Emadian et al., 2017; Pathak & Navneet, 2017; Tokiwa et al., 2009) การทำความเข้าใจความแตกต่างนี้เป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

1.3.1 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Natural Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากแหล่งชีวภาพโดยตรง เช่น พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ตัวอย่างได้แก่ เซลลูโลส, แป้ง, ไคติน, โปรตีน, และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA)

ข้อดี คือ สามารถย่อยสลายได้ดีในธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากพอลิเมอร์จากธรรมชาติมีโครงสร้างที่คุ้นเคยและสามารถถูกย่อยสลายได้โดยตรงโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรียและเชื้อรา (Tokiwa et al., 2009) ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตจากแหล่งธรรมชาติช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์และมักไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตราย สามารถหมุนเวียนได้ (Renewable) โดยวัตถุดิบในการผลิตมาจากแหล่งชีวภาพที่สามารถปลูกทดแทนได้อย่างต่อเนื่อง และ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง พอลิเมอร์หลายชนิดมีคุณสมบัติ biocompatibility ที่ดีเยี่ยม เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ (Balla et al., 2019)

ข้อเสีย คือ มีสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ต่ำ พอลิเมอร์จากธรรมชาติส่วนใหญ่มักมีความแข็งแรงและความทนทานต่ำกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้การใช้งานในอุตสาหกรรมบางประเภทมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง (Emadian et al., 2017) มีการดูดซึมน้ำสูง (High Water Absorption): พอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น เซลลูโลสและแป้ง มีโครงสร้างที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง มีต้นทุนการผลิตสูง แม้ว่าวัตถุดิบจากธรรมชาติจะมีปริมาณมาก แต่กระบวนการสกัด การทำให้บริสุทธิ์ และการดัดแปลงเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการมักมีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ต้นทุนของพอลิเมอร์ประเภทนี้ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป (Emadian et al., 2017) และมีความคงตัวต่ำในบางสถานะ พอลิเมอร์บางชนิดอาจมีความคงตัวต่ำต่อความร้อนหรือสภาวะการแปรรูป

1.3.2 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการสังเคราะห์ (Synthetic Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการทางเคมีในอุตสาหกรรม โดยอาจใช้วัตถุดิบจากปิโตรเลียมหรือชีวภาพ ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA), พอลิคาโพรแลคโตน (PCL), พอลิবিวทีลีนอะดิเพต เทเรฟทาเลต (PBAT), และพอลิবিวทีลีน ซัคซิเนต (PBS)

ข้อดี คือ สมบัติเชิงกลดี (Good Mechanical Properties) พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีและกระบวนการผลิตได้อย่างแม่นยำ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนทาน และความยืดหยุ่นได้ตามต้องการสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง (Albertsson & Hakkarainen, 2017) มีความต้านทานต่อสารเคมีดี (Good chemical resistance) พอลิเมอร์จากการสังเคราะห์มักมีความเสถียรทางเคมีสูง สามารถทนต่อกรด ด่าง และตัวทำละลายได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์จากธรรมชาติ สามารถผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ง่าย (Ease of industrial production) กระบวนการผลิตพอลิเมอร์จากการสังเคราะห์สามารถควบคุมและปรับขนาดให้เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ง่ายกว่า ซึ่งนำไปสู่การผลิตที่สม่ำเสมอและ

มีประสิทธิภาพ และมีความคงตัวของสมบัติ มีความคงตัวของสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพที่ดีกว่าในสภาวะการใช้งานที่หลากหลาย

ส่วน **ข้อเสีย** คือ **ต้นทุนวัตถุดิบและการผลิตสูง** แม้จะผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ง่าย แต่กระบวนการสังเคราะห์มักต้องใช้พลังงานสูง และวัตถุดิบที่ใช้บางชนิดอาจมีต้นทุนสูง ส่งผลให้พอลิเมอร์ประเภทนี้มีราคาสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำในบางสภาวะ แม้ว่าพอลิเมอร์จากการสังเคราะห์จะถูกออกแบบให้ย่อยสลายได้ แต่ในบางสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิต่ำ หรือ ความชื้นต่ำ อัตราการย่อยสลายอาจลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Pathak & Navneet, 2017) ซึ่งหมายความว่า การย่อยสลายอาจไม่เกิดขึ้นในทุกสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และ อาจเกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม แม้จะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่ในบางกรณีอาจทิ้งสารตกค้างหรืออนุภาคขนาดเล็ก (microplastics) ไว้ในสิ่งแวดล้อมได้หากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพไม่สมบูรณ์ หรือสภาวะไม่เหมาะสม (Shen et al., 2020)

แหล่งวัตถุดิบ การผลิตพอลิเมอร์บางชนิดยังคงต้องพึ่งพิงวัตถุดิบจากปิโตรเลียม ทำให้ยังไม่สามารถลดการพึ่งพาทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียนได้อย่างเต็มที่

โดยสามารถสรุปการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ได้ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และ ความแตกต่างของพอลิเมอร์บางชนิดในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ และ จากการสังเคราะห์

ประเภทพอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากธรรมชาติ	- ย่อยสลายได้ในธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ - เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม - สามารถหมุนเวียนได้ - ความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง	- สมบัติเชิงกลต่ำ - ดูดซึมน้ำสูง - ต้นทุนการผลิตสูง - ความคงตัวต่ำในบางสภาวะ
พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากการสังเคราะห์	- สมบัติเชิงกลดี - ความต้านทานต่อสารเคมีสูง - ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ง่าย - ความคงตัวของสมบัติ	- ต้นทุนวัตถุดิบและการผลิตสูง - ย่อยสลายได้ยากในบางสภาวะ - อาจเกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม - บางชนิดยังพึ่งพิงวัตถุดิบจากปิโตรเลียม

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติและการสังเคราะห์บางชนิด (เพิ่มเติม)

ชื่อพอลิเมอร์	ประเภท	แหล่งที่มา	สมบัติเด่น	การใช้งาน	ข้อจำกัด
PLA (Polylactic Acid)	สังเคราะห์จาก ชีวมวล	น้ำตาลจากพืช เช่น ข้าวโพด	แข็งแรง ย่อย สลายได้ในโรง หมักปุ๋ย	บรรจุภัณฑ์, फिल्मห่อ อาหาร, อุปกรณ์ทาง การแพทย์	เปราะ และ ย่อยสลายช้า ในธรรมชาติ
PHA (Polyhydroxyalkanoates)	ชีวภาพจาก จุลินทรีย์	แบคทีเรียผลิต จากน้ำตาล/ ไขมัน	ย่อยสลายได้ใน ทะเลและดิน	บรรจุภัณฑ์, การแพทย์, เกษตรกรรม	ต้นทุนการผลิต สูง
PBS (Polybutylene Succinate)	สังเคราะห์จาก ปิโตรเลียม/ ชีวมวล	ซักซินิกแอซิด + บิวทาน์ไดออล	ความเหนียวดี ย่อยสลายได้ในดิน	ฟิล์มคลุมดิน, ถุงพลาสติก, บรรจุภัณฑ์	ย่อยสลายช้า กว่า PLA
PCL (Polycaprolactone)	สังเคราะห์จาก ปิโตรเลียม	อนุพันธ์จาก ปิโตรเคมี	ยืดหยุ่น ย่อยสลายใน ร่างกายได้	การแพทย์, ระบบส่งยา, วัสดุฝังใน	ย่อยสลายช้า มากใน ธรรมชาติ

1.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่ออัตราและกลไกของการย่อยสลาย ทั้งในระดับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เอง และสภาพแวดล้อมภายนอกที่เอื้อต่อการย่อยสลาย ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ได้แก่ ปัจจัยภายใน (Intrinsic Factors) และปัจจัยภายนอก (Extrinsic Factors) (Emadian et al., 2017; Pathak & Navneet, 2017)

1.4.1 ปัจจัยภายใน (Intrinsic Factors)

ปัจจัยภายในหมายถึงลักษณะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพอลิเมอร์เองที่ส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลาย ปัจจัยสำคัญประกอบด้วย

1.4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ (Chemical Structure) ชนิดของหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีในสายโซ่พอลิเมอร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความสามารถในการย่อยสลาย ได้แก่

พอลิเมอร์ที่มีพันธะเอสเทอร์ (-COO-) หรือพันธะเอไมด์ (-CONH-) พอลิเมอร์ที่มีพันธะเอสเทอร์ (-COO-) เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์จำพวกเอสเทอเรส (Esterase), ไลเปส (Lipase) และคิวทิเนส (Cutinase) ส่วนพอลิเมอร์ที่มีพันธะเอไมด์ (-CONH-) เช่น โปรตีนธรรมชาติ (คอลลาเจน เจลาติน) และพอลิเอไมด์บางชนิด จะถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ทั้งนี้ PLA และ PCL เป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีเฉพาะพันธะเอสเทอร์ในสายโซ่หลักเท่านั้น ไม่มีพันธะเอไมด์ (Tokiwa et al., 2009; Woodruff & Hutmacher, 2010)

1.4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Molecular Weight) น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลายโดยตรง พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (สายโซ่สั้นกว่า) จะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าและเร็วกว่า เนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าถึงปลายสายโซ่และตำแหน่งที่อ่อนแอในสายโซ่ได้ง่ายกว่า (Tokiwa et al., 2009) ในทางตรงกันข้าม พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักจะมีโครงสร้างที่แน่นหนาและมีความทนทานต่อกระบวนการย่อยสลายมากกว่า

1.4.1.3 ความเป็นผลึก (Crystallinity) ระดับของความเป็นผลึกในพอลิเมอร์ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายดังนี้

ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous regions): เป็นบริเวณที่สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีพื้นที่ว่างมากกว่า ทำให้โมเลกุลของน้ำและเอนไซม์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่า ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐานย่อยสลายได้เร็วกว่า

ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline regions): เป็นบริเวณที่สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของน้ำและเอนไซม์เข้าถึงและทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น ดังนั้น พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) ซึ่งมีส่วนที่เป็นผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์อื่น ๆ จึงมีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าในบางสภาวะ (Tsuiji, 2016)

1.4.1.4 ความชอบน้ำ (Hydrophilicity) พอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จะย่อยสลายได้ง่ายกว่า เนื่องจากน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการทำงานของจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) มีความชอบน้ำมากกว่าพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) จึงย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่า (Albertsson & Hakkarainen, 2017)

1.4.2 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic Factors)

ปัจจัยภายนอกคือปัจจัยทางกายภาพและเคมีในสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออัตราและกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ ได้แก่

1.4.2.1 อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ

อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยทั่วไปจะเพิ่มอัตราการย่อยสลาย เนื่องจากทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์มีการเคลื่อนที่สูงขึ้น และเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับปฏิกิริยาเคมี รวมถึงเร่งกิจกรรมของเอนไซม์และจุลินทรีย์ (Emadian et al., 2017)

ตัวอย่าง การย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA อุณหภูมิในระยะ thermophilic ของการหมักปุ๋ยอุตสาหกรรมอยู่ที่ประมาณ 55–60°C ตามมาตรฐาน ASTM D6400 มีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าในสภาวะธรรมชาติที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามาก (Emadian et al., 2017)

1.4.2.2 ความชื้น (Moisture) ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสและการเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลาย

สภาวะที่มีความชื้นสูง พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายด้วยน้ำ เช่น PLA และ PCL จะย่อยสลายได้ดีกว่าเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีน้ำเพียงพอ นอกจากนี้ น้ำยังเป็นตัวกลางสำคัญสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์

สภาวะแห้ง การย่อยสลายของพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นช้าลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากขาดองค์ประกอบสำคัญในการทำปฏิกิริยาและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Pathak & Navneet, 2017)

1.4.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสิ่งแวดล้อมส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพพอลิเมอร์และกิจกรรมของเอนไซม์และจุลินทรีย์

สภาวะที่เป็นด่าง (Alkaline) โดยพอลิเมอร์ที่มีพันธะเอสเทอร์ เช่น PLA จะมีอัตราการย่อยสลายเร็วขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบเบสเร่ง (base-catalyzed hydrolysis) สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย

สภาวะที่เป็นกรด (Acidic) พอลิเมอร์บางชนิดที่มีพันธะเอไมด์ อาจมีอัตราการย่อยสลายที่ดีขึ้นในสภาวะที่เป็นกรด การเลือก pH ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการย่อยสลายที่รวดเร็วและสมบูรณ์

1.4.2.4 จุลินทรีย์ (Microorganisms) จุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่ายบางชนิด มีบทบาทสำคัญและเป็นหัวใจหลักในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์

กลไกการทำงาน โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะหลั่งเอนไซม์ภายนอกเซลล์ (extracellular enzymes) ที่เฉพาะเจาะจงออกมาเพื่อย่อยสลายพันธะเคมีในพอลิเมอร์ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจนสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ หลังจากนั้น โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกย่อยสลายต่อในกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต

ตัวอย่าง เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) สามารถย่อยสลายได้ดีในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติเนื่องจากแบคทีเรียหลายชนิดสามารถผลิตเอนไซม์ PHA depolymerase ที่จำเพาะเจาะจงต่อ PHA ได้ (Pathak & Navneet, 2017)

ปัจจัยเสริม เช่นการมีแหล่งจุลินทรีย์ที่หลากหลายและปริมาณที่เหมาะสม รวมถึงการมีสารอาหารที่จำเป็นอื่น ๆ (เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส) จะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

อาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมักมีโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อการย่อยสลาย เช่น เอสเทอร์ (Ester), เอไมด์ (Amide), อีเทอร์ (Ether), หรือ ยูรีเทน (Urethane) ที่สามารถถูกไฮโดรไลซิสโดยน้ำ หรือถูกโจมตีโดยเอนไซม์ ทำให้พันธะในสายโซ่หลักขาดออก แล้วเกิดเป็นโมเลกุลเล็กลง

ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สำคัญและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง เช่น

Polylactic acid (PLA) จะมีหมู่เอสเทอร์ ($-COO-$) ซึ่งเป็นพันธะที่สามารถสลายตัวผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีเอนไซม์หรือ pH ที่เหมาะสม

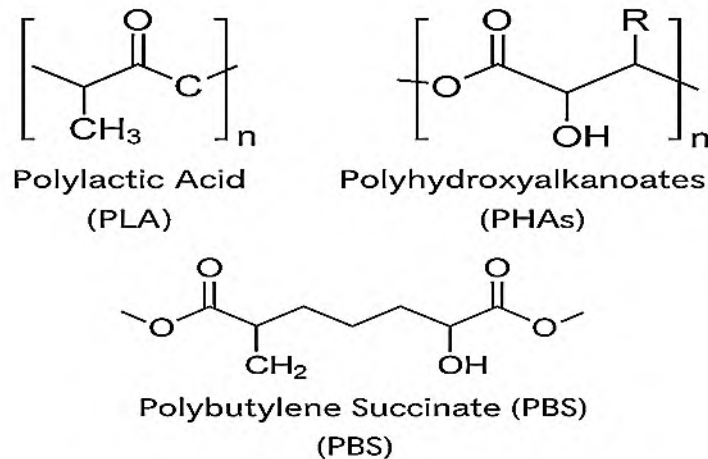
Polyhydroxyalkanoates (PHAs) เป็นพอลิเอสเทอร์ ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ มีพันธะเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ PHA Depolymerase ทำให้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีในธรรมชาติ

Polybutylene Succinate (PBS) เป็นพอลิเอสเทอร์ ที่ผลิตจาก Succinic Acid และ Butanediol มีหมู่เอสเทอร์ทำให้อย่อยสลายได้ด้วยกลไกไฮโดรไลซิสและเอนไซม์ในดิน

และสรุปกลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้และหมู่ฟังก์ชันได้ดังตารางที่ 1.3 รวมถึงสามารถแสดงตัวอย่างโครงสร้างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ บางชนิด ดังรูปที่ 1.1

ตารางที่ 1.3 หมู่ฟังก์ชันและกลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด

Functional Group (หมู่ฟังก์ชัน)	Chemical Structure (โครงสร้างทางเคมี)	Mechanism of Degradation (กลไกการย่อยสลาย)
Ester	-COO-	Hydrolysis (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส), Enzymatic Attack (การโจมตีด้วยเอนไซม์จำพวกเอสเทอเรส /ไลเปส)
Amide	-CONH-	Hydrolysis (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส), Protease Enzyme (การย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส)
Ether	-O-	Oxidative Cleavage (การแตกตัวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน)
Urethane	-NHCOO-	Hydrolysis (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส), Enzymatic Attack (การโจมตีด้วยเอนไซม์)
Glycosidic ใน Polysaccharides)	-O- (ระหว่างหน่วยน้ำตาล)	Hydrolysis (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส), Enzymatic Attack (การย่อยด้วยเอนไซม์ไกลโคซิเดส/อะไมเลส/เซลลูเลส)



รูปที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของ Poly(lactic acid) (PLA), Poly(hydroxyalkanoates) (PHAs) และ Poly(butylene succinate) (PBS) ซึ่งเป็นตัวอย่างของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์

1.5 สมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การทำความเข้าใจสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยหลัก ๆ แล้วแบ่งออกเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ

1.5.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกล หมายถึง ความสามารถของพอลิเมอร์ในการรับแรง การเปลี่ยนรูป ความแข็งแรง และความยืดหยุ่นเมื่อได้รับแรงกระทำ สมบัติทางกลที่สำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่มักใช้ในการพิจารณา ได้แก่

ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนที่จะแตกหัก

ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) คือ ค่าร้อยละของการยืดตัวของวัสดุเมื่อแตกหัก บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นหรือความเหนียว

ค่าความแข็งแรงต่อแรงโค้งงอ (Flexural Strength) คือ ค่าความสามารถของวัสดุในการทนทานต่อการโค้งงอ

ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Elastic Young's Modulus/Young's Modulus) จะบ่งบอกถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปเชิงยืดหยุ่นของวัสดุ

ค่าความแข็ง (Hardness) คือค่าความต้านทานของวัสดุต่อการกด หรือ การเจาะ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ โครงสร้างโมเลกุล, ระดับความเป็นผลึก (Crystallinity), อุณหภูมิของกระบวนการขึ้นรูป, และการเติมสารเติมแต่ง (Fillers) เช่น เส้นใยธรรมชาติ หรือสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

1.5.2 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties)

สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีผลโดยตรงต่อกระบวนการแปรรูป (เช่น การฉีดขึ้นรูป, การอัดรีด) และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน สมบัติที่สำคัญได้แก่

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์ถึงผลึกเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นของเหลวหนืด

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) คืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์อสัณฐาน เปลี่ยนจากสถานะแข็งและเปราะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่นคล้ายยาง

อุณหภูมิการสลายตัวเชิงความร้อน (Thermal Decomposition Temperature, T_d) คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มสลายตัวทางเคมีเนื่องจากความร้อน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดอุณหภูมิการแปรรูปที่ปลอดภัย

ปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์, ระดับความเป็นผลึกในพอลิเมอร์, และความหนาแน่นของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ตารางที่ 1.4 แสดงตัวอย่างอุณหภูมิดังกล่าวของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้บางชนิด

ตาราง 1.4 ค่าสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด

พอลิเมอร์	Tm (°C)	Tg (°C)
PLA	170-180	55-65
PHB	170-180	0 ถึง 5
PBS	112-115	-32
PCL	58-63	-60 ถึง -65

ที่มา: Avérous, L. (2008). Shah, A.A., et al. (2008). Woodruff, M.A., & Hutmacher, D.W. (2010).

5.3 สมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability)

สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ ความสามารถของพอลิเมอร์ในการถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือเอนไซม์ในสิ่งแวดล้อม กลไกหลักของการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 กลไกหลักที่ทำงานร่วมกัน

การย่อยสลายทางเคมี (Chemical Degradation) เป็นการแตกตัวของพันธะเคมีในพอลิเมอร์ด้วยปัจจัยทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological Degradation) เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย, เชื้อรา) ที่ผลิตเอนไซม์มาย่อยสลายโครงสร้างพอลิเมอร์โดยตรง

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (เช่น พันธะเอสเทอร์, เอไมด์), อุณหภูมิ, ความชื้น, ระดับความเป็นผลึก (Crystallinity), และสภาพแวดล้อมเฉพาะที่วัสดุถูกทิ้ง เช่น ดิน, น้ำทะเล, หรือในร่างกายมนุษย์ ตารางที่ 1.5 แสดงตัวอย่างระยะเวลาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์บางชนิดในสถานะที่แตกต่างกัน

ตาราง 1.5 ระยะเวลาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิด

พอลิเมอร์	ระยะเวลาย่อยสลาย (ประมาณ)	สภาวะย่อยสลาย
PLA	6 เดือน - 2 ปี	Composting (ปุ๋ยหมักอุตสาหกรรม)
PHA	< 6 เดือน	Soil (ดิน), Marine (ทะเล)
PBS	1-2 ปี	Soil (ดิน)

ที่มา: ที่มา: Avérous, L. (2008). Shah, A.A., et al. (2008). Woodruff, M.A., & Hutmacher, D.W. (2010).

