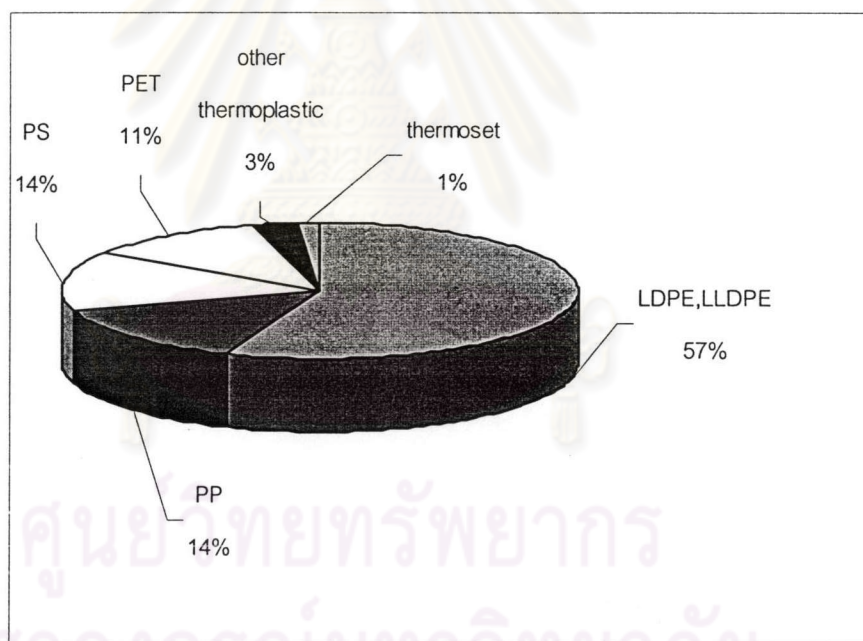


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พลาสติกในงานบรรจุภัณฑ์

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ได้นำพลาสติกมาใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว กระดาษ และโลหะเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะพลาสติกที่อยู่ในรูปของฟิล์มนั้นมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง จากสถิติปริมาณการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2541-2543 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบว่าพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (polyolefin) ซึ่งประกอบด้วย พอลิเอทิลีน (polyethylene) และพอลิพรอพิลีน (polypropylene) มีปริมาณการใช้งานสูงมากถึง 71 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีราคาถูก สามารถขึ้นรูปต่างๆ ได้ง่าย ฯลฯ



รูปที่ 2.1 ปริมาณการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2541-2543¹

พอลิเอทิลีน (polyethylene) มีชื่อย่อในวงการพลาสติกว่า “PE” เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ ประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ ของพลาสติกทั้งหมด² พอลิเอทิลีนได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization) ของแก๊สเอทิลีน จนกลายเป็น

พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยมีโครงสร้างโมเลกุลต่างๆกัน คือ โครงสร้างแบบเชิงเส้น (linear) และโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา (branched) ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต หากแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นจะสามารถแบ่งได้เป็น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene: LLDPE) เป็นต้น พอลิเอทิลีนที่มีการใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และเป็นพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene)

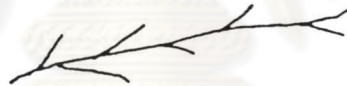
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ถูกผลิตโดยการใช้ความดันต่ำ (low pressure process) สามารถผลิตได้ทั้งกระบวนการซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta Process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) และมีการเติมโคมอนอเมอร์จำพวกแอลฟา-โอเลฟินส์ต่างๆ (10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) เช่น บิวทีน (butene-1) เฮกซีน (hexene-1) ออกทีน (octene-1) หรือ เมทิลเพนทีน (4-methylpentene-1) เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีน กับแอลฟา-โอเลฟินส์ต่างๆ ที่กล่าวมา ความหนาแน่นของ LLDPE จะอยู่ในลำดับเดียวกับ LDPE ส่วนโครงสร้างของ LLDPE จะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE คือมีโครงสร้างเป็นสายโซ่คาร์บอนยาวๆ และมีกิ่งสั้นๆ แยกออกจากสายโซ่หลักตลอดความยาวของโมเลกุล แต่จะไม่มีกิ่งก้านสาขาเหมือน LDPE ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจากโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นๆ ของ LLDPE จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดผลึกได้มากกว่าใน LDPE ที่มีกิ่งยาวเกะกะขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้น LLDPE จึงมีความแข็งแรง (strength) และความเหนียว (toughness) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE พบว่ามีความเป็นผลึกน้อยกว่า ทำให้มีความใสมากกว่า ซึ่งจะเห็นว่า LLDPE มีสมบัติของทั้ง LDPE และ HDPE คือ มีความแข็งแรงกับ ความเหนียว ใกล้เคียงกับ HDPE ในขณะที่สมบัติในด้านความใสกับการฉีกด้วยความร้อน คล้ายกับ LDPE รวมเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้มีการใช้งานในการทำฟิล์มเช่นเดียวกับ LDPE เนื่องจากมีลักษณะเด่น คือ ความเหนียว ความต้านทานแรงเจาะทะลุ ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทรงรูป ความแข็งแรงของรอยตะเข็บในการเชื่อมด้วยความร้อนสูง ความใส และสามารถเป่าเป็นฟิล์มได้บางเฉียบ



(ก) LDPE



(ข) HDPE



(ค) LLDPE

รูปที่ 2.2 โครงสร้างจำลองแสดงกิ่งก้านสาขาของพอลิเอทิลีนต่างๆ

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ³

ชนิดของพอลิเอทิลีน	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)
LDPE	0.910-0.925
LLDPE	0.926-0.940
HDPE โคพอลิเมอร์	0.941-0.959
HDPE ไฮโมพอลิเมอร์	≥ 0.960

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ LLDPE เปรียบเทียบกับ LDPE³

สมบัติ	LLDPE		LDPE	
	0.922 g/cm ³	0.926 g/cm ³	0.918 g/cm ³	0.927 g/cm ³
Melt index, g/10 min	1.2	0.13	3.5	0.15
Tensile strength, MPa	13	20	12	16
Elongation %	800	600	550	600
Flexural modulus, MPa	234	510	138	414
Hardness, shore D		58		58
Environmental stress-crack resistance (ESCR)		1000		65
Melting point, °C	122		102	

จากโครงสร้างของ LLDPE เปรียบเทียบกับ LDPE พบว่ามีความแตกต่างกันในส่วนของความยาวและจำนวนกิ่งก้านสาขา ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1 LLDPE จะประกอบไปด้วยหมู่เมทิลีน (methylene) ที่เป็นกิ่งสั้นๆ ตลอดความยาวของสายโซ่หลัก การมีกิ่งก้านสาขาจะทำให้ความหนาแน่นและความเป็นผลึกลดลง

