

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้

# พลาสติกย่อยสลายได้

## ทางชีวภาพ

### (Biodegradable plastics)



สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้

# พลาสติกย่อยสลายได้

## ทางชีวภาพ

### (Biodegradable plastics)



สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

# คำนำ

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ เรื่อง “ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ” ฉบับนี้ สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้จัดทำขึ้นภายใต้โครงการเครือข่ายห้องสมุดอิเล็กทรอนิกส์ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ โครงการย่อยที่ 2 โครงการเพิ่มศักยภาพการเข้าถึงสารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในรูปแบบ Digital Library กิจกรรมย่อย 2.5 ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ (Information Repackaging) ในส่วนของสารนารูด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้นี้ให้ผู้ใช้ได้เข้าถึงสารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายและสะดวกพร้อมใช้ เอกสารประมวลพร้อมใช้ฉบับนี้ให้ความรู้เกี่ยวกับประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กลไกการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

คณะผู้จัดทำหวังว่า ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเอกสารฉบับเต็มที่ใช้ในการเรียบเรียงประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ฉบับนี้ได้รวบรวม จัดเก็บ และให้บริการ ณ บริเวณห้องอ่านชั้น 2

ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

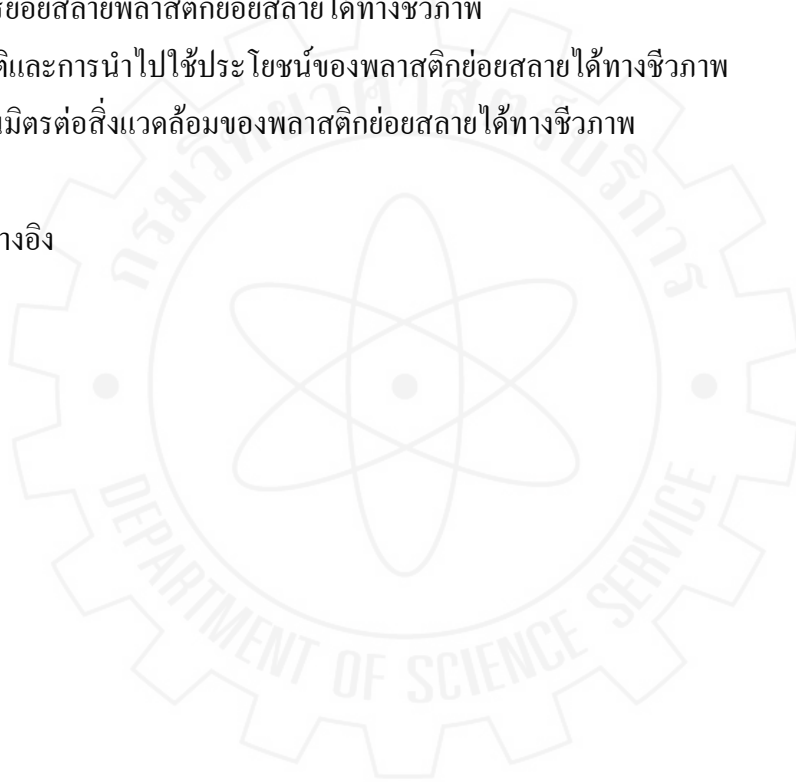
สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อ	1
คำสำคัญ	1
บทนำ	2
ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	4
เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	6
กลไกการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
คุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	25
บทสรุป	28
เอกสารอ้างอิง	30



## พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเริ่มเป็นที่ประจักษ์แล้วว่า การหาพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นวิธีการเดียวที่จะทำให้เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและอำนวยความสะดวกสบายให้แก่มวลมนุษยชาติดำเนินไปอย่างสมดุลกับธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีพื้นฐานของมวลมนุษยชาติเริ่มจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบไปสู่กระบวนการผลิตปิโตรเคมีได้ก่อให้เกิดวัสดุหลากหลายชนิดที่ต่อเนื่องไปสู่การพัฒนาเป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกต่างๆ ถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกตลอดศตวรรษที่ผ่านมา แต่มนุษย์ได้พบข้อจำกัดของแหล่งพลังงานจากน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติซึ่งประมาณการได้ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด อีกทั้งกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะได้ขยายไปในวงกว้างและมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของโลก ปัญหาด้านการไม่ย่อยสลายและตกค้างอยู่ในธรรมชาติหรือการกำจัดด้วยการเผาไหม้อีกก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้น ล้วนแต่เป็นประเด็นปัญหาที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันแล้วว่าต้องหาวิธีการแก้ไขอย่างเร่งด่วน จึงทำให้การคิดค้นกระบวนการใหม่และการสร้างนวัตกรรมอย่างครบวงจรภายในเวลาอันรวดเร็ว ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นประเด็นหลักในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานในอนาคตอันใกล้ ซึ่งแบ่งตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics) ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกประเภทหลังกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยนักวิทยาศาสตร์ตลอดจนนักธุรกิจและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในระดับแนวหน้าทั่วโลกกำลังตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบมวลชีวภาพ (biomass) ในการผลิตพลาสติกชนิดใหม่ เช่น พอลิแลคติกแอซิดหรือพอลิแลคไทด์ (PLA) และ กลุ่มพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) ฯลฯ เพื่อรองรับมาตรการและนโยบายในการจัดการด้านการรักษาสีงแวดล้อม พร้อมทั้งแนวโน้มการค้าขายสินค้าอุปโภคบริโภคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

**คำสำคัญ :** พลาสติก; การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ; สิ่งแวดล้อม; จุลินทรีย์

**Keywords :** Plastic; Biodegradable; Environment; Microorganism

## 1. บทนำ

พลาสติกนับว่ามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิต หากเราได้มีโอกาสไปเดินซื้อสินค้าไม่ว่าที่ใดก็ตาม จะพบว่าผลิตภัณฑ์เกือบทุกชนิดที่เราซื้อ อาหารส่วนใหญ่ที่เรารับประทาน และเครื่องใช้จำนวนมากที่เราใช้ ล้วนผลิตขึ้นหรือถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่เรียกว่าพลาสติกด้วยกันทั้งสิ้น การใช้พลาสติกมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี ในทำนองเดียวกันของเหลือทิ้งที่มาจากผลิตภัณฑ์ พลาสติกก็ย่อมมีปริมาณมากขึ้นตามกัน สมบัติของพลาสติกที่ย่อยสลายช้ากลายเป็นปัญหาไปทั่วโลก เพราะถ้าไม่มีการกำจัดที่ถูกต้องก็มีแต่จะทับถมกันมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (degradable plastic) ในรูปแบบต่างๆ ขึ้นมา เคล็ดลับอยู่ที่การผสมพลาสติกด้วยสารเคมีที่สลายตัวได้ด้วยแสงสว่าง แแบคทีเรีย หรือสารเคมีชนิดอื่น

พลาสติกย่อยสลายได้ เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ สามารถวัดการย่อยสลายได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติก ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิด และประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ องค์กรในต่างประเทศหลายๆ องค์กรได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐาน วิธีการทดสอบและการรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ISO (International Organization for Standardization) ASTM (American Society for Testing and Materials) DIN (Deutsches Institut für Normung or German Institute for Standardization) JIS (Japanese Industrial Standard) ORCA (Organic Reclamation and Composting Association, Belgium) และ ISR (Institute for Standards Research) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ในระดับนานาชาติในปัจจุบันนี้มี รายละเอียดที่ใกล้เคียงกัน หากแต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่ององค์ประกอบ วิธีการทดสอบ และคุณสมบัติเพื่อผ่านการรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม มาตรฐานเหล่านี้ ล้วนมีส่วนหลักที่คล้ายคลึงกัน อาทิ การวัดความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability) การวัดความสามารถในการแตกเป็นชิ้นเล็กๆ (disintegration) ของวัสดุทดสอบในสภาวะหมักปุ๋ย (compost) และการประเมินการย่อยสลายเบื้องต้น รวมถึงปริมาณโลหะหนัก ตลอดจนการวิเคราะห์คุณภาพ และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของปุ๋ยที่ได้จากการหมัก (ecotoxicity of the compost)

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอนินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้อ้างว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์

ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่าบรรจุภัณฑ์สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ชนาวดี ลีจังกภัย, 2549 ก)

## 2. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (รูปที่ 2) คือ

แหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้		แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม
พลาสติกที่มีแปงเป็นองค์ประกอบ	PBS	PVA
พื้นฐาน	PBT	พอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง
PLA	PTT	เช่น PCL
PHAs	พอลิเอไมด์	ACC โคพอลิเมอร์
	พอลิยูรีเทน	PET ที่ถูกดัดแปร
		พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยแสง
		Controlled degradation additive master-batches

รูปที่ 2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม (NIA, 2551)

**2.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้** ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และปาล์ม ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชผลทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (lignocellulosics) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีสำหรับการย่อยเซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิกไปเป็นน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา

**2.2 แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม** เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (naphtha) และถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ และถูกใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวนอกจากจะใช้แล้วหมดไปแล้ว กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในการผลิตวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติก เพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมลง นอกจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้ว ยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย

### 3. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถจำแนกตามกลไกของการย่อยสลายได้ (ธนาวดี ลีจากภัย, 2549 ข) ดังต่อไปนี้

**3.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ** (biodegradable plastics) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและ ข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็เกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งผู้บริโภคบางรายที่กลัวว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะเกิดการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งานโดยทำให้อายุการใช้งานสั้น และไม่คุ้มค่าในการใช้งานนั้น ไม่ต้องกังวลในจุดนี้อีกต่อไป เพราะตราใบที่เราไม่ทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ให้เป็นขยะ โดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบ และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลาย ก็จะไม่เกิดการย่อยสลาย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มการทำตลาดที่ดี และมีการผลิตเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ Polylactic Acid (PLA) และ Polyhydroxyalcanoates (PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้