1.6 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามกลไกการย่อยสลาย

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถจำแนกกลไกการย่อยสลายออกได้เป็น 5 ประเภทหลัก ซึ่งมักเกิดขึ้นพร้อมกันหรือเป็นลำดับขั้นตอน ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะแวดล้อม ได้แก่ การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation), การย่อยสลายเชิงกล (Mechanical Degradation), การย่อยสลายผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidative Degradation), การย่อยสลายผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation), และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) (Shah et al, 2008; Tokiwa et al., 2009) ดังมีรายละเอียดพอสังเขปในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

1.6.1 การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากแสงแดด โดยมีหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ไวต่อรังสี เช่น หมู่คีโตน (Ketone Group) หรือสารไวแสง (photo-initiators) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับพลังงาน UV ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ซึ่งนำไปสู่การแตกตัวของพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scission) และการย่อยสลายต่อไป (Emadian et al., 2017) อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายด้วยแสงมักทำให้เกิดชิ้นส่วนพอลิเมอร์ขนาดเล็ก (fragmentation) มากกว่าการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์

1.6.2 การย่อยสลายเชิงกล (Mechanical Degradation)

เป็นการทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ผ่านแรงกระทำทางกายภาพและกลไก เช่น การเสียดสี (abrasion), การขีด (scratching), การขัด (grinding), หรือการลดขนาดโดยกระบวนการผลิต แม้จะทำให้ขนาดลดลง แต่ไม่ได้หมายถึงการย่อยสลายทางเคมีหรือชีวภาพที่สมบูรณ์ และอาจนำไปสู่การเกิดไมโครพลาสติก (Albertsson & Karlsson, 2020)

1.6.3 การย่อยสลายผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

เป็นกระบวนการที่ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ในสภาวะแวดล้อม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ความร้อน, แสงยูวี, หรือสารเติมแต่งโลหะ (เช่น ในกรณีของ oxo-biodegradable plastics) ช่วยให้เกิดอนุมูลอิสระ และส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์แตกหักเร็วขึ้น (Geyer et al., 2017) กระบวนการนี้มักเป็นขั้นตอนเริ่มต้นที่ทำให้พอลิเมอร์แตกตัวเป็นชิ้นเล็ก ๆ และเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (เช่น หมู่คาร์บอนิล) ซึ่งอาจทำให้พอลิเมอร์ที่แตกตัวไวต่อการย่อยสลายทางชีวภาพมากขึ้น

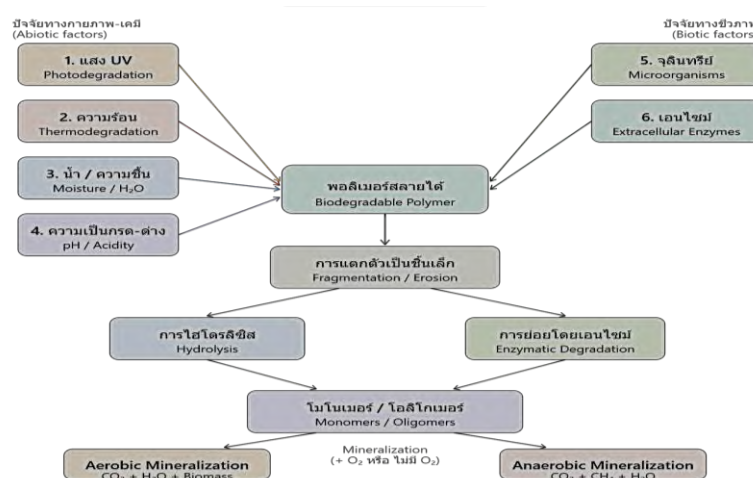
1.6.4 การย่อยสลายผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)

เป็นกระบวนการทางเคมีที่น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อการไฮโดรไลซิส เช่น พันธะเอสเทอร์ (-COO-) หรือพันธะเอไมด์ (-CONH-) ที่มีอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง (Makadia & Siegel, 2011) กระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบมีเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) และไม่มีเอนไซม์ (non-enzymatic hydrolysis) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพอลิเมอร์และสภาวะแวดล้อม (เช่น pH, อุณหภูมิ)

1.6.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ (แบคทีเรีย, เชื้อรา) สังเคราะห์และหลั่งเอนไซม์มาย่อยสลายโครงสร้างพอลิเมอร์โดยตรง จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), น้ำ (H_2O), แร่ธาตุ, และมวลชีวภาพ (Biomass) (Shah et al., 2008) กระบวนการนี้ถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ทำให้พอลิเมอร์สลายตัวอย่างสมบูรณ์และกลับคืนสู่ระบบนิเวศ โดยเป็นกลไกที่สำคัญที่สุดสำหรับพอลิเมอร์ที่จัดว่าเป็น "ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ" อย่างแท้จริง

นอกจากนี้ พลาสติกที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics: EDP) และพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) ยังคงได้รับความนิยมในการวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยลดปัญหาขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Averous, 2008) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างวงจรการย่อยสลายตามธรรมชาติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การย่อยสลายพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยปัจจัยต่าง ๆ

ที่มา: ดัดแปลงจากแนวคิดของ Payanthoth et al.(2024)

1.7 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในด้านต่าง ๆ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลากหลายภาคส่วน ทั้งในอุตสาหกรรม, การเกษตร, การแพทย์, และการจัดการสิ่งแวดล้อม ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการเป็นวัสดุทางเลือกเพื่อความยั่งยืน

1.7.1 การใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ (Packaging Industry)

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์เป็นหนึ่งในภาคส่วนหลักที่มีการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมากที่สุด เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกและส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

ประเภทผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ถุงพลาสติก, ภาชนะบรรจุอาหารใช้แล้วทิ้ง (จาน, ชาม, แก้ว, ซ้อนส้อม), फिल्मห่ออาหาร (cling films), บรรจุภัณฑ์แบบแข็งสำหรับสินค้าอุปโภคบริโภค

วัสดุที่นิยม

PLA (Polylactic Acid): นิยมใช้สำหรับภาชนะบรรจุอาหารใส, ถ้วย, และฟิล์มห่ออาหาร เนื่องจากมีความใสและแข็งแรง งานวิจัยล่าสุดกำลังพัฒนาฟิล์ม PLA ที่เสริมด้วยสารต้านจุลชีพจากธรรมชาติเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร (Malinowski et al., 2022)

PBAT (Polybutylene Adipate Terephthalate) ใช้ในการผลิตถุงพลาสติกและฟิล์มห่ออาหารที่ต้องการความยืดหยุ่นและทนทาน เนื่องจากมีสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน (PE) (Roy et al., 2020)

PHA (Polyhydroxyalkanoates) ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความทนทานต่อไขมันและน้ำ เช่น บรรจุภัณฑ์นมหรือของเหลวบางชนิด สามารถย่อยสลายได้ในดินและทะเล (Srisa et al., 2023)

Starch-based polymers มักใช้ในรูปของวัสดุผสม (Blends) หรือโฟมบรรจุภัณฑ์ เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย

ข้อดี คือลดการสะสมของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม, สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะธรรมชาติหรือในกระบวนการหมักในอุตสาหกรรม (Song et al., 2009)

ข้อจำกัด คือความทนทานและอัตราการย่อยสลายของวัสดุเหล่านี้อาจแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมการใช้งาน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในบางกรณีที่ต้องการอายุการใช้งานที่ยาวนานหรือสมบัติที่เฉพาะเจาะจง

(Siracusa et al., 2008) งานวิจัยจึงมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติกัน (Barrier Properties) และความคงทนของบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ (Ramesh et al., 2021)

1.7.2 การใช้งานทางการแพทย์และวัสดุทางชีวการแพทย์ (Medical and Biomedical Applications)

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ **ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility)** และความสามารถในการย่อยสลายได้ในร่างกายโดยไม่ทิ้งสารพิษตกค้าง ทำให้ไม่จำเป็นต้องผ่าตัดนำวัสดุออกหลังการใช้งาน

ไหมเย็บแผลที่สามารถดูดซึมได้ทางชีวภาพ (Absorbable Surgical Sutures) เป็นการประยุกต์ใช้ที่แพร่หลายที่สุด พอลิเมอร์เช่น Poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA), Polycaprolactone (PCL), และ Poly(glycolic acid) (PGA) ถูกใช้ในการผลิตไหมเย็บแผลที่ย่อยสลายตัวทางชีวภาพได้ งานวิจัยในปัจจุบันยังคงพัฒนาไหมเย็บแผลให้มีคุณสมบัติเฉพาะทาง เช่น การปลดปล่อยสารต้านการอักเสบ เป็นต้น (Gopinath et al., 2021)

ระบบนำส่งยา (Drug Delivery Systems) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ใช้เป็นพาหะในการห่อหุ้มยาในรูปของอนุภาคนาโน (Nanoparticles), ไมโครสเฟียร์ (Microspheres), หรือเม็ดฝังใต้ผิวหนัง เพื่อควบคุมการปลดปล่อยยาในอัตราที่คงที่หรือปลดปล่อยยาเฉพาะที่ในร่างกาย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยาและลดผลข้างเคียง (Hussain et al., 2022) ตัวอย่างเช่น PLGA ถูกใช้ในการนำส่งยาต้านมะเร็งหรือวัคซีน (Wang et al., 2021)

วัสดุฝังในร่างกาย (Implants) และวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) พอลิเมอร์เช่น PLA, PCL, และ PLGA ถูกใช้ในการผลิตสกรู, หมุด, แผ่นยึดกระดูกที่ย่อยสลายได้สำหรับศัลยกรรมกระดูก หรือใช้เป็นโครงสร้างรองรับเซลล์ (scaffolds) สำหรับการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อใหม่ เมื่อเนื้อเยื่อใหม่พัฒนาขึ้น โครงสร้างพอลิเมอร์มีการย่อยสลายทางชีวภาพ (Pan et al., 2023) งานวิจัยที่ทันสมัยกำลังเตรียมวัสดุจากการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) เพื่อสร้างวัสดุฝังในที่เหมาะสมกับกายวิภาคของแต่ละบุคคล (Sun et al., 2022)

1.7.3 การใช้งานในอุตสาหกรรมเกษตรกรรม (Agricultural Applications)

ในภาคเกษตรกรรม พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณขยะพลาสติกในแปลงเกษตร และเพิ่มประสิทธิภาพในการเพาะปลูก

ฟิล์มคลุมดินย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Mulch Films) ใช้สำหรับคลุมหน้าดิน เพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของวัชพืช, รักษาความชื้นในดิน, และควบคุมอุณหภูมิดิน หลังจากการใช้งาน วัสดุเหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในดินโดยไม่ต้องเก็บกลับ ซึ่งช่วยลดแรงงานและลดการสะสมขยะพลาสติก (Xu et al., 2021) วัสดุที่นิยมคือ PBAT, PLA blends และ Starch-based polymers

ภาชนะเพาะกล้า (Biodegradable Seedling Pots) ผลิตจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น แป้ง, เซลลูโลส หรือ PHA สามารถปลูกลงดินไปพร้อมกับต้นกล้าได้โดยตรง ช่วยลดการทำลายรากจากการย้ายปลูกและวัสดุจะย่อยสลายเป็นปุ๋ยบำรุงดิน (Zhao et al., 2021)

แคปซูลควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยและสารเคมีทางการเกษตร (Controlled-Release Fertilizers and Agrochemicals) คือการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพห่อหุ้มปุ๋ย, สารกำจัดศัตรูพืช, หรือสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารเหล่านั้นอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สาร ลดการสูญเสียจากการชะล้าง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Praveen et al., 2020)

1.7.4 การใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Environmental and Energy Applications)

นอกเหนือจากการลดขยะพลาสติกโดยตรง พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพยังมีบทบาทในด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน เพื่อสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาที่ยั่งยืน

ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถใช้เป็นวัสดุชีวภาพสำหรับการกรอง (Filter Media) หรือเป็นโครงสร้างรองรับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษ

การควบคุมการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emission Control) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำปุ๋ยหมักหรือการหมักไร้อากาศของวัสดุพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน (biogas) ที่สามารถนำไปผลิตพลังงานได้ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการที่ควบคุม

ระบบผลิตพลังงานชีวมวล (Biomass Energy Production) โดยวัสดุย่อยสลายได้บางชนิดที่มาจากชีวมวล สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพได้โดยตรง

วัสดุสำหรับสิ่งแวดล้อม (Environmental Remediation) มีงานวิจัยกำลังสำรวจการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในการห่อหุ้มสารบำบัด (เช่น สารดูดซับ, จุลินทรีย์) เพื่อบำบัดมลพิษในดินหรือน้ำ (Emadian et al., 2017)