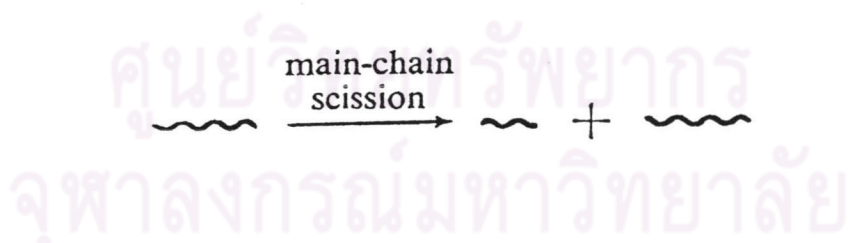
จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่า LLDPE มีจุดหลอมเหลว (melting point) ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่น (flexural modulus) และความสามารถในการยืดดึง (elongation) ที่สูงกว่า LDPE โดยเฉพาะ environmental stress crack resistance ที่สูงกว่าใน LDPE

2.2 กระบวนการย่อยสลาย (Degradation)

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์สังเคราะห์และสิ่งแวดล้อมในแง่ของผลกระทบต่างๆ มาเป็นเวลานานกว่า 2 ทศวรรษ อย่างไรก็ตามในช่วง 10 ปีที่ผ่านมากระแสนิยมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมต่อความสนใจของสาธารณชนมีเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการใช้พลาสติกไม่ว่าจะเป็นกลุ่มของบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคหรือในทางอุตสาหกรรมมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก วัสดุที่ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต่างๆไม่จำเป็นต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เนื่องจากส่วนใหญ่บรรจุภัณฑ์ประเภทฟิล์มมักใช้แล้วทิ้ง พอลิเอเลฟินส์เป็นพลาสติกกลุ่มหนึ่งซึ่งได้รับการวิจารณ์กันมากในเรื่องนี้ เนื่องจากมีเสถียรภาพต่อการสลายตัวสูง กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกเหล่านี้อาจเกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือ การย่อยสลายโดยใช้แสง (photodegradation) ภายใต้อิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์

ขยะพลาสติกมักมีปัญหาในเรื่องของปริมาณมากกว่าน้ำหนัก ทำให้ปัญหาปริมาณพลาสติกเพิ่มมากขึ้นทุกวันเนื่องจากความสามารถในการย่อยสลายที่ต่ำ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา จึงมีการมุ่งศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (biodegradable Polymers)

เมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลสังเคราะห์ขนาดใหญ่ การย่อยสลายของวัสดุพอลิเมอร์มักหมายถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดการขาดของพันธะทางเคมี (bond scission) ในโครงสร้างหลักของโมเลกุล (backbone)



รูปที่ 2.3 การขาดของพันธะในโครงสร้างหลักของโมเลกุลขนาดใหญ่

การสลายตัวของพอลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของหมู่ฟังก์ชันในวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดของพันธะในโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งกระบวนการในการย่อยสลายสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆได้ดังนี้

การสลายตัวทางเคมี (Chemical Degradation)

การสลายตัวทางเคมีเป็นกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของสารเคมี เช่น กรด เบส ตัวทำละลาย หรือแก๊สต่างๆ ที่สัมผัสกับพอลิเมอร์นั้นๆ หรือเกิดจากการที่สารเติมแต่ง เช่น ออกซิแดนท์ (oxidants) หรือ เปอร์ออกไซด์ (peroxides) ช่วยสนับสนุนให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติก เช่น การเกิดออกซิเดชันของพันธะคู่ ในไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fats) น้ำมัน (oil) และยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไว (active free radicals)

การสลายตัวทางความร้อน (Thermal Degradation)

การสลายตัวทางความร้อนเป็นการขาดของพันธะเคมี ภายใต้อิทธิพลของความร้อน ที่มีพลังงานมากพอในการทำให้เกิดการขาดของพันธะสำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์จะมีเสถียรภาพต่อความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด คือในช่วง 100-300 องศาเซลเซียส และเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิถึง 1,000 องศาเซลเซียส สารอินทรีย์จะสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals), อีออนอิสระ (free ions), ไฮโดรเจน หรือ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ความไวต่อความร้อนของสารอินทรีย์เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลประกอบไปด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะไม่ดีเท่าวัสดุอนินทรีย์ เช่น โลหะและเซรามิก

สำหรับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเดี่ยว (single bond) จะอยู่ในช่วง 150-400 กิโลจูลต่อโมล ตัวอย่างเช่น

ตารางที่ 2.3 พลังงานที่ใช้สลายพันธะต่างๆ⁴

ชนิดของพันธะ	พลังงานที่ใช้สลายพันธะ (kJ/mol)
O-O	147
C-H	320-420
C-O	330
C-C	260-400

การเกิดออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

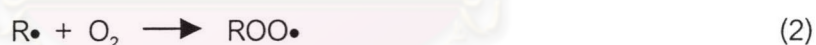
พอลิเมอร์โดยทั่วไป โดยเฉพาะพอลิเมอร์แบบรวมตัวที่เกิดจากไวนิลมอนอเมอร์ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิพรอพิลีน (polypropylene) สามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนขณะผ่านกระบวนการแปรรูป หรือขณะใช้งานในที่โล่งแจ้ง

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์จะเป็นปฏิกิริยาแบบ free radical chain reaction และปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยา autoxidation นั่นคือ ผลผลิตจากปฏิกิริยาจะกลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นได้นั่นเอง กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นดังนี้

1. ปฏิกิริยาเริ่มต้น (initiation) โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนจะแตกออกเป็น 2 อนุมูลอิสระ (free radicals)



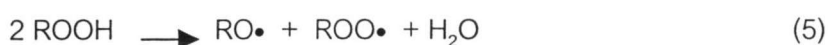
2. ไฮโดรคาร์บอนแรดิคัล ($R\cdot$) จะรวมตัวกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ($ROO\cdot$)



3. เปอร์ออกไซด์แรดิคัลจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนต่อไป เกิดปฏิกิริยาแผ่ขยาย (propagation reaction) ได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($ROOH$) กับไฮโดรคาร์บอนแรดิคัล ($R\cdot$)



4. ไฮโดรคาร์บอนแรดิคัล ($R\cdot$) ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับปฏิกิริยาในขั้นที่ 2 ส่วนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($ROOH$) จะสลายตัวดังนี้





5. ปฏิกิริยาสิ้นสุด (termination)



จากปฏิกิริยาดังกล่าว แสงโดยเฉพาะช่วงคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตและความร้อน จะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นได้รวดเร็วขึ้น ส่วนเกลือของโลหะหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีก

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการย่อยสลายของโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันจะเป็นการช่วยลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ต่อไป

การสลายตัวโดยแสง (Photodegradation)

