

## พลาสติกชีวภาพ: วัสดุทางเลือก

### BIOPLASTICS: AITERNATIVE MATERIAL

ภัทรนันท์ ทวดอาจ<sup>1\*</sup> ศรัญญา มณีทอง<sup>1</sup> และธัญพรรณ ฮ่อบรรทัด<sup>1</sup>

Pattaranun Thuadaj<sup>1\*</sup>, Sarunya Maneethong<sup>1</sup> and Thanyapan Hobanthad<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000

<sup>1\*</sup> Division of Chemistry, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000. Thailand

\*Corresponding author, e-mail: pattaranun.ta@bru.ac.th

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการศึกษาพบว่าวัสดุที่ถูกนำมาใช้ปริมาณมากคือพลาสติก เนื่องจากประโยชน์ที่หลากหลาย อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันคือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพราะว่าพลาสติกโดยทั่วไปผลิตจากปิโตรเลียม และมีอายุการย่อยสลายยาวนาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาพลาสติกชีวภาพจากธรรมชาติ เพื่อทดแทนหรือวัสดุทางเลือก เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาสั้น จากการศึกษาพบว่าพลาสติกชีวภาพที่พบมากคือ พอลิแลคติกแอซิด พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท ซึ่งผลิตจากผลผลิตทางการเกษตรหรือของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย ฟางข้าว เป็นต้น และพบวาระยะเวลาการย่อยสลาย 28-300 วัน นอกจากนี้เมื่อปรับปรุงสมบัติพลาสติกชีวภาพ พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางส่งผลให้มีแนวโน้มการเพิ่มปริมาณกำลังการผลิตในสภาวะการณ์โลก

**คำสำคัญ:** พลาสติกชีวภาพ ประเภทพลาสติกชีวภาพ การใช้ประโยชน์

#### Abstract

The current study found that the materials, which used many plastics wherewith various application. However, the current problem is the impact on the environment because generally of plastics produced from petroleum and have long degradation life. Therefore, the development of bioplastics from natural for replacement or alternative materials. Since it can degradation within a short period of time. The study found that the furthestmost public bioplastics of polylactic acid, polyhydroxybutyrate and polyhydroxyalkanoates, which produced from agricultural products or waste agricultural as cassava, corn, sugarcane, rice straw etc. and found that degradation time 28-300 day. In addition, when improving the plastic properties found that it can be applied extensively. The result is a tendency to increase production in the global situation.

**Keywords:** Bioplastics, Bioplastics Type, Application

## บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาจากปิโตรเลียม ในยุคปัจจุบันนี้นับเป็นวัสดุที่อยู่คู่กับมวลมนุษยชาติ เริ่มจากกิจกรรมประจำวันคือ ตั้งแต่ตื่นนอนก็พบว่าในการล้างหน้า แปรงฟัน และการใช้ยาสีฟันมีบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติก รวมทั้งการรับประทานอาหาร ถ้วย จาน ซึ่งภาชนะดังกล่าวยังคงผลิตจากพลาสติก แก้วน้ำดื่ม กาละมัง ถึงขยะ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ของเล่นเด็ก ทุกอย่างล้วนพบว่ามีสารตั้งต้นจากพลาสติก [1] ซึ่งจะเห็นได้ว่าตั้งแต่ตื่นนอนจนกระทั่งถึงเข้านอน สิ่งของเครื่องใช้ทุกชนิดมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบแทบทั้งสิ้น และยังสามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่น ๆ เช่นไม้ เหล็ก แก้ว เป็นต้น แต่พลาสติกที่เกิดขึ้นจากปิโตรเลียมนั้นมีข้อเสียคือ การย่อยสลายใช้เวลานานแต่ก็สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันของประเทศไทย ประชากรยังขาดจิตสำนึกในการคัดแยกขยะ ก่อนที่เทศบาลจะนำไปกำจัดต่อไป จากเหตุผลดังกล่าวนี้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทำให้นักวิทยาศาสตร์คิดค้นวัสดุที่สามารถทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมซึ่งก็คือพลาสติกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือที่เรียกว่า “พลาสติกชีวภาพ” ซึ่งใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายสั้นและน้อยกว่าพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากปิโตรเลียม

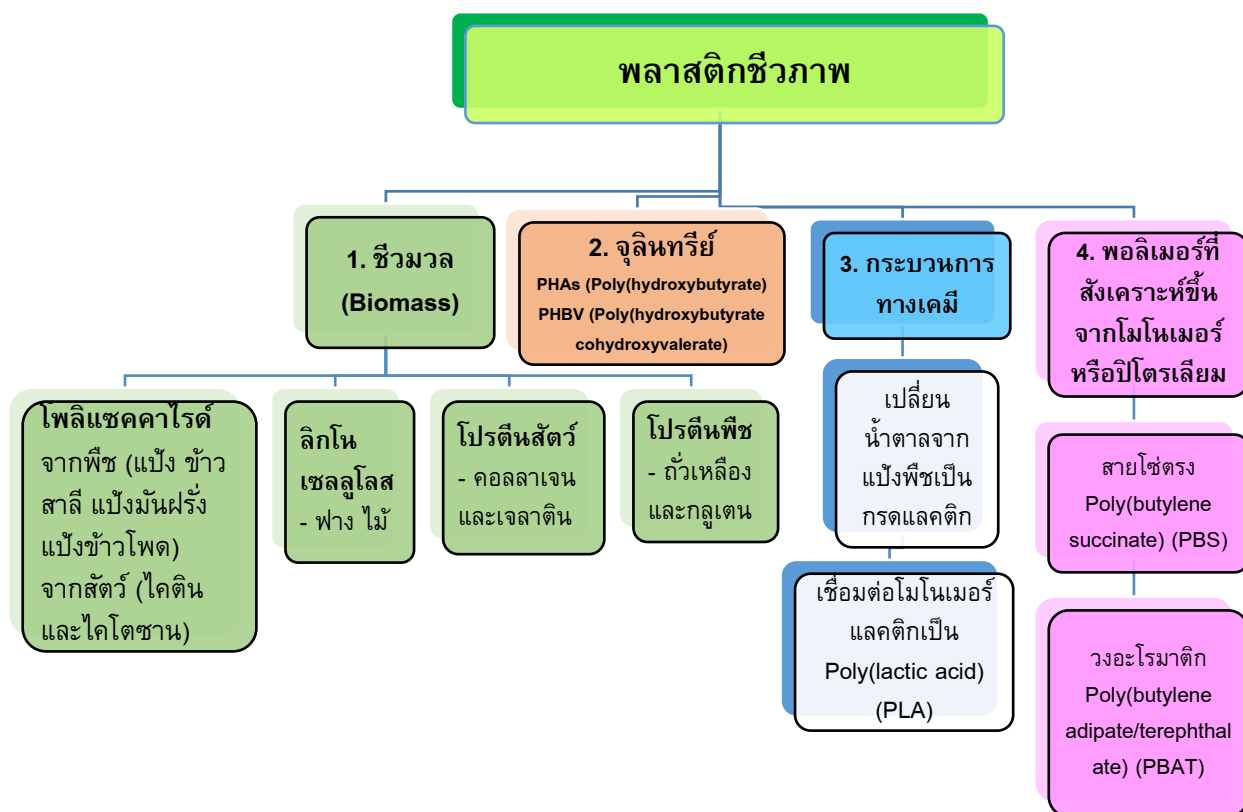
บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ ความหมาย การย่อยสลาย การเตรียม การใช้ประโยชน์ และสถานการณ์ของพลาสติกชีวภาพ

## ความหมายพลาสติกชีวภาพ [2]

จาก ISO 472:1988 ให้ความหมายของพลาสติกชีวภาพ คือ พลาสติกที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี จากกิจกรรมของจุลินทรีย์จากธรรมชาติ ภายในสภาวะที่กำหนดโดยสภาพแวดล้อม

จาก ASTM D20.96 ให้ความหมายของพลาสติกชีวภาพ คือ พลาสติกที่สามารถเปลี่ยนเป็นโมเลกุลเล็กจากการตัดพันธะของสายโซ่โพลิเมอร์ยาว ๆ จากปฏิกิริยาทางเคมี ชีวภาพ และทางกายภาพเพื่อให้เปลี่ยนโครงสร้างด้วยการย่อยสลายภายใต้สภาวะตามธรรมชาติหรือที่สภาวะกำหนด

จากความหมายดังกล่าวข้างต้นสรุปว่า พลาสติกชีวภาพ คือ พลาสติกที่เปลี่ยนจากโพลิเมอร์สายยาวให้เป็นโมโนเมอร์สายสั้นด้วยการแตกพันธะหรือการเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ส่งผลให้สมบัติต่างจากเดิม ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติหรือที่กำหนด จากคำจำกัดความดังกล่าวข้างต้น ยังสามารถแบ่งประเภทของพลาสติกชีวภาพ ตามหลักเกณฑ์สารตั้งต้นหรือวัตถุดิบเริ่มต้นที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเป็น 4 ประเภท ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ประเภทพลาสติกชีวภาพ

### การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ [3]

**Photo-degradation** การย่อยสลายพันธะของพอลิเมอร์โดยใช้แสงหรือรังสียูวี หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ที่มีพันธะเคมีไม่แข็งแรง จึงสามารถกำจัดหรือลดปริมาณพลาสติกชนิดนี้ได้ แต่ข้อเสียคือการย่อยนี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อบ่อฝังกลบขยะมีปริมาณขยะหนาแน่น หรือภายใต้สภาวะที่มีมืด พลาสติกที่มีการเคลือบด้วยสารอื่นที่มีความหนา

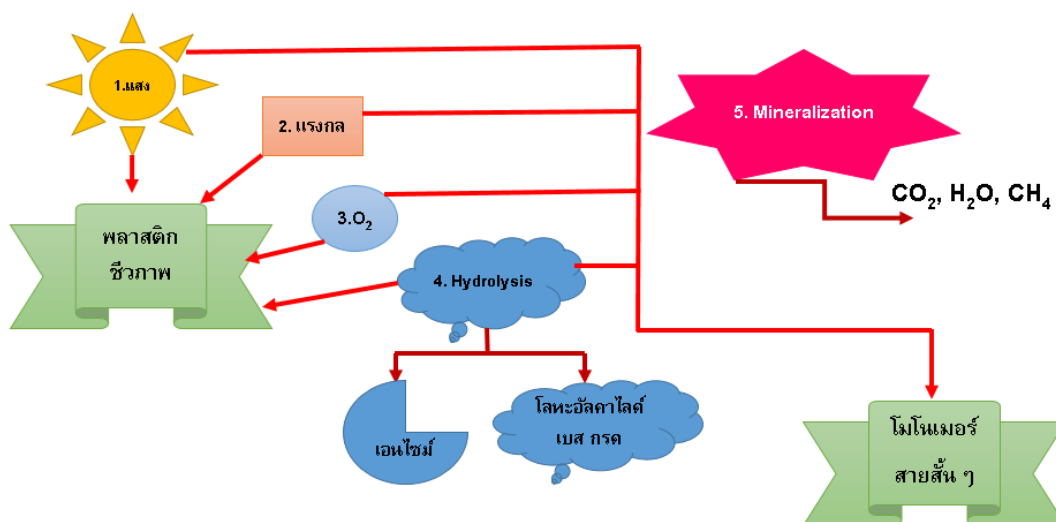
**Mechanical degradation** การย่อยสลายโดยอาศัยแรงกลทำให้พลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

**Oxidative degradation** การย่อยสลายโดยการเติมออกซิเจนลงในพอลิเมอร์ โดยอาศัยปัจจัยช่วย คือ ความร้อนจากแสงหรือรังสียูวี หรือแรงกลเป็นปัจจัยร่วมเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ  $RO\cdot$  และ  $OH\cdot$  ที่ไม่เสถียรที่ตำแหน่งคาร์บอน การแตกพันธะส่งผลต่อการเสถียรเชิงกล ข้อดีของการย่อยสลายพลาสติกด้วยวิธีนี้คือ สามารถย่อยได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด หรือทำการเติมเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแตกตัวไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและย่อยสลายได้ในที่สุด

Hydrolytic degradation การย่อยสลายโดยอาศัยพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับน้ำ เรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่ง เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase และตัวเร่งที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่พบในสภาวะทางธรรมชาติ เรียกการย่อยเช่นนี้ว่าการย่อยทางเคมี กรณีการย่อยด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อาศัยตัวเร่งจากพอลิเมอร์ภายในโครงสร้างใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดโมโนเมอร์สายสั้น

Biodegradable การย่อยสลายของพอลิเมอร์โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ

จากความหมายการย่อยสลายนี้นี้สรุปได้ว่า การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ คือ การทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกพันธะเป็นโมโนเมอร์สายสั้น ๆ โดยอาศัยปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ คือ ความร้อน แสงหรือรังสียูวี แรงกล จุลินทรีย์ ออกซิเจน และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยอาศัยน้ำ ภายใต้สภาวะการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวคือเอนไซม์ และสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์ด้วยโลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่พบตามธรรมชาติ ดังภาพที่ 2

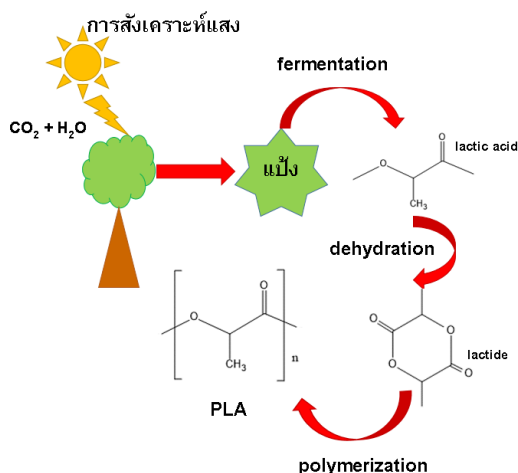


ภาพที่ 2 การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพด้วยปัจจัยต่าง ๆ

### การเตรียมพลาสติกชีวภาพ

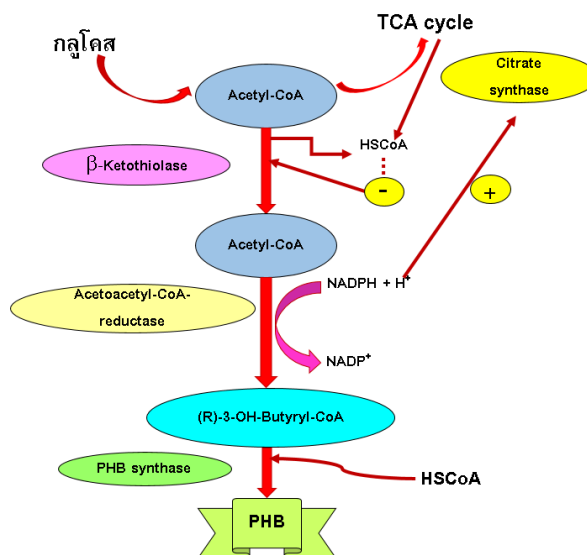
พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid, PLA) ผลิตขึ้นจากสารตั้งต้นทางการเกษตร คือ ข้าวโพด อ้อย หัวบีท และ มันสำปะหลัง เริ่มต้นด้วยการบดหรือไม้แบ่งจากพืชให้ละเอียด จากนั้นย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล และอาศัยกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ให้เปลี่ยนเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) จากนั้นทำให้โครงสร้างของสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงเป็นวงแหวน เรียกว่า Lactide นำไปกลั่นภายใต้ระบบสุญญากาศโดยเกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพอลิเมอร์สายยาวของ lactide เรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) การปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (PCL) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูปในรูปแบบการเป่าและฉีด และหากหมักโดยจุลินทรีย์ *Eschericia coli* ซึ่งจุลินทรีย์

นี้ใช้น้ำตาลเป็นแหล่งอาหารและเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีน้ำตาลเป็นพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) [4] ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการผลิต PLA

พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Polyhydroxybutyrate : PHB) คือพอลิเมอร์จากการหมักกลูโคสและกรดอะซิติก (Acetic acid) จากแบคทีเรีย ซึ่งต้องอาศัยวัฏจักรเครปส์ (Kreb's cycle, TCA cycle) เป็นตัวกลาง และต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพคือเอนไซม์ 3 ชนิดดังนี้ 1. เอนไซม์ 3-Ketothiolase ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการรวมตัว Acetyl CoA เกิดเป็น Acetoacetyl-CoA 2. เอนไซม์ Acetoacetyl-CoA reductase คือเอนไซม์ชนิดเร่งปฏิกิริยารีดักชันโดยทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ Acetoacetyl-CoA เกิดเป็น (R)-3-Hydroxybutyryl-CoA และชนิดสุดท้ายเอนไซม์ PHA synthase เร่งปฏิกิริยา Polymerizes สาร(R)-3-Hydroxybutyryl-CoA เกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือพอลิเมอร์ PHB ดังภาพที่ 4 [5]



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิต PHB

ที่มา: ตัดแปลงจาก Davies, S.; & Tighe, B. (1995). Cell attachment to gel-spun polyhydroxybutyrate fibers. *Polymer preprints*. 36: 103-104.

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สังเคราะห์จากเซลล์ภายในจุลินทรีย์ ประเภทแบคทีเรีย โดยพบว่า PHA ถูกแบคทีเรียสร้างขึ้นเพื่อเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน สารสะสมในรูปเม็ดแกรนูล ซึ่งพบได้ในเซลล์ของแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังพบว่าแบคทีเรีย *Ralstonia eutropha* สามารถสร้างและสะสม PHA ได้ประมาณ 90% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเซลล์แห้ง ซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีลักษณะคล้ายเทอร์โมพลาสติก แต่ข้อดีคือสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดย PHA สร้างขึ้นเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำรองให้แก่เซลล์ภายในจุลินทรีย์ พบว่าจุลินทรีย์สามารถดึงคาร์บอนสำรองกลับมาใช้ช่วยการเจริญเติบโตเมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมขาดแคลนคาร์บอน และ PHA มีข้อดีคือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกประการคือมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ จึงจำแนก PHA อยู่ในกลุ่มพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ (Polyester) นับเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม คือพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน [6] ยกตัวอย่างพลาสติกชีวภาพที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดและการย่อยสลายทางธรรมชาติ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเตรียมพลาสติกชีวภาพ จากวัตถุดิบตั้งต้นต่าง ๆ

ชนิดพลาสติกชีวภาพ	วัตถุดิบตั้งต้น	สารตั้งต้น	ระยะเวลาการย่อยสลาย	เอกสารอ้างอิง
PLA	ฟางข้าว	โพลีแซคคาไรด์ (เซลลูโลส)	105 วัน (ฝังกลบในดิน)	[7]
	ข้าวโพด	โพลีแซคคาไรด์ (แป้ง)	60 วัน (58 องศาเซลเซียส, ปุ๋ยหมัก)	[8]
	กากสับปะรด	โพลีแซคคาไรด์ (เซลลูโลส)	ไม่พบการศึกษา	[9]
	กากน้ำตาล ซึ่งข้าวโพด	ลิกโนเซลลูโลส	ไม่พบการศึกษา	[10]
	เศษปลาเหลือทิ้ง	ไคโตซาน	ไม่พบการศึกษา	[11]
PHB	แบคทีเรียสายพันธุ์ <i>Cupriavidus necator</i> (กลุ่ม <i>Ralstonia eutropha</i> )	อาหารเหลว + อาหารเลี้ยงเชื้อ + เคซีนและถั่วเหลือง + กลูโคส	180 วัน (ฝังกลบในดิน)	[12]
	แบคทีเรียสายพันธุ์ <i>Wautersia eutropha</i> B5786	น้ำตาลฟรุกโทส + $\text{NH}_4\text{Cl}$ ภายใต้ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และการเติมอากาศ	300 วัน (ฝังกลบในดิน)	[13]

ชนิดพลาสติกชีวภาพ	วัตถุดิบตั้งต้น	สารตั้งต้น	ระยะเวลาการย่อยสลาย	เอกสารอ้างอิง
	เกรดการค้า	Tianan Biomaterials Co. Ltd. ประเทศจีน	110 วัน (58 องศาเซลเซียส, ปุ่มหมัก)	[14]
	เกรดการค้า P209	Biomer, ประเทศเยอรมันนี	28 วัน (70% ความชื้น, 55 องศาเซลเซียส, ปุ่มหมัก)	[15]

### การใช้ประโยชน์จากพลาสติกชีวภาพ

ทางด้านบรรจุภัณฑ์ เช่นการนำพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 160-190 องศาเซลเซียส สามารถขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) เป็นรูปต่าง ๆ เช่น ถ้วย ชาม และด้วยคุณสมบัติที่มีความใส สมบัติทางกายภาพ แข็งกล การซึมผ่านก๊าซใกล้เคียง พอลิเมอร์ชนิด Polyethylene Terephthalate (PET) และ Polystyrene (PS) ที่ผลิตขึ้นจากปิโตรเลียม จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้แทนพลาสติกจากปิโตรเลียมหลายชนิด เช่น พิล์มสำหรับหุ้มอาหารผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร ได้แก่ กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ และแก้วน้ำ สำหรับใช้ครั้งเดียวทิ้ง รวมทั้ง ถุงหูหิ้ว ถุงใส่กล่อง เส้นใยและสิ่งทอ นำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเคสของมือถือ โดยมีข้อสรุปจากงานวิจัยการศึกษา PLA ผสม PHB เพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้คงที่ สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อนำมาแทนที่พอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารในปัจจุบันที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยพบว่าค่าการละลายของ PLA อยู่ระหว่าง  $19.5 \text{ MPa}^{1/2}$  และ  $20.5 \text{ MPa}^{1/2}$  ในขณะที่ PHB อยู่ระหว่าง  $18.5 \text{ MPa}^{1/2}$  และ  $20.1 \text{ MPa}^{1/2}$  เนื่องจากความแตกต่างของค่าความสามารถในการละลายค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเข้าคู่ที่ตีระหว่างไบโอพอลิเมอร์หรือพลาสติกชีวภาพสองชนิดนี้ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ PLA-PHB ในอัตรา 75:25 พบว่า PHB กระจายตัวในเมทริกซ์ PLA พบว่าสมบัติที่ได้คือ จุดหลอมเหลว 180-190 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของการสลายตัว 270 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการแยกองค์ประกอบทางเคมีสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส สมบัติเชิงกล โมดูลัสของยัง (E) 1400-1800 MPa สมบัติเชิงกลเทนไซล์ (TS) 16-50 MPa และพบว่าค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น 7% ในอัตราส่วนนี้ แสดงลักษณะความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ลดลงซึ่งเป็นคุณสมบัติสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร จากการศึกษาการใช้ PLA ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ พบว่าคุณสมบัติในการป้องกันความชื้นที่ด้อยกว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม โดยเฉพาะความเปราะบางโดยธรรมชาติของ PLA บริเวณคอขวด จึงมีการพยายามศึกษาสารเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น Plasticizers การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไลเซชัน ทำได้โดยการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อเสริมความเหนียว เพื่อปรับปรุงสมบัติความคงทนของพลาสติกชีวภาพ ปัญหาที่พบเมื่อนำ PLA มาประยุกต์ใช้การผลิตในระดับอุตสาหกรรมพบว่า PLA มีข้อจำกัดคือความต้านทานความร้อนต่ำและค่าการซึมผ่านก๊าซที่เข้าถึง ในกรณีนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรม ข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นพบว่ามีการวิจัยที่นำอนุภาคระดับนาโนเมตรเติมผสมในพอลิเมอร์ชีวภาพนี้ เช่น นาโนเคลย์ เพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าว [16] และพบการศึกษาผลของดินระดับนาโนเมตรและระดับไมโครเมตรต่อจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายด้วยความร้อนของ Polylactides พบข้อสรุปว่า ความเสถียรทาง

ความร้อนและความคงตัวทางความร้อนของ Poly (D-lactide) และ Poly-L-lactide ของนาโนคอมโพสิตสูงกว่าของ ไมโครคอมโพสิต [17]

ทางด้านเกษตร การพัฒนาปุ๋ยละลายช้าจากพลาสติกชีวภาพหรือไบโอพอลิเมอร์นั้น นับว่าเป็นวัสดุที่สำคัญต่อโลก ในแง่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้และเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัสดุที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่คงไว้ซึ่งศักยภาพการปลดปล่อยช้าเทียบเท่าปุ๋ยละลายช้าเกรดการค้า ปุ๋ยออสโมโค้ท (Osmocote) ถึงเวลาที่นักวิจัยควรตระหนัก รักรักษาและลดการปลดปล่อยมลภาวะสู่โลก โดยทำการเตรียมพลาสติกชีวภาพหรือไบโอพอลิเมอร์-ไฮโดรเจล-นาโนคอมโพสิต สำหรับใช้เป็นวัสดุเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย พบว่ามีงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุปลดปล่อยช้าจากไบโอพอลิเมอร์ สรุปได้ว่าสามารถเตรียมได้จากไบโอพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น โดยนำไบโอพอลิเมอร์เหล่านี้มาสังเคราะห์ให้เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างแบบร่างแห ร่วมกับ นาโนเคลย์ (มอนต์มอริลโลไนต์) การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมโพสิต สำหรับเคลือบปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อย โดยผสมแป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน (70:30 และ 80:20) ต่าง ๆ เพื่อสร้างเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างแบบร่างแห และผสมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน (2 4 6 8 และ 10 ส่วน โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 ส่วน) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับไบโอพอลิเมอร์ แล้วนำไปหล่อเป็นแผ่น จากนั้นนำแผ่นนาโนคอมโพสิตที่ได้ไปวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น ความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออน ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) จากการทดลองพบว่าปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในนาโนคอมโพสิตเพิ่มขึ้น มีผลให้การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมมอนต์มอริลโลไนต์มีผลทำให้การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าลดลง และจากการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่าในอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็น 80:20 มีค่าร้อยละการหายไปของน้ำหนักสูงกว่าอัตราส่วน 70:30 เล็กน้อย นอกจากนี้จากผลของเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นแบบแยกกระจาย และเมื่อนำปุ๋ยเม็ดทางการค้าไปห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตที่อัตราส่วน 80:20:8 ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ แล้วไปวิเคราะห์หัตถการปลดปล่อยไนโตรเจนพบว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ นาโนคอมโพสิตมีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนต่ำกว่าปุ๋ยที่ไม่ได้เคลือบประมาณ 33% [18] การศึกษาลักษณะเฉพาะ สมบัติการพอง และสมบัติการปลดปล่อยของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยชนิดใหม่โดยมีพื้นฐานจากเซลลูโลสไฮโดรเจล (Cellulose hydrogel) ของฟางข้าวสาลี โดยผสมเซลลูโลสจากฟางข้าวสาลี พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเมอร์ กรดอะคริลิก เพื่อให้เกิดพอลิเมอร์ คอมโพสิตที่มีโครงสร้างแบบร่างแห จากนั้นนำไปผสมกับยูเรีย (Urea) หรือ ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ ) และคัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาด 20 40 และ 60 เมช และวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซึมน้ำและการปลดปล่อยปุ๋ย วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตมีอัตราการพองที่เร็วใน 60 นาทีแรก แล้วจึงเข้าสู่สภาวะสมดุล และอัตราการการปลดปล่อยปุ๋ยทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในช่วง 30 นาทีแรกเร็วและค่อย ๆ ช้า ที่หลังจากนั้น อีกทั้งปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะมีอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยเร็วกว่า นอกจากนี้จาก



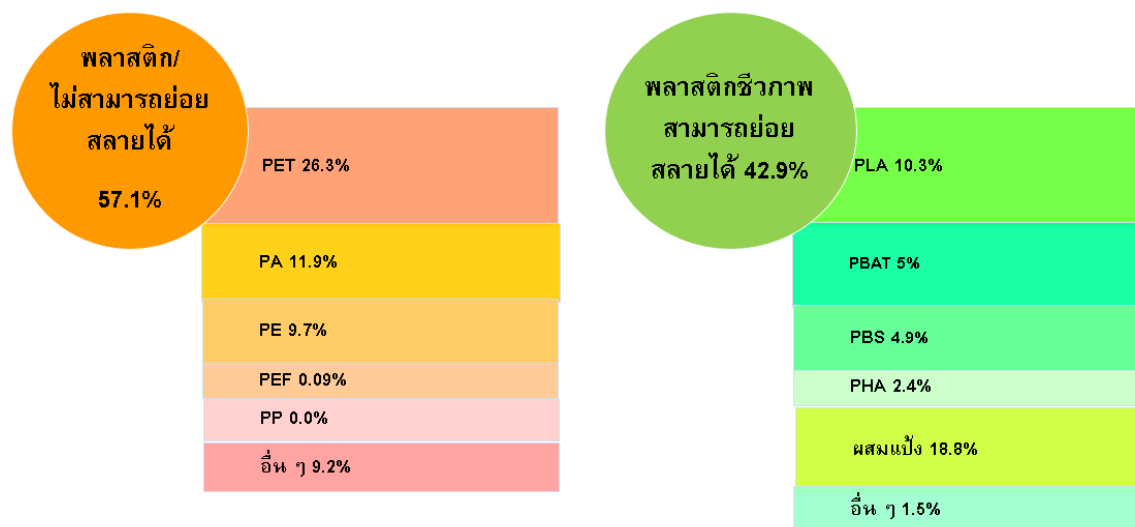
ผลของอินฟราเรด สเปกโทรสโกปีพบพีกกลุ่มไฮดรอกไซด์ของเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พิคคาร์บอนิลของอะคริลาไมด์ พิคของยูเรีย และพิคของไดโพลแฮมเชื่อมฟอสเฟต จึงสรุปได้ว่าการเตรียมปุ๋ยปลดปล่อยช้าจากเซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเมอร์กรดอะคริลิก รวมทั้งเคลือบยูเรียและไดโพลแฮมเชื่อมฟอสเฟตนั้นประสบความสำเร็จ [19] นอกจากนี้พบว่าการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ดูดซับน้ำอัจฉริยะโดยมีพื้นฐานจากแป้ง โดยผสมแป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง หรือแป้งมันฝรั่งกับอะคริลาไมด์ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหอนนคู่ (Twin-roll mixer) เพื่อให้มีลักษณะเป็นเจล จากนั้นคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช จากนั้นนำปุ๋ยยูเรียมาเคลือบในชั้นแรกคือ เซลลูโลสและชั้นที่ 2 คือ พอลิเมอร์ดูดซับน้ำอัจฉริยะที่มีพื้นฐานจากแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีสเปรย์ วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากแป้งและปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแล้วด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และวิเคราะห์พฤติกรรมการปลดปล่อยของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแล้วในดิน จากผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานเป็นแป้งมีลักษณะคล้ายตะแกรง และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการปลดปล่อยของปุ๋ยพบว่าเมื่อดินเปียกเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิเมอร์มีการปลดปล่อยไนโตรเจนถึง 95% ในขณะที่ปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยเซลลูโลสอย่างเดียวยังมีการปลดปล่อยไนโตรเจนประมาณ 60% ภายใน 24 ชั่วโมง และเมื่อเคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานจากแป้งเป็นชั้นที่สอง จะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนประมาณ 40% ภายใน 24 ชั่วโมง หรือ 70% ใน 96 ชั่วโมง โดยพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีพื้นฐานจาก แป้งมันฝรั่งมีการปลดปล่อยไนโตรเจนน้อยที่สุด รองลงมาคือแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้จากแป้งมันฝรั่งและแป้งข้าวโพดมีขนาดรูตะแกรงประมาณ 10-25 ไมโครเมตร แต่พอลิเมอร์ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังมีขนาดรูตะแกรงประมาณ 50 ไมโครเมตร [20] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมวัสดุปลดปล่อยธาตุอาหารละลายช้าจากพลาสติกชีวภาพหรือไบโอพอลิเมอร์ ซึ่งให้เห็นชัดว่าสามารถใช้เซลลูโลส จากชานอ้อยทดแทนแป้งชนิดต่าง ๆ ได้เพราะเป็นสารชีวโมเลกุลประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เป็นโครงสร้างและทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห ผนวกกับการดูดซึมของน้ำได้ดีด้วยการผสมกับไบโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic property) เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสามารถเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับไบโอพอลิเมอร์โครงสร้างแบบร่างแหด้วยวัสดุนาโน เช่น นาโนเคลย์ (มอนต์มอริลโลไนต์)

ทางด้านการแพทย์ พลาสติกชีวภาพสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่มีพิษ จึงนำคุณสมบัตินี้ประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เช่น แคปซูลยา วัสดุทางการแพทย์ทำจากแลคติกหรือกรดไกลโคลิคและคิดเป็นประมาณ 95% ของตลาด เช่น รากฟันเทียม และอุปกรณ์ทันตกรรม สกรูทางการแพทย์ซึ่งใช้ในการยึดกระดูกแตก เพื่อรักษาสमानเอ็น และสำหรับการผ่าตัดเข้าอ่อน ๆ บนข้อเท้าและมือ รากฟันเทียมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำจากอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนถูกใช้เพื่อเติมหลุมฟันหลังจากถอนฟัน [21]

### สภาวะการผลิตพลาสติกชีวภาพ

จากสถานการณ์การผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลก พบว่ามีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มขึ้นสูงจากปี 2560 ผลิต 2.05 ล้านตัน เป็น 2.44 ล้านล้านตันในปี 2565 แต่สำหรับพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) ชื่อทางการค้าคือ ไนลอน (Nylon) พบเปอร์เซ็นต์การผลิต 57.1 ของกำลังการผลิตพลาสติกทั่วโลก [22] นอกจากนี้ยังพบว่า PE มี

การขยายกำลังการผลิตในยุโรป แต่ PET มีอัตราการเติบโตคงที่ และพบว่า PEF (Polyethylene furanoate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่มีแนวโน้มเข้าสู่ตลาดในปี 2563 เนื่องจากพบคุณสมบัติเด่นด้านการทนความร้อนสามารถเทียบเคียง PET จากปิโตรเลียม และผลิตจากวัสดุชีวภาพทั้งหมด ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ เครื่องดื่มอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหาร ในขณะที่ PP มีการคาดการณ์ว่า ในปี 2565 พอลิเมอร์ชนิดนี้จะเข้าสู่ฐานการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยมีอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภท และสำหรับ PUR (Polyurethanes) จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อขยายตลาดเชิงพาณิชย์ ทดแทน PUR จากปิโตรเลียม ดังภาพที่ 5

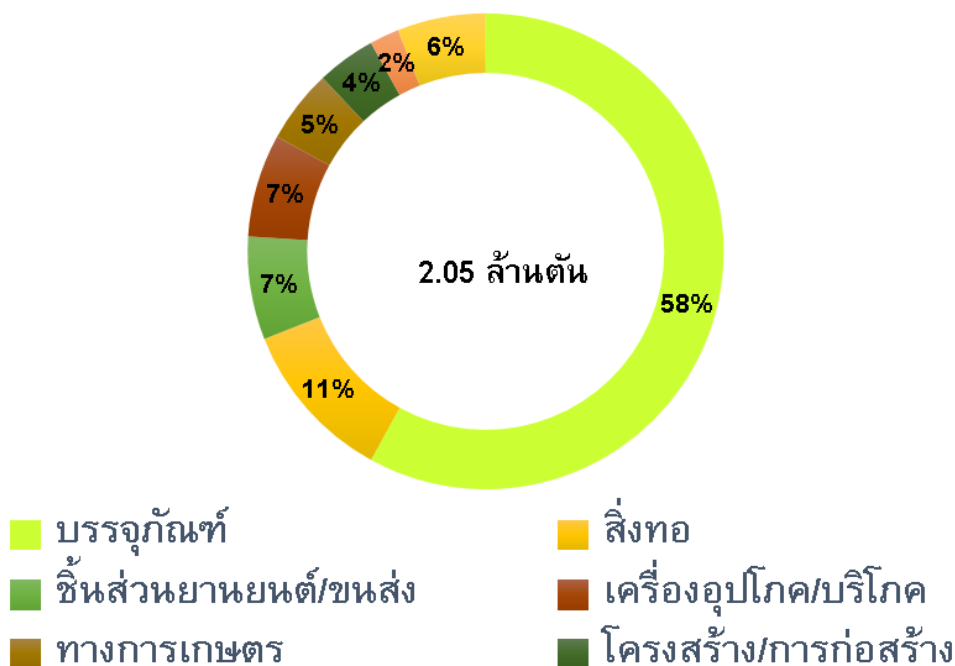


ภาพที่ 5 ภาพรวมการผลิตพลาสติกชีวภาพโลกปี 2560

ที่มา: ดัดแปลงจาก European Bioplastics. (2017). Bioplastics: Facts and figures. Berlin. [Online]. Retrieved May 23, 2020, from: <https://www.european-bioplastics.org/market/>.

จากแนวโน้มการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพพบว่า PLA (Polylactic acid) และ PHAs (Polyhydroxyalkanoates) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหลักที่เติบโตจากการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เพื่อเทียบเคียงกับพอลิเมอร์จากปิโตรเลียม เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภท โดยคาดการณ์ว่าในปี 2565 พบอัตราการเติบโตของกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นสามเท่าจาก 0.15 ล้านตัน ซึ่งเดิมอยู่ที่ 0.05 ล้านตัน ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์ ดังภาพที่ 6

## การใช้ประโยชน์พลาสติกชีวภาพ



ภาพที่ 6 ตลาดและการใช้ประโยชน์พลาสติกชีวภาพปี 2560

ที่มา: ดัดแปลงจาก European Bioplastics. (2017). Bioplastics: Facts and figures. Berlin. [Online]. Retrieved May 23, 2020, from: <https://www.european-bioplastics.org/market/>.