ดังนั้น พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายในภาคส่วนต่าง ๆ โดยมีจุดเด่นที่สามารถลดปัญหาขยะพลาสติกและเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์, การแพทย์, เกษตรกรรม, และด้านสิ่งแวดล้อม และจะกล่าวถึงรายละเอียดพอสังเขปเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานในบทอื่น ๆ ในหนังสือต่อไป อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและอัตราการย่อยสลายในแต่ละประเภทของพอลิเมอร์ยังเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบในการนำไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

1.8 โอกาสและความท้าทายในอนาคต รวมถึงราคาและการผลิตในเชิงการค้าของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เนื่องจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นกลุ่มวัสดุที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในบริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียน การลดการพึ่งพาทรัพยากรฟอสซิล และการจัดการปัญหาขยะพลาสติกที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม คำว่า “ย่อยสลายได้” มิได้หมายความว่าวัสดุทุกชนิดจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในทุกสภาพแวดล้อม หากแต่การย่อยสลายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก น้ำหนักโมเลกุล สารเติมแต่ง ความหนาของผลิตภัณฑ์ และเงื่อนไขปลายทาง เช่น การทำปุ๋ยหมักอุตสาหกรรม การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดิน น้ำจืด หรือน้ำทะเล ดังนั้น การประเมินพอลิเมอร์กลุ่มนี้จึงต้องพิจารณาตลอดห่วงโซ่คุณค่า ตั้งแต่วัตถุดิบ กระบวนการผลิต คุณสมบัติการใช้งาน ราคา การจัดการหลังใช้ ไปจนถึงมาตรฐานและนโยบายกำกับดูแล (Rosenboom et al., 2022; Börner & Zinn, 2024) ในเชิงวิชาการ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพไม่ได้เป็นการแก้ปัญหาทั้งหมดของปัญหาพลาสติก แต่ควรเป็นวัสดุเฉพาะหน้าที่ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่มีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุ การรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม หรือ การรีไซเคิลเชิงกลทำได้ยาก

1.8.1 ราคาและการผลิตในเชิงการค้าในเชิงพาณิชย์ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญในตลาดปัจจุบัน ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด หรือ PLA, พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต หรือ PHA, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต หรือ PBAT และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หรือ PBS โดยแต่ละชนิดมีเทคโนโลยีการผลิตและระดับความพร้อมเชิงอุตสาหกรรมแตกต่างกัน PLA ผลิตจากกรดแลกติกที่ได้จากการหมักน้ำตาลหรือแป้ง แล้วนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ส่วน PHA ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่สะสมพอลิเมอร์ภายในเซลล์ และต้องมีการเพาะเลี้ยงและทำให้บริสุทธิ์หลังการหมัก ขณะที่ PBAT และ PBS ผลิตผ่านกระบวนการสังเคราะห์เคมีจากมอนอเมอร์ที่อาจมีแหล่งกำเนิดชีวภาพหรือฟอสซิลผสมกัน (Börner & Zinn, 2024) โดยข้อมูลตลาดล่าสุดสะท้อนว่ากำลังการผลิตไบโอพลาสติกทั่วโลกยังมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับพลาสติกทั้งหมด โดย European Bioplastics รายงานว่าไบโอพลาสติกคิดเป็นเพียงประมาณครึ่งเปอร์เซ็นต์ของพลาสติกเกือบ 414 ล้านตันที่ผลิตทั่วโลกต่อปี แต่กำลังการผลิตคาดว่าจะเพิ่มจากประมาณ 2.47 ล้านตันในปี 2024 เป็นประมาณ 5.73 ล้านตันในปี 2029 ทั้งนี้

ในปี 2024 การผลิตจริงอยู่ที่ราว 1.44 ล้านตัน หรือประมาณ 58% ของกำลังการผลิตติดตั้ง และบรรจุภัณฑ์ยังเป็นกลุ่มใช้งานหลัก คิดเป็นประมาณ 45% หรือ 1.12 ล้านตัน ของตลาดไบโอพลาสติก (European Bioplastics, 2024a, 2024b)

1.8.2 ประเด็นเชิงพาณิชย์ สามารถเปรียบเทียบประเด็นเชิงพาณิชย์ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับสถานะปัจจุบันและนัยสำคัญ ได้ดังตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.6 ประเด็นเชิงพาณิชย์ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กับ สถานะปัจจุบันและนัยสำคัญ

ประเด็นเชิงพาณิชย์	สถานะปัจจุบันและนัยสำคัญ
ขนาดตลาดเมื่อเทียบกับพลาสติกทั้งหมด	ไบโอพลาสติกยังมีส่วนแบ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับพลาสติกฟอสซิล จึงยังไม่เกิดผลของการประหยัดต่อขนาดเทียบเท่าอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
กำลังการผลิต	กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 2.47 ล้านตันในปี 2024 ไปสู่ 5.73 ล้านตันในปี 2029 แต่การใช้กำลังการผลิตจริงยังต่ำกว่าศักยภาพติดตั้ง
ตลาดหลัก	บรรจุภัณฑ์เป็นตลาดหลัก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับปัญหาขยะหลังการบริโภคและความต้องการวัสดุที่สามารถจัดการปลายทางได้ดีขึ้น
พอลิเมอร์สำคัญ	PLA มีปริมาณตลาดสูงและการใช้งานครอบคลุม ขณะที่ PHA มีจุดเด่นด้านการย่อยสลายในหลายสภาพแวดล้อม แต่ต้นทุนยังสูง
ข้อจำกัดทางราคา	ต้นทุนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ยังสูงกว่าพลาสติกทั่วไปหลายเท่า โดยเฉพาะ PHA ซึ่งยังมีภาระต้นทุนจากการหมักและการแยกคืนผลิตภัณฑ์

ประเด็นเรื่องราคายังคงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการขยายตลาดสู่การผลิตมวลรวม งานวิเคราะห์ของ Börner และ Zinn (2024) ระบุว่าต้นทุนการผลิตของพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในปัจจุบันอาจสูงกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไปประมาณ 2–10 เท่า โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องใช้การหมักและกระบวนการ downstream processing ที่ซับซ้อน สำหรับ PLA มีรายงานว่ากำลังการผลิตเพิ่มจากประมาณ 70,000 ตันต่อปีในปี 2003 เป็นประมาณ 459,000 ตันต่อปีในปี 2022 และมีราคาเฉลี่ยประมาณ 1.6–2.3 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ขณะที่พอลิ

เอทิลีนหรือ PE ซึ่งเป็นพลาสติกทั่วไปมีราคาตกลงอย่างมากตามผลของการเรียนรู้และการประหยัดต่อขนาดจนอยู่ราวระดับ 1 ยูโรต่อกิโลกรัม ในช่วงปี 2020 (Börner & Zinn, 2024) สำหรับ PHA ความท้าทายด้านราคายังเด่นชัดกว่า PLA เนื่องจากการผลิตโดยจุลินทรีย์มักต้องการแหล่งคาร์บอนที่มีต้นทุนสูง การควบคุมสภาวะปลอดเชื้อ และการแยกคีนพอลิเมอร์จากเซลล์ งานของ Pozo-Morales et al. (2025) ระบุว่าราคา PHA อาจอยู่ประมาณ 4–6 ยูโรต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ปิโตรเลียมหลายเท่า แม้กระนั้น การใช้วัตถุดิบราคาต่ำ เช่น กากตะกอนน้ำเสีย น้ำเสียอุตสาหกรรม ของเสียอินทรีย์ หรือวัตถุดิบรุ่นที่สาม อาจช่วยลดต้นทุนและสร้างความสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ หากสามารถควบคุมคุณภาพพอลิเมอร์และความสม่ำเสมอของกระบวนการได้ (Pozo-Morales et al., 2025; Börner & Zinn, 2024)

1.8.3 โอกาสในอนาคต โอกาสสำคัญประการแรกคือการเติบโตของตลาดที่ขับเคลื่อนโดยแรงกดดันด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายสาธารณะ การเพิ่มขึ้นของความตระหนักเรื่องไมโครพลาสติก การปล่อยแก๊สเรือนกระจก และขยะบรรจุภัณฑ์ ทำให้ผู้ผลิต ผู้ค้าปลีก และผู้กำหนดนโยบายเริ่มให้ความสำคัญกับวัสดุที่มีเส้นทางปลายทางชัดเจนกว่าเดิม กฎ Packaging and Packaging Waste Regulation หรือ PPWR ของสหภาพยุโรปมุ่งลดขยะบรรจุภัณฑ์ ส่งเสริมการออกแบบที่ใช้ทรัพยากรน้อยลง เพิ่มการรีไซเคิล และควบคุมสารที่อาจก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ไมโครพลาสติก นโยบายลักษณะนี้มีแนวโน้มเปิดพื้นที่ให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่การรีไซเคิลเชิงกลทำได้ยาก หรือมีการปนเปื้อนอาหารสูง เช่น ถุงชา แคปซูลกาแฟ ผลไม้ ถังเก็บขยะอินทรีย์ และบรรจุภัณฑ์อาหารบางประเภท (European Commission, n.d.; Börner & Zinn, 2024) โอกาสประการที่สองคือการใช้วัตถุดิบทางเลือกและของเสียเป็น feedstock การผลิต PLA, PHA, PBAT และ PBS ในระดับอุตสาหกรรมจำนวนมากยังพึ่งพาน้ำตาล แป้ง หรือน้ำมันจากพืช ซึ่งอาจเกิดข้อวิจารณ์ด้านการแข่งขันกับอาหาร การใช้ที่ดิน และผลกระทบทางเกษตร อย่างไรก็ตาม งานวิจัยระยะใหม่ให้ความสำคัญกับวัตถุดิบที่ไม่แข่งขันกับอาหาร เช่น ของเสียอินทรีย์ น้ำเสียอุตสาหกรรม แก๊สมีเทน ชีวมวลสาหร่าย และคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการอุตสาหกรรม การเปลี่ยนวัตถุดิบเหล่านี้เป็นมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์สามารถลดต้นทุนและลดภาระสิ่งแวดล้อมได้ หากมีระบบโลจิสติกส์ การปรับสภาพวัตถุดิบ และการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสม (Rosenboom et al., 2022; Börner & Zinn, 2024)

นอกจากนี้ ในกรณีศึกษาจากประเทศไทยยังชี้ให้เห็นโอกาสเชิงชีวเศรษฐกิจในภูมิภาคเขตร้อน งานของ Chalermthai et al. (2023) ประเมินความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลาสติกชีวภาพร่วมกับผลิตภัณฑ์เสริมอาหารจากสไปรูลินาในระดับที่สัมพันธ์กับความต้องการพลาสติกของไทย ผลการศึกษาระบุว่าระบบการผลิตแบบร่วมผลิตภัณฑ์อาจให้ระยะเวลาคืนทุนต่ำและผลตอบแทนจากการลงทุนสูงภายใต้สมมติฐานที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่ไวต่อความคุ้มค่ามากที่สุดส่วนชีวมวลที่จัดสรรให้ผลิตภัณฑ์อาหารเทียบกับพลาสติก