การสลายตัวโดยใช้แสง เป็นการลดลงของสมบัติต่างๆของวัสดุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ โดยมีสาเหตุมาจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงปกติ (visible light) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้รวมถึงการขาดของพันธะ การเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) หรือแม้แต่การเปลี่ยนสี เป็นต้น อินทรีย์วัตถุจะมีความสามารถในการสลายตัวเนื่องจากแสงได้ การสลายตัวโดยแสงของพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นในภาวะที่มีออกซิเจน (photolysis) หรือการใช้แสงช่วงความยาวคลื่นต่ำซึ่งจะมีพลังงานสูง (< 280 นาโนเมตร)

แม้ว่าอินทรีย์วัตถุจะสามารถสลายตัวได้ด้วยแสง แต่ทั้งนี้อัตราในการสลายตัวของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันก็ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบด้วย แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะสามารถก่อให้เกิดการสลายตัวได้ดีกว่าแสงปกติ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ใช้ภายในบ้านจะเกิดการสลายตัวได้ช้ามากเมื่อเทียบกับวัสดุที่อยู่ภายนอก ซึ่งจะสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง ความไวต่อแสงของพอลิเมอร์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่า พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอะโรมาติก (aromatic) เช่น อะรามิด

(aramids) และพอลิเอสเทอร์ (polyester) จะสามารถดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่นปกติ (380 นาโนเมตร) และเกิดการสลายตัวได้

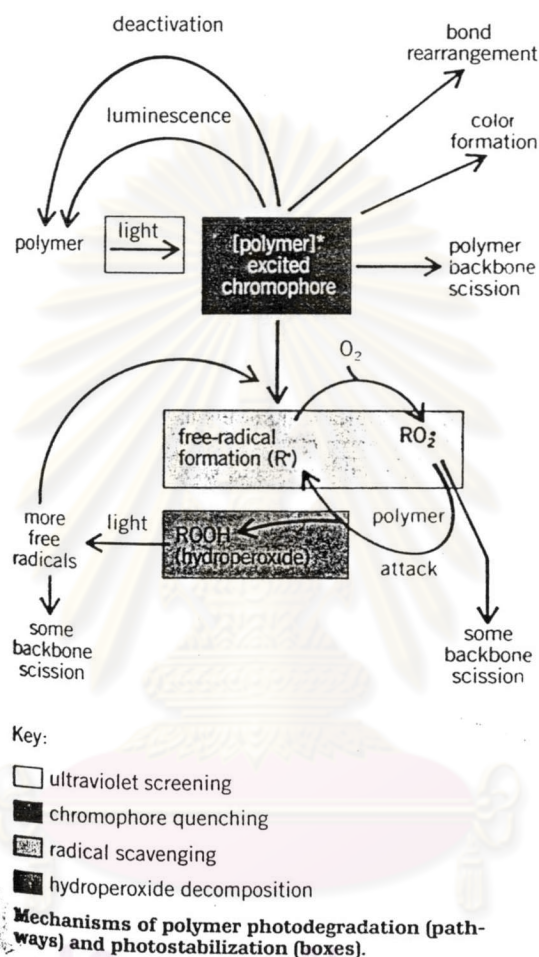
ตารางที่ 2.4 ความไวต่อแสงของพอลิเมอร์แต่ละชนิด⁵

Polymer	Outdoor lifetime (years)	Cutoff (nm)	Absorption relative to solar limit
Polyethylene	0.5-1.0	180	Nonabsorber
Polypropylene	0.2	180	Nonabsorber
Poly(vinyl chloride)	0.5	220	Nonabsorber
Poly(methyl methacrylate)	>20	240	Nonabsorber
Polyamides	3-4	240	Nonabsorber
Polystyrene	0.1	270	Nonabsorber
Polycarbonate	0.5	280	Inherent absorber
Polyurethane (MDI-based)	2	280	Inherent absorber
Poly(ethylene terephthalate)	3	310	Inherent absorber
Aramid [poly(paraphenylene terephthalamide)]	0.3	350	Inherent absorber

โดยปกติพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอะโรมาติกจะดูดแสงในช่วง UV ซึ่งพอลิเมอร์แบบอะลิฟาติก (aliphatic) ไม่เกิดการสลายตัว การสลายตัวของพอลิเมอร์ด้วยแสงนั้น อาจเกิดจากสิ่งแปลกปลอม (impurities) ในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการพอลิเมอไรเซชัน การขึ้นรูป หรือในระหว่างการใช้งานหรือการเก็บรักษา ซึ่งอนุภาคของสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UV และกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวต่อไปได้

ซึ่งกลไกในการเกิดการสลายตัวด้วยแสง แสดงในรูปที่ 2.4 เริ่มจากหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ในวัสดุดูดซับแสงเอาไว้ ทำให้เกิดการขาดของพันธะทางเคมี และก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน ออกซิเจนจะรวมตัวกับแรดิคัลที่มีความว่องไวและกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ต่อไป

การสลายตัวด้วยแสงสามารถทำให้เกิดได้โดยการเติมหมู่ทางเคมีที่มีความว่องไวต่อแสง (photoactive chemical groups) เข้าไปในสายโซ่พอลิเมอร์ หรือการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสง (photoactive additives) ลงไปก็ได้ เนื่องจากแสงที่ดูดกลืนโดยพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการขาดของพันธะซึ่งทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง จนสามารถเกิดการย่อยสลายด้วยกระบวนการอื่นๆต่อไปได้



รูปที่ 2.4 กลไกการสลายตัวโดยใช้แสง (photodegradation)⁶

การสลายตัวทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เป็นผลมาจากการที่วัสดุถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ (microbial attack) ที่เรียกว่า microbial degradation ซึ่งจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์หลากหลายชนิดซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ การทำลายพอลิเมอร์โดยใช้เอนไซม์เป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้อาหาร เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ การเข้าทำลายของจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์

เกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง โดยที่อุณหภูมิซึ่งมีการเติบโตของจุลินทรีย์มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส หรือเป็นการถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ขึ้น ที่เรียกว่า macroorganism degradation เช่น ทาก หนอน หรือสัตว์ที่มีฟันสำหรับกัดแทะ เช่น หนู หรือ กระรอก

โดยทั่วไปอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการสลายตัวทางชีวภาพ (biodegradation) คือ กระบวนการย่อยสลายที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น จุลินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อรา หรือสารที่สิ่งมีชีวิตเหล่านี้หลั่งออกมาซึ่งหมายถึงเอนไซม์ (enzyme) นั้นเอง

2.3 พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable Polymers)

แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะพลาสติก คือ การพัฒนา พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ ซึ่งมีอยู่หลายแนวทางด้วยกัน อาทิเช่น

