

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้พลาสติกในด้านต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกเหล่านี้ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทาน มีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพง และมีการออกแบบให้มีรูปแบบหลากหลายเพื่อประโยชน์ในการใช้งาน โดยมีกระบวนการผลิตที่สะดวกและรวดเร็ว แต่คุณสมบัติที่ดีเหล่านี้กลับทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากต้องเป็นภาระในการกำจัดภายหลังจากการใช้สอย โดยเฉพาะพลาสติกที่มีการใช้ครั้งเดียวทิ้ง จากการใช้ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ทำให้พลาสติกเหล่านี้ไม่ฝักใฝ่หรือถูกย่อยโดยสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติหรือแม้แต่ในกระบวนการกำจัดขยะ (เช่น การสลายไปเป็นส่วนหนึ่งของวงจรคาร์บอนในระบบนิเวศน์ เป็นต้น) มีผลทำให้ปริมาณขยะเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น ผลที่เห็นได้โดยตรงคือมลภาวะอันเนื่องมาจากกองขยะซึ่งเป็นแหล่งปฏิภูมิลและเป็นที่สะสมของเชื้อโรค ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณใกล้เคียงและในธรรมชาติโดยทั่วไป เช่น ดิน แม่น้ำ และทะเล เป็นต้น (Narayan, 1993) ความทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกเหล่านี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในธรรมชาติไม่มีเอนไซม์เอสเทอเรส (esterase) หรือดีพอลิเมอร์เอส (depolymerase) ที่สามารถย่อยและใช้สารต่างๆ จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มนุษย์สร้างขึ้นได้ นอกจากนี้ สมบัติที่ไม่ละลายน้ำของพลาสติกยังยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยแต่น้ำหนักโมเลกุลที่สูงของพอลิเมอร์ก็เป็นปัญหาอีกอย่างหนึ่งด้วย (Narayan, 1993) ปัจจุบันได้มีความพยายามในการกำจัดขยะพลาสติกหลายวิธีซึ่งได้แก่

1. การเผา (incineration) หลายประเทศในยุโรปได้นำพลาสติกใช้แล้วมาเผาเพื่อให้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการนำมาเผาอบยาสูบ แต่ก็ยังคงสร้างปัญหาในกรณีที่ไม่สามารถควบคุมควันหรือเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังรวมถึงก๊าซพิษต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ไฮโดรคลอไรด์ หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่มีอันตรายจำเป็นต้องมีระบบควบคุมความปลอดภัย และเสียค่าใช้จ่ายสูง (Evans and Sikdar, 1987; Huffman et al, 1973)

2. การถมที่ (landfilling) การจัดสรรพื้นที่ที่ถูกสุขอนามัยเพื่อใช้ในการกำจัดขยะโดยการถมเป็นวิธีที่นิยมกันมานาน ขยะจะถูกฝังลงดิน โดยอาจมีกระบวนการแยกเศษวัสดุที่ใช้ประโยชน์

ได้บางส่วนออกก่อนและทิ้งเฉพาะขยะส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถใช้ได้ แต่วิธีนี้จะเกิดผลข้างเคียงจากปัญหาเรื่องกลิ่น ไฟไหม้ หรือเป็นที่อาศัยของแมลงและสัตว์เล็กๆ นอกจากนี้ผลในระยะยาวคือพื้นที่ว่างที่ลดน้อยลงในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะ (Nicholson, 1994) โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูงซึ่งมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เบา เช่น ในประเทศอังกฤษ พลาสติกที่ถูกกำจัดจะเป็นพลาสติกแบบความหนาแน่นสูงประมาณ 7.3% โดยน้ำหนัก แต่มีปริมาณถึง 16.3% และคาดว่าในปี.ศ. 2000 ปริมาณของขยะพลาสติกเหล่านี้จะสูงถึง 31.4% ของปริมาณขยะทั้งหมด (Narayan, 1993) วิธีนี้จึงเป็นการแก้ปัญหาในระยะสั้น เนื่องจากปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถหาพื้นที่มารองรับได้หมดในอนาคต (Huffman et al, 1973)

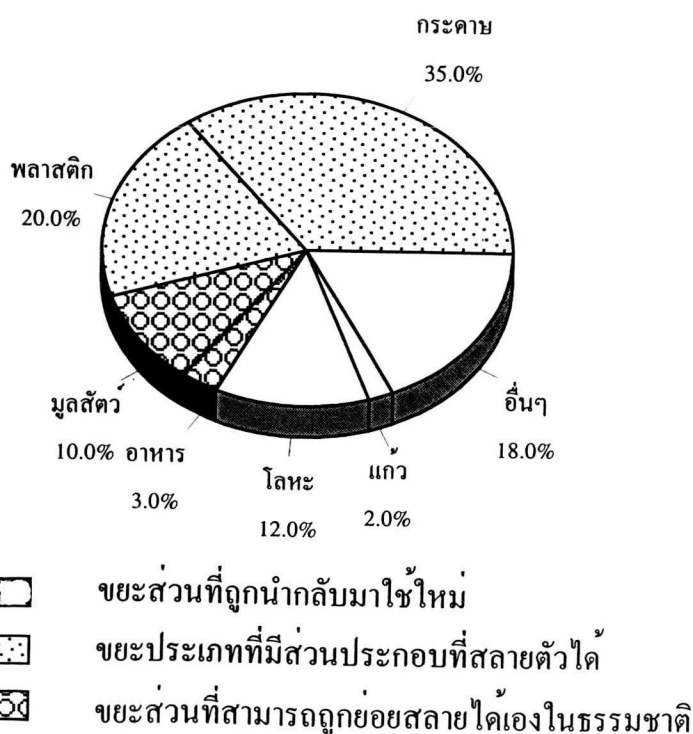
3. การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling) จะมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ พลาสติกใช้แล้วมีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่ ทำให้พลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้กับงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการบริโภคโดยตรง เช่น ถังน้ำ ถูใส่ขยะ กะละมัง เป็นต้น (Evans and Sikdar, 1987) และขั้นตอนในการแยกขยะพลาสติกชนิดต่างๆ ออกจากกันรวมถึงการแยกสารเติมแต่งออกจากพลาสติกทำได้ยากเนื่องจากความหลากหลายของชนิดของพลาสติกที่ถูกดัดแปลง ทำให้ยากต่อการแยกประเภทของพอลิเมอร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ระบบที่ใช้ในการแยกประเภทพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในยุโรปคือ การระบอบองค์ประกอบของพลาสติกที่ผลิตใช้ในแต่ละชนิดเพื่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์จำแนกชนิดและติดบาร์โค้ดลงบนผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการแยกประเภท (Nicholson, 1994) อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีการนี้คือพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่จะมีราคาสูงกว่าพลาสติกที่ผลิตขึ้นใหม่ นอกจากนี้ในขั้นตอนของกระบวนการในการนำกลับมาใช้ใหม่จะเปลี่ยนแปลงสมบัติของพลาสติกมีผลให้ลักษณะทางเคมีที่ติหลายประการลดลง เช่น การผ่านความร้อนจากกระบวนการผลิตมาแล้วในครั้งแรก เมื่อนำมาผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่จะใหม่ได้ง่าย ก้นถุงพลาสติกจะฉีกติดกันยากขึ้น และอายุในการใช้งานของพลาสติกจะสั้นลงด้วย (Evans and Sikdar, 1987 และ Leaversuch et al, 1987)

ขยะที่เกิดจากพลาสติกสังเคราะห์ที่ถูกผลิตขึ้นมาในหลายรูปแบบตามประเภทของการใช้งาน เช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ วัสดุที่ใช้เพื่อการขนส่ง เฟอร์นิเจอร์ หรือวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ก่อสร้าง ซึ่งมีจำนวนหลายล้านตันต่อปี และขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะต้องผ่านเข้าสู่กระบวนการกำจัด โดยถูกกำจัดได้เพียงบางส่วนหรือถูกกำจัดได้น้อยแล้วแต่ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิต โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดภายหลังการใช้งานแตกต่างกันดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดการขยะพลาสติกสังเคราะห์ที่จำแนกตามการใช้งาน (Wiley, 1986 อ้างถึงใน Nicholson, 1994)

ประเภทของการใช้งาน	อายุการใช้งานของพลาสติก (ปี)	%การกำจัดภายหลังการใช้งาน
วัสดุบรรจุภัณฑ์	1	100
วัสดุเพื่อการขนส่ง	5	20
เฟอร์นิเจอร์และอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน	10	10
อุปกรณ์ที่ใช้ทางไฟฟ้า	10	10
อาคารและอุปกรณ์ก่อสร้าง	50	2

ปัจจุบันในประเทศสหรัฐอเมริกา มีวิธีการกำจัดขยะประเภทขยะจากชุมชน [United State municipal solid waste (MSW)] โดย 80% ของ MSW ได้ถูกนำไปถมที่มี 10% ที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ และ 10% ที่ถูกนำไปเผา โดยพลาสติกและกระดาษประเภทที่มีส่วนประกอบของสารที่สามารถสลายตัวได้และใช้เพียงครั้งเดียว (single-used disposable packaging soiled & coated paper) ซึ่งมีถึง 55% ถูกนำไปใช้ในการถมที่และถูกจุลินทรีย์ในดินย่อยสลายเป็นแหล่งอินทรีย์สารในดิน อาหารและมูลสัตว์ (รวม 13%) จัดเป็นขยะส่วนที่สลายตัวได้ทั้งหมดจะถูกส่งมีชีวิตในธรรมชาติย่อยสลายได้เอง ส่วนแก้วและโลหะ (รวม 14%) จะเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Narayan, 1993)



รูปที่ 1 การจัดการขยะประเภทขยะชุมชนในสหรัฐอเมริกา (ดัดแปลงจาก Narayan, 1993)

จากปัญหาขยะที่เพิ่มขึ้นโดยลำดับดังเป็นที่ทราบกันดีโดยทั่วไป ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจที่จะหาวัสดุหรือพลาสติกใหม่ๆ ที่มีลักษณะที่ดีหรือมีการปรับปรุงให้เหมาะสมทั้งประโยชน์ใช้งานและง่ายต่อการกำจัดไปพร้อมกัน วัสดุที่น่าสนใจคือ พลาสติกย่อยสลายได้ (degradable plastic) ที่มีสมบัติของพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกับสามารถย่อยสลายได้ และผลจากการย่อยไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมดังเช่นสารพิษที่เกิดจากการย่อยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ทำให้เกิดมลภาวะหรือสารตกค้างในน้ำหรือบริเวณใกล้เคียง (Narayan, 1993) นอกจากนี้พลาสติกบางประเภทที่ไม่สามารถเก็บกลับมากำจัดได้ เช่น ถุงพลาสติกที่ใช้ตามร้านค้าทั่วไป ฝาจุกกระป๋องเครื่องดื่มต่างๆ ตาข่ายที่ใช้จับปลา หรือเชือกที่ใช้สำหรับการประมง พลาสติกเหล่านี้จะกลายเป็นขยะที่ถูกทิ้งอยู่ทั่วไปในธรรมชาติโดยไม่ถูกย่อยสลาย จึงได้มีการผลิตอุปกรณ์ที่สามารถย่อยสลายได้ มาใช้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ วัสดุหีบห่อที่ใช้เพียงครั้งเดียวทิ้ง เช่น อุปกรณ์บรรจุอาหาร เป็นต้น อุปกรณ์ที่ใช้เฉพาะงาน เช่น ถ้วย จาน ช้อน ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่สิ่งทอ (nonwovens) เช่น ผ้าอ้อม ผ้าอนามัย หรือพลาสติกที่ใช้ในทางการแพทย์ เช่น หมอนเย็บแผล แคปซูลบรรจุยา รวมถึงพลาสติกที่ใช้ในงานทางทะเล เช่น เครื่องมือจับปลาชนิดต่างๆ อุปกรณ์ที่กล่าวมาเป็นตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทที่อยู่ในหลักการออกแบบให้ถูกย่อยสลายได้ (Narayan, 1993; Nicholson, 1994)

พลาสติกสังเคราะห์ชนิดที่ถูกลย่อยสลายได้บางส่วน

การออกแบบพลาสติกสังเคราะห์ประเภทนี้ทำได้โดยให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เอ็นไซม์จากจุลินทรีย์สามารถไฮโดรไลซ์หรือออกซิไดส์ได้ พอลิเมอร์เหล่านี้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol หรือ PVA) บางชนิด พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone หรือ PCL) บางชนิด และพอลิแลคเตต (polylactate หรือ PLA) เป็นต้น (Narayan, 1993; Raghavan, 1995)

ก) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ หรือ PVA กระบวนการผลิต PVA ต้องทำที่อุณหภูมิสูงเนื่องจาก PVA มีจุดหลอมเหลวถึง 230 °ซ โดยได้มาจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ของพอลิไวนิลอะซิเตตกับแอลกอฮอล์ไอโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยคุณสมบัติของ PVA ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับของปฏิกิริยาในการไฮโดรไลซ์ PVA ชนิดดังกล่าวนี้จะสลายตัวได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง โดยถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 230 °ซ และถูกไฮโดรไลซ์ได้บางส่วนที่อุณหภูมิ 180-190 °ซ อย่างไรก็ตาม PVA สามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °ซ ในอุตสาหกรรม PVA ถูกผลิตใช้

เป็นวัสดุบรรจุสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร ใช้เป็นฟิล์มเคลือบ และยังใช้ในการผลิตเป็นถุงแบบใช้ครั้งเดียวสำหรับการซักโรคในโรงพยาบาล เป็นต้น การย่อยสลายในธรรมชาติ PVA จะถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงในขั้นตอนการกำจัดเพื่อให้โครงสร้างทางเคมีมีการเปลี่ยนแปลงและโมเลกุลมีขนาดเล็กลงก่อนที่จะถูกทิ้งในธรรมชาติ สิ่งมีชีวิตในธรรมชาติที่สามารถย่อยสลาย PVA ที่ถูกเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลแล้วมีทั้งแบคทีเรีย รา ยีสต์ และเห็ด โดยภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลาย PVA คือ ในปุ๋ยคอก ดิน และน้ำทะเล เป็นต้น (Raghavan, 1995)

ข) พอลิคาโพรแลคโตน หรือ PCL เตรียมได้จากการพอลิเมอไรซ์คาโพรแลคโตนแบบวงแหวน พอลิเมอรัสนี้มีความเป็นผลึกสูง จุดหลอมเหลวประมาณ 59 °ซ สามารถถูกย่อยสลายได้ โดยอัตราการย่อยสลายของ PCL จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นของพอลิเมอรั อัตราส่วนของความเป็นผลึกและความไม่ผลึก PCL เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์หรือฟิล์มโดยเป็นสารยึดหยุ่นและใช้เคลือบผิวภาชนะ PCL จะถูกย่อยสลายได้ในดินเมื่อทำการบ่มเป็นเวลา 3 เดือนโดยพบว่ามีกรย่อยสลาย PCL โดยเอ็นไซม์จากจุลินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมาในดินจะย่อยสายพอลิเมอรัโมเลกุลสูงให้มีขนาดสั้นลง (Narayan, 1993; Raghavan, 1995)

ค) พอลิแลคเตต หรือ PLA สารตั้งต้นในกระบวนการผลิต PLA ได้มาจากการย่อยสลายแป้งข้าวโพดหรือแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีกระบวนการผลิตเป็นสองขั้นตอนคือ การย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสด้วยเอ็นไซม์อะไมเลส (amylase) กับกลูโคอะไมเลส (glucoamylase) และการหมักกลูโคสให้เป็นกรดแลคติกโดยแบคทีเรียแลคโตบาซิลลัส (*Lactobacillus* sp.) แล้วผ่านกระบวนการพอลิเมอไรซ์กรดแลคติกให้เป็นพอลิแลคเตต โดยสามารถผลิต PLA เป็นโฮโมพอลิเมอรัและโคพอลิเมอรัร่วมกับไกลโคไลด์ (glycolide) และคาโพรแลคโตน (caprolactone) ได้อนุพันธ์หลายชนิดซึ่งมีประโยชน์และถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นไหมละลาย ไหมเย็บแผล (resorbable sutures) ใช้เป็นอวัยวะเทียมในการทำศัลยกรรมกระดูก (prosthetic devices) เป็นต้น (Narayan, 1993)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic)

มีการให้นิยามของคำว่า “biodegradable plastic” หลากๆ นิยาม จนเมื่อ ASTM (American Society for Testing and Materials) สรุปรูปเป็นมาตรฐานและให้นิยามของพลาสติกประเภทนี้ว่าเป็น “พลาสติกที่ย่อยสลายได้ โดยการย่อยมีผลมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย รา ยีสต์ หรือ สาหร่าย เป็นต้น” (Raghavan, 1995;) ซึ่งพลาสติกประเภทนี้มีหลายชนิด ทั้งที่เกิดในธรรมชาติและเป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่มีการใส่สารเติมแต่ง ได้แก่

ก) พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการใส่สารเติมแต่ง (additive based polymer)

ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรไพลีน (polypropylene) และพอลิสไตรีน (polystyrene) ที่มีการใส่สารเติมแต่งธรรมชาติบางชนิด เช่น ขี้วัว ขี้วัวโศด แป้ง และเซลลูโลส เป็นต้น (Evans and Sikdar, 1987; Raghavan, 1995) เมื่อพลาสติกเหล่านี้ถูกทิ้งในธรรมชาติ จุลินทรีย์จะย่อยสารเติมแต่งมีผลให้พลาสติกมีความอ่อนตัวลง มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น โลหะหรือน้ำที่มีอยู่ในดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้สายของพอลิเมอร์ขาดและน้ำหนักโมเลกุลลดลง (Johnson et al, 1993; Ramsay et al, 1993)

ข) พลาสติกที่ถูกสลายตัวโดยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV degradable plastic)

เนื่องจากพลาสติกชนิดนี้มีหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) เป็นองค์ประกอบซึ่งมีความไวสูงต่อแสง UV ทำให้เกิดการแตกตัวของสายพอลิเมอร์ทำให้พลาสติกกรอบและแตกได้ หรือมีการเติมสารเติมแต่งชนิดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำลายสายพอลิเมอร์เมื่อได้รับแสง UV เช่น เหล็ก และ ทองแดง เป็นต้น (Brandl et al, 1990)

ค) พอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ (microbial polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทางชีวภาพ โดยถูกสร้างและสะสมอยู่ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์บางชนิดพอลิเมอร์ดังกล่าวได้แก่พอลิไฮดรอกซีแอลคานอยด์ (polyhydroxyalkanoate) หรือ PHA ซึ่งจัดเป็นเทอร์โมพอลิเอสเทอร์ (thermopolyester) หมายถึงมีสมบัติที่สามารถนำมา

ขึ้นรูปได้เมื่อได้รับความร้อน และเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยตรงโดยเอ็นไซม์บางชนิด เช่น เอสเทอร์เอสหรือดีพอลิเมอร์เอสจากจุลินทรีย์ ได้สารที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ต่อไป จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในธรรมชาติ (Evans and Sikdar, 1987; Brandl et al, 1990) ปัจจุบันมีบริษัทที่ผลิต PHA เป็นการค้า ได้แก่ บริษัท ICI ที่ผลิตพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต หรือ PHB และพอลิ(ไฮดรอกซีบิวทีเรต-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ PHBV ซึ่งผลิตจากจุลินทรีย์โดยใช้แหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาลกลูโคสสำหรับการผลิต PHB ใช้น้ำตาลกลูโคสและกรดวาเลอริกสำหรับการผลิต PHBV ผ่านกระบวนการนำมาขึ้นรูปทำเป็นขวดแชมพูในประเทศสหรัฐอเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น และเยอรมนี และใช้ทำเป็นคัมจับมีดโกนในประเทศญี่ปุ่น (Raghavan, 1995)

ซึ่งจากรายงานของ Kimura และคณะ ที่ตีพิมพ์ในปี 1994 ได้จัดรูปแบบการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 2 แบบคือ deterioration และ decomposition โดยให้คำนิยามของการย่อยสลายแบบ deterioration ว่าเป็นการย่อยสลายทางกายภาพและเคมีซึ่งมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่า tensile strength และ relative viscosity ในขณะที่การย่อยสลายแบบ decomposition จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งมีผลทำให้มีการลดลงของน้ำหนักพลาสติกและมักจะกระตุ้นให้เกิดการย่อยสลายแบบ deterioration ด้วย โดย Kimura และคณะ ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกหลายชนิด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ (Kimura et al, 1994)

ชนิดของพอลิเมอร์	รูปแบบการย่อยสลาย
เซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรีย (bacterial cellulose, BC)	decomposition, deterioration
โคพอลิเมอร์ของ P(3HB/3HV)	decomposition, deterioration
พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ (PVA)	deterioration
พอลิคาโพรแลคโตน (PCL)	decomposition, deterioration
พอลิเมทิลกลูตาเมต (poly methyl L-glutamate, PMLG)	deterioration
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density PE, HDPE)	weak deterioration

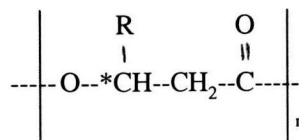
หมายเหตุ ทำการทดลองนานเป็นเวลา 24 เดือน

Kimura และคณะ พบว่า BC P(3HB/3HV) และ PCL ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ และมีการลดลงของน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ PVA PMLG และโดยเฉพาะ HDPE ถูกย่อยสลายได้น้อยมาก

พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต หรือ PHA

PHA เป็นพอลิเอสเทอร์ที่จุลินทรีย์บางชนิดสร้างและสะสมภายในแกรนูลในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานของเซลล์ และสามารถถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีเอนไซม์เอสเทอเรสและดีพอลิเมอเรส ผลจากการย่อยสลายได้สารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดคาร์บอกซิลิก (Evans and Sikdar, 1987; Brandl et al, 1990; Lee, 1996) จากสมบัติที่ดีเหล่านี้ทำให้มีงานวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิต PHA ออกมาในรูปแบบต่างๆ ในทางอุตสาหกรรมได้นำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุ เช่น ขวดแชมพู ถุงพลาสติก ฟิล์ม ผ้าอ้อม ผ้าอนามัย เป็นต้น นอกจากนี้ PHA ยังมีสมบัติที่เข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ได้ โดยนำมาผลิตเป็นไหมเย็บแผล เข็ม ผ้าซับเลือด ผ้าพันแผล และแคปซูลบรรจุตัวยา ทางการเกษตรได้นำ PHA มาผลิตในรูปเม็ดหรือแคปซูลเพื่อบรรจุสารบางชนิด เช่น ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ยาฆ่ารา และปุ๋ย เพื่อให้สารเหล่านี้ค่อยๆ ถูกปล่อยออกมาและมีฤทธิ์อยู่ได้นานในดิน วิธีนี้จะช่วยให้การใช้ยาเหล่านี้ไม่สิ้นเปลืองและไม่ต้องใช้อย่างบ่อยครั้ง (Brandl et al, 1990; Doi, 1990; Lee, 1996)

PHA เป็นพอลิเอสเทอร์สายตรงที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ซึ่งเป็นกรดไฮดรอกซี ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกจากโมโนเมอร์ตัวหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซีจากโมโนเมอร์อีกตัวหนึ่ง ปิตา-คาร์บอนเป็นไครัลคาร์บอนซึ่งทุกๆ โมโนเมอร์แสดง R-configuration และการเชื่อมต่อกันของโมโนเมอร์เป็นแบบหัวต่อหาง (head-to-tail configuration) และเป็นแบบไอโซแทคติก (isotactic) โดยมีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างของโมโนเมอร์ของ PHA (Brandl et al,1990; Doi,1990)

(---) คือพันธะเอสเทอร์ * คือปิตา-คาร์บอน

จากรูปที่ 2 เมื่อ R คือหมู่เมทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxybutyrate หรือ 3HB
 R คือหมู่เอทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxyvalerate หรือ 3HV
 R คือหมู่โพรพิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxycaproate หรือ 3HC
 R คือหมู่บิวทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxyheptanoate หรือ 3HH
 R คือหมู่เพนทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxyoctanoate หรือ 3HO
 R คือหมู่เฮกซิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxynonanoate หรือ 3HN
 R คือหมู่เซปทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxydecanoate หรือ 3HD
 R คือหมู่ออกทิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxyundecanoate หรือ 3HUD
 R คือหมู่โดเดซิล โมโนเมอร์นี้คือ β -hydroxydodecanoate หรือ 3HDD

PHA ที่พบแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ PHA ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียว เรียกว่าโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เช่น พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของบีตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต เรียกว่า พอลิ(บีตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต) หรือ PHB เป็นต้น และ PHA ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิดเรียกว่าเฮเทอโรโพลิเมอร์ (heteropolymer) เช่น โคพอลิเมอร์ของ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาลเอร์เรต) หรือ P(3HB-co-3HV) และโคพอลิเมอร์ของ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทีเรต) หรือ P(3HB-co-4HB) หรือเทอร์พอลิเมอร์ของ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาลเอร์เรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทีเรต) หรือ P(3HB-co-3HV-co-4HB) เป็นต้น (Doi, 1990; Lee, 1996)

จุลินทรีย์ที่พบว่าสามารถผลิต PHA ได้มีหลายชนิด ทั้งที่เป็นแบคทีเรีย รา และยีสต์ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีการสะสม PHA (Doi, 1990)

<i>Acinetobacter</i>	<i>Gamphosphaeria</i>	<i>Photobacterium</i>
<i>Actinomycetes</i>	<i>Haemophilus</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Alcaligenes</i>	<i>Halobacterium</i>	<i>Rhizobium</i>
<i>Aphanothece</i>	<i>Hyphomicrobium</i>	<i>Rhodobacter</i>
<i>Aquaspirillum</i>	<i>Lamprocystis</i>	<i>Rhodospirillum</i>
<i>Azospirillum</i>	<i>Lampropedia</i>	<i>Sphaerotilus</i>
<i>Azotobacter</i>	<i>Leptothrix</i>	<i>Spirillum</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Methylobacterium</i>	<i>Spirulina</i>
<i>Beggiatoa</i>	<i>Methylocystis</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Beijerinckia</i>	<i>Methylosinus</i>	<i>Syntrophomonas</i>
<i>Caulobacter</i>	<i>Micrococcus</i>	<i>Thiobacillus</i>
<i>Chlorofrexeus</i>	<i>Microcoleus</i>	<i>Thiocapsa</i>
<i>Chlorogloea</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Thiocystis</i>
<i>Chromatium</i>	<i>Moraxella</i>	<i>Thiodictyon</i>
<i>Chromobacterium</i>	<i>Mycoplana</i>	<i>Thiopedia</i>
<i>Clostridium</i>	<i>Nitrobacter</i>	<i>Thiophaea</i>
<i>Derxia</i>	<i>Nitrococcus</i>	<i>Vibrio</i>
<i>Ectothiorhoaospira</i>	<i>Nocardia</i>	<i>Xanthobacter</i>
<i>Escherichia</i>	<i>Oceanospirillum</i>	<i>Zoogloea</i>
<i>Ferrobacillus</i>	<i>Paracoccus</i>	

กลไกการย่อยสลายพอลิเมอร์

โดยทั่วไปกลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์นั้นมีได้หลายทาง ซึ่งอาจเป็นการย่อยสลายโดยเป็นไปอย่างช้าๆ หรืออาจมีการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว โดยในขณะที่มีการย่อยสลายพอลิเมอร์ อาจหลอมตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ลักษณะการสลายตัวที่แตกต่างกันเนื่องมาจากความซับซ้อนของชนิดและโครงสร้างของพอลิเมอร์นั้นๆ รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสลายตัวของพอลิเมอร์ เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้ แสง การเพิ่มอุณหภูมิ และรังสีต่างๆ รวมทั้งแรงกระทำทางเชิงกล เช่น ความเครียด เป็นต้น ซึ่งเราสามารถจำแนกชนิดของการย่อยสลายพอลิเมอร์ได้หลายแบบ ได้แก่ การย่อยสลายด้วยความร้อน (Thermal degradation) การย่อยสลายทางเชิงกล (Mechanical degradation) การย่อยสลายทางเคมี (Chemical degradation) การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) หรือ การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation) เป็นต้น (Kelen, 1983)

นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งการย่อยสลายพอลิเมอร์ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการย่อยสลายพอลิเมอร์ได้หลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาการตัดสายพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random chain scission) การย่อยสลายพอลิเมอร์ (Depolymerization) ปฏิกิริยาการเชื่อมไขว้ (Cross-linking) หรือ ปฏิกิริยาการแทนที่ (Substitution) เป็นต้น (Kelen, 1983)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีหลายกลไกในการย่อยสลายพอลิเมอร์ แต่การย่อยสลายทางชีวภาพจัดเป็นวิธีพื้นฐานที่มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพสูง และสามารถเกิดได้ทั่วไปในธรรมชาติ กลไกที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่

1) การสลายตัวโดยแสง (photodegradation)

เป็นวิธีที่อาศัยรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือ UV ในแสงแดดเป็นตัวทำให้สายของพอลิเมอร์แตกออกเป็นส่วนเล็กๆ โดยพอลิเมอร์จะมีความไวต่อแสง UV ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 290-400 นาโนเมตร พอลิเมอร์จะเสียบสมบัติทางกายภาพ ทำให้กรอบ ไม่แข็งแรง ในที่สุดจะสลายตัวเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง (Raghavan, 1995) วิธีการที่ทำให้พลาสติกสลายตัวด้วยแสงสามารถทำได้โดยการใช้สารช่วยกระตุ้นการสลายตัว (photo-activator) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นต้น ใส่ลงในพลาสติกให้ทำปฏิกิริยากับสารต้านการออกซิไดส์ (anti-oxidation) ได้ เป็นสารเชิงซ้อนอีกชนิดหนึ่ง เมื่อสารเหล่านี้ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะทำให้เกิดการแตกตัวได้ออก

ของโลหะ ซึ่งจะเป็ตัวเริ่มต้นในการสลายตัวต่อไป หรือการมีหมู่คีโตน คาร์บอนิล (ketone carbonyl system) โดยหมู่คีโตนในสายของพอลิเมอร์ซึ่งมีความไวสูงต่อแสง UV เมื่อถูกแสงจะรับพลังงานทำให้สายของพอลิเมอร์ขาด พลาสติกจะกรอบและแตก น้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่การย่อยสลายก็ยังไม่สมบูรณ์และเกิดขึ้นโดยใช้ระยะเวลาานานแต่มีการย่อยเพียงเล็กน้อย (Kelen, 1983)

2) การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation)

พลาสติกสังเคราะห์สามารถถูกย่อยสลายได้ในน้ำด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่เกิดขึ้นในอัตราที่ช้ามาก การย่อยสลายเกิดจากการตัดสายพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างง่าย พอลิเอสเทอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์สามารถถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ เกิดจากการไฮโดรไลซีสายพอลิเมอร์ในน้ำโดยไม่มีเอนไซม์คือพอลิเอสเตอร์ ซึ่งเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าการมีเอนไซม์ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน 2-3 เท่า (Doi, 1990) จากสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์โดยสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน์ โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์และการเกษตรได้ดังที่กล่าวมาแล้ว

จากการศึกษาของ Doi และคณะในปี 1989-1990 โดยศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชีวภาพ 4 ชนิดได้แก่ P(3HB) P(3HB-co-68%3HV) P(3HB-co-9%4HB) และ P(3HB-co-16%4HB) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปลอดเชื้อความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พีเอช 7.4 ที่อุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 37-70 °ซ พบว่าที่อุณหภูมิ 37 °ซ น้ำหนักของชิ้นพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 180 วัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุล โดยในช่วงระยะแรกของการบ่ม [ประมาณ 80 วันสำหรับ P(3HB) กับ P(3HB-co-68%3HV) และ 20 วันสำหรับ P(3HB-co-4HB)] ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุลแต่หลังจากนั้นน้ำหนักโมเลกุลเริ่มลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลา อธิบายได้ว่าในช่วงแรกโมเลกุลของน้ำมีการซึมเข้าสู่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้แผ่นฟิล์มมีความหนาขึ้นโดยไม่มีการย่อยของสายพอลิเมอร์ หลังจากนั้นการย่อยสลายเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และอัตราการย่อยสลายก็แตกต่างกันไปตามชนิดของพอลิเมอร์

Doi และคณะ(1989-1990) ยังได้ศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบของพอลิเมอร์ต่อการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 55 °ซ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พีเอช 7.4 โดยใช้แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ 3 ชนิดคือ P(3HB) P(3HB-co-3HV) และ P(3HB-co-4HB) ที่มีอัตราส่วนของปริมาณโมโนเมอร์ต่างกัน พบว่ามีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อัตรา

การย่อยสลายที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ทั้ง 6 ชนิด และสรุปว่าอัตราการตัดสายพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ และเรียงลำดับการย่อยจากมากไปหาน้อยดังนี้ $P(3HB-co-27\%4HB) > P(3HB-co-17\%4HB) > P(3HB-co-10\%4HB) > P(3HB) > P(3HB-co-45\%3HV) > P(3HB-co-71\%3HV)$ และจากการศึกษาการย่อยสลายของ $P(3HB-co-9\%4HB)$ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่อุณหภูมิ 70 °ซ พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ โดยน้ำหนักโมเลกุลของ $P(3HB-co-9\%4HB)$ ลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และค่าการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (polydispersities) อยู่ในช่วงแคบแสดงว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างง่ายของพอลิเมอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เกิดขึ้นเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงแรกมีการตัดสายโซ่พอลิเมอร์แบบสุ่มทำให้มีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และในช่วงที่สองก็เริ่มมีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการมีโมโนเมอร์ของ 4HB ในโมเลกุลช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายให้เร็วขึ้น (Doi et al, 1989-1990)

Satoh และคณะ (1994) พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสส่วนใหญ่ยังไม่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการถูกย่อยสลายกับความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ จึงได้ทำการทดลองกับพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ $P(3HB)$ และ $P(3HB-co-3HV)$ โดยการผสม (blend) แผ่นฟิล์มทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันได้แผ่นฟิล์มผสมของ $P(3HB)/P(3HB-co-3HV)$ ที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน และทำการบ่มแผ่นฟิล์มตัวอย่างในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.4 ที่อุณหภูมิ 55 °ซ พบว่าความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์มผสมลดลงตามปริมาณของ $P(3HB-co-3HV)$ ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว (Δh_f) ของแผ่นฟิล์มผสมลดลง

ในปีเดียวกัน Lauzier และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของ PHB ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ กันคือ เตรียมจากการสกัด PHB จากแกรนูลด้วยเอ็นไซม์ดีพอลิเมอเรสเตรียมจากการสกัดด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และเตรียมจากการเผาสกัดที่อุณหภูมิ 120 °ซ ทำการบ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3.0 นอร์มอล ปริมาตร 50 มล. โดยทำการรีฟลักซ์ (reflux) ที่อุณหภูมิ 104.5 °ซ เป็นเวลา 18 ชม. หยุดปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในน้ำแข็ง พบว่า PHB ที่เตรียมโดยวิธีการต่างกันมีค่า M_n และ M_w/M_n เริ่มต้นต่างกัน และจากการวิเคราะห์ PHB ภายหลังการย่อยพบว่า PHB ที่เตรียมโดยวิธีต่างกันมีอัตราการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา ควบคู่ไปกับการลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ ในขณะที่ระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นและได้ค่าสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 6 (ค่า T_m

และ Δh_f เพิ่มขึ้น) หลังจากนั้นน้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงอย่างรวดเร็วเกือบเป็นสองเท่าในช่วงแรก อุณหภูมิหลอมเหลวและค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลวของ PHB ก็ลดลงด้วย

จากรายงานของ Doi และคณะในปี 1989-1990 ที่ศึกษาการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเอ็นไซม์ P(3HB) ดีพอลิเมอร์เอส [P(3HB) depolymerase] พบว่าที่อุณหภูมิ 37 °C ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปลอดเชื้อที่มี P(3HB) ดีพอลิเมอร์เอส มีการลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ในอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาที่บ่ม และองค์ประกอบที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์มีผลทำให้มีอัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกัน การมีโมโนเมอร์ของ 4HB ทำให้อัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์เกิดได้เร็วขึ้นซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4 จะเห็นว่า โคพอลิเมอร์ของ P(3HB-co-4HB) มีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าโฮโมพอลิเมอร์ของ P(3HB) อย่างเดียว นั่นคือการมีโมโนเมอร์ของ 4HB ในสายของโคพอลิเมอร์จะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายด้วยเอ็นไซม์ เนื่องมาจากการเข้าจับของเอ็นไซม์กับหมู่เอสเทอร์ของ 4HB เกิดได้ง่ายกว่าการเข้าจับกับ 3HB เพราะลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่มีกิ่งก้านของ 4HB นอกจากนี้ความยาวของสายพอลิเมอร์ไม่มีผลต่ออัตราการย่อยสลาย P(3HB) ด้วยเอ็นไซม์ เป็นการสนับสนุนว่าเอ็นไซม์ P(3HB) ดีพอลิเมอร์เอส จัดเป็นชนิด endo-type hydrolase และการย่อยสลายด้วยเอ็นไซม์เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของแผ่นฟิล์มเท่านั้น โดยดูจากค่า Mn ที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจากการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแผ่นฟิล์มของ P(3HB) ทั้งด้านตัดขวางและพื้นผิวด้านบน ซึ่งพบว่ามีอัตราการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวด้านบนของแผ่นฟิล์มเท่านั้น (Doi et al, 1989-1990)

ตารางที่ 4 การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและน้ำหนักที่หายไปของแผ่นฟิล์มพอลิเอสเตอร์
 ภายหลังจากย่อยสลายด้วยเอ็นไซม์ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มี P(3HB) ดีพอลิเมอร์
 พีเอช 7.5 ที่อุณหภูมิ 37 °ซ (Doi, 1990)

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (ชม.)	%ของน้ำหนักเมื่อเทียบกับ น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักโมเลกุล	
			$M_n \times 10^{-3}$	Mw/Mn
P(3HB)	0	100	768	1.9
P(3HB)	5	83	837	1.7
P(3HB)	20	32	669	1.9
P(3HB)	0	100	22	3.4
P(3HB)	20	42	28	3.3
P(3HB-co-10%4HB)	0	100	395	3.0
P(3HB-co-10%4HB)	5	36	352	2.5
P(3HB-co-17%4HB)	0	100	366	2.9
P(3HB-co-17%4HB)	5	43	331	2.6

หมายเหตุ ขนาดของแผ่นฟิล์มเริ่มต้น 10×10 มม. หนา 40-70 ไมครอน หนัก 5-8 มก.

3) การย่อยสลายทางชีวภาพโดยปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ (microbial degradation)

เกิดจากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และยีสต์ จะผลิตเอ็นไซม์ ออกมาย่อยสลายโซ่คาร์บอนของพอลิเมอร์ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ และกรด คาร์บอกซิลิก เป็นต้น พลาสติกจะถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในธรรมชาติได้สารที่ไม่เป็น อันตรายต่อระบบนิเวศน์ (Holmes, 1985) ระยะเวลาในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง หลายประการ (Kelen, 1983) ได้แก่

1. สภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น
2. ชนิดและกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สามารถปล่อยเอ็นไซม์ออกมาย่อยพอลิเมอร์
3. ชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์
4. น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์
5. พื้นที่ผิวสัมผัสและความมีรูพรุนรวมถึงระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของพอลิเมอร์
6. ปัจจัยอื่นๆ เช่น การเติมสารช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเมอร์ หรือ การให้สารอาหารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์ เป็นต้น

PHA มีลักษณะพิเศษที่สามารถถูกย่อยสลายในธรรมชาติได้ โดยฟิล์มหรือไฟเบอร์ที่ผลิต จากพอลิเอสเทอร์จากจุลินทรีย์จะสามารถถูกย่อยในดิน กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย หรือในน้ำทะเล ได้อย่างรวดเร็วภายใต้ภาวะที่เหมาะสม จุลินทรีย์บางชนิด เช่น แบคทีเรียหรือรา จะปล่อย เอ็นไซม์ P(3HB) ดีพอลิเมอเรส ออกมานอกเซลล์ไปย่อยสลายพอลิเอสเทอร์ของ P(3HB) ให้ มีขนาดเล็กลงเป็น ไดเมอร์หรือ โมโนเมอร์และถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารต่อไป (Doi, 1990)

จากรายงานของ Brandl และคณะในปี 1990 กล่าวถึงความสามารถในการถูกย่อยสลาย ของ PHA ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ซึ่งโดย ทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นไม่มีผลมากนักต่อการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ของ PHB ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกย่อยสลายได้เร็วพอๆ กับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำกว่า ในขณะที่การมีโมโนเมอร์แบบ (S)-configuration จะทำให้การย่อยสลาย ของพอลิเมอร์เกิดได้ไม่ดี แสดงว่า ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์มีผลต่อการจับ ของเอ็นไซม์ (stereoselectivity) เช่น β -HB และ β -HV จะสามารถถูกย่อยสลายได้ดีโดยไม่ขึ้น กับปริมาณของ β -HV ที่มีอยู่ต่างกันพอลิเมอร์ สรุปว่าการย่อยสลายของพอลิเมอร์มีผลจาก โครงสร้างทางเคมีมากกว่าผลจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Mergaert และคณะในปี 1993 ซึ่งศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHA ในดิน พบว่ามีจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งที่เป็นแบคทีเรียแกรมลบ แบคทีเรียแกรมบวก สเตรปโตมัยซิส และราที่พบในดินที่สามารถย่อยสลาย PHA ได้ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ชนิดของจุลินทรีย์ที่พบในดิน 5 ประเภทที่สามารถย่อยสลาย PHA ได้ที่อุณหภูมิ 15 °ซ และ 40 °ซ (Mergaert et al, 1993)

ชนิดของจุลินทรีย์	การย่อยสลายในดินต่างกัน 5 ประเภทที่อุณหภูมิต่างกัน 3 อุณหภูมิ														
	15 °ซ					28 °ซ					40 °ซ				
	H	S	P	C	L	H	S	P	C	L	H	S	P	C	L
Prokaryotes															
<i>Acidovorax facilis</i>		×	×	×	×		×		×	×					
<i>Variovorax paradoxus</i>	×			×	×	×	×		×	×					×
<i>Pseudomonas syringae</i>							×								
<i>Comamonas testosteroni</i>								×							
<i>Cytophaga johnsonae</i>		×													
<i>Bacillus megaterium</i>							×		×	×					×
Unidentified gram-negative bacteria				×						×					
<i>Streptomyces</i> spp.	×			×		×	×		×	×				×	×
Molds															
<i>Aspergillus fumigatus</i>	×					×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
<i>Paecilomyces marquandii</i>				×			×		×						
<i>Penicillium daleae</i>						×									
<i>Penicillium simplicissimum</i>								×		×					
<i>Penicillium ochrochloron</i>					×					×					
<i>Penicillium adametzii</i>								×							
<i>Penicillium chermisinum</i>								×							
<i>Penicillium restrictum</i>										×					
<i>Acremonium</i> sp.										×					
Unidentified								×							

หมายเหตุ	H คือ ดินป่าไม้เนื้อแข็ง (hardwood forest soil)
	S คือ ดินทราย (sandy soil)
	P คือ ดินป่าสน (pinewood forest soil)
	C คือ ดินเหนียว (clay soil)
	L คือ ดินผสมปุ๋ย (loamy soil)

การตรวจสอบลักษณะของพอลิเมอร์ที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Characterization of biodegradable polymers)

โดยการหาอัตราการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวพอลิเมอร์ ซึ่งคู่ได้จากการเจริญของเชื้อที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าบนพลาสติกซึ่งจะเป็นตัวประเมินหรือเป็นหลักฐานว่าพลาสติกมีการถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้จริงอย่างคร่าวๆ (Raghavan, 1995) และสามารถขยายผลการตรวจสอบให้ละเอียดยิ่งขึ้นได้ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมจำนวนเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดให้แน่นอน และกำหนดภาวะให้เหมือนกันในทุกการทดลอง (Narayan, 1993) นอกจากนี้จะต้องตรวจสอบสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ภายหลังการย่อยสลายซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป อย่างไรก็ตาม การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ภายใต้ภาวะที่แตกต่างกันบอถึงความสามารถในการย่อยที่จำเพาะ และแตกต่างกันไปในแต่ละสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงควรทำการทดสอบควบคู่ไปกับการย่อยสลายในสภาพแวดล้อมจริงๆ ในธรรมชาติ เพื่อเป็นการยืนยันผลการย่อยสลายที่เกิดขึ้นและสามารถนำไปใช้ได้จริง (Narayan, 1993) การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพจะต้องมีการตรวจสอบขั้นพื้นฐาน (Raghavan, 1995) ดังต่อไปนี้

1) การสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ (weight loss)

การย่อยสลายทางชีวภาพเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและ / หรือทางกายภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียของมวลซึ่งสามารถคำนวณได้จากการชั่งน้ำหนักและเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปกับน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งอาจเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักหรือเป็นอัตราการผุพังของพอลิเมอร์ต่อเวลา

2) การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ก่อนและหลังการย่อยสลาย โดยดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ซึ่งจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของชิ้นพอลิเมอร์ได้ทั้งพื้นผิวภายนอกและภายในจากด้านบนและภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์ม โดย SEM จะให้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติที่มีความลึกทำให้สามารถมองเห็นลักษณะที่นูนและ / หรือเป็นหลุมลงไปของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถแยกลักษณะที่แตกต่างกันของเม็ดพอลิเมอร์และเซลล์หรือเส้นใยของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย

3) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ชนิดเดียวกันอาจประกอบด้วยโมเลกุลที่มีความยาวหรือน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน เรียกว่ามีน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบพอลิดีสเพอร์ส (polydisperse) ดังนั้นจึงไม่สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลที่แน่นอนของพอลิเมอร์ได้ ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะหาเป็นค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งมี 2 วิธีคือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number average molecular weight, M_n) เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากจำนวนโมเลกุลเป็นหลัก และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (weight average molecular weight, M_w) เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากน้ำหนักพอลิเมอร์ เมื่อมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ค่า M_w มากกว่า M_n เสมอ เนื่องจากโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีเป็นจำนวนมากกว่าโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และค่า M_w จะเท่ากับ M_n เมื่อทุกโมเลกุลมีขนาดเท่ากัน หรือเรียกว่ามีน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบโมโนดีสเพอร์ส (monodisperse)

การย่อยสลายเกิดจากการแตกของสายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนั้นการหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการย่อยสลายจึงเป็นการตรวจสอบผลที่สำคัญและข้อมูลที่ได้จะเป็นการยืนยันผลการย่อยสลายที่เกิดขึ้นได้จริง เครื่องมือในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ได้แก่เครื่อง gel permeation chromatography (GPC) ซึ่งจะให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) และอัตราส่วนของ M_w/M_n บอกถึงดัชนีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (polydispersity index, PDI)

4) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพอลิเมอร์

เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพอลิเมอร์ เช่น ระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, DP) อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว (enthalpy of fusion, ΔH_f) คือค่าความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง

เป็นของเหลว และอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature, T_g) คืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว (glass) ไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubber) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยการใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) และ thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และไม่เป็นผลึก (amorphous) โดยการซึมของน้ำและการจับของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นได้ดีในส่วนที่ไม่เป็นผลึกมากกว่าในส่วนที่เป็นผลึก เมื่อส่วนที่ไม่เป็นผลึกถูกย่อยไปเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นผลึก ระดับความเป็นผลึกก็จะเพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่า DP , T_m และ Δh_f เพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้เรายังตรวจสอบให้ละเอียดยิ่งขึ้นได้ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการย่อยสลาย โดยการใช้เครื่อง GC, NMR และ IR เป็นต้น

มูลเหตุจูงใจในการทำงานวิจัย

เนื่องจากพลาสติกสังเคราะห์ที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและมีผลตกค้างในระบบนิเวศน์ การผลิตพลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาดังกล่าวได้ พอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น PHA ได้รับความสนใจในการทดแทนการใช้พลาสติกปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารที่สร้างจากจุลินทรีย์บางชนิดและสามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติที่มีเอ็นไซม์เอสเทอร์เอสหรือดีพอลิเมอร์เอสเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานต่อไป ผลจากการย่อยสลายได้สารที่ไม่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศน์ จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่สามารถสร้างและสะสม PHA ได้และหาภาวะในการเลี้ยงเชื้อเพื่อการผลิตด้วยการปรับปรุงสูตรอาหารและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญและการสร้าง PHA จากเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด นอกจากนี้นักวิจัยหลายกลุ่มยังศึกษาถึงความสามารถในการย่อยสลายของ PHA โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมหลายๆ แบบ เช่น จากการศึกษารายงานของ Doi และคณะ (1989-1990) ที่มีงานวิจัยต่อเนื่องในการศึกษาถึงพอลิเอสเทอร์หลายชนิดที่ผลิตจากจุลินทรีย์ทั้งในด้านการผลิต การนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และการย่อยสลาย หรือจากการศึกษาของ Brandl และคณะ (1990) ที่กล่าวถึงพลาสติกจากแบคทีเรียคือ PHA ว่าเป็นพอลิเอสเทอร์ธรรมชาติที่สามารถผลิตและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ หรือบทความทางวิทยาศาสตร์ของ Lee (1995) ที่รวบรวมงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มโดยกล่าวถึง พอลิเอสเทอร์จากแบคทีเรียได้แก่ PHA ชนิดต่างๆ และอีกหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้ โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติซึ่งผลิตได้จากจุลินทรีย์ โดยเป็นงานวิจัยที่ศึกษามาต่อเนื่อง เริ่มจากอรุณ ชาญชัย

เขาวัววัฒน์ (2536) ได้คัดเลือกแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ผลิต PHA ได้แก่ *Alcaligenes* sp. A-04 โดยทำการศึกษานิตและสมบัติทางกายภาพและเคมีของพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตได้พบว่าเป็น PHB และทำการเลี้ยงในระดับขวดเขย่าด้วยการใช้อาหารเพื่อการผลิต PHB คือ MSM (mineral salt medium) และได้ปรับปรุง โดยใช้ฟรักโตส 5 กรัมต่อลิตรเป็นแหล่งคาร์บอนและมีการจำกัดไนโตรเจน ทำให้เชื้อมีการสร้างและสะสม PHB เพิ่มขึ้นเป็น 47% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (เมื่อคัดเลือกเชื้อได้ เชื้อสามารถผลิต PHB ได้เพียง 20% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง) ชนัญ ผลประไพ (2537) ได้ศึกษาต่อมาโดยใช้อาหารสูตรปรับปรุงของอรุณาใช้ในการผลิต PHB จากเชื้อเดียวกันในถังหมักขนาด 5 ลิตร และหาภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงในระดับถังหมักโดยเลี้ยงแบบ 2 ขั้นตอนคือ การเลี้ยงเชื้อให้ได้ปริมาณเซลล์สูงในอาหาร rich medium แล้วจึงถ่ายเชื้อลงในอาหารเพื่อการผลิต PHB ใช้ฟรักโตส 30 กรัมต่อลิตร และปริมาณแอมโมเนียมซัลเฟต 1.5 กรัมต่อลิตร ควบคุมอัตราการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศ 1.8 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเป็น 30 °ซ โดยให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในถังหมักเท่ากับ 100% พบว่า *Alcaligenes* sp. A-04 สามารถผลิต PHB ได้สูงถึง 85% ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง (คิดเป็น 7.54 กรัมต่อลิตร) เนื่องจาก PHB มีสมบัติที่แข็งและเปราะ อัญชญา สุรติขจร (2537) จึงศึกษาโคพอลิเมอร์ของ P(3HB-co-3HV) ซึ่งมีสมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่า PHB คือ มีความแข็งแรงลดลงและความเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้เหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้มากกว่า PHB โดยได้ศึกษานิตและองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแบคทีเรียสายพันธุ์เดียวกันเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของโคพอลิเมอร์ที่ผลิตได้และเทอร์พอลิเมอร์บางชนิดเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่า *Alcaligenes* sp. A-04 สามารถผลิต PHA ได้หลายชนิดทั้งที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์ของ P(3HB) และ P(3HV) หรือโคพอลิเมอร์ของ P(3HB-co-3HV) และ P(3HB-co-4HB) และเทอร์พอลิเมอร์ของ P(3HB-co-3HV-co-4HB) โครงการวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จาก *Alcaligenes* sp. A-04 ในภาวะปลอดเชื้อและเมื่อใช้แหล่งจุลินทรีย์ภายใต้ภาวะในการย่อยสลายแตกต่างกัน โดยศึกษาผลขององค์ประกอบของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ และแหล่งจุลินทรีย์ที่ต่างกันต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกผลิตพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์และสามารถถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติควบคู่กันไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHA ที่ผลิตได้จาก *Alcaligenes* sp. A-04 ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในภาวะปลอดเชื้อและการย่อยสลายทางชีวภาพในดินในภาวะที่มีอากาศ โดยศึกษาผลขององค์ประกอบของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ และแหล่งจุลินทรีย์ที่ต่างกันต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ผลิต PHA ที่มีองค์ประกอบต่างๆ กันจาก *Alcaligenes* sp. a-04 ในถังหมักขนาด 5 ลิตร สกัดแยกและทำให้บริสุทธิ์แล้วเก็บรวบรวมให้ได้ในปริมาณมาก เพื่อนำไปใช้ในการย่อยสลายทางชีวภาพ
2. ตรวจสอบลักษณะและองค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้ด้วยการวิเคราะห์ทางเคมี
3. เตรียมตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้เพื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ
4. ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHA ชนิดต่างๆ โดยทำการทดลอง 2 แบบคือการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปลอดเชื้อ และการย่อยสลายทางชีวภาพในแหล่งจุลินทรีย์ต่างกัน 5 ชนิด
5. ตรวจสอบลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ภายหลังการย่อยสลายทางชีวภาพ