ชีวภาพ และราคาขายของพลาสติกชีวภาพ กรณีนี้สะท้อนว่าความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้อาจไม่เกิดจากการผลิตวัสดุเดียวกัน แต่เกิดจาก โมเดลไบโอรีไฟเนอรี ที่กระจายรายได้จากหลายผลิตภัณฑ์ (Chalermthai et al., 2023) โอกาสอีกประการหนึ่งคือการพัฒนาสมบัติผ่านการผสมพอลิเมอร์ การคอมพาวนด์ และการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้เหมาะกับการใช้งานจริง PLA มีความแข็งแรงและใสแต่เปราะ ขณะที่ PBAT มีความยืดหยุ่นและเหมาะกับฟิล์ม ส่วน PHA มีศักยภาพด้านการย่อยสลายในสภาพแวดล้อมหลากหลายแต่ยังมีข้อจำกัดด้านราคาและการแปรรูป การใช้ blend เช่น PLA/PBAT หรือการปรับสูตรด้วยสารเติมแต่งที่ผ่านการรับรองจึงเป็นแนวทางสำคัญในการสร้างสมดุลระหว่างสมบัติเชิงกล ความสามารถในการแปรรูป ต้นทุน และการย่อยสลาย (Börner & Zinn, 2024)

1.8.4 ความท้าทายในอนาคต ความท้าทายที่สำคัญที่สุดคือการทำให้วัสดุมีสมบัติเหมาะสมกับหน้าที่มากกว่าการพยายามเลียนแบบพลาสติกฟอสซิลทุกด้าน ผู้ใช้ในอุตสาหกรรมมักคาดหวังให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีราคา ความทนทาน ความเสถียร การขึ้นรูป และ สมบัติกันไอน้ำหรือแก๊สเทียบเท่าพลาสติกเดิม พร้อมทั้งย่อยสลายได้เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน ซึ่งเป็นความคาดหวังที่ขัดแย้งกันในเชิงวัสดุศาสตร์ เพราะโครงสร้างที่ทำให้วัสดุเสถียรต่อความร้อน น้ำ หรือแรงกล อาจทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์เข้าถึงพันธะพอลิเมอร์ได้ยากขึ้น ดังนั้น การออกแบบวัสดุจำเป็นต้องเริ่มจากข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์และเส้นทางปลายทางที่ชัดเจน (Börner & Zinn, 2024) ความท้าทายด้านต้นทุนยังคงมีนัยสำคัญ การลดราคาจำเป็นต้องอาศัยการขยายกำลังผลิต การเพิ่มประสิทธิภาพของสายพันธุ์จุลินทรีย์ การเพิ่ม productivity ของการหมัก การลดต้นทุน downstream processing และการใช้วัตถุดิบราคาต่ำอย่างสม่ำเสมอ Börner และ Zinn (2024) ชี้ว่ากระบวนการแยกคืน PHA อาจมีสัดส่วนต้นทุนสูงมาก และควรลดบทบาทของ downstream processing จากระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 50% ของต้นทุนการผลิตลงสู่ช่วงประมาณ 20–40% เพื่อเพิ่มความสามารถแข่งขัน นอกจากนี้ การผลิตจากของเสียยังเผชิญความผันผวนขององค์ประกอบวัตถุดิบตามฤดูกาลและภูมิภาค ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพพอลิเมอร์และความเชื่อมั่นของลูกค้าอุตสาหกรรม อีกความท้าทายหนึ่งคือการจัดการปลายทางและมาตรฐาน การที่วัสดุสามารถย่อยสลายได้ภายใต้เงื่อนไขหนึ่งไม่ได้หมายความว่าเหมาะสมกับทุกระบบจัดการขยะ ตัวอย่างเช่น PLA มักได้รับการรับรองสำหรับการทำปุ๋ยหมักอุตสาหกรรมมากกว่าการย่อยในธรรมชาติ ขณะที่ PHA บางชนิดมีศักยภาพย่อยสลายในสภาพแวดล้อมธรรมชาติได้กว้างกว่า แต่การพิสูจน์ต้องอาศัยมาตรฐานและข้อมูลเฉพาะชนิดพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ และสภาพแวดล้อม การปะปนของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในกระแสรีไซเคิลของพลาสติกทั่วไปอาจสร้างปัญหาคุณภาพวัสดุรีไซเคิล หากไม่มีระบบคัดแยกและการติดตามที่ชัดเจน (Rosenboom et al., 2022; Börner & Zinn, 2024) ท้ายที่สุด ความท้าทายเชิงนโยบายและการประเมินวัฏจักรชีวิตยังมีความสำคัญอย่างยิ่ง การเปรียบเทียบพอลิเมอร์ชีวภาพกับพลาสติกฟอสซิลต้องพิจารณาไม่เฉพาะคาร์บอน

พื้พันธุ์ของการผลิต แต่รวมถึงการใช้ที่ดิน น้ำ ปุ๋ย ผลกระทบความหลากหลายทางชีวภาพ การขนส่ง อายุการใช้ งาน และการจัดการหลังใช้ Rosenboom et al. (2022) เน้นว่ามาตรฐานการระบุชนิดวัสดุและแนวทาง LCA จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงและทำให้สอดคล้องกัน เพื่อหลีกเลี่ยง greenwashing และช่วยให้ผู้บริโภค ผู้ผลิต และผู้กำหนดนโยบายตัดสินใจจากข้อมูลที่เปรียบเทียบได้จริง

1.9 บทสรุป

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีศักยภาพในการลดปัญหามลภาวะและข้อจำกัดของการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย, เชื้อรา, และเอนไซม์ต่าง ๆ ซึ่งจะเปลี่ยนพอลิเมอร์ไปเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเล็กลง จนกลายเป็นน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, หรือชีวมวลที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถจำแนกตามแหล่งที่มาของสารตั้งต้นได้เป็นหลายประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural Polymers) เช่น เซลลูโลส, แป้ง, ไคโตซาน และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Biodegradable Polymers) เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA), พอลิคาโพรแลคโตน (PCL), และพอลิবিທີลีนซึกซิเนต (PBS) เป็นต้น กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมักเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะเข้าไปทำลายพันธะเคมีในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างที่เล็กลงจนสามารถละลายน้ำได้ และถูกดูดซึมเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติ พอลิเมอร์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายด้าน อาทิเช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้, วัสดุทางการแพทย์ (เช่น เส้นไหมละลาย, สกรูที่ละลายได้ในร่างกาย), และเป็นวัสดุที่ช่วยในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม ด้วยศักยภาพในการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดปริมาณขยะพลาสติก ทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สำคัญในการพัฒนาวัสดุเพื่อส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืน นอกจากนี้อนาคตของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีศักยภาพสูง แต่การขยายผลเชิงพาณิชย์ต้องดำเนินบนฐานความจริงทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม ไม่ใช่บนภาพลักษณ์ความเป็น “พลาสติกสีเขียว” เพียงอย่างเดียว ในระยะสั้น ตลาดจะเติบโตในกลุ่มผลิตภัณฑ์เฉพาะที่สอดคล้องกับการทำปุ๋ยหมัก การปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุ หรือความเสี่ยงการหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม ในระยะกลางถึงยาว ความสามารถแข่งขันจะขึ้นอยู่กับการลดต้นทุนผ่านการขยายกำลังผลิต การพัฒนา feedstock รุ่นใหม่ การปรับปรุงการหมักและ downstream processing การออกแบบวัสดุให้เหมาะกับหน้าที่ และการสร้างโครงสร้างพื้นฐานปลายทางที่รองรับได้จริง หากนโยบาย มาตรฐาน และแรงจูงใจทางเศรษฐกิจมีความชัดเจน พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะสามารถเปลี่ยนจากตลาดเฉพาะไปสู่หนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของระบบวัสดุหมุนเวียนในอนาคต

1.10 คำถามท้ายบท

- 1.10.1 อธิบายความหมายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 1.10.2 จงยกตัวอย่างพอลิเมอร์จากธรรมชาติ 3 ชนิด พร้อมระบุแหล่งที่มาโดยสังเขป
- 1.10.3 จงยกตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 3 ชนิด พร้อมระบุโครงสร้างทางเคมีที่ทำให้ย่อยสลายได้
- 1.10.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเกี่ยวข้องอย่างไรกับการย่อยสลายพอลิเมอร์ และพันธะเคมีใดที่ไวต่อปฏิกริยานี้
- 1.10.5 จุลินทรีย์ชนิดใดที่มีส่วนช่วยในการย่อยสลายพอลิเมอร์ และมีกลไกการทำงานอย่างไร
- 1.10.6 เหตุใดพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่สำคัญในอนาคตในบริบทของปัญหาสิ่งแวดล้อม
- 1.10.7 จงระบุผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เป็นสารประกอบโมเลกุลต่ำที่เกิดจากการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้
- 1.10.8 วัสดุทางการแพทย์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีประโยชน์อย่างไรเมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ย่อยสลาย
- 1.10.9 ข้อดีและข้อจำกัดของการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์มีอะไรบ้าง
- 1.10.10 จงอธิบายกระบวนการออกซิเดชันในการย่อยสลายพอลิเมอร์ โดยระบุถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

1.11 เอกสารอ้างอิง

- Albertsson, A.-C., & Karlsson, S. (2020). *Degradable polymers: Principles and applications* (2nd ed.). Springer.
- Albertsson, A. C., & Hakkarainen, M. (<https://www.google.com/search?q=2017>). Designed to degrade: Probing the oxidation and hydrolysis sensitivity of engineered polymer materials. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 55(4), 589–606. <https://doi.org/10.1002/pola.28302>

- Ammash, J. Y., & Ammash, Z. H. (2023). Biodegradable polymers for bone tissue engineering: A comprehensive review. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(1), 22. <https://doi.org/10.3390/jfb14010022>
- ASTM International. (2023). *Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities (ASTM D6400-23)*. <https://doi.org/10.1520/D6400-23>
- ASTM International. (2021). *Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions, incorporating thermophilic temperatures (ASTM D5338-15R21)*. <https://doi.org/10.1520/D5338-15R21>
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835-864. <https://doi.org/10.1002/mabi.200400043>
- Avérus, L. (<https://www.google.com/search?q=2008>). Polymers from renewable resources: A challenge for the future of plastics. *Macromolecular Symposia*, 272(1), 1-8. <https://doi.org/10.1002/masy.200850101>
- Balla, V. K., Bodhak, S., & Basu, B. (2019). Biomaterials for biomedical applications: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 107(6), 1185-1202. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36640>
- Börner, T., & Zinn, M. (2024). Key challenges in the advancement and industrialization of biobased and biodegradable plastics: A value chain overarching perspective. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, Article 1406278. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1406278>
- Chalermthai, B., Ebaid, R., Wongwatanapaiboon, J., Lee, S. H., Cheirsilp, B., & Maneein, S. (2023). Techno-economic assessment of co-production of edible bioplastic and food supplements from Spirulina. *Scientific Reports*, 13, Article 10190. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37156-3>