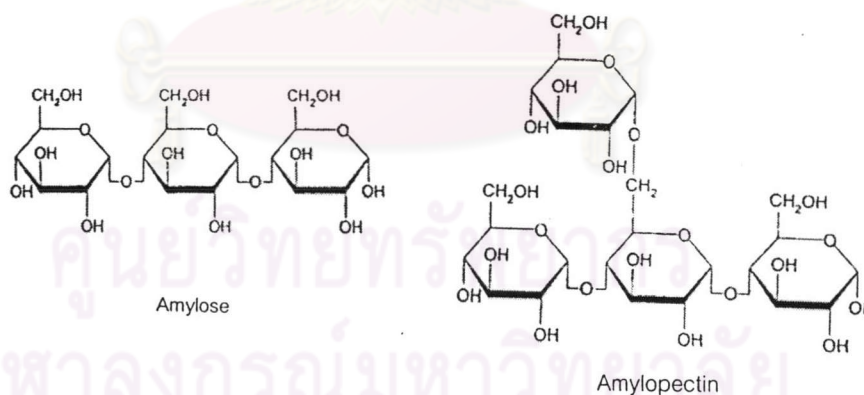
1. การใส่โครโมฟอร์ (chromophore) หรือหมู่ที่ไวต่อการไฮโดรไลซิสโดยจุลินทรีย์⁷ ตัวอย่างเช่น พอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ พอลิยูรีเทน พอลิแอนไฮไดรด์ และพอลิอะซิทัล
2. การพัฒนาพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรีย⁸⁻⁹ (bacteria-produced polymer) โดยใช้ จุลินทรีย์แปลงน้ำตาลจากข้าวโพดหรือพืชชนิดอื่นให้กลายเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ ตัวอย่างเช่น พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (PHB) พอลิไฮดรอกซีวาเลอเรต (PHV) และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนอิก แอซิด (PHA)
3. การผลิตพลาสติกจากพืชชนิดต่างๆ เช่น รำข้าวโพด¹⁰ (maize bran) รำข้าวสาลี¹¹ (wheat bran) หรือ พืชที่ให้น้ำตาล¹¹ (sugar-beet-pulp) โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification)
4. การผสม (blend) พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (nonbiodegradable polymer) เข้ากับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) เช่น แป้ง¹²⁻¹⁴ (starch) เซลลูโลส (cellulose) หรือ โปรตีน (protein)

ซึ่งการเติมตัวเติม (filler) ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ลงไปในพลาสติกนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องอาศัยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน โดยเมื่อตัวเติมที่แทรกอยู่ในพลาสติกถูกจุลินทรีย์ หรือ แบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติบริโภคไป จะเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของพลาสติก ทำให้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น จุลินทรีย์ แบคทีเรีย หรือ เชื้อรา สามารถแทรกซึมเข้าไปทำลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นตัวเติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย คือ แป้ง

2.3.1 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage นอกจากนี้ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group

แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น เรียกว่า อะไมโลส และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง เรียกว่า อะไมโลเพกทิน แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินแตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง¹⁵

แป้งเป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ จึงมีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว ยังมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น

อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมแป้ง
ดัดแปร เป็นต้น

ได้มีงานวิจัยมากมายที่ใช้แป้งเป็นตัวเติมลงในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถใน
การย่อยสลาย ซึ่งพบว่าประสบผลสำเร็จด้วยดีมาแล้ว

2.3.2 เจลาติน (Gelatin)

นอกจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่กล่าวมาแล้ว คือ แป้ง ยังมีพอลิเมอร์
อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างเป็นโปรตีนที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเช่นกัน คือ
เจลาติน

เจลาตินเป็นสารจำพวกโปรตีน ได้มาจากการสกัดคอลลาเจน (collagen) ซึ่งเป็นองค์
ประกอบหลักในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ เช่น กระดูก หนัง และเส้นเอ็น ซึ่งกระบวนการในการ
สกัดสามารถทำได้โดยการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) คอลลาเจนด้วยกรด (acid hydrolysis) หรือ
ด้วยด่าง (alkaline hydrolysis)

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

เจลาตินมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบๆ (coarse granules) จนถึงผงละเอียด ไม่มีสีหรือมีสี
เหลืองเล็กน้อย โดยจะมีลักษณะโปร่งใส (transparent) ไม่มีกลิ่นหรือรส มีลักษณะเป็นของแข็ง
เปราะ มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 1.3-1.4 ซึ่งสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเจลาตินจะ
ขึ้นอยู่กับ

1. แหล่งของคอลลาเจน
2. วิธีการสกัด
3. ภาวะในการสกัดและความเข้มข้น
4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
5. สารเติมแต่งหรือสิ่งเจือปนต่างๆ

จำนวนลูกโซ่ที่ต่อกันของเจลาตินจะมีความยาวมากตั้งแต่ 300-5,000 หน่วยโมเลกุล ในโมเลกุลของเจลาตินมีทั้งอนุมูลกรดและอนุมูลเบส จึงจัดว่าเป็นสารแอมโฟเทอริก (amphoteric) ซึ่งมีสมบัติพิเศษ คือ สามารถละลายได้ทั้งในสารละลายที่เป็นกรดและเป็นเบส

การปรับความเป็นกรดเป็นเบสของสารละลาย (pH) ให้เหมาะสมจะทำให้สภาพประจุของโมเลกุลเจลาตินเกิดความสมดุล มีสภาพเป็นกลาง ไม่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่าเป็น จุดไอโซอิเล็กทริกของเจลาติน (isoelectric point) เจลาตินที่ได้จากการสกัดคอลลาเจนด้วยสารละลายกรด จะมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ที่ค่าพีเอช (pH) 7-9 ในขณะที่เจลาตินที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่างจะมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ที่ค่าพีเอช 4-5 ที่จุดไอโซอิเล็กทริกเจลาตินจะมีสมบัติพิเศษ คือ จะมีอัตราการละลายน้ำหรือการบวมตัวน้อยมาก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเจลาติน พบว่า มีกรดอะมิโนมากมายหลายชนิดที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ ไกลซีน (glycine) โพรลีน (proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) ในปริมาณ 26.4-30.5 %, 14.8-18%, 13.3-14.5% ตามลำดับ นอกจากนี้จะพบกรดอะมิโนชนิดอื่นๆแทรกอยู่บ้าง เช่น อะลานีน (alanine) 8.7%, วาลีน (valine) 2.5%, ลิวซีน (leucine) 3.2%, ไอโซลิวซีน (isoleucine) 1.4%, ซิสทีน (cystine) และ ซิสทีอีน (cysteine) 0.1%, เมไทโอนีน (methionine) 1.0%, ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) 2.2%, เซอรีน (serine) 0.4%, ทรอนีน (thronine) 1.9%, ไทรอซีน (tyrosin) 0.5%, แอสพาทิก แอซิด (aspartic acid) 6.6%, กลูตามิก แอซิด (glutamic acid) 11.4%, อาร์จินีน (arginine) 8.1%, ไลซีน (lysine) 4.1% และ ฮิสทีดีน (histidine) 0.8%¹⁶

และจากการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) พบว่าเจลาตินประกอบไปด้วย ธาตุคาร์บอน 50.5% ไฮโดรเจน 6.8% ไนโตรเจน 17% และออกซิเจน 25.2% ซึ่งในเจลาตินที่มีความบริสุทธิ์มากอาจมีไนโตรเจนถึง 18.2-18.4 %

สมบัติของเจลาติน

เจลาตินที่บริสุทธิ์เมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายที่ใส ไม่มีสี สารละลายมีสภาพขุ่น แต่จะเหนียวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของเจลาติน ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถรับประทานได้ ดังนั้นสารละลายเจลาตินจะเสียเนื่องจากเชื้อราหรือแบคทีเรียได้ แต่สำหรับเจลาตินแห้ง มีปริมาณน้ำอยู่น้อย เชื้อราหรือแบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงเก็บในสภาพแห้งได้นานกว่า

การละลาย ในการนำไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร เภสัชกรรม หรือฟิล์มถ่ายภาพ เจลาตินจะถูกใช้ในรูปของสารละลาย เจลาตินจะไม่ละลายในแอลกอฮอล์ อะซิโตน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อีเทอร์ เบนซีน ปีโตรเลียมอีเทอร์ และตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว แต่จะละลายในน้ำ กรดอะซิติก และสารละลายของพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล โพรพิลีนไกลคอล ซอพิทอล และแมนนิทอล เจลาตินละลายได้ดีในน้ำร้อน เมื่อสารละลายเย็นตัวลงจะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นเจล (gel) มีความยืดหยุ่น การเปลี่ยนสภาพเป็นเจลนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และความเป็นกรดต่างของสารละลาย

การดูดความชื้น เจลาตินแห้งสามารถดูดความชื้นได้ดีและรวดเร็ว จนเมื่อปริมาณความชื้นที่ดูดไว้เท่ากับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่โดยรอบแล้วก็จะหยุดการดูดความชื้น เจลาตินดูดความชื้นได้ดีเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าสูง เช่น ในประเทศไทยซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70-80 เจลาตินที่มีขายอยู่ทั่วไปจะมีความชื้นประมาณ 9-12 เปอร์เซ็นต์

การพองตัว เจลาตินพองตัวได้เมื่อดูดสารละลายเข้าไป น้ำทำให้เจลาตินพองตัวได้ดี และอุณหภูมิจะมีผลต่อการพองตัวด้วยอย่างมาก การพองตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่อุณหภูมิมียค่ามากกว่า 30 องศาเซลเซียส พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลที่ทำให้โมเลกุลของเจลาตินยึดเกาะกันได้อย่างหลวมๆจะหมดไป ส่งผลให้เจลาตินหมดสภาพของการกลายเป็นเจล แต่จะละลายในสารละลายได้หมด ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เจลาตินจะละลายได้กลายเป็นสารละลายใส ไม่มีสภาพเจล ไม่หนืด ต่อเมื่ออุณหภูมิลดลงจนพันธะระหว่างสายโมเลกุลเกิดขึ้นได้ใหม่ สารละลายเจลาตินจึงกลับมามีสภาพเป็นเจลเช่นเดิม

การพองตัวของเจลาตินขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลทำให้เจลาตินมีการพองตัวในน้ำได้มากขึ้น ยกเว้นค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นจะเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่จุดไอโซอิเล็กทริก ซึ่งในกรณีเช่นนั้นเจลาตินจะมีการพองตัวน้อยมาก

การแข็งตัวของเจลาติน เจลาตินแข็งตัวได้จากปฏิกิริยาเชื่อมระหว่างสายโมเลกุลของเจลาตินกับสารที่ทำให้แข็งตัวหรือสารเพิ่มความแข็ง (hardener) เมื่อเจลาตินแข็งตัวจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

1. ลดการบวมตัวของเจลาตินเมื่ออยู่ในน้ำ และในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดหรือด่าง
2. เพิ่มคุณสมบัติการห่อหุ้มแผล เจลาตินจะทนต่อความร้อนได้ดีขึ้นโดยไม่เกิดการห่อหุ้มตัว เปลี่ยนสภาพจากเจลเป็นของเหลว
3. เพิ่มความหนืดของสารละลาย สารละลายเจลาตินที่มีสารทำให้แข็งตัวอยู่จะมีความหนืดมากขึ้นกว่าเดิม

การสกัดเจลาติน

ในทางอุตสาหกรรมจะเตรียมเจลาตินได้จากการไฮโดรไลซิสสารโปรตีนคอลลาเจนในกระดูกหรือหนังสัตว์ ขั้นตอนการเตรียมเจลาติน คือ

1. นำกระดูกมาล้างให้สะอาด ขจัดสิ่งปนเปื้อนออก ทูบให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ
2. ละลายแคลเซียมฟอสเฟตในกระดูกออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเป็นเวลานาน 1-2 วัน จะได้สารโอเซอิน (ossein) ซึ่งมีลักษณะเป็นเอ็นที่เหนียวและใส โอเซอินประกอบด้วยคอลลาเจนจำนวนมากยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น
3. ล้างโอเซอินให้สะอาดด้วยน้ำ
4. นำโอเซอินมาไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดหรือด่าง เพื่อย่อยสลายโมเลกุลโอเซอินที่มีลักษณะโครงสร้างตาข่ายต่อกันยาวด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงให้ขาดออกจากกัน ได้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดสั้นลง จนได้สารที่เรียกว่าคอลลาเจนซึ่งยังคงมีขนาดโมเลกุลใหญ่ จึงต้องไฮโดรไลซ์ต่อไปอีกเพื่อทำให้โมเลกุลขาดและสั้นลงเรื่อยๆ จนกระทั่งได้โมเลกุลเล็กลงอีก และได้ความยาวของโมเลกุลประมาณ 300-5,000 หน่วย ในขั้นนี้ก็ได้เจลาตินออกมา

วิธีการในการไฮโดรไลซิสโอเซอินมีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจางย่อยสลายโอเซอินจนกระทั่งโมเลกุลสั้นลงใช้เวลาประมาณ 1-2 อาทิตย์ จะได้เจลาตินที่มีจุดไอโซอิเล็กทริกที่ pH 7-9
2. การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) ใช้ด่างจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาว) ย่อยสลายโอเซอินจนกระทั่งโมเลกุลสั้นลง จะใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าวิธีไฮโดร-

ไลซ์ด้วยกรด คือ ใช้เวลาตั้งแต่ 20-100 วัน จึงจะได้สารละลายเจลาตินออกมา เจลาตินที่ได้มีจุดไอโซอิเล็กทริกที่ pH 4-5