### สรุป

พลาสติกชีวภาพชนิด PLA PHB และ PHAs สังเคราะห์จากผลผลิตทางการเกษตรและของเหลือทิ้งทางการเกษตร ข้อดีคือสามารถย่อยสลายได้จากสภาพทางธรรมชาติหรือที่กำหนดขึ้น เช่น แสงหรือรังสียูวี แรงกล จุลินทรีย์ ออกซิเจน เอนไซม์ และสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านแก๊สเพื่อให้สามารถนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์จากปิโตรเลียม อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์สถานการณ์โลก พบว่ามีแนวโน้มการผลิตเพิ่มขึ้น แต่สำหรับประเทศไทยปัญหาที่พบคือประชากรยังขาดจิตสำนึกในเรื่องการคัดแยกขยะ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวันมีที่มาจากปิโตรเลียมซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตามสัญลักษณ์ที่กำหนดไว้ แต่สำหรับพลาสติกชีวภาพนั้นจะต้องถูกนำไปกำจัดได้ตามสภาวะดังกล่าวข้างต้น ถึงจะสามารถลดปริมาณขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Teerawirut, S. (2017, May). Plastics: Extraneous Material that affect life and environment) The Secretariat of the House of Representatives. (in Thai).
- [2] Chandra, R. and Renu, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*. 1273-1335. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700\(97\)00039-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00039-7)

- [3] National metal and materials technology center. (2017). Type of biodegradable plastics. [Online]. Retrieved May 23, 2020, from: <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/plastics-degradation/degradable-plastic-type.html>. (in Thai).
- [4] Lertworasirikul, A. (2011). Poly(lactic acid): Polyester from Renewable Resources. *Kasetsart Engineering Journal*. 77, 99-110. (in Thai).
- [5] Davies, S., Tighe, B. (1995). Cell attachment to gel-spun polyhydroxybutyrate fibers. *Polymer preprints*. 36, 103-104.
- [6] Duangsri, C., Raksajit W. (2016). Polyhydroxyalkanoates: an alternative biomaterial for renewable plastic. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 7(2), 415-423. (in Thai).
- [7] Fabjola, B., Stefano, P., Luciana, S. , Laura, E. D., Giovanna, G. , Andrea, B. , Stefania, F. , Elza, B. (2018, November). A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*. 200, 357-368. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.252>
- [8] Ahn, H.K., Huda, M.S., Smith, M.C., Mulbry, W., Schmidt, W.F., Reeves, J.B. (2011, April). Biodegradability of injection molded bioplastic pots containing polylactic acid and poultry feather fiber. *Bioresource Technology*. 102, 4930-4933. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.042>
- [9] Anil, D., Suzana, W. (2006, May). Effect of sodium alginate concentration, bead diameter, initial pH and temperature on lactic acid production from pineapple waste using immobilized *Lactobacillus delbrueckii*. *Process Biochemistry*. 41(5),1117-1123. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.12.002>
- [10] Limin, W., Bo, Z., Bo, L., Bo, Y., Cuiqing, M., Fei, S., Dongliang, H., Qinggang, L., Yanhe, M., Ping, X. (2010, October). Efficient production of l-lactic acid from corncob molasses, a waste by-product in xylitol production, by a newly isolated xylose utilizing *Bacillus* sp. Strain. *Bioresource Technology*. 101(20), 7908-7915. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.031>
- [11] Min-Tian, G., Makoto, H., Eiichi, T., Tadashi, H. (2006, December). Acid-hydrolysis of fish wastes for lactic acid fermentation. *Bioresource Technology*. 97(18), 2414-2420. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.002>
- [12] Jain, R., Tiwari, A. (2015). Biosynthesis of planet friendly bioplastics using renewable carbon source. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 13, 11.
- [13] Boyandin, A.N., Prudnikova, S.V., Karpov, V.A., Ivonin, V.N.,Đ , N.L., Nguyen, T.H., Lê, T.M.H., Filichev, N.L., Levin, A.L., Filipenko, M.L., Volova, T.G., Gitelson, I.I. (2013, September). Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 83, 77-84. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.04.014>

- [14] Weng, Y.X., Wang, X.L., Wang, Y.Z. (2011, June). Biodegradation behavior of PHAs with different chemical structures under controlled composting conditions. *Polymer Test.* 30, 372-380.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.02.001>
- [15] Tabasi, R.Y., Aji, A. (2015, October). Selective degradation of biodegradable blends in simulated laboratory composting. *Polymer Degradation and Stability.* 120, 435-442.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.07.020>
- [16] Marina, P. A., María, D. S., Miguel, A., Juan, L. (2017, August). On the use of PLA-PHB blends for sustainable food packaging applications. *Materials.* 10(1008), 1-26. DOI: 10.3390/ma10091008
- [17] Zhou, Q., Xanthos, M. (2009, March). Nanosize and microsize clay effects on the kinetics of the thermal degradation of polylactides. *Polymer Degradation and Stability.* 94 (3), 327-338.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.12.009>
- [18] Wiriyasoonthorn, S., Sriphalang, S. (2015). Preparation of Cassava starch/Poly(vinylalcohol)/Montmorillonite Nanocomposites for Coating Controlled-Release Fertilizer. *KKU Science Journal.* 43(3), 503-514. (in Thai).
- [19] Li, X., Li, Q., Xu, X., Su, Y., Yue, Q., Gao, B. (2016, March). Characterization, swelling and slow-release properties of a new controlled release fertilizer based on wheat straw cellulose hydrogel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* 60, 564-572.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.10.027>
- [20] Qiao, D., Liu, H., Yu, L., Bao, X., Simon, G.P., Petinakis, E., Chen, L. (2016, August). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulates by starch-based supersorbent polymer. *Carbohydrate Polymers.* 147, 146-154.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.010>
- [21] Elsevier. (2016, May 23). Commercial Applications of Bioplastics. Introduction to Bioplastics Engineering, pp.227-249. Retrieved from: <http://scitechconnect.elsevier.com/wp-content/uploads/2016/10/Commercial-applications-of-bioplastics.pdf>.
- [22] European Bioplastics. (2017, May 23). Bioplastics: Facts and figures. Berlin. Retrieved from: <https://www.european-bioplastics.org/market/>.