- European Bioplastics. (2024a, December 10). *Bioplastics market development update 2024*.
<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2024/>
- European Bioplastics. (2024b, December 10). *EUBP reveals the results of the 2024 market data report*. <https://www.european-bioplastics.org/eubp-reveals-the-results-of-the-2024-market-data-report/>
- European Commission. (n.d.). *Facts about the new EU rules on packaging and packaging waste*. Retrieved May 16, 2026, from https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/packaging-waste/facts-about-new-eu-rules-packaging-and-packaging-waste_en
- Dutta, P. K., Dutta, J., & Tripathi, V. S. (2014). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63(1), 20-31.
- Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (<https://www.google.com/search?q=2017>). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Management*, 59, 526–536.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (<https://www.google.com/search?q=2017>). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gopinath, V., Karthikeyan, S., Rathanaswamy, R., Santhi, T., & Gnanasekaran, D. (2021). Recent advances in biodegradable sutures for surgical applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 32(14), 1845-1869. <https://doi.org/10.1080/09205063.2021.1960233>
- Gross, R. A., & Kalra, B. (2002). Biodegradable polymers for the environment. *Science*, 297(5582), 803-807. <https://doi.org/10.1126/science.297.5582.803>
- Hussain, M., Zafar, M., & Waseem, A. (2022). Biodegradable polymers for controlled drug delivery: Recent advances and future perspectives. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33(4), 38. <https://doi.org/10.1007/s10856-022-06649-w>

- International Organization for Standardization. (2013). *Plastics—Vocabulary (ISO 472:2013)*.
<https://www.iso.org/standard/44102.html>
- International Organization for Standardization. (2012). *Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions—Method by analysis of evolved carbon dioxide—Part 1: General method (ISO 14855-1:2012)*.
<https://www.iso.org/standard/57902.htm>
- Uambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
<https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2018). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393.
- Makadia, H. K., & Siegel, S. J. (2011). Poly lactic-co-glycolic acid (PLGA) as biodegradable controlled drug delivery carrier. *Polymers*, 3(3), 1377-1397.
<https://doi.org/10.3390/polym3031377>
- Malinowski, M., Kociok, K., Gaca, R., & Wyciszkiewicz, P. (2022). Biodegradable polymer films for active food packaging. *Polymers*, 14(19), 4216. <https://doi.org/10.3390/polym14194216>
- Pan, H., Ma, D., Chen, Y., Yu, G., & Cui, F. (2023). Recent advances in biodegradable polymers for bone tissue engineering. *Materials & Design*, 225, 111516.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111516>
- Pathak, V. M., & Navneet. (<https://www.google.com/search?q=2017>). Review on the current status of polymer degradation: A microbial approach. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0145-9>

- Payanthoth, N. S., Nik Mut, N. N., Samanta, P., Li, G., & Jung, J. (<https://www.google.com/search?q=2024>). A review of biodegradation and formation of biodegradable microplastics in soil and freshwater environments. *Applied Biological Chemistry*, 67, 110. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00959-7>
- Philip, S., Keshavarz, T., & Roy, I. (2007). Polyhydroxyalkanoates: Biodegradable polymers with a range of applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 82(3), 233-247.
- Pozo-Morales, L., Rosales Martínez, A., Baquerizo, E., & del Valle Agulla, G. (2025). Simulation tool for the techno-economic assessment of the integrated production of polyhydroxyalkanoates as value-added byproducts of a wastewater treatment plant. *Processes*, 13(2), Article 295. <https://doi.org/10.3390/pr13020295>
- Praveen, S., Varghese, E. G., & Rajeswari, A. K. (2020). Biodegradable polymers for controlled release of agrochemicals: A review. *Polymer Bulletin*, 77(11), 6049-6072. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-03063-0>
- Ramesh, M., Anbarasan, M., & Mohanraj, M. (2021). Biodegradable polymers for sustainable food packaging applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6100-6105. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.669>
- Rosenboom, J.-G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7, 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Roy, K., Dutta, S., & Chatterjee, K. (2020). Recent advancements in biodegradable plastic packaging for sustainable environment: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), 38665-38686. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10143-4>
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (<https://www.google.com/search?q=2008>). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>

- Shen, M., Ye, S., & Zeng, G. (2020). Biodegradable plastics: Are they better for the environment? *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 21, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100448>
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (https://www.google.com/search?q=2008). Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127-2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>
- Srisa, A., Tangtium, J., & Sothornvit, R. (2023). Development of biodegradable films from PLA and PHA for food packaging applications. *Journal of Food Science and Technology*, 60(1), 32-41. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05494-x>
- Sun, J., Yuan, X., & Liu, S. (2022). 3D printing of biodegradable polymers for tissue engineering scaffolds. *Materials Today Bio*, 13, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100223>
- Tokiwa, Y., & Calabia, B. P. (2006). Degradation of plastics by microorganisms. *Biotechnology Letters*, 28(15), 1157-1164. <https://doi.org/10.1007/s10529-006-9051-z>
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722-3742. <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>
- Tsuji, H. (2016). Poly(L-lactic acid) stereocomplex: From fundamentals to advanced materials. *Progress in Polymer Science*, 60, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.03.003>
- Wang, Y., Cai, Y., Liang, J., & Zhang, Y. (2021). PLGA-based microspheres for sustained drug delivery: A review. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(3), 1147-1160. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.10.027>
- Woodruff, M. A., & Hutmacher, D. W. (2010). The return of a forgotten polymer. *Progress in Polymer Science*, 35(10), 1217-1256. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002>

- Xu, H., Ren, X., Wang, Q., & Li, Y. (2021). Research progress of biodegradable mulching film based on polymer materials. *Polymers*, *13*(23), 4165. <https://doi.org/10.3390/polym13234165>
- Zhao, S., Wang, H., & Liu, X. (2021). Research progress of biodegradable seedling pots from agricultural and forestry wastes. *Industrial Crops and Products*, *167*, 113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>

บทที่ 2

โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.1 บทนำ

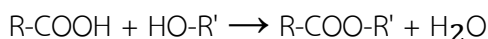
พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะในยุคสมัยที่ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนถูกยกระดับเป็นวาระระดับโลก โครงสร้างทางเคมีของ Biodegradable Polymer เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติของวัสดุ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความเสถียร การใช้งาน รวมถึงสมบัติในการย่อยสลาย โครงสร้างพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมักมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้ง่าย เช่น หมู่เอสเทอร์ ($-\text{COO}-$), เอไมด์ ($-\text{CONH}-$), ยูรีเทน ($-\text{NHCOO}-$) และหมู่ไกลโคซิดิก ($-\text{O}-$) เป็นต้น ซึ่งสามารถถูกทำลายพันธะได้ในสภาวะธรรมชาติหรือภายในร่างกาย (Tokiwa et al., 2009; Tsuji, 2016)

จากบทที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ พอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural Biopolymers) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Synthetic Biodegradable Polymers) ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของพันธะเคมี โครงสร้าง และวิธีการสังเคราะห์ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแต่ละประเภท เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง สมบัติ และการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.2 ประเภทพันธะเคมีในพอลิเมอร์

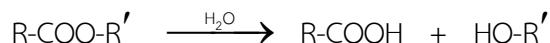
โครงสร้างของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะของพันธะเคมีที่เชื่อมโยงหน่วยมอนอเมอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมถึงความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พันธะเคมีหลักที่พบในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้มีดังนี้:

2.2.1 พันธะเอสเทอร์ (Ester Linkage, $-\text{COO}-$)



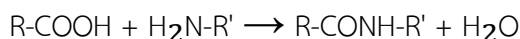
เป็นพันธะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) พบมากในพอลิเอสเทอร์ (Polyesters) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่สำคัญที่สุด เช่น PLA, PCL, PBS, PHAs, PLGA

ความสำคัญต่อการย่อยสลายคือ พันธะเอสเทอร์มีความไวสูงต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทั้งในสภาวะ กรด เบส และเป็นกลาง และการเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์จำพวกเอสเทอเรส (Esterase) หรือไลเปส (Lipase) อัตราการไฮโดรไลซิสจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเป็นผลึก ความชื้น pH และโครงสร้างโมเลกุล การที่พันธะนี้แตกออกจะนำไปสู่การเกิดการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว (Makadia & Siegel, 2011). ดังแสดงสมการไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเทอร์ได้ดังนี้

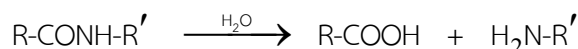


2.2.2 พันธะเอไมด์ (Amide Linkage, -CONH-)

เป็นพันธะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่เอมีน (-NH₂) พบในพอลิเอไมด์ (Polyamides) เช่น ไนลอน (Nylon) บางชนิดที่ดัดแปลงให้ย่อยสลายได้ หรือ โปรตีนธรรมชาติ (เช่น คอลลาเจน เจลาติน) และ ไคโตซาน



ความสำคัญต่อการย่อยสลายคือ พันธะเอไมด์ก็สามารถถูกไฮโดรไลซิสและย่อยสลายได้โดยเอนไซม์จำพวกโปรตีเอส (Protease) แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีความเสถียรต่อการไฮโดรไลซิสสูงกว่าพันธะเอสเทอร์ เนื่องจากพันธะเอไมด์มีลักษณะเป็น resonance ทำให้มีความเสถียรทางเคมีมากกว่า นอกจากนี้การมีอยู่ของพันธะไฮโดรเจนระหว่าง N-H และ C=O ยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโมเลกุล (Tokiwa et al., 2009). ดังแสดงสมการไฮโดรไลซิสของพอลิเอไมด์ได้ดังนี้

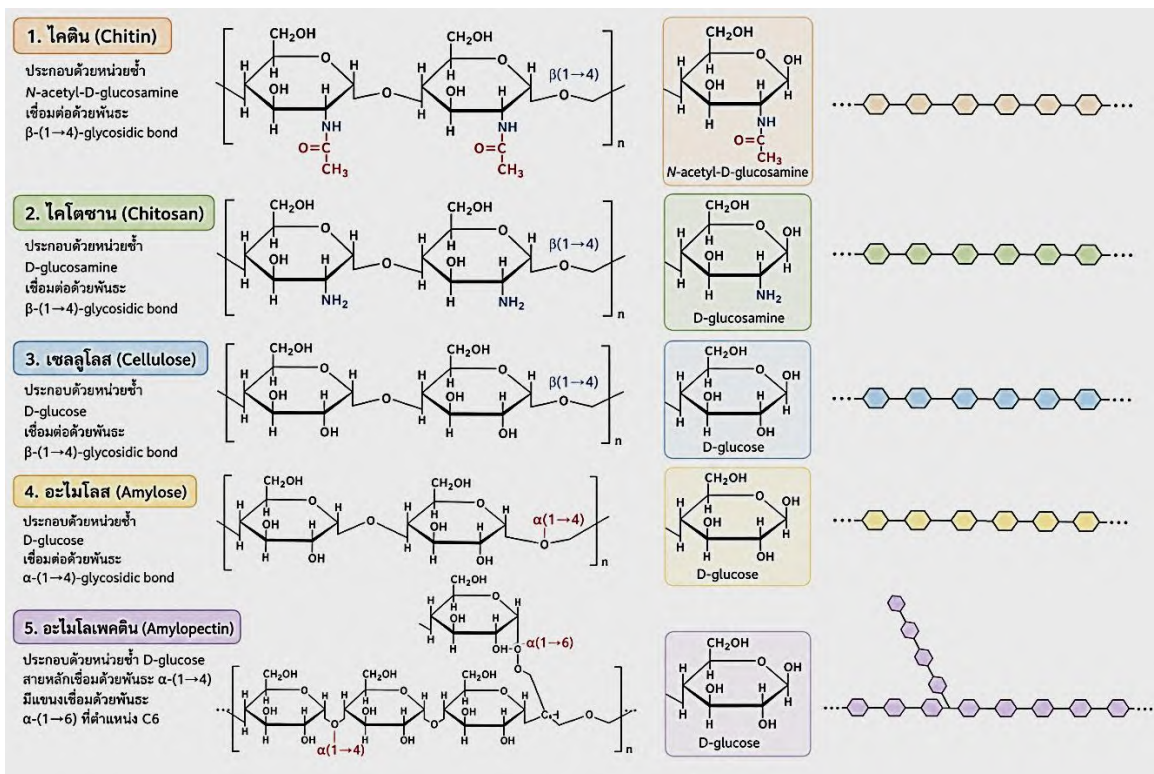


2.2.3 พันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic Linkage, -O-)