นำสารละลายเจลาตินที่ได้มากรองให้สะอาด ขจัดสารปนเปื้อนออกด้วยถ่านกรอง (active charcoal) สารละลายที่ได้มีความเข้มข้นของเจลาตินประมาณร้อยละ 20 ต้องทำการระเหยน้ำออกโดยกระบวนการลดความดันเพื่อให้เจลาตินแห้งอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะการเคี่ยวด้วยความร้อนนานๆเพื่อให้น้ำระเหย จะทำให้เจลาตินเสื่อมสภาพและได้เจลาตินที่มีคุณภาพต่ำ จึงต้องใช้วิธีการลดความดันที่อุณหภูมิต่ำแทน จึงได้เจลาตินแห้งที่มีคุณภาพดีและมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 12-15

การใช้งานของเจลาติน

ปริมาณการผลิตเจลาตินทั่วโลกมีมากถึงประมาณ 115,000 เมตริกตัน ซึ่งประเทศที่มีการผลิตเจลาตินมากที่สุดคือ สหรัฐอเมริกา มีประมาณ 31,000 ตัน รองลงมาคือ ฝรั่งเศส เยอรมัน อังกฤษ และญี่ปุ่น ตามลำดับ โดยมีการใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้เป็นสแตบิไลเซอร์ (stabilizer) และสารเพิ่มความหนืด (thickener) ในอาหาร ในทางเภสัชกรรม ใช้ทำแคปซูลบรรจุยา (capsules) ตัวควบคุมและปลดปล่อยยา และในอุตสาหกรรมฟิล์มถ่ายภาพ จะใช้เป็นส่วนประกอบของฟิล์มถ่ายภาพโดยใช้ทำเป็นสารยึด (binder) หรือชั้นเคลือบ (emulsion layer) นั้นเอง

ในการใช้งานด้านอื่นๆซึ่งเป็นส่วนน้อย เช่น กาว (adhesives), ตัวกรองแสง (light filter) ใน mercury lamps, ใช้เคลือบกระดาษและผ้า (sizing), bacteriological culture media, protective colloid, microencapsulated products และ clarifying agent เป็นต้น

2.4 กระบวนการและความสามารถในการสลายตัว

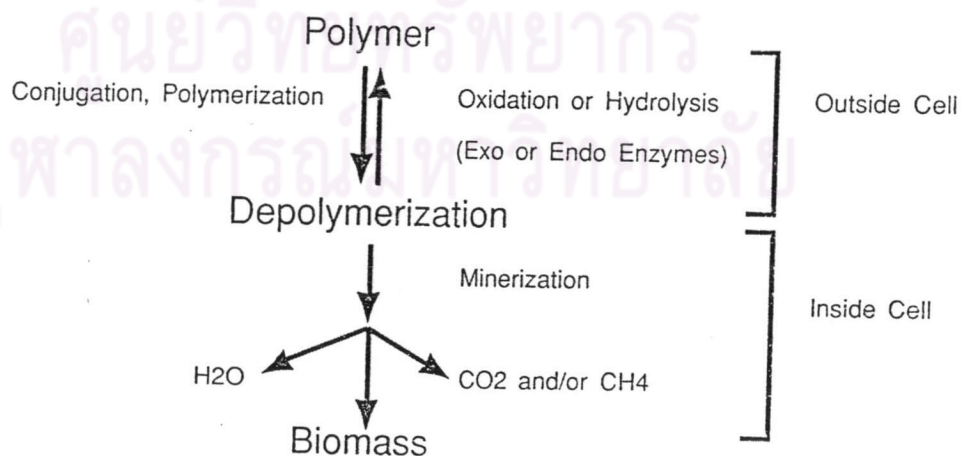
โดยปกติแล้ว พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (biopolymer) สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ดี ในขณะที่พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะต้านทานการย่อยสลาย ดังนั้นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพจึงมักมีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น โปรตีนหรือพอลิเปปไทด์ (polypeptides) พอลินิวคลีโอไทด์ (polynucleotides) พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides)

อย่างไรก็ตาม พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพแต่ละชนิดมีความสามารถในการสลายตัวที่ต่างกัน บางชนิดใช้เวลาเป็นเดือน แต่บางชนิดใช้เวลาร่วมปี ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและน้ำหนัก ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเป็นเส้นตรงจะย่อยสลายได้ดีกว่า

ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการย่อยสลาย ได้แก่ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น จุลินทรีย์ (microorganism) แบคทีเรีย (bacteria) และรา (fungi) โดยสิ่งมีชีวิตประเภทนี้จะผลิตเอนไซม์ (enzyme) เพื่อย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลของพอลิเมอร์ออกมาในระหว่างกระบวนการหายใจ ทั้งแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) โดยการเปลี่ยนให้เป็นโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ และแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) ที่จะได้ผลลัพธ์เป็นโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่น

กระบวนการย่อยสลายแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนี้ คือ

1. การขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ (depolymerization) โดยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กนั้นจะขับเอนไซม์ออกมาเพื่อตัด พอลิเมอร์ ทั้งการตัดอย่างสุ่ม และการตัดจากปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ เพื่อให้ได้สารประกอบที่เล็กลง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (outside cell)
2. สารประกอบที่ได้จะเข้าสู่เซลล์ของสิ่งมีชีวิตนั้น แล้วจะเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP น้ำ กลีเซอรอล และก๊าซต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (inside cell)



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการย่อยสลาย

กระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อพลาสติกอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น อุณหภูมิ และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของ พลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. สิ่งมีชีวิต ได้แก่ เอนไซม์ของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสม ปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสม การเคลื่อนที่ของเอนไซม์ เป็นต้น
2. โครงสร้างของพลาสติก ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี การกระจายตัวของสารที่ใช้ ความเป็นระเบียบในการจัดเรียงโมเลกุล พื้นที่ผิว และน้ำหนักของโมเลกุล เป็นต้น
3. สภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ออกซิเจน ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความดัน และแสง เป็นต้น

วิธีการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง ตัวอย่างเช่น

การฝังดิน : เป็นวิธีการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้วิธีหนึ่ง โดยชิ้นงานจะถูกนำไปฝังในดินภายนอกสถานที่หรือในห้องทดลอง เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ชิ้นงานจะถูกนำออกมา วิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย เช่น น้ำหนักที่สูญหายไป สมบัติเชิงกล ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือ ผลการทดลองที่ได้จะมีความแตกต่างกัน (non reproducibility) กล่าวคือเนื่องจากองค์ประกอบทางชีวภาพของการทดลองในแต่ละครั้งจะแตกต่างกัน เช่น ชนิดของดิน ความชื้น สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อยู่ภายในดิน ไม่ว่าจะเป็น จุลินทรีย์ แบคทีเรีย และเชื้อรา ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และยากที่จะควบคุมปัจจัยทางสภาพอุณหภูมิและความชื้น ทำให้ผลการทดลองไม่มี reproducibility

การเพาะเลี้ยงเชื้อราหรือแบคทีเรีย : เป็นการทดลองโดยการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียเพื่อใช้ในการย่อยสลายชิ้นงาน โดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียจะหลั่งสารเคมีประเภทเอนไซม์ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้แตกต่างกันออกไป เนื่องจากพอลิเมอร์ประกอบไปด้วยคาร์บอนหรือไนโตรเจนซึ่งเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ดังนั้นการย่อย