จากธรรมชาติคือ ใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังและข้าวโพด ให้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากพลาสติก 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีพลาสติกย่อยสลายอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมในตลาดเช่นกัน นั่นคือ poly (butylene adipate-co-terephthalate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบปิโตรเคมี ผลิตโดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมนี มีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพลาสติกทั้ง 2 ชนิดข้างต้นซึ่งได้มาจากพืชธรรมชาติ (Shiro Kaze, 2551)

**3.2 พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน** (oxidative degradation plastics) หรือบางครั้งเรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพายุลินทรีย์ (bioerodable plastics) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

**3.3 พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง** (photodegradable plastics) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งขึ้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนาจนเกินไป เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง ประเทศฝรั่งเศสใช้พลาสติกประเภทนี้ ขนาดกว้างประมาณ 1 เมตร บูลงบนทุ่งนาเพื่อกักเก็บความร้อนในดิน และเร่งผลผลิต อายุใช้งานอยู่ระหว่าง 1-3 ปีก่อนฝังลงไปกับดิน แต่พลาสติกชนิดนี้ต้องใช้ในภูมิประเทศที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวตามอัตราที่คาดการณ์ได้

**3.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส** (hydrolytic degradation plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮโดรด์ พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิ

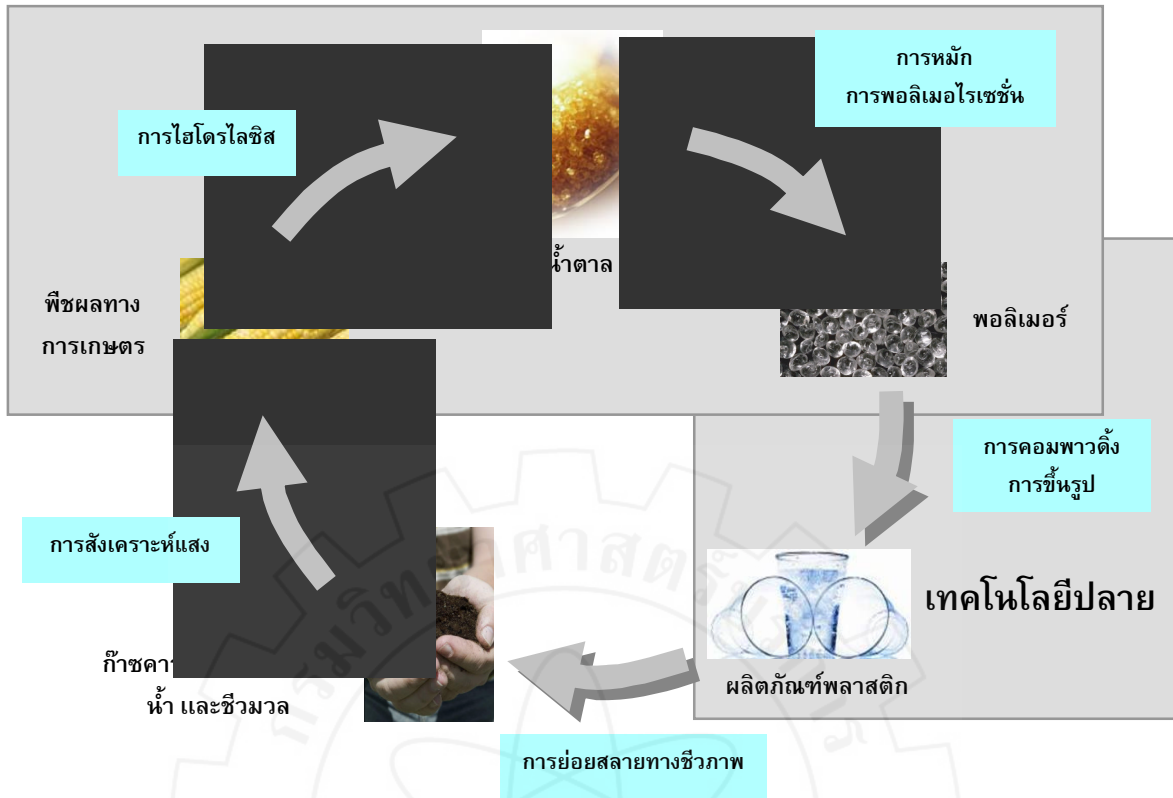
เมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase, lipase, esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

#### 4. เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในช่วงแรกของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้มีการนำแป้ง (starch) ชนิดต่างๆ มาใช้เป็นสารผสมร่วมกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการปิโตรเคมี เพื่อเป็นการลดสัดส่วนของสารที่ย่อยสลายได้ยากในวัสดุ และเพิ่มคุณสมบัติการสลายตัวของวัสดุให้มากขึ้น เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุเพียงชนิดเดียวที่สามารถขึ้นเป็นรูปร่วมกับวัสดุอื่นได้ โดยการใช้ความร้อน แต่วัสดุที่ได้จะพบปัญหาในเรื่องของการซึมผ่านของน้ำ และการบวมหรือการคงตัวของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เมื่อได้รับความชื้น โดยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแป้งนิ่มง่ายและไม่คงรูป จึงทำให้การใช้แป้งเพียงอย่างเดียวไม่ได้ผลเท่าที่ควร

มิติใหม่ของการสรรหาวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง การสังเคราะห์โมเลกุลของสารเคมีขึ้นมาใหม่ตลอดกระบวนการซึ่งถือว่ายังไม่มี ความชัดเจน วัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาจาก 2 แหล่ง คือ วัสดุที่มาจากแหล่งธรรมชาติ และวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น polyhydroxyalcanoates (PHAs) ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ผลิตและสะสมเอาไว้ในเซลล์ ส่วนวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ มักจะเกิดจากผลผลิตของกระบวนการหมัก (fermentation) ได้แก่ สารประกอบโปรตีน หรือสารประกอบเพคตินที่สามารถพัฒนาต่อไปเป็นสารพอลิเมอร์ รวมทั้ง polylactic acid (PLA) ซึ่งได้จากการต่อเชื่อมกัน (polymerisation) ของกรดแลคติก

วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตรถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ ตามลำดับ จากนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จะผ่านการปรับปรุงสมบัติ และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เมื่อหมดอายุการใช้งานหรือไม่เป็นที่ต้องการแล้วการนำไปทิ้งในสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้พลาสติกเหล่านี้ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (NIA, 2551)

ผลผลิตจากการเกษตรที่ให้แป้ง เช่น ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด และปาล์ม น้ำมัน ฯลฯ เมื่อผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพแล้วจะเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล และเปลี่ยนน้ำตาลเป็นมอนอเมอร์ เช่น กรดแลคติก 1,4-บิวเทนไดออล (BDO) กรดซัคซินิก แล้วจึงผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (catalytic polymerization) เกิดเป็นพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) หรือจากแป้งเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ประเภทต่างๆ โดยตรงด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) ในขณะที่วัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมีใช้ผลิตมอนอเมอร์ประเภทต่างๆ เช่น 1,4-บิวเทนไดออล (BDO) กรดซัคซินิก กรดเทอแรพธาลิก (TPA) ไคเมทิลเทอแรพธาเลต (DMT) แล้วจึงผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ต่อไป

แนวโน้มการผลิต และการใช้งานพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอนาคตนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่มุ่งเน้นการผลิตและการใช้งานพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในกระบวนการหมัก (compostable plastics) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-3 เดือน พร้อมกับเศษอาหารภายในโรงหมักขยะอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม ทำให้เราสามารถกำจัดขยะบรรจุภัณฑ์เศษอาหารและขยะอินทรีย์อื่นๆ ได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถใช้ทำปุ๋ยผสม

ปรับสภาพดิน ทำให้ดินร่วนซุย สำหรับใช้ในการเพาะปลูกพืชและผลิตผลทางการเกษตร ผลิตผลทางการเกษตรส่วนหนึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพดังตัวอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ใหม่ ซึ่งจัดเป็นการรีไซเคิลและทำให้เกิดการหมุนเวียนในการใช้ทรัพยากรที่เป็นแนวความคิดใหม่สำหรับโลกอนาคตอันใกล้

## 5. กลไกการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การย่อยสลายสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลไกหลักตามประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อที่ 3 ดังนี้คือ

- 5.1 การย่อยสลายด้วยวิธีการทางชีวภาพ
- 5.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 5.3 การย่อยสลายด้วยแสง
- 5.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

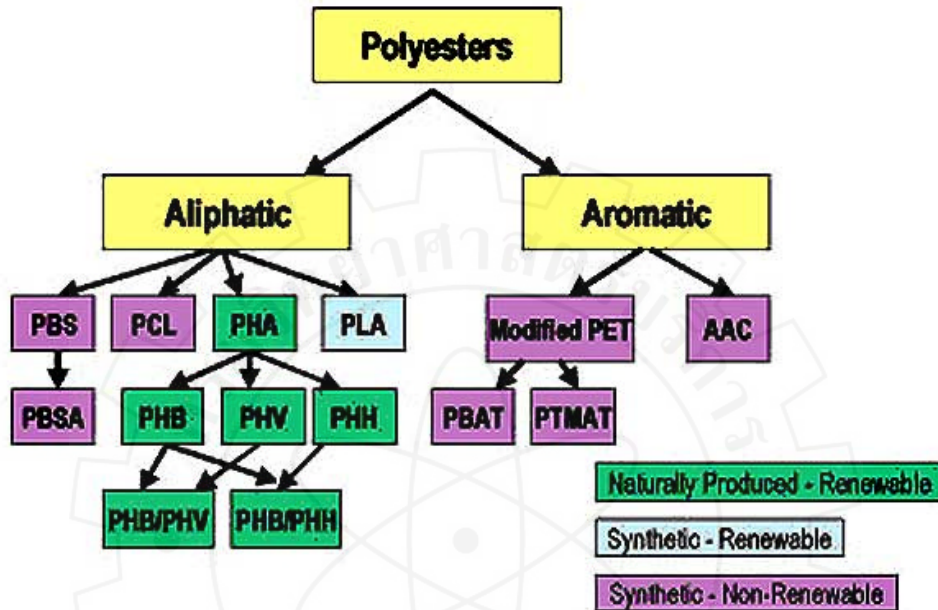
## 6. คุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

### 6.1 คุณสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่รู้จักกันดี ได้แก่ แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch หรือ TPS) พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid หรือ PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs) พอลิแคปโรแลคโตน (polycaprolactone หรือ PCL) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate หรือ PBS) พอลิบิวทิลีนเทเรพทาเลต (polybutylene terephthalate หรือ PBT) พอลิไตรเมทิลีนเทเรพทาเลต (polytrimethylene terephthalate หรือ PTT) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol หรือ PVA) ฯลฯ โดยพอลิเมอร์ที่มีการศึกษาวิจัย และนำมาผลิตเพื่อใช้ประโยชน์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ พอลิเมอร์ประเภทที่มีส่วนผสมของแป้ง (polysaccharide) และพอลิเอสเทอร์ (polyesters) โดยพอลิเมอร์ประเภทแรกเกิดจากการผสมพอลิเมอร์บางชนิด เข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งที่เกิดจากการเรียงต่อกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic โดยใช้อัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10 - 90 % ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งาน หากส่วนผสมของแป้งมากกว่า 60 % จะทำให้พลาสติกผสมสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเมื่อส่วนผสมของแป้งต่ำกว่า 60 % ส่วนผสมที่เป็นแป้งจะทำหน้าที่เป็นจุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวของชิ้นส่วนพอลิเมอร์ผสมทำให้มีขนาดเล็กลง ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแป้งประกอบด้วย พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเอสเทอร์ เป็นต้น โดยก่อนกระบวนการผสมอาจมีการปรับปรุงคุณภาพของแป้งที่ใช้โดยกระบวนการทางเคมีก่อน เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสม

พอลิเอสเทอร์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่ายโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายเป็น โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้ พอลิเอสเทอร์ยังสามารถจำแนกตาม

ส่วนประกอบของสายโซ่เป็น 2 ประเภท คือ aliphatic และ aromatic polyester ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้หลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภท aliphatic polyester เพราะสายโซ่มีความเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่า ในส่วนของ aromatic polyester จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยอาจต่อสายโซ่กับ aliphatic polyester ให้เป็นโคพอลิเมอร์ (aliphatic-aromatic copolyester) ก่อนจึงจะสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งสามารถใช้ PET เป็นส่วนประกอบหลักได้



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์ (ปรกรณ์ โสภาประกาศิต และ มัณฑนา โสภาประกาศิต, 2551)

หมายเหตุ PHA- polyhydroxyalkanoates PHB - polyhydroxybutyrate, PHH - polyhydroxyhexanoate  
 PHV- polyhydroxyvalerate PLA - polylactic acid PCL - polycaprolactone  
 PBS - polybutylene succinate PBSA - polybutylene succinate adipate  
 AAC - Aliphatic-Aromatic copolyesters PET - polyethylene terephthalate

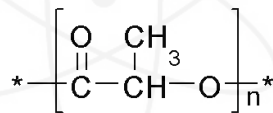
Aliphatic polyester ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 ตระกูลใหญ่ๆ คือ polybutylene succinate (PBS), polycaprolactone (PCL), polyhydroxyalkanoates (PHA), polylactic acid (PLA) ซึ่ง 2 ชนิดแรกต้องใช้อมอนอเมอร์จากปิโตรเคมี ส่วน PLA สามารถใช้วัตถุดิบที่ทดแทนได้แต่ยังต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ขณะที่ PHA เป็นพอลิเมอร์ตระกูลเดียวที่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดเกิดขึ้นในจุลินทรีย์ โดยปัจจุบันมีนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้ทางการค้าและมีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดบ้างแล้วคือ PLA ที่สามารถนำไปทดแทนพลาสติกประเภทบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวด PET

ถุงพลาสติก ฯลฯ โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นแป้ง เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยต้องนำแป้งมาผ่านกระบวนการหมักกับด้วยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้ lactic acid monomer จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ แต่ข้อจำกัดของ PLA คือ ไม่คงรูปเมื่อได้รับความร้อน ส่วนอีกชนิดคือ PHA ที่มีสมบัติทางกลดีกว่า เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermal forming) โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้มีอนุพันธ์หลายชนิดด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่สามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงจากสารจำพวกแป้งและน้ำตาล แล้วได้เป็นสายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ อีกทั้งมีการใช้จุลินทรีย์ตลอดกระบวนการ จึงเรียกพอลิเมอร์ประเภทนี้ว่า “microbial polymers” อย่างไรก็ตาม บทความนี้จะขอกล่าวถึงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่น่าสนใจโดยมีรายละเอียด ดังนี้

**6.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid หรือ PLA)** เป็นพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง (ข้าวโพด) ซึ่งกำลังกลายเป็นทางเลือกใหม่มาแทนที่พลาสติกจากปิโตรเลียม PLA เป็นแหล่งคาร์บอนที่ได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นทดแทนได้ โดยคาร์บอนที่ดูดซับโดยพืช เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการแพร่ของปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อนขึ้น และ PLA ยังไม่ก่อให้เกิดก๊าซพิษเมื่อถูกเผาเป็นเถ้า กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดยนักวิจัยของบริษัท Dupont ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ W.H. Carothers ในปี 1932 โดยการให้ความร้อนแก่กรดแลคติกภายใต้ความดันสูญญากาศ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และได้จดสิทธิบัตรไว้ในปี 1954 หลังจากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากราคาที่สูงของ PLA ทำให้การนำไปใช้งานมุ่งเน้นไปทางด้านการแพทย์ และเภสัชกรรม บริษัท Cargill, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิต PLA โดยในปี 1987 ได้เริ่มทำการวิจัยเพื่อผลิตกรดแลคติก แลคไทด์ และ PLA และในปี 1992 ได้เริ่มการผลิตในระดับโรงงานต้นแบบ จากนั้น ในปี 1997 ได้ร่วมลงทุนกับบริษัท Dow Chemical Company, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา แล้วสร้างบริษัท Cargill Dow LLC ขึ้นมาเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี และผลิตภัณฑ์ PLA เพื่อการค้าอย่างเต็มรูปแบบ และในปี 2001 ได้ส่งผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อทางการค้าว่า NatureWorks® ออกมาสู่ตลาดบริษัท ในปี 2005 บริษัท Dow Chemical Company, Inc. ได้ถอนตัวออก จึงมีการเปลี่ยนชื่อเป็นบริษัท NatureWorks® แทน

พอลิแลคติกแอซิดที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีแนวทางหนึ่งที่ได้พัฒนาจนประสบความสำเร็จและได้พอลิเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสมแก่การลงทุน คือ การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด โดยการแยกส่วนของแป้งและน้ำตาลที่หลงเหลือในเศษข้าวโพด น้ำตาลที่สกัดได้จะนำไปเข้ากระบวนการหมักจนกระทั่งได้ผลผลิต คือ กรดแลคติก (lactic acid) (Flieger, M., et al., 2003) แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการอื่นๆ ต่อไป ความปลอดภัยของพอลิแลคติกแอซิดถูกจัดให้เป็น GRAS (generally recognized as safe) โดยสำนักงานอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกา

กระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิด เริ่มต้นจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ โดยการปลูกข้าวโพดซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำเป็นวัตถุดิบ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ได้ผลผลิตเป็นแป้ง จากนั้นจึงนำเอาแป้งข้าวโพดมาผ่านกระบวนการหมักบ่มโดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะ เพื่อย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้งและน้ำตาลเป็นกรดแลคติก (lactic acid, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งใช้เป็นมอนอเมอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 กระบวนการที่แตกต่างกัน คือ กระบวนการควบแน่น (polycondensation) และ กระบวนการเปิดวง (ring-opening polymerization) ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างและสมบัติต่างๆ เหมือนกันทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 5 แต่ก็มีรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ที่ต่างกัน จึงเป็นที่มาของการเรียกชื่อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการแรกมักจะเรียกว่า “พอลิแลคติกแอซิด” ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้กรดแลคติกโดยตรงจนได้พอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ในกระบวนการที่สองจะมีการเปลี่ยนกรดแลคติกโดยปฏิกิริยาการรวมตัวของกรดแลคติก 2 โมเลกุล แล้วเกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่า แลคไทด์ (lactide) ก่อน จากนั้นจึงนำเอาวงแหวนแลคไทด์นี้มาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวพอลิเมอร์ในขั้นตอนต่อมา ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากกระบวนการนี้ว่า “พอลิแลคไทด์” อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ที่ได้จากทั้งสองกระบวนการก็คือสารชนิดเดียวกันนั่นเอง ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ได้แล้วก็สามารถนำมาขึ้นรูปเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของ PLA (NIA, 2551)

**A. สมบัติของ PLA** PLA มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก มีความแข็ง ความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ polyethylene (PE) หรือ polypropylene (PP) ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินส์ที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี ซึ่งสมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า (NIA, 2551)

สมบัติ	NatureWork® PLA <sup>1</sup>	Biomer® L9000 <sup>2</sup>
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.24	1.25
T <sub>g</sub> (°C)	56.7 - 57.9	n/a
T <sub>m</sub> (°C)	140 - 152	n/a
HDT (°C)	40 - 45 (amorphous) 135 (crystalline)	n/a
Tensile strength (MPa)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexular Modulus (MPa)	350 - 450	3,600

หมายเหตุ <sup>1</sup> Datasheets: NatureWorks PLA, NatureWorks LLC, USA. <http://www.natureworkslc.com>

<sup>2</sup> Datasheets: Biomer L9000, Biomer, Netherlands. <http://www.biomer.de>.

**B. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PLA** PLA สามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass-transition temperature : T<sub>g</sub>) ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิสซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยการ metabolisation อย่างรวดเร็วไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

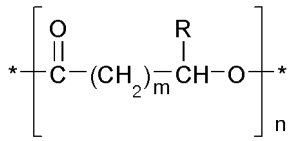
**C. การนำไปใช้ประโยชน์ของ PLA** PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

- **ด้านการแพทย์** เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์มานาน (Kolybaba, M., et al., 2003) เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ



- ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือ ปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด
- ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่อง โฟม พลาสติกสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ
- ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและ เครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน
- ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers) แผ่นรองพื้น (floor mats) และ อุปกรณ์ตกแต่งภายใน
- ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วน ประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี
- อื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษ สารยึดติด ท่อพลาสติกชั่วคราว

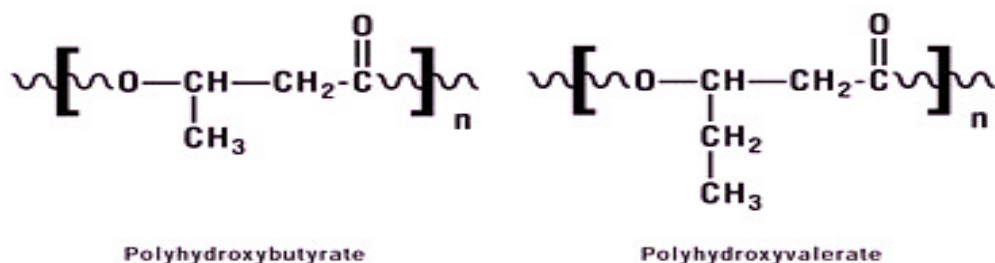
**6.1.2 พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs)** เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ ประเภทพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ (Cox, MK., 1994) หลากหลายชนิด เช่น *Hymenobacter aerophilus*, *Sphingomonas pituitosa*, *Pectobacterium cypripedii* และ *Alcaligenes eutrophus* ถึงแม้ว่าปัจจุบันมีการค้นพบอนุพันธุ์พอลิเอสเทอร์ที่อยู่ในกลุ่มนี้มากกว่า 100 ชนิด แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่เป็นที่ รู้จักแพร่หลาย (รูปที่ 6) โดยอนุพันธุ์พอลิเมอร์ที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด ได้แก่ Polyhydroxybutyrate (PHB) ซึ่งถูก ค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1926 โดย Lemoigne นักวิทยาศาสตร์แห่ง Pasteur Institute ณ กรุงปารีส PHAs ประกอบด้วยมอนอเมอร์หลัก คือ กรดไฮดรอกซีอัลคาโนอิก (hydroxyalkanoic acids) และสามารถจำแนกอย่าง กว้างๆได้ 2 กลุ่มตามความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ (R) ในหน่วยมอนอเมอร์ คือ ความยาวสายโซ่ของหมู่ แทนที่สั้น ซึ่งมอนอเมอร์จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 3 - 5 อะตอม และความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ปาน กลาง ซึ่งมอนอเมอร์จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 6 - 14 อะตอม PHAs ที่ผลิตได้โดยทั่วไปประกอบด้วย มอนอเมอร์ 100 - 30,000 หน่วย และมีความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้น



m	R	PHAs
1	ไฮโดรเจน (H) เมทิล (CH <sub>3</sub> ) เอทิล (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) โพรพิล (C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> ) เพนทิล (C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> ) โนนิล (C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> )	พอลิ(ไฮดรอกซีโพรพิโนเอต) พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวไทเรต) (PHB) พอลิ(3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) (PHV) พอลิ(3-ไฮดรอกซีเฮกซาโนเอต) (PHH) พอลิ(3-ไฮดรอกซีออกทานโอเอต) พอลิ(3-ไฮดรอกซีโดเดคาโนเอต)
2	ไฮโดรเจน (H) เมทิล (CH <sub>3</sub> )	พอลิ(4-ไฮดรอกซีบิวไทเรต) พอลิ(4-ไฮดรอกซีวาเลอเรต)
3	ไฮโดรเจน (H) เมทิล (CH <sub>3</sub> )	พอลิ(5-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) พอลิ(5-ไฮดรอกซีเฮกซาโนเอต)
4	เฮกซิล (C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> )	พอลิ(6-ไฮดรอกซีโดเดคาโนเอต)

#### รูปที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของ PHAs (NIA, 2551)

ในปี ค.ศ.1982 บริษัท ไอซีไอ (Imperial Chemical Industries Ltd. หรือที่เรียกว่า ICI) ประเทศอังกฤษ ได้พัฒนากระบวนการผลิตเพื่อการค้าของ PHB และ โคพอลิเมอร์หว่าง PHB และ PHV (polyhydroxyvalerate) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อทางการค้าว่า Biopol<sup>®</sup> โดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์เป็นหลัก PHB เป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สะสมอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล เมทิลและออกซิเจน ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 7



#### รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของ PHB และ PHV

ที่มา : <http://www.technoinhome.com>

มอนอเมอร์ดังกล่าวข้างต้นจะต่อกันเป็นสาย PHB ด้วยพันธะเอสเทอร์ โดยจำนวนมอนอเมอร์ที่ประกอบกันเป็นสาย PHB มีประมาณ 23,000 – 35,000 ซึ่งความยาวของสาย PHB ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ คือ วิธีสกัด PHB ออกจากเซลล์ของจุลินทรีย์ ชนิดของแบคทีเรียที่ใช้ผลิต ระยะเวลาของการเพาะเลี้ยงเซลล์ ชนิดของสารอาหารที่ใช้เลี้ยงจุลินทรีย์ และสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์พบว่า มีจุลินทรีย์มากกว่า 20 ชนิด ที่สามารถสังเคราะห์และสะสม PHB ไว้ภายในเซลล์ แต่สำหรับจุลินทรีย์ที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อผลิต PHB มีอยู่ 4 ชนิด คือ *Alcaligenes* sp., *Azobacter* sp., *Pseudomonas* sp. และ *Methylobacterium* sp.

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PHAs เป็นวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตร จำพวกแป้ง เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวสาลี และข้าว ในระยะแรกของการพัฒนาระบบการผลิต PHAs ได้ใช้เชื้อแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* H16 โดยมีน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งพลังงาน ปัจจุบันมีการศึกษา เชื้อชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติที่ดีเด่นในการผลิตหรือการใช้วัสดุอื่นๆ เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน รวมไปถึงการศึกษาการกระจายตัวของยีนส์ที่สำคัญในระบบการสร้าง PHAs ในเซลล์แบคทีเรียหรือการนำยีนส์ที่สำคัญไปใส่ในจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น *Escherichia coli* หรือ *Saccharomyces cerevisiae*

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต PHAs ได้แก่ ความคงตัวของระบบการผลิต ปริมาณเซลล์สะสม การสกัดได้ของ PHAs อัตราการใช้ PHAs เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน และคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งอาหาร PHAs ซึ่งผลิตได้จากการนำแป้งหรือน้ำตาลมาหมักด้วยจุลินทรีย์พิเศษชนิด *Escherichia coli* ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดนี้จะทำการผลิต PHAs ภายในตัวของจุลินทรีย์เอง หลังจากนั้นจึงทำการแยกเอา PHAs ออกด้วยการทำลายเปลือกนอกหุ้มของจุลินทรีย์ โดย PHAs เป็นพลาสติกชีวภาพที่มีความสามารถขึ้นรูปได้ สมบัติทางความร้อนและทางกลใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน (polyethylene; PE) หรือ (polypropylene; PP) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน และเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจจากตลาดเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย

**A. สมบัติของ PHAs** คุณสมบัติทางกลของ PHAs ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมอนอเมอร์ (composition of monomeric units) (Rawte, T., and Mavinkurve, S., 2002) PHAs ที่ผลิตได้มีช่วงน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 1,000 ถึงมากกว่า 1,000,000 โดยชนิดและความยาวสายโซ่ของมอนอเมอร์จะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่ได้ ส่วน PHB เป็นเทอร์โมพลาสติก ที่มีปริมาณผลึกในโครงสร้างสูง (ร้อยละ 60 - 70) จึงทำให้พอลิเมอร์มีความต้านทานต่อตัวทำละลายต่างๆ ดีมาก และมีความต้านทานต่อไขมันและน้ำมันปานกลางถึงดี PHB มีความหนาแน่น 1.171 – 1.260 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร PHB ที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วน PHB ที่มีความหนาแน่นสูงจะสามารถตกผลึกได้ (Philip, S., Keshavarz, T., and Roy, I.M 2007) มีจุดหลอมเหลวที่แปรผันระหว่าง 157 - 188 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อรังสียูวีได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดและด่าง เนื่องจาก PHB มีการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำ (ต่ำกว่า PET 2 เท่า และต่ำกว่า PE 40 เท่า) จึงสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อออกซิเจนได้ดี อย่างไรก็ตาม PHB ก็มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานคือ มีความแข็ง และเปราะง่าย

สมบัติของโคพอลิเมอร์ (polyhydroxybutyrate-valerate หรือ PHBV) ขึ้นอยู่กับปริมาณ hydroxyvalerate หรือ HV ที่เป็นองค์ประกอบ และการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก โคพอลิเมอร์ของ PHBV ที่มีปริมาณ HV ร้อยละ 5 - 12 มีอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature หรือ  $T_m$ ) ในช่วง 173 - 180 องศาเซลเซียส และมี  $T_g$  ประมาณ 5 องศาเซลเซียส เนื่องจากหมู่เอทิลซึ่งเป็นสายโซ่ด้านข้างของ HV ทำให้สายพอลิเมอร์มีการเรียงตัวกันอย่างไม่แน่นอน ส่งผลให้จุดหลอมเหลว ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงมอดูลัส (modulus strength) มีค่าลดลง ในขณะที่ความสามารถในการยืดหยุ่น (flexibility) ความทนต่อการกระแทก (impact strength) มีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถทำให้เป็นเส้นหรือแผ่นบางได้ นอกจากนี้โคพอลิเมอร์ของ PHBV ยังมีความเสถียรในน้ำ น้ำมัน และแอลกอฮอล์ แต่ไม่ทนหรือทนต่อการกรดและด่างได้น้อย และสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่า PHB

**B. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PHAs** สามารถนำมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติได้ (Gross, RA., and Kalra, B., 2002) PHAs สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ในดิน น้ำ (ทั้งในน้ำจืดและน้ำทะเล) สิ่งเน่าเปื่อย (compost) และในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนน้อย เช่น โรงบำบัดน้ำเสีย ในกรณีของ Biopol® (PHB) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพประเภทแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ในสายของโมเลกุล จึงทำให้สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่า สามารถย่อยสลายเกือบสมบูรณ์ภายในเวลา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 55 และอัตราส่วน C:N เท่ากับ 18:1 โคพอลิเมอร์ของ PHB/PHV ในอัตราส่วนร้อยละ 92/8 โดยน้ำหนัก สามารถย่อยสลายเกือบสมบูรณ์ภายในเวลา 20 วันภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในน้ำทิ้ง ในขณะที่พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์อื่นๆ เช่น PLA PBS และ PBSA ยังไม่เกิดการย่อยสลายขึ้นภายในเวลา 100 วัน ภายใต้สภาวะเดียวกัน เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะฝังกลบโคพอลิเมอร์ของ PHBV สามารถย่อยสลายได้ภายใน 6 เดือน พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างสายโซ่ตรงจะมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัดภายใน 1 ปีในดินที่ใช้ในการเพาะปลูก ทั้งนี้ อัตราการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ด้าน เช่น พื้นที่ผิวหน้าของพลาสติก ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ปริมาณสารอาหาร และปริมาณออกซิเจน

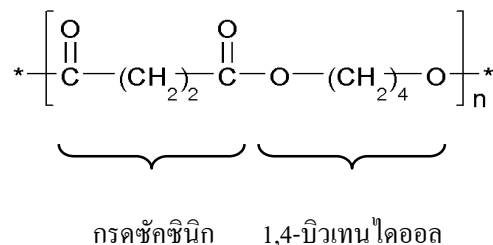
**C. การนำไปใช้ประโยชน์ของ PHAs** PHAs เป็นพอลิเอสเทอร์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย กล่าวคือ เริ่มแรก PHAs ถูกนำมาใช้งานทางด้านการแพทย์อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางชีวภาพที่โดดเด่นคือ ความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible) ความสามารถในการย่อยสลายได้เอง (bioresorbable) ในระบบชีวภาพ (biological system) ของร่างกายมนุษย์ และยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) อย่างไรก็ดี PHAs มีราคาแพง จึงเป็นข้อจำกัดในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้งานทั่วไป

- **ด้านการแพทย์** PHAs ถูกนำมาใช้ทางด้านการแพทย์และเภสัชกรรมในรูปแบบเช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ PLA เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตะเข็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) ผ้าพันแผล (gauzes) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic

fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

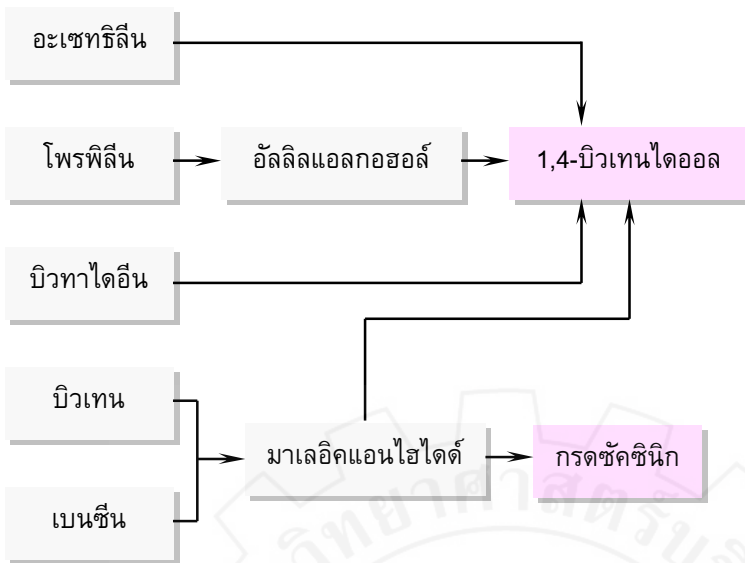
- **ด้านการเกษตร** วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด
- **ด้านบรรจุภัณฑ์** เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถูพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก สารเคลือบภาชนะกระดาษ
- **ด้านเส้นใยและแผ่นผ้าแบบ non-woven** เช่น ผลิตภัณฑ์อณามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน
- **ด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร** เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี
- **อื่นๆ** เช่น สารยึดติด สารเคลือบผิว สารยึดประสานสำหรับผงโลหะและเซรามิกซ์ นอกจากนี้ PHAs ยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีพิเศษ (specialty chemicals) เช่น solvents and coalescing solvents, polyurethane intermediates, surfactants and dispersant precursors

**6.1.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate หรือ PBS)** เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล โดยกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PBS โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี โดยเริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลต่อไป อย่างไรก็ตาม กรดซัคซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และสามารถเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 9 จากนั้นมอนอเมอร์ทั้งสองคือ กรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของ PBS

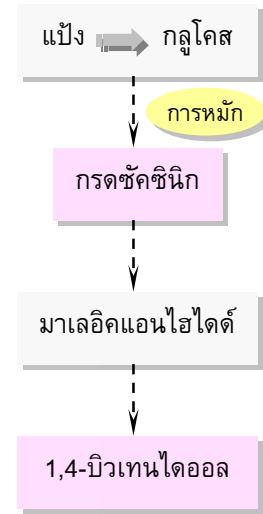


รูปที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของ PBS (NIA, 2551)

สารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี



สารตั้งต้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้



รูปที่ 9 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต PBS (NIA, 2551)

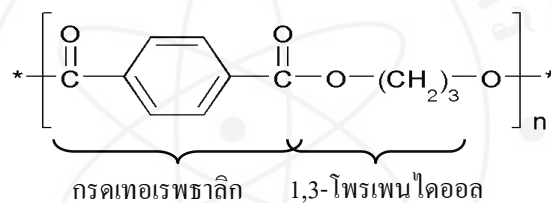
**A. สมบัติของ PBS** PBS เป็นเทอร์โมพลาสติกชีวภาพ มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA ซึ่ง PBS มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า PLA มาก แต่ต่ำกว่า PHBV และมี Tg ที่ต่ำมาก โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูง และทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังซ่อมดัดสีได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้ PBS ยังสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ได้ แต่คุณสมบัติดังกล่าวยังมีค่าต่ำกว่าพอลิเอสเตอร์ (Malhotra, SV., et al., 2007)

**B. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PBS** การย่อยสลายของ PBS เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ hydro-biodegradable เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป มีงานวิจัยระบุว่า แผ่นฟิล์ม PBS ที่มีความหนา 40 ไมครอน สามารถถูกย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 50 ภายใน 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป

**C. การนำไปใช้ประโยชน์ของ PBS** PBS สามารถนำไปใช้แทนที่ PET, PP และพอลิโอฟีนได้ โดยเฉพาะ low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), polystyrene (PS) และ PLA นอกจากนี้ PBS ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อเนกประสงค์ เบาะโฟม สารเสริมสร้างพลาสติก แบบ non-migrating สำหรับ polyvinyl chloride (PVC) และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่นๆ ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร

กระดาษต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์

**6.1.4 พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพทาเลต (polytrimethylene terephthalate หรือ PTT) PTT** ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการ polycondensation ของ trimethylene glycol กับ terephthalic acid หรือ dimethyl terephthalate (Houck, M., et al., 2010) PTT เป็นพอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกอยู่ในโครงสร้าง (รูปที่ 10) PTT ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1941 ในช่วงปลายทศวรรษ 1960 บริษัทเชลล์ได้พยายามทำการตลาดของ PTT แต่ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากราคาที่สูงของสารตั้งต้น ได้แก่ propanediol (PDO) ซึ่งผลิตผ่านกระบวนการไฮเดรชันของอะโครลีน (acrolein) จนกระทั่งในทศวรรษ 1990 บริษัทเชลล์ได้ใช้กระบวนการที่ลดต้นทุนมากขึ้นที่เรียกว่า ไฮโดรฟอร์ไมลเนชันต่อเนื่อง (continuous hydroformylation) ของเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) ด้วยตั้งเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ และในปี ค.ศ. 1999 ได้ผลิต PTT ขึ้นภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Corterra®



รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของ PTT

ในปี ค.ศ. 2004 บริษัทดูปองท์ได้ผลิตผลิตภัณฑ์จาก PTT ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Sorona™ ซึ่งเน้นตลาดเครื่องนุ่งห่มที่มีราคาสูง ขณะที่ Corterra® จะเน้นตลาดเส้นใยอุตสาหกรรมและพลาสติกวิศวกรรมที่ผ่านมายังบริษัทดูปองท์ผลิต PDO จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี (โดยใช้เทคโนโลยี Degussa สำหรับการไฮเดรชันของอะโครลีน) ในปี ค.ศ. 2004 บริษัทดูปองท์ได้ผลิต PDO จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ซึ่งทำให้บริษัทดูปองท์ประสบความสำเร็จในการพัฒนากระบวนการผลิต PDO เซิงการค้าเมื่อต้นปี ค.ศ. 2003 ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Bio-PDO™

กระบวนการผลิตทางชีวภาพที่พัฒนาโดยบริษัทดูปองท์ น้ำตาลเดกซ์โตรส (dextrose) ที่ได้จากข้าวโพดจะถูกสร้างและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย *E. coli* ที่ผ่านการดัดต่อทางพันธุวิศวกรรมและถูกเปลี่ยนเป็น PDO โดยตรงในตัวเซลล์ของแบคทีเรียโดยผ่านกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration pathway) จากนั้น PDO จะถูกแยกจากน้ำหมัก (fermentation broth) โดยการกรองและนำไประเหยเพื่อให้ความเข้มข้นขึ้นและทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่น จากนั้นจะถูกป้อนเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ต่อไป

PTT สามารถผลิตได้ทั้งจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของไดเอทิล เทอเรพธาลेट (DMT) กับ PDO หรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดเทอเรพธาลิคบริสุทธิ์ (purified terephthalic acid หรือ PTA) กับ PDO กระบวนการพอลิเมอไรเซชันสามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง ในขั้นตอนแรกของการพอลิเมอไรเซชัน พอลิเอสเทอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะถูกผลิตขึ้นในระบบที่มี PDO ปริมาณที่มากเกินไป โดยที่น้ำ (กรณีที่ทำปฏิกิริยากับ PTA) หรือเมทานอล (กรณีที่ทำปฏิกิริยากับ DMT) จะต้องถูกกำจัดออกไป ในขั้นตอนที่ 2 คือ การควบแน่น สายโซ่พอลิเมอร์จะเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว โดย PDO และน้ำ/เมทานอลที่หลงเหลืออยู่จะถูกกำจัดออกไป ในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป การกำจัด PDO ที่หลงเหลืออยู่ในปริมาณน้อยมากนั้นจะทำให้ยากมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีชุดเครื่องมือสำหรับทำปฏิกิริยาที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้นและความดันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และในขั้นตอนสุดท้าย พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวและมีความหนืดสูงจะถูกผสมกับสารเติมแต่งในเครื่องผสม (static mixer) และทำให้เป็นเม็ด

**A. สมบัติของ PTT** สมบัติของ PTT เป็นการรวมกันระหว่างสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทอเรพธาลेट หรือ PET (ความทน ความแข็ง ความเหนียว และความสามารถในการทนความร้อน) และสมบัติด้านการขึ้นรูปของพอลิบิวทิลีนเทอเรพธาลेट (PBT) (มีอุณหภูมิสำหรับการหลอมเหลวและการขึ้นรูปต่ำ สามารถเกิดผลึกได้อย่างรวดเร็ว และใช้เวลาเร็วกว่า PET) นอกจากนี้ยังมีความคล้ายคลึงกับพอลิเอไมด์ (PA 6,6) และพอลิโพรพิลีน (PP) ในการใช้งานด้านเส้นใยและพอลิคาร์บอเนต (PC) ในการใช้งานด้านการหล่อขึ้นรูปของ PTT นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติด้านการขึ้นรูป (เส้นใยและฟิล์ม) บางประการที่คล้าย PLA และเซลโลเฟน (cellophane)

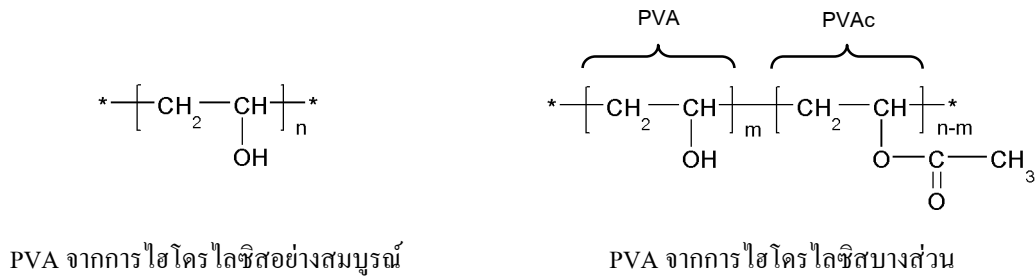
PTT มีความแข็งแรงและเหนียวมาก มีการตอบสนองการคืนกลับความยืดหยุ่น (elastic recovery) ที่ดีกว่า PET และ polybutylene terephthalate (PBT) PTT มี  $T_m$  (228 องศาเซลเซียส) และ  $T_g$  (50 องศาเซลเซียส) ซึ่งต่ำกว่า PET (ที่มี  $T_m$  และ  $T_g$  255 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงต่ำกว่า ความหนาแน่นของ PTT มีค่าประมาณ 1.34 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ฟิล์ม PTT มีความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำ PTT มีความต้านทานต่อการเปื้อนและมีความต้านทานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ดีเยี่ยม สามารถเกิดประจุไฟฟ้าสถิตต่ำ ดังนั้นจึงเหมาะสมในการผลิตเป็นพรม และยังพบว่า PTT มีความนุ่ม (มากกว่า PA และ PET) ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการในการนำมาผลิตเครื่องนุ่งห่ม

**B. การนำไปใช้ประโยชน์ของ PTT** การพัฒนา PTT เพื่อนำไปใช้ประโยชน์มักจะอยู่ในส่วนของเส้นใย (ได้แก่ สิ่งทอ พรม และเครื่องนุ่งห่ม) และการบรรจุภัณฑ์หีบห่อ (เช่น ฟิล์ม) เป็นหลัก ในขณะที่ PET ยังคงเป็นที่นิยมในการผลิตขวดสำหรับเครื่องดื่มที่มีรสซ่า (carbonated beverage) PTT ก็ถูกคาดหวังไว้ว่าจะสามารถนำไปใช้แทน PET ในงานด้านเส้นใยบางส่วนได้เช่นเดียวกับฟิล์มสำหรับหีบห่อต่างๆ และสิ่งของอื่น เช่น ฟิล์มเอกซ์เรย์ เทปแม่เหล็ก (สำหรับเครื่องเสียง วีดีโอ และคอมพิวเตอร์) และป้ายฉลาก

**6.1.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly (vinyl alcohol), PVA)** เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PVA เป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1924 ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย

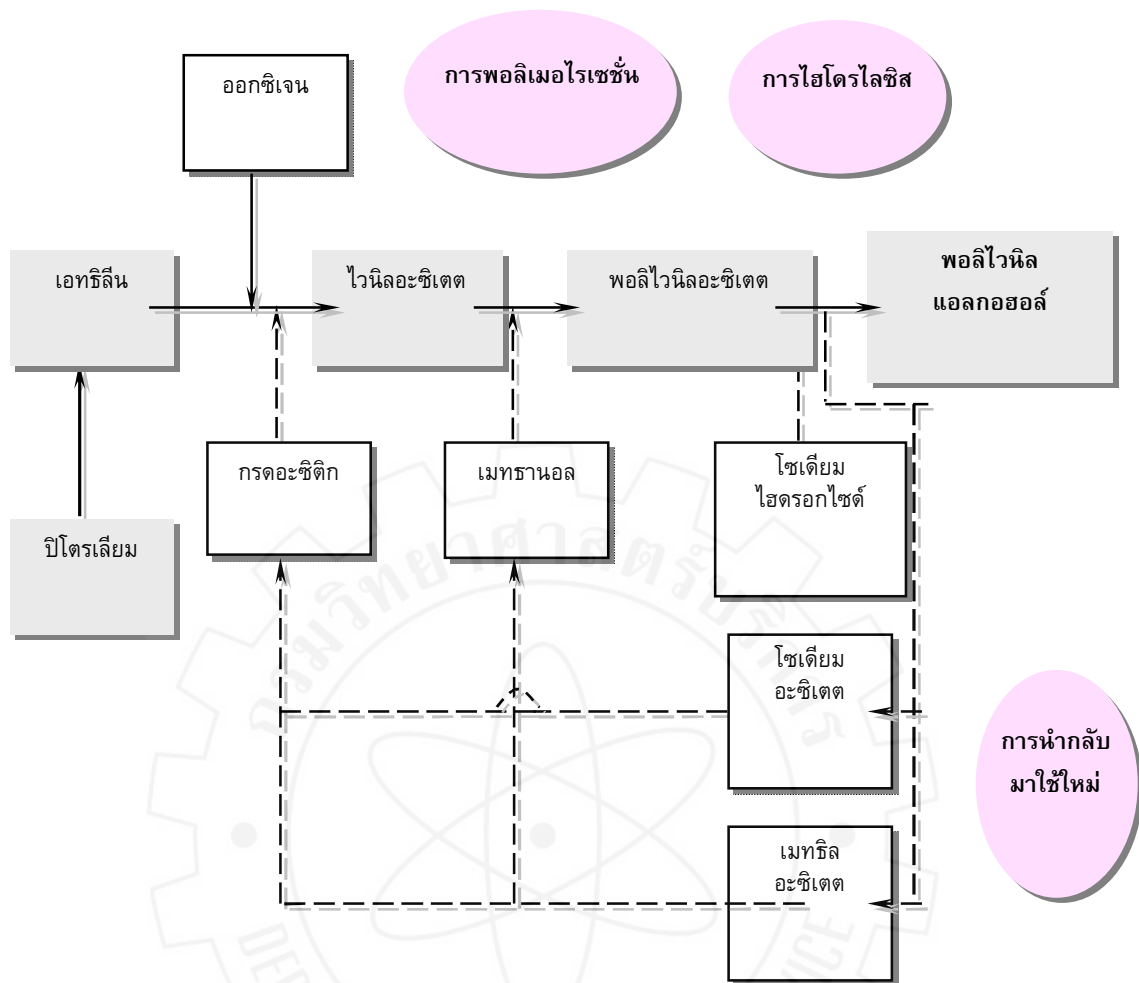


Herman และ Haehnel จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต (polyvinyl acetate หรือ PVAc) (Flieger, M., et al., 2003) โดยโครงสร้างทางเคมีของ PVA แสดงไว้ในรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของ PVA (NIA, 2551)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PVA เป็นผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี ได้แก่ ก๊าซเอทิลีน ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นไวนิลอะซิเตต (vinyl acetate, VAc) สำหรับเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น บริษัทคูราเรย์จำกัด ประเทศญี่ปุ่น เป็นหนึ่งในหลายบริษัทที่ผลิต PVA เพื่อการค้า ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Povol<sup>®</sup> โดยในช่วงทศวรรษ 1950 บริษัทคูราเรย์ จำกัด เริ่มต้นการผลิต PVA ในเชิงอุตสาหกรรม โดยใช้ไวนิลอะซิเตต เป็นสารตั้งต้นตัวกลางในการผลิต จากก๊าซอะเซทิลีน แต่ภายหลังทศวรรษ 1960 ไวนิลอะซิเตตสามารถผลิตได้จากก๊าซเอทิลีน ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา บริษัทคูราเรย์ จำกัด จึงได้ผลิต PVC จากก๊าซเอทิลีนแทนก๊าซอะเซทิลีน โดยกระบวนการผลิต PVA ที่ใช้ในปัจจุบันแสดงไว้ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 กระบวนการผลิต Poval<sup>®</sup> ของบริษัทกูราเรย์จำกัดในปัจจุบัน (NIA, 2551)

**A. สมบัติของ PVA** PVA เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและละลายได้ดีในน้ำ มีความต้านทานต่อน้ำมัน ไขมัน และสารละลายต่างๆ ดีเยี่ยม รวมทั้งมีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีก ความทนต่อการกระแทก อีกทั้งมีความยืดหยุ่นและการกั้นการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนสูง โดยสมบัติพื้นฐานของ PVA ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลึก ระดับการไฮโดรไลซิส และมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสบางส่วนยังคงมีหมู่อะซิเตตเหลืออยู่ จึงส่งผลให้มีปริมาณผลึกน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์ ปริมาณผลึกขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเสริมสร้างพลาสติก และ/หรือน้ำที่อยู่ในสารประกอบพอลิเมอร์ รวมถึงกระบวนการผลิต (การใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ PVA อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของมวลโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส (NIA, 2551) สามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อมวลโมเลกุล หรือ ระดับการไฮโดรไลซิส **เพิ่มขึ้น** : - ความหนืดเพิ่มขึ้น

- ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

- ความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น

- ความต้านทานตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

เมื่อมวลโมเลกุล หรือ ระดับการไฮโดรไลซิส **ลดลง** :

- ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

- ความสามารถในการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

- การบวมน้ำเร็วขึ้นเพิ่มขึ้น

PVA ซึ่งผลิตโดยบริษัทดูปองท์ ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Elvanol® สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ PVA ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสบางส่วน PVA ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์ และ โคพอลิเมอร์ โดย PVA ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสบางส่วนจะละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ส่วน PVA ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์จะละลายในน้ำร้อน (200 องศาฟาเรนไฮต์) และสามารถคงอยู่ในรูปของสารละลายเมื่อเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และ โคพอลิเมอร์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อการใช้งานในกระบวนการลงแป้งเส้นด้ายยืน (warp sizing) เนื่องจากโคพอลิเมอร์นี้มีสมบัติเฉพาะที่สมดุลกัน จึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ PVA สามารถเกิดการเสียดสีได้ง่ายที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลว คือ ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส การใช้โพลีเมอร์เกรดที่มีการไฮโดรไลซิสแล้วบางส่วนจะทำให้มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลงอยู่ที่ 180 – 190 องศาเซลเซียส

**B. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PVA** การย่อยสลายของ PVA ขึ้นอยู่กับปริมาณผลึกและน้ำหนักโมเลกุลของ PVA โดย PVA สามารถละลายในน้ำและย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีในบ่อบำบัดน้ำเสีย แต่จะย่อยสลายได้ช้าในดิน

**C. การนำไปใช้ประโยชน์ของ PVA** PVA สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งในระยะแรก PVA ถูกนำไปใช้ในงานสิ่งทอเป็นหลัก แต่ปัจจุบัน PVA ที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นโปรเทคตีฟคอลลอยด์ (protective colloid) ในกระบวนการผลิตโพลีเมอร์อิมัลชัน นอกจากนี้ PVA ยังนำไปใช้ในการประสานเม็ดสีกับเส้นใย (binding of pigments and fibers) การเคลือบผิว (coating) การผลิตสารชักฟอก และสารล้างทำความสะอาด ตัวยึดติด (กาว) สำหรับกระดาษ ไม้ ผ้า หนัง และวัสดุอื่นๆ ที่ดูดซับน้ำเป็นอิมัลซิไฟเออร์และโปรเทคตีฟคอลลอยด์ในการผลิตสี

ผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบแผ่นฟิล์มของ PVA นอกจากสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หีบห่อทั่วไปแล้ว ยังนำไปใช้ทางการแพทย์ เช่น ถุงสำหรับใส่เสื้อผ้าที่ใช้แล้วจากห้องผ่าตัดหรือแผ่นกโรติดต่อ ซึ่งสามารถนำถุงที่มีเสื้อผ้านี้ไปใส่ลงในเครื่องซักผ้าได้โดยตรง บรรจุภัณฑ์ที่ใช้เพียงครั้งเดียว สำหรับเอนไซม์ และสารเคมีเพื่อใส่ในถังฆ่าเชื้อ ด้านสิ่งทอ เช่น ถุงสำหรับใส่สารให้สีสำหรับการย้อมซึ่งนำไปใส่ลงในถังย้อมสีได้โดยตรง เนื่องจากสารให้สีบางประเภทประกอบด้วยสารอันตราย ฟิล์มสำหรับใช้เป็นแผ่นรองในงานปัก ซึ่งแผ่นรองนี้ไม่จำเป็นต้องเอาออกหลังจากการปักเสร็จสิ้น เนื่องจากจะละลายน้ำไปหมดหลังจากการ

ซักครั้งแรก ด้านการเกษตร เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้เพียงครั้งเดียวสำหรับสารกำจัดแมลง สารกำจัดวัชพืช และสารอันตรายต่างๆ

## 6.2 การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุด คือ พลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้ในการผ่าตัด และไหมเย็บแผล ปัจจุบันมักทำจากพลาสติกย่อยสลายได้ที่สามารถละลายในของเหลวในร่างกายได้อย่างช้าๆ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องมีการตัดไหม นอกจากนี้ยังมีการบรรจุยาลงในแคปซูลพลาสติกที่ละลายได้ช้า เพื่อปล่อยตัวยาเข้าสู่กระแสโลหิตในอัตราที่ควบคุมได้ การนำไปใช้ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้สามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้คือ

**6.2.1 การใช้งานทางการแพทย์** พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวหนังเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือ ไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นค้ำกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับ การออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

**6.2.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม** ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

**6.2.3 फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร** फिल्मคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

**6.2.4 ถุงสำหรับใส่ของ (shopping bag)** ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

**6.2.5 फिल्म และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (food waste film and bags)** फिल्मและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสต์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอม

โพลีพร็อพเพนและโพลีเอทิลีนอื่นๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ต้นต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

**6.2.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (consumer packaging materials)** สักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

**6.2.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill)** โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

## 7. ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การลดอัตราการปลดปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมนับว่าเป็นจุดเด่นที่ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับความสนใจอย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังสามารถลดอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และขึ้นรูปเพื่อนำมาใช้ประโยชน์แล้ว (เมื่อพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้นในกระบวนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) จะเห็นว่าในขั้นการผลิตวัตถุดิบคือ แป้งข้าวโพดนั้น ต้นข้าวโพดจะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศมาใช้ในการสังเคราะห์แสงเป็นปริมาณมาก ดังนั้น ผลที่ได้จากทั้งสองปัจจัยนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถช่วยลดปริมาณของก๊าซดังกล่าวในชั้นบรรยากาศได้ ซึ่งเป็นที่ทราบดีแล้วว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้เป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) หรือสภาวะที่ทำให้อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโลกสูงขึ้น

จุดเด่นในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกประการหนึ่งของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ สมบัติการย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ เนื่องจากพลาสติกดังกล่าวผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรตามที่กล่าวมา

ข้างต้น โดยใช้การหมักด้วยจุลินทรีย์ ดังนั้นพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์หรือใช้เอนไซม์เฉพาะบางชนิด

ผลจากการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ยาวได้เป็นสารโมเลกุลเล็กกลับมาดังเดิม ซึ่งกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดขึ้นได้ทั้งในร่างกายของสิ่งมีชีวิต หรือในสภาวะนอกในร่างกาย เช่น ในดินก็ได้ โดยเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายจะแตกต่างกันไป ซึ่งจากสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพนี้เอง จึงมีการนำเอาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ทางด้านการแพทย์ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุนำพาและปลดปล่อยยาไปยังอวัยวะเป้าหมาย ซึ่งจะสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือใช้เป็นวัสดุปิดแผล และไหมเย็บแผลที่สลายตัวได้เองโดยไม่เป็นพิษต่อร่างกาย การประเมินผลกระทบด้านบวกต่อสถานะแวดล้อมของการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานทดแทนพลาสติกทั่วไปในบางโอกาส สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment : LCA) ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เปรียบเทียบกับพลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเพื่อประเมินผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและสภาพแวดล้อมด้านต่างๆ เช่น แหล่งวัตถุดิบ ซึ่งอาจเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกหรือผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ปริมาณการใช้น้ำและพลังงานในกระบวนการผลิต การใช้สารเคมีในการเพาะปลูก และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หากมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้งาน และมีการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพแล้วจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังต่อไปนี้

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้น้ำและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบและเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากก๊าซมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้เนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

3. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์ และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการผลิต HDPE และ LDPE โดยพลังงานที่ใช้ในการผลิต PHAs ใกล้เคียงกับที่ใช้ในการผลิต PE หากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยใช้สารอาหารน้ำตาลในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้ง กากน้ำตาล ตะกอนจากบ่อน้ำทิ้ง จะทำให้การใช้พลังงานลดลง

ตารางที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกแต่ละชนิด

ชนิดพลาสติก	พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ (MJ/kg)
LDPE	81
PHA-fermentation process	81
HDPE	80
PCL	77
PVOH	58
PLA	57
TPS + 60% PCL	52
TPS + 52.5% PCL	48
TPS	25
TPS + 15% PVOH	25

ที่มา : MTEC (2553)

4. การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่เริ่มการผลิตจนถึงการกำจัดภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน (ตารางที่ 3) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็นพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

ตารางที่ 3 ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพลาสติกแต่ละชนิด

ชนิดพลาสติก	ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก *10 (Kg CO <sub>2</sub> eq./Kg)
PCL	53
LDPE	50
HDPE	49
PVOH	42
TPS + 60%PCL	36
TPS + 52.5% PCL	33
TPS + 15% PVOH	17
Mater Bi TM film grade	12
Thermoplastic starch	11
Mater Bi TM foam grade	9
PLA	NA
PLA-ferment	NA

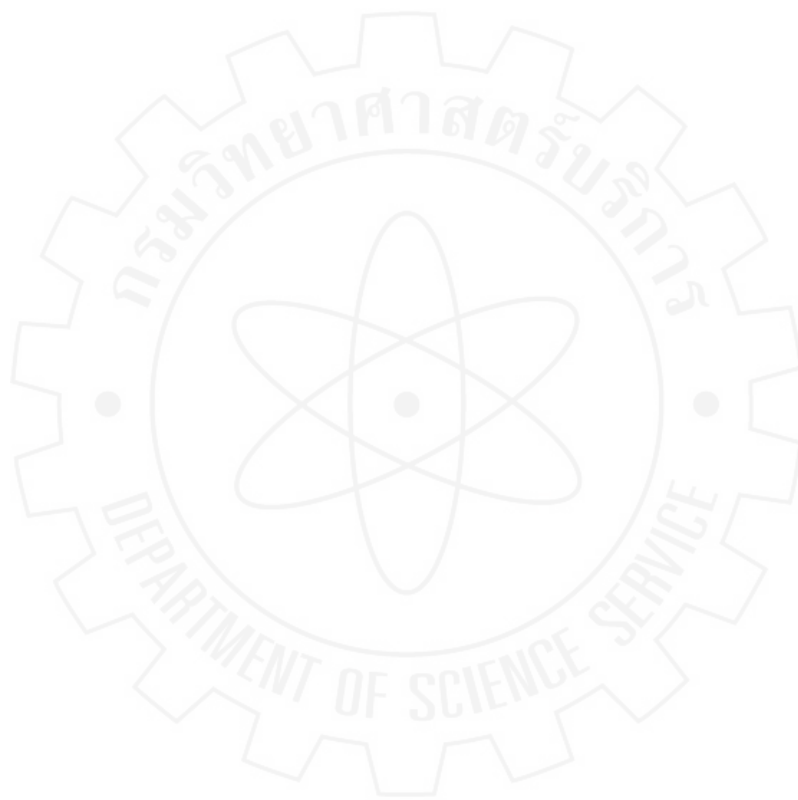
ที่มา : MTEC (2553)

## 8. บทสรุป

พลาสติกหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์จากสารปิโตรเคมีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แม้จะมีราคาถูก มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานนาน แต่ความทนทานและการยึดเกาะกันอย่างเหนียวแน่นของเนื้อพลาสติกทำให้พลาสติกไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ อันเป็นการสร้างภาระการจัดการขยะ หรือของเหลือทิ้ง ดังนั้นจึงได้เกิดการศึกษาวิจัยเพื่อนำวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่ายมีปริมาณมาก และราคาถูกมาทดลองผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัตถุดิบนี้ นอกจากจะใช้พลังงานในการสังเคราะห์และย่อยสลายต่ำแล้ว ยังทำให้ดินมีสภาพดีในการย่อยสลาย ลดการเกิดฝนกรดและสร้างสภาพแวดล้อมโดยรวมที่ดีตามไปด้วย นอกเหนือจากนั้นผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับการพัฒนาแล้ว ยังมีสมบัติในด้านความแข็งแรง ยึดหยุ่น และทนทานต่อการใช้งานได้ดีเช่นเดียวกับพลาสติกสังเคราะห์จนสามารถผลิตออกสู่ตลาดมากขึ้น แม้ในปัจจุบันจะมีการนำ PLA และ PHAs ออกมาใช้บ้างแล้ว แต่ต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง ทำให้พลาสติกย่อย



สลายได้ทางชีวภาพมีราคาแพงกว่าพลาสติกสังเคราะห์ที่ใช้กันทั่วไปอยู่ 2-3 เท่า อย่างไรก็ตาม ในอนาคตข้างหน้าหากได้มีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้ทรัพยากรที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยทำการประเมินหรือกำหนดอายุการใช้งาน ศึกษาผลกระทบและระยะเวลาการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์หลังการเลิกใช้งานพร้อมทั้งหาวิธีการบริหารจัดการที่เหมาะสมลดต้นทุนการผลิต เสริมความรู้ และสร้างความเข้าใจแก่ผู้เกี่ยวข้องให้มากขึ้นแล้ว ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพกลายเป็นที่นิยม และยอมรับของคนทั้งโลกในอนาคตข้างหน้าได้



## เอกสารอ้างอิง

- NIA. เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [ออนไลน์] [อ้างถึง 19 กรกฎาคม 2551] เข้าถึงได้จาก: <http://www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf>
- ธนาวดี ลีจากภัย. สารความรู้ด้านโพลีเมอร์. วารสารสมาคมโพลีเมอร์ (ประเทศไทย), มกราคม-เมษายน, 2549, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 3.
- ธนาวดี ลีจากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ จำกัด, 2549, หน้า 9-15.
- ปรกรณ์ โอภาประกาศิต และ มณฑนา โอภาประกาศิต. โพลีเมอร์กับปัญหาสิ่งแวดล้อม. [ออนไลน์] [อ้างถึง 5 กรกฎาคม 2551] เข้าถึงได้จาก: <http://www.vcharkarn.com/varticle/18774/#P6>
- Cox, MK. Properties and applications of polyhydroxyalkanoates. Edited by Y. Doi and K. Fukuda. In **Biodegradable plastics and polymers**. Amsterdam: Elsevier B.V., 1994, p. 120-135.
- Flieger, M., et al. Biodegradable plastics from renewable sources, **Folia microbiologica**, 2003, vol. 48, no. 1, p. 27-44.
- Gross, RA., and Kalra, B. Biodegradable polymers for the environment. **Science**, August, vol. 297, p. 803-807.
- Houck, M., et al. Poly(trimethylene terephthalate) : a new type of polyester fiber. **Forensic Science Communications**, July, 2001, vol. 3, no. 3.
- Kolybaba, M., et al. **Biodegradable polymers: past, present, and future**. 2003. Oct. 3-4; North Dakota: ASASE Quality Inn & Suites. 2003, 15 p.
- Malhotra, SV., et al. Applications of corn-based chemistry. **The Bridge Linking Engineering and Society**, 2007, vol. 37, no. 4, p. 17-24.
- MTEC. พลาสติกย่อยสลายได้ : เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน. [ออนไลน์] [อ้างถึง 31 มีนาคม 2553] เข้าถึงได้จาก: [www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_/plastic\\_envi.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_/plastic_envi.html)
- Philip, S., Keshavarz, T., and Roy, I. Polyhydroxyalkanoates: biodegradable polymers with a range of applications. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 2007, vol. 82, no. 3, p. 233-247.
- Rawte, T., and Mavinkurve, S. Characterization of polyhydroxy alkanotes-Biodegradable plastics from marine bacteria. **Current Science**, September, 2002, vol. 83, no. 5, p. 562-564.
- Shiro Kaze. ไปโอพลาสติกคืออะไร. [ออนไลน์] [อ้างถึง 5 กรกฎาคม 2551] เข้าถึงได้จาก: [http://shirokazedazero.blogspot.com/2008/02/blog-post\\_7073.html](http://shirokazedazero.blogspot.com/2008/02/blog-post_7073.html)