เป็นพันธะที่เชื่อมหน่วยน้ำตาลเข้าด้วยกันในพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคติน และไคโตซาน ส่วนประเภทของพันธะไกลโคซิดิก α -(1-4) linkage พบในแอมิโลสและแอมิโลเพกติน (แป้ง), β -(1-4) linkage พบในเซลลูโลสและไคติน และ α -(1-6) linkage พบในจุดแยกสาขาของแอมิโลเพกติน สามารถแสดงโครงสร้างไคติน ไคโตซาน เซลลูโลส อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ได้ดังรูปที่ 2.1 โดยไคตินและไคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้น (linear polysaccharide) ที่ประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลเชื่อมกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidic เหมือนกับเซลลูโลส ความแตกต่างหลักอยู่ที่ตำแหน่ง C2 โดยไคติน มีหมู่ acetamido (-NHCOCH₃) ที่ C2 ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่จำนวนมาก ส่งผลให้ไม่ละลายน้ำและมีความแข็งแรง

สูง ส่วน ไคโตซาน ได้จากการกำจัดหมู่อะเซทิล (deacetylation) ออกจากไคติน เหลือหมู่ amino ($-NH_2$) ที่ C2 ซึ่งสามารถรับโปรตอนได้ในสภาวะกรด ($pK_a \approx 6.3-6.8$) ทำให้ละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดอะซิติก 1%

ความสำคัญต่อการย่อยสลายคือ พันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซิสและย่อยสลายได้โดยเอนไซม์เฉพาะทาง เช่น เซลลูเลส (Cellulase), อะไมเลส (Amylase) หรือไคตินเนส (Chitinase) ซึ่งผลิตโดยจุลินทรีย์หลายชนิด **ความสำคัญต่อการย่อยสลายคือ** โดยเอนไซม์แต่ละตัวจะมีความจำเพาะต่อการจับกับพันธะไกลโคซิดิกแต่ละชนิด เช่น α -amylase จะตัดพันธะ α -(1-4) ส่วน β -glucanase จะตัดพันธะ β -(1-4) ซึ่งผลิตโดยจุลินทรีย์หลายชนิด (Dutta et al., 2014).

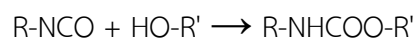


รูปที่ 2.1 โครงสร้างไคติน ไคโตซาน เซลลูโลส อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน

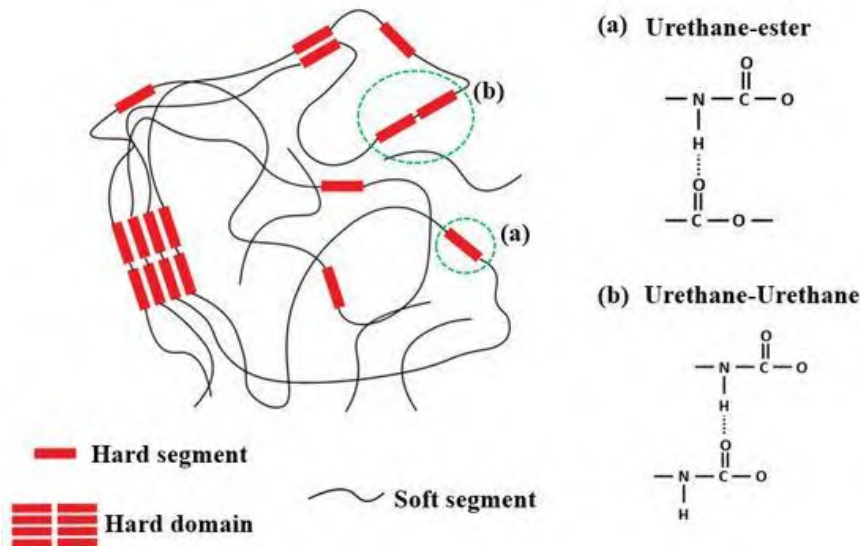
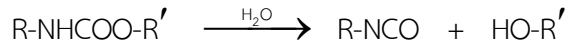
ที่มา : ดัดแปลงจาก Dutta et al. (2014).

2.2.4 พันธะยูรีเทน (Urethane Linkage, $-NHCOO-$)

เป็นพันธะที่พบในพอลิยูรีเทน (Polyurethanes) บางชนิด ที่ได้รับการออกแบบให้ย่อยสลายได้ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไอโซไซยานต (Isocyanate) และแอลกอฮอล์



ความสำคัญต่อการย่อยสลายคือ พันธะยูรีเทนสามารถถูกไฮโดรไลซิสและย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม โดยเฉพาะเอนไซม์ Urethane Hydrolase และ Esterase บางชนิด อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของส่วนที่เป็น Soft Segment และ Hard Segment ของพอลิยูรีเทนด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 รวมทั้งสามารถแสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิยูรีเทนได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง Soft Segment และ Hard Segment ของพอลิยูรีเทน

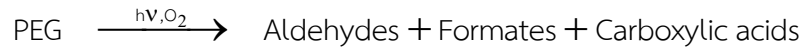
ที่มา : Yilgör, I., Yilgör, E., & Wilkes, G.L. (2015).

จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างแบบ segmented polyurethane ซึ่งประกอบด้วย soft segment ที่มีความยืดหยุ่นสูง และ hard segment ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง diisocyanate กับ chain extender โดย hard segment สามารถรวมตัวกันเป็น hard domain ผ่านแรง hydrogen bonding ระหว่างหมู่ urethane-urethane และ urethane-ester ส่งผลให้เกิด microphase separation ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลและการย่อยสลายของพอลิยูรีเทน

2.2.5 พันธะอีเทอร์ (Ether Linkage, -O-)

เป็นพันธะที่พบในพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้หลายชนิด ความสำคัญต่อการย่อยสลายนั้น พันธะอีเทอร์มีความเสถียรสูง

ต่อการไฮโดรไลซิส แต่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนและแสง นอกจากนี้ยังมีผลต่อสมบัติการละลายน้ำของพอลิเมอร์ ยกตัวอย่าง เช่น PEG เมื่อได้รับ UV และ O₂ แสดงได้ดังสมการดังนี้



ส่งผลให้ molecular weight ลดลง polymer chain แตก สมบัติเชิงกลลดลง และ biodegradation เพิ่มขึ้น

หมายเหตุสำคัญ

ในสภาวะที่มีน้ำและ pH เป็นกลาง (hydrolytic conditions) อัตราการย่อยสลายของพันธะเคมีในพอลิเมอร์โดยทั่วไปเรียงลำดับได้ดังนี้ (จากเร็วไปช้า) พันธะเอสเทอร์ > พันธะไกลโคซิดิก > พันธะยูรีเทน > พันธะเอไมด์ > พันธะอีเทอร์ ทั้งนี้ อัตราการย่อยสลายที่แท้จริงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ pH ของสภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ ชนิดเอนไซม์ ความเป็นผลึก และน้ำหนักโมเลกุล ดังนั้นลำดับนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบในภาพรวมเท่านั้น ไม่ใช่ค่าตายตัวในทุกสภาวะ ประเภทพันธะเคมีในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทพันธะเคมีในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

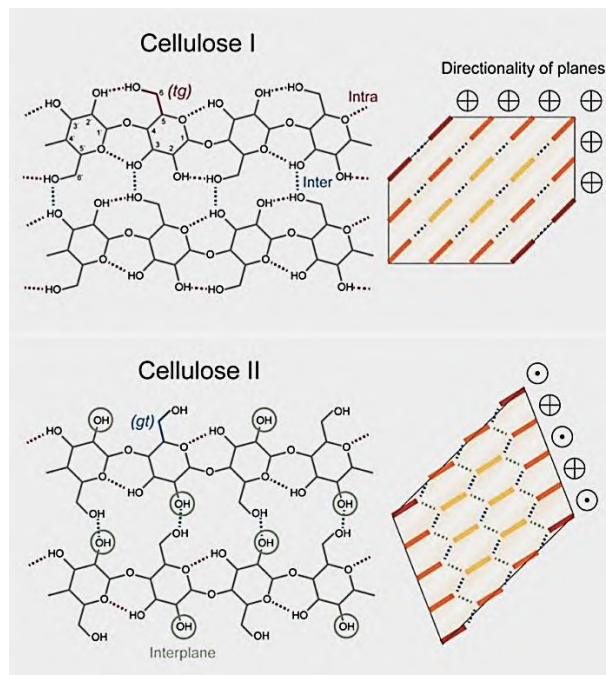
พันธะเคมี	หมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง	ความสามารถในการย่อยสลาย	ตัวอย่างพอลิเมอร์
เอสเทอร์ (–COO–)	C=O และ C–O–C	สูง	PLA, PBS, PCL, PHAs
เอไมด์ (–CONH–)	N–H และ C=O	ปานกลาง	เจลาติน, คอลลาเจน
ยูรีเทน (–NHCOO–)	NH และ COO	ปานกลาง	PU ที่ย่อยสลายได้
ไกลโคซิดิก (–O–)	O–C ในพอลิแซ็กคาไรด์	สูง	แป้ง, เซลลูโลส, ไคโตซาน
อีเทอร์ (–O–)	C–O–C ในพอลิเอทิลีนไกลคอล	ต่ำ	PEG, PEO

2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากธรรมชาติ (Natural Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและหลากหลาย สามารถย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อมโดยกลไกทางชีวภาพโดยตรง ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ จุลินทรีย์ มีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีความหลากหลายทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น เซลลูโลส แป้ง โปรตีน ไคโตซาน เป็นต้น

2.3.1 พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides)

2.3.1.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืช เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ที่สุดในโลก เช่น ไม้ ฝ้าย ใผ่ และสาหร่าย มีโครงสร้างทางเคมี เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วย D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic bonds ทำให้เกิดโครงสร้างสายตรงที่มีความแข็งแรง มีสูตรโครงสร้าง $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยมีกลูโคสประมาณ 10,000-15,000 หน่วยต่อสายโซ่ มีโครงสร้างความเป็นผลึกสูง และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมากที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ ทำให้มีความแข็งแรงและไม่ละลายน้ำ สำหรับการสังเคราะห์ คือสังเคราะห์โดยพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) และเอนไซม์ cellulose synthase สำหรับสมบัติและการใช้งาน คือไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายทั่วไป มีความแข็งแรงสูง, ไม่เป็นพิษ, ย่อยสลายได้โดยเอนไซม์เซลลูเลส มีค่า Young's modulus ประมาณ 100–167 GPa สำหรับ cellulose nanocrystal นิยมนำมาใช้ในการผลิตกระดาษ, ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เส้นใยสิ่งทอ และ , วัสดุคอมโพสิต, และวัสดุทางการแพทย์ (Klemm et al., 2018). ประเภทของเซลลูโลส คือ Cellulose I คือ รูปแบบธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกแน่น, Cellulose II เกิดจากการแปรรูป มีความเป็นผลึกน้อยกว่า และ Nanocellulose เซลลูโลสขนาดนาโน มีสมบัติเชิงกลสูงมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อแรงดึงและบีบอัด แสดงรูปโครงสร้าง Cellulose I และ Cellulose II ได้ดังรูปที่ 2.3

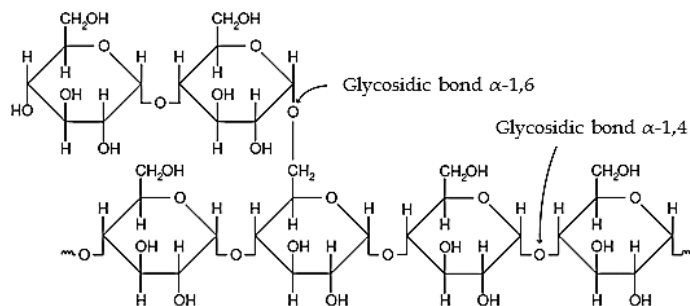


รูปที่ 2.3 โครงสร้างพันธะไฮโดรเจนและทิศทางการจัดเรียงสายโซ่ของเซลลูโลส I และเซลลูโลส II

ที่มา : ดัดแปลงจาก Wohlert et al., (2022)

จากรูปที่ 2.3 รูปบน แสดงโครงสร้างของ Cellulose I ซึ่งสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์เรียงตัวแบบขนาน (parallel) โดยหมู่ไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) ที่ C6 อยู่ในรูปแบบ tg (trans-gauche) ก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจน 2 ประเภท ได้แก่ พันธะภายในสายโซ่เดียวกัน (Intra: $\text{O}3\text{H}\cdots\text{O}5'$) และพันธะระหว่างสายโซ่ (Inter: $\text{O}6\text{H}\cdots\text{O}3'$) ส่วนแผนภาพทางขวาแสดง directionality of planes แบบขนาน กล่าวคือ สายโซ่ทุกสายชี้ไปในทิศทางเดียวกัน (สัญลักษณ์ $\oplus$) ส่วน รูปล่าง แสดงโครงสร้างของ Cellulose II ซึ่งสายโซ่เรียงตัวแบบสลับทิศ (antiparallel) โดยหมู่ $-\text{CH}_2\text{OH}$ เปลี่ยนจาก tg มาเป็น gt (gauche-trans) ทำให้รูปแบบพันธะไฮโดรเจนมีความซับซ้อนมากขึ้น เกิดพันธะระหว่างระนาบ (Interplane) ระหว่างสายโซ่หลักและสายโซ่กลาง ($\text{O}6\text{H}\cdots\text{O}2'$ และ $\text{O}2\text{H}\cdots\text{O}2'$) แผนภาพ directionality of planes แสดงการสลับทิศทางของสายโซ่ ($\oplus$ และ $\odot$) ซึ่งทำให้โครงสร้าง Cellulose II มีเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์สูงกว่า Cellulose I

2.3.1.2 แป้ง (Starch) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สะสมเป็นอาหารในพืช พบในเมล็ดข้าว ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับโครงสร้างทางเคมีจะประกอบด้วยแอมิโลส (Amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายตรง (พันธะ α -(1-4)) คิดเป็นประมาณ 20-30% ของแป้ง และแอมิโลเพกทิน (Amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายกิ่ง (พันธะ α -(1-4) และ α -(1-6)) ดังแสดงรูปโครงสร้างในรูปที่ 2.4 คิดเป็นประมาณ 70-80% ของแป้ง โดยมีจุดแยกสาขาเกิดขึ้นทุก ๆ 24-30 หน่วยกลูโคส สำหรับการสังเคราะห์คือ สังเคราะห์โดยพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเก็บสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช นอกจากนี้ยังมีสมบัติและการใช้งานคือ ละลายในน้ำร้อน เกิดเป็นเจล, ย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์อะไมเลส มีอุณหภูมิ gelatinization ระหว่าง $55-85^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง มีราคาถูก หาได้ง่าย สามารถนำมาดัดแปลงเป็นเทอร์โมพลาสติกแป้ง (Thermoplastic Starch, TPS) เพื่อใช้ในบรรจุภัณฑ์, ใช้ในการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โฟมบรรจุภัณฑ์ วัสดุพลาสติกชีวภาพ ฟิล์มคลุมดิน, และภาชนะใช้แล้วทิ้ง (Avérous, 2008).



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของการต่อพันธะ α -1,4 และ α -1,6 ในอะไมโลส และ อะไมโลเพกทิน

จากรูปจะเห็นได้ว่า อะไมโลส (Amylose) เป็นโซ่ตรงของหน่วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์แบบ α -1,4 (Surendren et al., 2022) โดยอะไมโลเพกติน (Amylopectin) เป็นสายโซ่ของหน่วยกลูโคสที่มีโครงสร้างแบบแตกแขนง เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์แบบ α -1,4 ในส่วนของโซ่ตรง และพันธะไกลโคไซด์แบบ α -1,6 ในจุดแตกแขนง (Stelescu et al., 2024) ในการทำปฏิกิริยากับพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer Interaction) โดยพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล จะเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลแป้ง ส่งผลให้เกิดการเกิดพันธะไฮโดรเจน และ ลดความเป็นผลึกของแป้ง (Niazi, 2013) การดัดแปรนี้ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตวัสดุได้ดียิ่งขึ้น

2.3.1.3 ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) มีแหล่งที่มา ดังนี้ ไคตินพบในเปลือกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู และหอย แมลง และผนังเซลล์ของเชื้อรา ส่วนไคโตซานได้จากการดื้ออะซิไทเลชัน (Deacetylation) ของไคติน ที่พบในเปลือกกุ้ง ปู กบ และผนังเซลล์ของเห็ด โดยการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์ สำหรับโครงสร้างทางเคมี ไคตินเป็นพอลิเมอร์ของ N-Acetylglucosamine ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ β -(1-4) มีสูตรโครงสร้าง $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ส่วน ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคซามีนและ N-acetylglucosamine (มีหมู่เอมีนอิสระ) มีสูตรโครงสร้าง $(C_6H_{11}NO_4)_n$ สำหรับการสังเคราะห์ สังเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิตทางชีวภาพ สำหรับสมบัติและการใช้งานนั้น ไคโตซานมีคุณสมบัติชอบน้ำ, มีประจุบวก, ต้านจุลชีพ และต้านเชื้อรา และเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatible) สูง ปลอดภัยต่อร่างกาย ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ chitinase และ lysozyme จึงนิยมใช้ในงานชีวการแพทย์ (ไหมเย็บแผล, ระบบนำส่งยา และวัสดุทางการแพทย์) ใช้ในเครื่องสำอางค์ ผลิตภัณฑ์ดูแลผิว, ฟิล์มห่ออาหาร, การบำบัดน้ำเสีย, และเกษตรกรรม และอื่น ๆ (Dutta et al., 2014).

2.3.2 โปรตีน (Proteins)

มีแหล่งที่มาคือ ได้จากสัตว์ (เช่น คอลลาเจน, เจลาติน, เคซีน) หรือพืช (เช่น โปรตีนถั่วเหลือง) มีโครงสร้างทางเคมีคือ เป็นพอลิเมอร์ของกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (Peptide Bond) โครงสร้างสามมิติที่ซับซ้อน กำหนดสมบัติ สำหรับการสังเคราะห์คือสังเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิตผ่านกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน สำหรับสมบัติและการใช้งานคือ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง ย่อยสลายได้โดยเอนไซม์โปรติเอส นิยมใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร (ฟิล์มกินได้), ชีวการแพทย์ (scaffold สำหรับ tissue engineering), และเครื่องสำอาง เป็นต้น (Balla et al., 2019)

2.3.3 พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs)

มีแหล่งที่มาคือ เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตและสะสมภายในเซลล์ของแบคทีเรียหลายชนิด ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนเกินพอแต่ขาดสารอาหารอื่น ๆ (เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส) มีโครงสร้างทางเคมี เป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างหลากหลาย ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและแหล่งคาร์บอน มักมีหมู่เมทิล (methyl group) หรือหมู่แอลคิลที่ยาวกว่า ทำการเชื่อมกับคาร์บอนในสายโซ่หลัก ตัวอย่างเช่น Poly(3-hydroxybutyrate), (PHB) ที่มีหน่วยซ้ำเป็น 3-hydroxybutyrate สำหรับการสังเคราะห์ คือผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยแบคทีเรีย (เช่น *Cupriavidus necator* (ชื่อเดิม: *Ralstonia eutropha*), *Pseudomonas putida*)

สูตรทั่วไปของหน่วยซ้ำ PHA คือ $-[O-CHR-(CH_2)_x-CO]-n$

โดยที่ R = หมู่แอลคิล, x = จำนวนเมทิลีน (ขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์)

ตัวอย่าง เช่น PHB (Poly-3-hydroxybutyrate): R = CH₃, x = 1

สูตรเฉพาะของ PHB: $-[O-CH(CH_3)-CH_2-CO]-n$

PHBV คือ โคพอลิเมอร์ของ 3-HB (R=CH₃) และ 3-HV (R=C₂H₅)

สำหรับสมบัติและการใช้งาน มีสมบัติเชิงกลที่หลากหลาย ตั้งแต่เปราะและแข็ง (PHB) จนถึงยืดหยุ่น คล้ายยาง (PHBV) สามารถย่อยสลายได้ทั้งในดินและน้ำทะเลโดยเอนไซม์ PHA depolymerase นิยมใช้ในบรรจุภัณฑ์, ฟิล์มเกษตรกรรม, และวัสดุทางการแพทย์ (Philip et al., 2007; Srisa et al., 2023).

2.4 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการสังเคราะห์ (Synthetic Biodegradable Polymers)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้ถูกผลิตขึ้นผ่านกระบวนการทางเคมีในอุตสาหกรรม โดยมีโครงสร้างที่ถูกออกแบบให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจใช้วัตถุดิบจากปิโตรเลียม หรือชีวภาพ ผลิตขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี สามารถควบคุมสมบัติและโครงสร้างได้ ตัวอย่าง เช่น PLA, PCL, PBS, และ PBAT

2.4.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyesters) ซึ่งเป็นกลุ่มที่สำคัญที่สุดในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากการสังเคราะห์

2.4.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) แหล่งที่มาของมอนอเมอร์คือ กรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งได้จากการหมักน้ำตาลจากพืช (เช่น แป้งข้าวโพด และ อ้อย) และมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิเอสเทอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกรดแลคติก สามารถมีได้ทั้ง L-lactic acid, D-lactic acid หรือ Racemic Mixture (DL-Lactic acid) ซึ่งส่งผลต่อความเป็นผลึกและสมบัติ โดยกลไกการสังเคราะห์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1) การพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง (Direct Condensation Polymerization)

การควบแน่นของกรดแลคติกโดยตรง (มีข้อจำกัดเรื่องน้ำหนักโมเลกุล)