สลายพอลิเมอร์จะก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของกลุ่มเชื้อเหล่านี้ได้ ซึ่งการวัดความสามารถในการย่อยสลายสามารถทำได้ด้วยการสังเกตอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อที่เพาะเลี้ยงบนชิ้นงานพอลิเมอร์นั้นๆ หรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์หรือน้ำหนักของเซลล์จุลินทรีย์และแบคทีเรีย ซึ่งได้มีการแบ่งประเภทของความสามารถในการเจริญเติบโตของเชื้อราหรือแบคทีเรีย (colony growth) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ดังนี้คือ

- 0 คือ ไม่สามารถสังเกตการเจริญเติบโตได้
- 1 คือ มีการเจริญเติบโตน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์
- 2 คือ มีการเจริญเติบโต 10-30 เปอร์เซ็นต์
- 3 คือ มีการเจริญเติบโต 30-60 เปอร์เซ็นต์
- 4 คือ มีการเจริญเติบโต 60-100 เปอร์เซ็นต์

นอกจากการสังเกตการเจริญเติบโตของเชื้อราแล้ว สามารถพิจารณาผลอื่นๆได้ เช่น ผลเชิงปริมาณคือ ปริมาณการใช้ออกซิเจน (oxygen uptake) และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลต่างๆ ก็เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการย่อยสลายได้เช่นกัน

การใช้น้ำจากบ่อบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge Waste Water Treatment) เป็นวิธีการทดสอบการย่อยสลายโดยใช้น้ำเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง ซึ่งได้มีการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำ ทำได้โดยการจุ่มแซ่วัสดุพอลิเมอร์ที่ต้องการย่อยสลายลงในน้ำเสียที่มีจุลินทรีย์ เป็นระยะเวลาตามที่ต้องการ เมื่อครบกำหนดเวลาจึงนำออกมาตรวจสอบสมบัติต่างๆของวัสดุเพื่อติดตามผลของการย่อยสลาย เช่น น้ำหนักที่สูญเสียไป การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลต่างๆ

การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (enzymatic degradation) เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นวิธีที่มีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าวิธีที่กล่าวมา ซึ่งเป็นการเจาะจงนำเอนไซม์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายวัสดุนั้นๆ โดยตรง ดังนั้นวิธีการใช้เอนไซม์นี้จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ และเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบผลการทดลองซ้ำได้ (reproducible) เนื่องจากเป็นวิธีการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ โดยมีการควบคุมสภาวะที่ใช้โดยคำนึงถึงสภาวะที่เอนไซม์สามารถ

เร่งปฏิกิริยาได้สูงสุด ไม่ว่าจะเป็ น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดมีความสามารถแตกต่างกันออกไป

2.5 การปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด

ในการผสมพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้เข้ากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ มักมีปัญหาคือ เรื่องของความสามารถในการเข้ากันระหว่างเฟส กล่าวคือได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogenous) ซึ่งในการที่จะทำให้สมบัติของวัสดุเป็นไปตามต้องการนั้น ของผสมควรมีความสามารถในการเข้ากันที่ดี (miscible) และการกระจายตัวของพอลิเมอร์ยังเป็นอีกดรรชนีหนึ่งที่ใช้วัดความสามารถในการสลายตัวอีกด้วย

ปัญหาหนึ่งที่พบบ่อยมาก คือ พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีความชอบน้ำที่ต่างกัน โดยพอลิเมอร์สังเคราะห์มักมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในขณะที่พอลิเมอร์ธรรมชาติจะมีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้เกิดการเข้ากันไม่ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติที่ต้องการจะปรับปรุงด้วย ได้มีผู้ค้นคว้าและพัฒนาการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากัน อาทิเช่น

ในปี 1998 J.Prinos¹⁷ และคณะ ได้ทำการผสม LLDPE กับแป้งข้าวโพด โดยใช้เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (Ethylene /vinyl Acetate : EVA) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า EVA ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความสามารถในการยึดติดของฟิล์มพลาสติกสูงขึ้น

ในปี 1999 Jacob Jon และ Mrinal Bhattacharya¹⁸ ได้ผสมพอลิเอสเตอร์ที่กราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันกับโปรตีนจากถั่วเหลือง พบว่า พอลิเอสเตอร์ที่กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยวิธีการ free radical polymerization นั้นสามารถเข้ากันได้ดีกับโปรตีนดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่เตรียมได้มีสมบัติที่ดี และทำให้ความว่องไวต่อความชื้นของวัสดุลดลงด้วย

นอกจากนี้การเติมนอกจากนี้การเติมสารซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) อาทิเช่น โคพอลิเมอร์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิโอะเลฟินส์^{19,20} (PP or PE-g-MA) โคพอลิเมอร์ของอะคริลิกแอซิดและพอลิเอทิลีน (EAA) โคพอลิเมอร์เอทิลีนและไวนิลอะซิเตต²¹ (EVA) เป็นต้น สารเหล่านี้จะมีโครงสร้างของโมเลกุลที่ปลายข้างหนึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยากับหมู่ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะต้องสามารถเข้า

กันได้กับเนื้อพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งสารช่วยผสม ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA)

อีกวิธีหนึ่งคือ การตัดแปรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ธรรมชาติให้มีลักษณะความไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยการทำปฏิกิริยากับส่วนของสายโซ่อะลิฟาติก (aliphatic chain) ยาวๆ เช่น กรดไขมันชนิดต่างๆ²² ซึ่งส่วนที่เป็นกรดไขมันสายโซ่ยาวนี้เป็นส่วนที่แสดงถึงลักษณะไม่มีขั้ว (nonpolar) ซึ่งส่งผลให้มีความไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกับในพอลิเมอร์สังเคราะห์

2.6 กระบวนการผสมและขึ้นรูป

ในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์เพื่อนำไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการผสมส่วนประกอบอื่นๆลงไปด้วยเพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุให้มีสมบัติที่ติดตามที่ต้องการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งานเป็นหลัก การเติมสารเติมแต่ง (additives) ต่างๆลงไปอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์

สารเติมแต่งที่ใช้เพื่อต้องการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ใช้เพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (modifying additives) เช่น การทำให้วัสดุที่มีความแข็งสามารถยืดหยุ่นได้มากขึ้น โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) หรือการเติมสารตัวเติม บางชนิดลงไปเพื่อเพิ่มเนื้อของวัสดุทำให้วัสดุที่เตรียมได้มีราคาถูกลง เช่น การเติมสารที่มีราคาที่ถูกกว่าเข้าไปทดแทน

2. ใช้เพื่อป้องกันการสลายตัวของวัสดุพอลิเมอร์ (protective additives) ในระหว่างการผลิตหรือการใช้งาน เช่น antioxidant stabilizer

สารเติมแต่งที่นิยมเติมลงไป คือ ฟิลเลอร์ (filler) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือ การเติมลงไปเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต หรืออาจที่ผลต่อสมบัติบางประการของวัสดุ เช่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ ซึ่งโดยมากจะเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน เป็นต้น

ดังนั้นขั้นตอนในการผสมจึงมีความสำคัญต่อสมบัติของวัสดุด้วย ซึ่งวัสดุจะมีสมบัติที่ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการกระจายตัว (distribution และ dispersion) ที่ดีของพอลิเมอร์และสารตัวเติม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคในการผสมด้วย

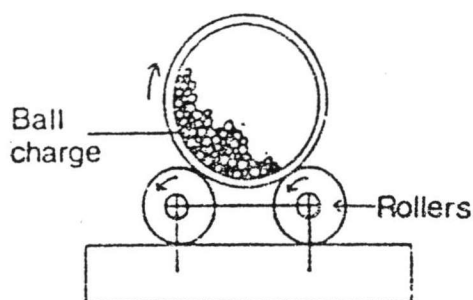
กระบวนการในการผสมพอลิเมอร์เข้ากับสารเติมแต่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้คือ

2.6.1 Blending or Extensive or Distributive Mixing

เป็นการผสมแบบเชิงกล โดยนำของผสมมาทวนหรือคลุกเคล้าเข้าด้วยกัน โดยไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งนิยมใช้ในการเตรียมเบื้องต้นก่อนนำไปผสมในระดับโมเลกุล (copounding) ต่อไป ตัวอย่างของเครื่องมือที่ใช้ในการผสมประเภทนี้ เช่น Tumble Drum, Ball Mill

หม้อบด (Ball Mill)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผสมเชิงกลหรือบดวัสดุที่เป็นของแข็งให้มีขนาดเล็กลง ประกอบไปด้วยหม้อบดรูปทรงกระบอก (cylindrical vessel) และลูกบดทำด้วยเหล็กกล้า (steel) หรือเซรามิก (ceramics) จำนวนมากและมีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับวัสดุที่ต้องการผสมหรือบดได้มากขึ้น ดังรูปที่ 2.9 โดยเริ่มต้นจะต้องทำการบรรจุวัตถุดิบที่ต้องการผสมทั้งหมดลงไปพร้อมกัน จากนั้นจึงวางหม้อบดบนแกนของเครื่องโดยวางในแนวนอน เมื่อมอเตอร์หมุนหม้อบดและลูกบดภายในก็หมุนตามไปด้วย ทำให้เกิดการเสียดสีกันของวัตถุดิบกับลูกบดที่อยู่ภายใน ทำให้เกิดการแตกของวัตถุดิบจนมีขนาดเล็กลง ซึ่งกระบวนการผสมโดยวิธีนี้จะมีข้อเสีย คือ เป็นกระบวนการที่ช้า ต้องใช้เวลาหลายชั่วโมงในการบดหรือผสม



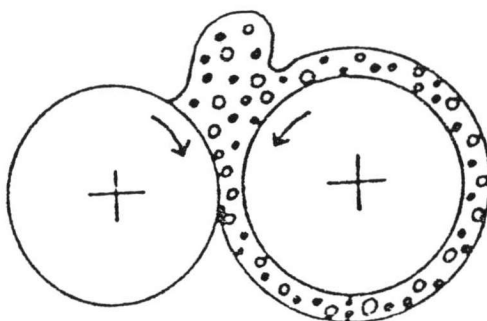
รูปที่ 2.9 หม้อบดผสม²³

2.6.2 Compounding or Intensive or Dispersive Mixing

เป็นการผสมในระดับโมเลกุลซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ โดยอาศัยความร้อนในการผสม ซึ่งพอลิเมอร์จะถูกหลอมเหลวในระหว่างการผสม และมีแรงเฉือน (shear) เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเครื่องผสมแบบนี้ ชนิดที่มีหลักการที่ง่ายที่สุด คือ เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (two roll mill)

เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)

เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้งเป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบไปด้วย ลูกกลิ้ง 2 ลูก ซึ่งจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน คือหมุนเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และจะมีช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) ไว้สำหรับใส่พอลิเมอร์และสารเติมแต่งต่างๆ ซึ่งสามารถปรับระยะระหว่างช่องให้มีขนาดตามต้องการได้ ซึ่งถ้าปรับให้มีระยะระหว่างช่องว่างที่เล็กจะทำให้เกิดการผสมที่ดีเนื่องจากมีแรงเฉือนสูง เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้งจะทำการผสมได้ดีในทิศทางเดียวกับเครื่อง (machine direction) แต่ในทิศทางตรงกันข้าม (transverse direction) จะเกิดการผสมที่ไม่ดีนัก และเทคนิคนี้ยังไม่เหมาะที่ใช้ในการผสมปริมาณมากๆ ทั้งนี้ความสามารถในการผสม (capacity) ของเครื่องจะขึ้นอยู่กับขนาดของลูกกลิ้ง ซึ่งอาจมีขนาดตั้งแต่ 84 นิ้ว ซึ่งใช้ในการผลิตในปริมาณมากในโรงงานอุตสาหกรรม หรือขนาดมาตรฐานคือ 60 นิ้ว 48 นิ้ว และ 36 นิ้ว ส่วนลูกกลิ้งที่มีขนาดเล็ก 18 นิ้ว 12 นิ้ว หรือ 6 นิ้ว เหมาะในการใช้ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.10 เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)²³

ขั้นตอนในการผสมทำโดยเติมพอลิเมอร์และสารเติมแต่งลงไปในช่วงว่างระหว่างลูกกลิ้งที่มีการให้อุณหภูมิที่ต้องการใช้หลอมเหลวพอลิเมอร์ก่อน (preheat) พอลิเมอร์จะหลอมเหลวติดอยู่รอบๆลูกกลิ้งลูกหนึ่ง โดยพอลิเมอร์จะหลอมเหลวติดอยู่กับลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และมีความเร็วรอบสูงกว่า จากนั้นจึงค่อยๆเติมสารเติมแต่งลงไป และทำการผสมโดยใช้มีดปาด ซึ่งทำจากอลูมิเนียม โดยการกรีดจากด้านหนึ่งของลูกกลิ้ง และตลบเนื้อพอลิเมอร์กลับไปกลับมา เพื่อให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดี หรือดึงของผสมออกมาแล้วใส่ลงไปใหม่ ทำซ้ำๆกันหลายๆครั้ง จนสังเกตเห็นว่าเกิดการผสมเข้ากันได้ดี จึงค่อยๆดึงของผสมออกมา ซึ่งของผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่น (sheet) หรือ ฟิล์ม (film) ขึ้นกับระยะระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองลูก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย