บทความวิชาการ

บทบาทของแบคทีเรียต่อพลาสติกชีวภาพ

ศิริวิมล สุขสวัสดิ์ และ วสุ ปฐมอารีย์*

บทคัดย่อ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ทำให้เกิดการสะสมและก่อปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำพลาสติกบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ (recycle) เพื่อช่วยแก้ปัญหาขยะพลาสติก แต่ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastic) หรือพลาสติกชีวภาพขึ้นมา ซึ่งกระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น รา แบคทีเรีย เป็นต้น พลาสติกชีวภาพที่เป็นที่นิยมและรู้จักกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate, PHA) พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) และพอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) ซึ่งการผลิตพลาสติกชีวภาพขึ้นมานั้นเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการในการใช้พลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต พอลิแลกติกแอซิด

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: wasu.p@cmu.ac.th

The Role of Bacteria on Bioplastic

Siriwimol Suksawat and Wasu Pathom-aree*

ABSTRACT

Plastics are widely used materials as they have many good properties such as lightweight, inexpensive and durable which can be mould into various products. However, most plastics are non-degradable which can be accumulated and generated environment problems. Recycling is promoted to solve plastic waste problem with limited success. This led to research and development on biodegradable plastic using agricultural raw materials. The degradation process occurs by the microorganism such as fungi, bacteria. Bioplastics are popular and widely recognized in current such as polyhydroxyalkanoates (PHA), polyhydroxybutyrate (PHB) and polylactic acid (PLA). Production of these bioplastics in response to an increased plastic demand will help reduce the environmental impact in the long run.

Keywords: bioplastics, polyhydroxyalkanoate, polyhydroxybutyrate, polylactic acid

Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University

*Corresponding author, email: wasu.p@cmu.ac.th

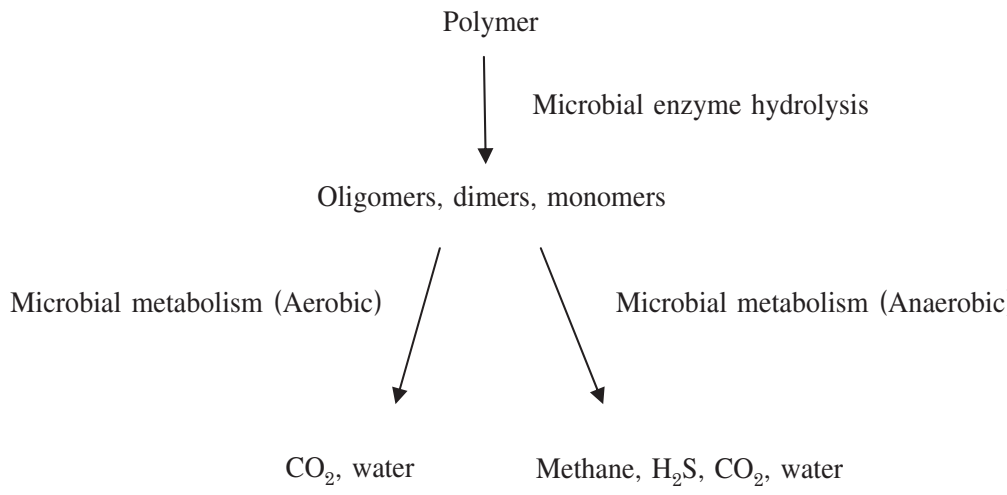
พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) หรือพลาสติกที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) คือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย เป็นต้น [1] โดยสามารถแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics) เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น พอลิคาร์โปรแลคโทน (polycaprolactone, PCL) เป็นต้น และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics) เช่น พอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalcanoate, PHA) และพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) เป็นต้น [2]

ในส่วนของบทความฉบับนี้จะขอกล่าวถึงพลาสติกชีวภาพบางประเภทที่น่าสนใจ คือ PHA, PLA และ PHB เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้ทั่วไปในทางการค้าในขณะนี้ โดยพลาสติกดังกล่าวผลิตจากวัสดุธรรมชาติซึ่งสามารถเกิดขึ้นใหม่และทดแทนได้ (renewable resources) เช่น เซลลูโลส (cellulose) คอลลาเจน (collagen) เคซีน (casein) พอลิเอสเทอร์ (polyester) แป้ง (starch) โปรตีนจากถั่ว และข้าวโพด เป็นต้น [3] ซึ่งประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย รวมไปถึงมวลชีวภาพอื่นๆ ที่มีศักยภาพและราคาถูก สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตพลาสติกชีวภาพได้ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งนอกจากการผลิตพลาสติกชีวภาพจะช่วยลดปัญหาขยะแล้วยังช่วยลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

กลไกการย่อยสลายเริ่มต้นจากจุลินทรีย์เจริญและสร้างโคโลนีบนพื้นผิวของพลาสติก และเริ่มกระบวนการย่อยโดยอาศัยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งเอนไซม์จะไปจับกับพอลิเมอร์ จากนั้นจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกคลีเวจ (hydrolytic cleavage) ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงปรากฏในรูปของไดเมอร์ (dimer) และมอนอเมอร์ (monomer) ผลลัพธ์สุดท้ายของกระบวนการย่อยจะได้พลังงานและสารประกอบ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน กรดแลกติก แร่ธาตุต่างๆ มวลชีวภาพ (biomass) และน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต [2] โดยความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับรูปแบบของการย่อย (รูปที่ 1)

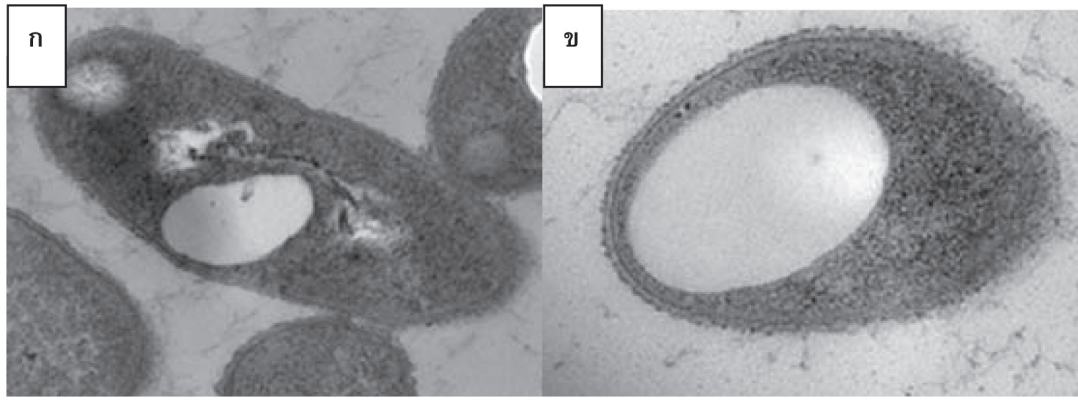


รูปที่ 1 แผนภาพการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ [4]

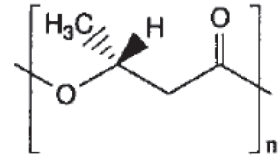
พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA)

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นพลาสติกที่ทนต่อความร้อน (thermoplastics) มีความยืดหยุ่นเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ (elastomeric) [5] ซึ่งคล้ายกับพลาสติกสังเคราะห์ประเภทพอลิเอททิลีน (polyethylene) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene) แต่ต่างกันตรงที่ PHA สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการค้นพบอนุพันธ์พอลิเอสเทอร์ที่อยู่ในกลุ่มนี้มากกว่า 100 ชนิด แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย โดยอนุพันธ์พอลิเมอร์ที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด ได้แก่ P3HB ซึ่งถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1926 โดย Lemoigne นักวิทยาศาสตร์จากสถาบัน Pasteur กรุงปารีส [6] ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต PHA นั้นมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้มีการค้นหาวัสดุที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายเพื่อลดต้นทุน เช่น Chakravarty และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการผลิต PHA จากระบบบำบัดน้ำเสียพบว่าปัจจัยหลักที่เพิ่มต้นทุนในการผลิต คือ แหล่งคาร์บอนที่ใช้ในการผลิต นอกจากนี้ Jantima และคณะ [8] ได้นำน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียที่สามารถผลิต PHA โดยมี crude glycerol เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า แบคทีเรียจีนัส *Novosphingobium* มีความสามารถในการผลิต PHA ได้ดีที่สุด โดยให้ผลผลิต 0.29 g PHAs g^{-1}

จุลินทรีย์หลายชนิด เช่น *Alcaligenes, Azotobacter, Bacillus, Pseudomonas, Variovorax, Stenotrophomonas, Acinetobacter, Xanthomonas, Penicillium, Paecilomyces, Acremonium, Verticillium* และ *Zygosporium* เป็นต้น [9] สามารถสะสม PHA ภายในเซลล์ในรูปของ amorphous granules [5] ภายในไซโตพลาสซึม (รูปที่ 2) เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งสะสมพลังงานเพื่อใช้ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น ปริมาณออกซิเจน ไนโตรเจน หรือสารอาหารที่ถูกจำกัด [10, 11] พอลิเมอร์ที่สร้างขึ้นจะมีการสะสมบริเวณผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จะมีการหลั่งเอนไซม์



รูปที่ 2 PHA granule ภายในไซโตพลาสซึมของเซลล์แบคทีเรีย [8]



รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ PHA [13]

extracellular hydrolases เพื่อใช้ในการเปลี่ยนพอลิเมอร์ให้เป็นมอนอเมอร์ของ hydroxyl acid [12] ซึ่ง PHA มีโครงสร้างอยู่ในรูป R-(3)-hydroxy fatty acid หรือ R-β-hydroxy fatty acid (รูปที่ 3)

PHA แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามจำนวนคาร์บอนในหน่วยมอนอเมอร์ คือ short chain length PHA (scl PHA) ซึ่งจะมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 3-5 อะตอม ส่วน medium chain length PHA (mcl PHA) มีคาร์บอน 6-14 อะตอม และ long chain length PHA (lcl PHA) มีคาร์บอนมากกว่า 14 อะตอมขึ้นไป [14]

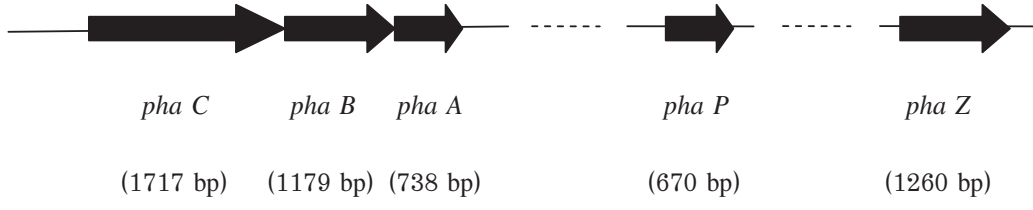
กระบวนการสังเคราะห์ PHA

แบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลให้เป็น PHA เพื่อเป็นแหล่งสะสมอาหารประเภทคาร์บอนและแหล่งพลังงานให้แก่เซลล์ในการตอบสนองต่อสภาวะเครียดต่อสิ่งแวดล้อม หรือสภาวะที่การเจริญถูกจำกัดและมีแหล่งคาร์บอนมากเกินไป โดยจะผลิตเก็บไว้ภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถแยกออกมาได้โดยการทำให้ผนังเซลล์แบคทีเรียแตกออก นอกจากนี้ยังมีการนำเอาความรู้ทางเทคโนโลยีชีวภาพเข้ามาใช้ในการผลิต PHA จากพืช โดยการนำยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ไปใส่ในพืชเป้าหมาย เพื่อให้พืชสามารถผลิต PHA ได้โดยตรงจากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และ PHA ที่ผลิตได้จะสะสมในส่วนต่างๆ เช่น เมล็ด ใบ

การสังเคราะห์ PHA ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ *de novo* fatty acid biosynthesis, chain elongation และ fatty acid β-oxidation ซึ่งทั้ง 3 กระบวนการจะมีการนำสารประกอบคาร์บอนไปสังเคราะห์ PHA ได้แก่ (R)-3-hydroxyacyl carrier protein (ACP), ketoacyl-Co A, (S)-3-hydroxyacyl-Co A และ 2-trans-enoyl-Co A โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ 3-hydroxyacyl-acyl-CoA-ACP transferase, ketoacyl-Co A reductase, 3-hydroxyacyl-Co A epimerase และ enoyl-Co A hydratase เพื่อเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนดังกล่าวให้อยู่ในรูปของ (R)-3-hydroxyacyl-acyl-Co A หลังจากนั้นจะเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชั่น (polymerization) โดยเอนไซม์ PHA polymerase และได้ PHA เป็นผลิตภัณฑ์ [15]

การสังเคราะห์ PHA เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ PHA synthase ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการทำงานของ *pha* CBA cluster (รูปที่ 4) ประกอบด้วย *pha* A, *pha* B และ *pha* C โดย *pha* A จะทำหน้าที่ในการควบคุมการสร้างเอนไซม์ β-ketothiolase ซึ่งมีบทบาทในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยน acetyl-Co A เป็น acetoacetyl-Co A สำหรับ *pha* B เป็นส่วนที่ควบคุมการสร้างเอนไซม์ NADPH-oxidoreductase ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยน acetoacetyl-Co A ไปเป็น R-3-hydroxybutyryl-Co A และ *pha* C เกี่ยวข้องกับการสร้างเอนไซม์ PHA polymerase โดยสังเคราะห์พอลิเมอร์จาก R-3-hydroxybutyryl-Co A ส่วน *pha* P ทำหน้าที่สร้างโปรตีน phasin ทำหน้าที่ในการควบคุมขนาด จำนวน และพื้นที่ผิวของ PHA inclusion การสังเคราะห์และการสะสม phasin เป็นกลไกที่เกิดขึ้นร่วมกับ *pha* R ซึ่งเป็น autoregulate repressor ทั้งนี้ยังขึ้นกับปริมาณของ *pha* C ที่มีอยู่ในเซลล์และยังเกี่ยวข้องกับ *pha* Z ซึ่งควบคุมการผลิตเอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรส (depolymerase) [16]

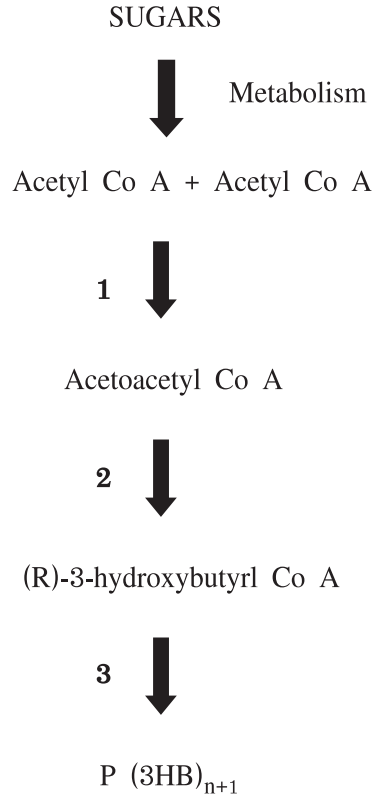
ในกระบวนการสังเคราะห์ PHA (PHA synthesis) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 pathway ที่มีความแตกต่างกัน [18] ซึ่งจะอาศัยการทำงานของเอนไซม์ 3 ชนิดในการเร่งปฏิกิริยา คือ เอนไซม์ β-ketoacyl-Co A thiolase *(phb A)*, เอนไซม์ acetoacetyl Co A *(phb B)* และเอนไซม์ P (3HB) polymerase *(phb C)* [19] ซึ่งในแต่ละ pathway จะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างเช่น



รูปที่ 4 ลักษณะ *pha* CBA cluster ของ *Ralstonia eutropha* H16 [17]

กระบวนการสังเคราะห์ PHA ใน *Ralstonia eutropha (Alcaligenes eutrophus)*

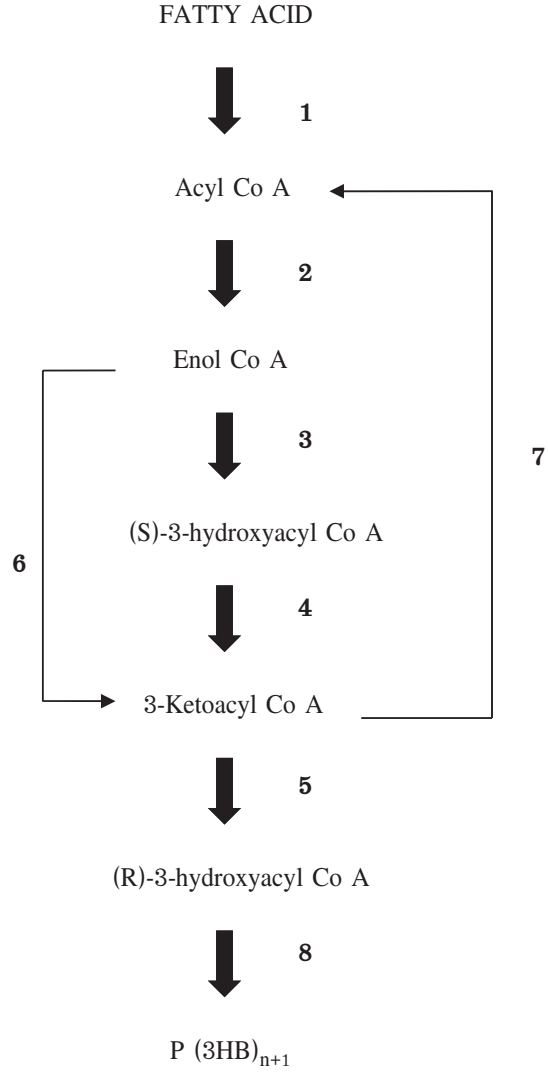
ใน *R. eutropha* กระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตจะนำไปสู่การเริ่มต้นการสังเคราะห์ PHA โดยปฏิกิริยาแรกจะมีการควบแน่น (condensation) ของ acetyl Coenzyme A (acetyl Co A) 2 โมเลกุลเพื่อเปลี่ยนไปเป็น acetoacetyl Co A โดยอาศัยเอนไซม์ β-Ketoacyl-Co A thiolase หรือเอนไซม์ β-ketothiolase ซึ่งจะถูกควบคุมโดยยีน *phb A* ขั้นตอนต่อมาจะเกิด stereospecific reduction ของ acetoacetyl Co A ไปเป็น R-3-hydroxybutyryl Co A โดยอาศัย NADPH dependent acetoacetyl Co A dehydrogenasse หรือ reductase ซึ่งถูกควบคุมโดยยีน *phb B* และในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดกระบวนการ polymerization หรือ incorporation ของ R-3-hydroxybutyryl Co A enantiomer เพื่อเปลี่ยนเป็น poly3-hydroxybutyrate โดยเอนไซม์ P(3HB) polymerase หรือ PHB synthase ซึ่งถูกควบคุมโดยยีน *phb C* [20] (รูปที่ 5)



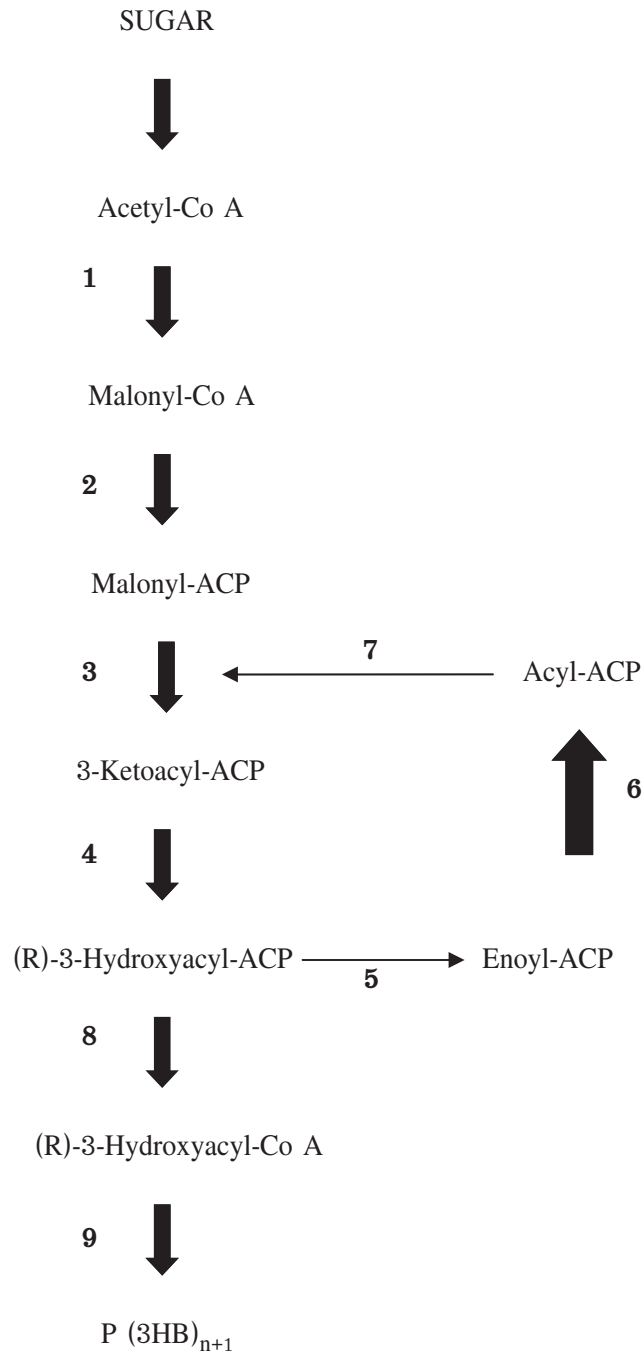
รูปที่ 5 กระบวนการสังเคราะห์ของ PHA จากคาร์โบไฮเดรตใน *R. eutropha* (1) (β-Ketothiolase, (2) NADPH dependent acetoacetyl Co A reductase, (3) P (3HB) polymerase or synthase [21]

กระบวนการสังเคราะห์ใน *Rhodopseudomonas rubrum*

Pathway ประเภทที่ 2 พบใน *Rhodopseudomonas rubrum* โดย β-oxidation ของกรดไขมัน (fatty acid) จะเป็นตัวนำไปสู่กระบวนการสังเคราะห์ PHA ซึ่งในปฏิกิริยาแรกจะคล้ายคลึงกับที่พบใน *R. eutropha* เพื่อให้ได้ acetoacetyl Co A เป็นผลลัพธ์ จากนั้นจะมีการ reduced เพื่อเปลี่ยนไปเป็น L-(+)- 3-hydroxybutyrl Co A โดยอาศัยเอนไซม์ NADH depemdent reductase และในขั้นตอนสุดท้ายจะมีการเปลี่ยน L-(+)-3-hydroxybutyrl Co A ไปเป็น D-(-)-3-hydroxybutyrl Co A โดยอาศัยเอนไซม์ enol Co A hydratase 2 โมเลกุล (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 กระบวนการสังเคราะห์ PHB ใน *R. rubrum* (1) Acyl Co A ligase, (2) Acyl Co A dehydrogenase, (3) Enol Co A hydratase, (4) 3-Hydroxyacyl Co A dehydrogenase, (5) 3-Ketoacyl Co A reductase, (6) R-enol Co A hydratase, (7) 3-Ketothiolase, (8) PHB synthase [21]



รูปที่ 7 การสังเคราะห์ PHA จาก "*de novo* fatty acid synthesis" ใน *Pseudomonas* group-II (1) Acetyl Co A Carboxylase, (2) ACP malonyl transferase, (3) 3-Ketoacyl ACP-Synthase, (4) 3-Ketoacyl ACP reductase, (5) 3-Hydroxyacyl ACP reductase, (6) Enol ACP reductase, (7) 3-Ketoacyl ACP synthase, (8) 3-Hydroxy acyl ACP Co A transferase, (9) PHB synthase [21]

กระบวนการสังเคราะห์ใน *Pseudomonas* group I

Pathway ประเภทที่ 3 มักพบใน *Pseudomonas* ซึ่ง rDNA มีความสัมพันธ์กับ group I เช่น *P. oleorans* ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดนี้จะมี fatty acid β-oxidation ของ alkanes, alkanes, alkanols หรือ alkanoic acids ซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์ medium side chain (MSC) PHAs

กระบวนการสังเคราะห์ใน *Pseudomonas* group II

ใน pathway ประเภทที่ 4 พบใน *Pseudomonas* ที่มีความสัมพันธ์ของ rDNA homology เกี่ยวข้องกับ group II กระบวนการสังเคราะห์ PHA เป็นผลมาจาก *de novo* fatty acid synthesis pathway ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ copolymers ของ medium side chain (MSC) 3-hydroxyalknoates (3HA) จาก acetyl Co A (รูปที่ 7)

การย่อยสลายของ PHA

ข้อดีของ PHA ประการหนึ่งก็คือความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพทั้งในสภาวะที่มีอากาศ (aerobic) และไร้อากาศ (anaerobic) PHA สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ที่สร้างโดยจุลินทรีย์

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ในขั้นต้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ซึ่งพบว่า PHA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ทั้งนี้จุดหลอมเหลวก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลาย เช่น จุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการย่อยสลายลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ลดลง [22] Tokiwa และ Suzuki [23] พบว่า เอนไซม์ไลเปส (lipase) ไม่สามารถไฮโดรไลซ์ P (3HB) ได้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง (178°C)

Nishida และคณะ [24] พบว่าโครงสร้างผลึกมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการมีโครงสร้างผลึกมากจะทำให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำลง ทั้งนี้ประชากรจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิล้วนแล้วแต่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพในสิ่งแวดล้อม

จุลินทรีย์ในแฟมิลี่ *Pseudonocardiaceae, Micromonosporaceae, Thermomonosporaceae, Streptosporangiaceae* และ *Streptomycetaceae* สามารถย่อย P(3PH) ซึ่งใช้เป็น prototype ในการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHA ในสิ่งแวดล้อมได้ [25] ซึ่งส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สามารถผลิต PHA ได้ ล้วนแล้วแต่สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ภายในเซลล์ได้ (intracellular) ขณะที่เกิดการย่อยสลายภายในเซลล์เกิดขึ้น เอนไซม์ PHA depolymerase ภายในเซลล์จะไปทำลายพันธะของ P(3HB) ให้กลายเป็น 3-hydroxybutyric acid โดยเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสจะไปออกซิไดส์ให้กลายเป็น acetylacetate และ β-ketothiolase เพื่อไปทำลายพันธะของ acetylacetate ให้กลายเป็น acetyl-Co A

การศึกษาเกี่ยวกับเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลาย PHA มักจะมุ่งเน้นไปที่การใช้เอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรส โดย PHA สามารถถูกย่อยได้โดยเอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรสประเภท intracellular (i-PHA) และ extracellular (e-PHA) ที่หลั่งออกมาโดยจุลินทรีย์ [26]

extracellular depolymerase ย่อย PHA ในสิ่งแวดล้อม [25] โดยแบคทีเรีย สาหร่าย และเห็ดรา ที่พบในธรรมชาติ โดยเข้าทำปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิว [27] ซึ่ง extracellular enzyme ที่หลั่งออกมาโดยจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ โดยได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายและซึมผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์สามารถนำสารดังกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ กระบวนการย่อยสลายโดยเอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรส จะทำให้ได้โอลิโกเมอร์เป็นผลผลิตจุลินทรีย์บางชนิดสามารถผลิต additional dimer hydrolase ซึ่งสามารถทำลายพันธะของโอลิโกเมอร์ไปเป็นมอนอเมอร์ [28] มีรายงานว่าเอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรส หรือเอสเทอร์เรส (esterase) จากจุลินทรีย์ เช่น *Alcaligenes faecalis, Pseudomonas lemoignei* และ *Penicillium simplicismum* สามารถย่อย PHA ที่พบในดิน ปุ๋ยหมัก activated silt น้ำทะเล และน้ำจืด ทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน เพื่อใช้ในการเจริญของเซลล์ต่อไป เมื่อเกิดการย่อยสลายโดยธรรมชาติจะได้เป็นปุ๋ยที่มีแหล่งคาร์บอนที่สมบูรณ์ ช่วยเพิ่มปริมาณน้ำและช่วยในการรักษาสารอาหารในดิน ซึ่งในสภาวะที่มีอากาศจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ขณะที่สภาวะที่ไร้อากาศจะได้น้ำและมีเทน [29]

เอมไซม์ β-ketothiolase มีบทบาทสำคัญทั้งในกระบวนการสังเคราะห์ และในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่มีอากาศ acetyl-Co A จะเข้าไปใน citric acid cycle และจะถูกออกซิไดส์ไปเป็น CO_2 [30] นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHA ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น pH สารอาหาร และวัสดุที่ประกอบเป็น PHA เช่น องค์ประกอบของมอนอเมอร์ โครงสร้างผลึก และพื้นผิว เป็นต้น [31]

การประยุกต์ใช้ PHA

นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร การแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรมอาหาร หรือใช้เป็นวัสดุในการสังเคราะห์สารเคมีบริสุทธิ์และการผลิตสารสี

1. ด้านการแพทย์ ถูกนำมาใช้ทางด้านการแพทย์และเภสัชในรูปแบบเช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ PLA เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) ผ้ากอซ (gauzes) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ด้านการเกษตร วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

3. ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก สารเคลือบภาชนะกระดาษ

4. ด้านเส้นใยและแผ่นผ้า เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน

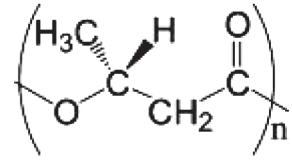
5. ด้านอิเลคโทรนิกส์และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี

พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (Polyhydroxybutyrate, PHB)

พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต เป็นพอลิเมอร์ประเภทแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง (รูปที่ 8) ในกลุ่มของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่สร้างมาจากแบคทีเรียเพื่อใช้เป็นแหล่งสะสมคาร์บอนและพลังงาน โดยอยู่ในรูป amorphous state และถูกย่อยสลายไปเป็นมอนอเมอร์ และ/หรือ โอลิโกเมอร์ โดย intracellular PHB depolymerase ที่ผลิตโดยแบคทีเรียที่สามารถผลิต PHB ได้ [32] เมื่อแบคทีเรียเหล่านี้ตาย PHB จะเปลี่ยนจาก amorphous ไปเป็น semi-crystalline state และจะถูกย่อยสลายโดย extracellular PHB depolymerase ที่หลั่งออกมาจากจุลินทรีย์ที่สามารถย่อย PHB ในธรรมชาติ เช่น ดิน น้ำจืดและน้ำทะเล เป็นต้น [33] พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตเป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้จากแหล่งวัตถุดิบที่มีราคาถูก นอกจากนี้ PHB ยังสามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ [34] ทั้งในสภาวะที่มีอากาศ และไร้อากาศ โดยปราศจากผลผลิตที่มีความเป็นพิษ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมีซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันได้ [35]

PHB เป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล เช่น น้ำหนักมวลโมเลกุล (molecular weight) จุดหลอมเหลว (melting temperature) จุดคล้ายแก้ว (glass-transition temperature) ความเปราะ (brittleness) ความแข็ง (stiffness) ทนแรงกระแทกได้สูง ทนการขีดข่วน มีอุณหภูมิในการหลอมสูง คล้ายคลึงกันกับ พอลิโพรพิลิน (polypropylene) ไม่ละลายน้ำ ทนต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต [17] จึงมีการนำไปใช้ในการผลิตกล่อง ของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย เป็นต้น

จุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถสังเคราะห์รวมถึงสะสม PHB ได้ในปริมาณสูง เช่น *Pseudomonas* sp., *Ralstonia* sp., *Aeromonas* sp., *Alcaligenes latus* [35], *Azotobacter* sp., *Bacillus* sp., *Hymenobacter aerophil, Sphingomonas pituitosa, Pectobacterium cypripedii* เป็นต้น [36, 37]

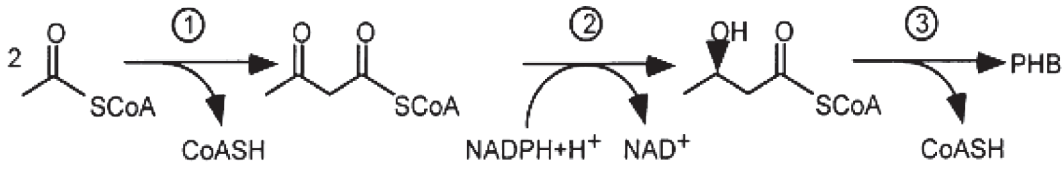


รูปที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของ PHB [38]

กระบวนการสังเคราะห์ PHB

การสังเคราะห์ PHB เกี่ยวข้องกับวัฏจักร TCA cycle เริ่มต้นจาก acetyl-Co A จะถูกเปลี่ยนไปเป็น acetoacetyl-Co A และ hydroxylbutyryl-Co A โดย β-ketothiolase และ acetoacetyl-Co A reductase ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชั่นของไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอนไซม์เอไปเป็น PHB โดยเอนไซม์ PHB synthetase การสังเคราะห์ PHB เกี่ยวข้องกับ pha CBA cluster [35]

(รูปที่ 9) ซึ่งโมเลกุลของ PHB จะแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ วิธีการสกัด ช่วงการเจริญของเซลล์ที่นำมาสกัด และสภาวะที่ใช้เลี้ยงเซลล์ เป็นต้น [39]



รูปที่ 9 กระบวนการสังเคราะห์ PHB ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน: (1) β-ketothiolase (2) Acetoacetyl-Co A reductase และ (3) PHB polymerase [11]

การย่อยสลายของ PHB

กลไกการย่อยสลาย PHB ภายในเซลล์ หรือปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรซ์เซชั่นเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ซึ่งถูกควบคุมโดยเอนไซม์ 3-hydroxybutyrate ซึ่งถูกยับยั้งโดย NADH ฉะนั้นหากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชั่นย่อมจะไม่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนส [40]

Chowdhury [41] เป็นคนแรกที่รายงานเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย PHB พบว่า *Bacillus, Pseudomonas* และ *Streptomyces* sp. สามารถย่อยสลาย PHB ได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ จุลินทรีย์ที่สามารถย่อย PHB ในสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่ประมาณ 0.5-9.6% ของโคโลนีทั้งหมด [42] ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้แยกได้จากแหล่งที่มีอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic temperature) และพบในแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงเพียงเล็กน้อย เชื้อรา *Aspergillus* sp. สามารถย่อยฟิล์ม PHB ได้ถึง 90% หลังจากการเลี้ยง 5 วัน ที่ 50°C จากจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้ 341 สายพันธุ์ พบว่ามีเพียง 31 สายพันธุ์ ที่สามารถย่อย PHB, PCL และ PES จากการจัดจำแนกพบว่าอยู่ในจีนัสของ *Actinomadura, Microbispora, Streptomyces, Thermoactinomyces* และ *Saccharomonospora* [43]

การประยุกต์ใช้ PHB

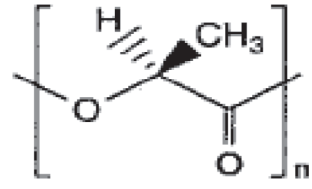
PHB สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้เป็นตัวห่อหุ้มยาที่ย่อยสลายได้ เพื่อค่อยๆ ปลดปล่อยยาที่บรรจุอยู่ภายในออกมาอย่างช้าๆ
2. ใช้เป็นสารกำจัดแมลง วัชพืช หรือใช้เป็นปุ๋ย
3. อุปกรณ์ที่ใช้เพียงครั้งเดียว ตัวอย่างเช่น มีดโกน เครื่องใช้ในครัวเรือน ผ้าอ้อม ขวดแชมพู กล่องบรรจุเครื่องสำอาง ถ้วยพลาสติก เป็นต้น
4. ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์ยากลุ่ม chiral compound
5. การประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)

พอลิแลกติกแอซิด เป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ซึ่งสังเคราะห์ได้จากกรดแลกติก (รูปที่ 10) ซึ่งผลิตได้จากฟาร์มและผลผลิตทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และธัญพืช โดยอาศัยกระบวนการหมักจนกระทั่งได้ผลผลิต คือ กรดแลกติกต่างจากพลาสติกที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์จากปิโตรเคมี

เป็นพอลิเมอร์ที่มีประโยชน์หลายอย่าง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (recycleable) และย่อยสลายในกระบวนการหมักได้ (compostable) ความโปร่งใสสูง น้ำหนักโมเลกุลสูง และทนต่อการละลายน้ำได้ดี สามารถกักเก็บกลิ่นและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ สามารถแพร่ผ่านได้ดี ทนต่อการกระแทกต่ำ มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิสไตรีน (polystyrene) ซึ่งใช้ในการผลิตถังพลาสติก ขวดพลาสติก ภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น

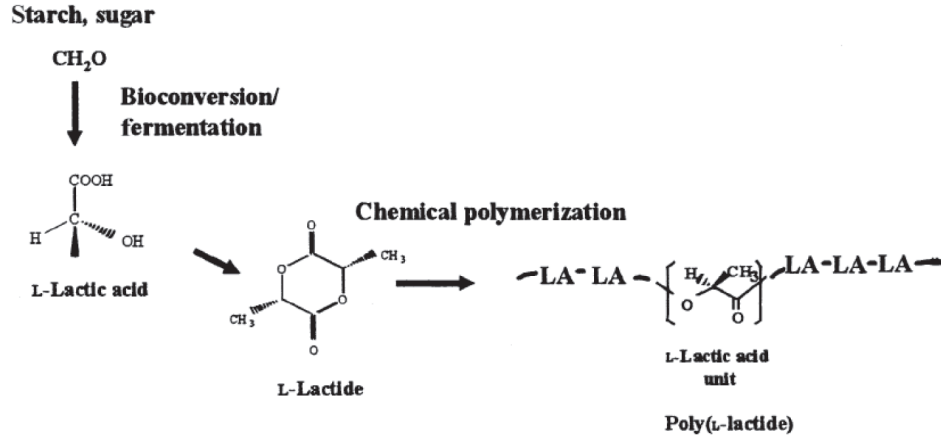


รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของ PLA [13]

กระบวนการผลิต PLA

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PLA คือ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น แป้งที่มาจากข้าวโพดและมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยในช่วงหลังได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต เช่น Pramkaew [44] ได้รายงานว่า แบคทีเรียในสกุล *Lactobacillus* สามารถใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับผลิตกรดดี-แลกติกที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงของกรดมากกว่าร้อยละ 99 กระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมักด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลกติก โดยอาศัยแบคทีเรียในตระกูล homolactic *Lactobacteriaceae* เช่น *Lactobacillus amylophilus, Lactobacillus amylophorus* และ *Lactobacillus bulgaricus* และ *Lactobacillus delbrueckii* ซึ่งจะมีการเปลี่ยนไพรูเวต (pyruvate) ให้กลายเป็นกรดแลกติก โดยอาศัยเอนไซม์ lactate dehydrogenase ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดแก๊สออกซิเจน จากนั้นนำกรดแลกติกที่ได้มาผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชั่น (รูปที่ 11) ซึ่ง PLA สามารถเตรียมได้จาก 2 ปฏิกิริยา คือ การควบแน่น (condensation polymerization) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดแลกติกและมีการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวได้เป็นพอลิแลกติกแอซิดและการเปิดวง (ring opening polymerization) ใช้มอนอเมอร์ ได้แก่ แลกไทด์ (lactide) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ที่เกิดจากการรวมตัวกันของกรดแลกติก 2 โมเลกุล จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวง

แล้วเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาวพอลิแลกไทด์ โดยมีสารประกอบดีบุก เช่น ทินออกโทเอต (tin(II) octoate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า “พอลิแลกไทด์” แต่ทั้งนี้ พอลิเมอร์ที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการก็คือสารชนิดเดียวกัน เมื่อสังเคราะห์ก็สามารถขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป PLA มี 3 stereoisomers คือ poly (L-lactide) (L-PLA), poly (D-PLA) และ poly (DL-lactide)(DL-PLA)



รูปที่ 11 กระบวนการสังเคราะห์ PLA จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนโดยกระบวนการร่วมกันระหว่างวิธีการทางชีวภาพ และกระบวนการ polymerization [17]

การย่อยสลายของ PLA

ในขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำและกรดแลกติก โดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งมักเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นสารประกอบและกรดแลกติกที่ได้จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยกระบวนการเมแทบอลิซึม และได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

พลาสติก PLA สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์หลายชนิด โดยทั่วไปแบคทีเรียที่สามารถย่อย PLA ที่อุณหภูมิสูง (60°C) เช่น *Brevibacillus* sp., *Bacillus smithii* และ *Geobacillus* sp. [45] *Amycolatopsis* สายพันธุ์ HT-32 เป็นแอคติโนมัยซีทชนิดแรกที่มีการรายงานว่าสามารถย่อย PLA ได้ [46] พบว่า *Amycolatosis* 15 สายพันธุ์ สามารถสร้างวงใส (clear zones) บน emulsified-PLA agar plates สามารถบ่งชี้ได้ว่าจุลินทรีย์ที่สามารถย่อย PLA ได้นั้นส่วนใหญ่จะพบในจีนัสนี้ [47] ซึ่งการศึกษาในภายหลังพบว่า แอคติโนมัยซีทในแฟมิลี่ *Pseudonocardiaceae* และจีนัสที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึง *Amycolatopsis, Lentzea, Kibdelosporangium, Streptoalloteichus* และ *Saccharothrix* สามารถผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลาย PLA ได้ที่ 30°C [48] ตัวอย่างเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลาย PLA ได้ เช่น esterase, protease และ lipase ที่ได้มาจากจุลินทรีย์ [49]

Tokiwa และ Jererat [50] คาดว่า *Pseudonocardiaceae* และจีนัสที่เกี่ยวข้องมีบทบาทสำคัญในการย่อย PLA ในการเลี้ยงเชื้อดังกล่าวมีการเติมเจลาตินลงไปด้วย ซึ่งมีผลทำให้เชื้อสามารถย่อยแผ่นฟิล์มได้ปริมาณที่มากกว่าการเลี้ยงเชื้อโดยไม่มีการเติมเจลาติน กล่าวได้ว่าเจลาตินมีประสิทธิภาพในการกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการย่อยสลาย PLA [51] เมื่อไม่นานมานี้ จากการศึกษาโดยใช้เทคโนโลยีทางด้านชีวโมเลกุลของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อย PLA แต่ไม่สามารถเพาะเลี้ยงได้ (unculturable) ในระบบนิเวศ โดย Sangwan และ Wu [52] รายงานว่าเชื้อราจีนัส *Paecilomyces* และแอคติโนมัยซีทจีนัส *Thermomonospora* และ *Thermopolyspora* เป็นประชากรหลักที่สามารถย่อย PLA ได้ นอกจากนี้ Konkit และคณะ [53] ได้ทำการศึกษาการย่อยสลาย PLA โดยใช้แอคติโนมัยซีทในจีนัส *Pseudonocardia* 20 สปีชีส์ โดยพบว่ามีเพียง *Pseudonocardia alni* AS4.1531^{T} สปีชีส์เดียวเท่านั้นที่สามารถย่อยสลาย PLA ได้ โดยสามารถย่อย PLA ได้ 70% ภายใน 8 วัน

การประยุกต์ใช้ PLA

เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์ได้หลายด้าน เช่น

1. ด้านการแพทย์ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) ได้ จึงถูกนำมาใช้ผลิตไหมเย็บแผล วัสดุปิดแผล และอุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก เป็นต้น
2. ด้านการเกษตร ผลิตเป็นภาชนะในการเพาะปลูก ยาฆ่าแมลงและวัชพืช เป็นต้น
3. ด้านบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก
4. ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชิ้นส่วนในโทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี เป็นต้น
5. ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน เป็นต้น

สรุป

ขยะพลาสติกเป็นปัญหาใหญ่ที่ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก ต้องใช้ระยะเวลานานนับร้อยปี งานวิจัยในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาจึงมุ่งเน้นในการที่จะพัฒนาพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกโดยอาศัยจุลินทรีย์ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ ที่ช่วยในด้านการออกแบบพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ รวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยผลิตภัณฑ์เหล่านี้เพิ่มมากขึ้น

พลาสติกชีวภาพมีคุณประโยชน์มากมายและสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรหรือผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีราคาถูก หากมีการส่งเสริมให้มีการผลิตและใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง นอกจากจะช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลาสติกสังเคราะห์แล้วยังเป็นแนวทางหนึ่งในการทำให้วัตถุดิบทางการเกษตรและผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมีมูลค่าทางเศรษฐกิจเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตพลาสติกชีวภาพก็ยังมีค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่สูงกว่าพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนในการผลิตมีราคาสูง ปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาแนวทางในการลดต้นทุนเพื่อรองรับความต้องการใช้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Shimao, M. 2001. Biodegradation of Plastics. *Current Opinion in Biotechnology* 12: 242-247.
2. Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwa, C. U., and Aiba, S. 2009. Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences* 10: 3722-3742.
3. Tokiwa, Y., and Calabia, B. P. 2006. Biodegradability and Biodegradation of Poly (Lactide). *Journal of Applied Microbiology* 72: 244-251.
4. Premraj, R., and Mukesh, D. 2005. Biodegradation of Polymers. *Indian Journal of Biotechnology* 4: 186-193.
5. Bernd, H. A. R., and Alexander, S. 1999. Biochemical and Genetic Analysis of PHA Synthases and Other Proteins Required for PHA Synthesis. *International Journal of Biological Macromolecules* 25: 3-19.
6. Lemoigne, M. 1926. Produit de DéShydratation et de Polymerization de l'acide β-Oxybutyrique. *Bulletin de la Society Chimique de France* 8: 770-782.
7. Chakravarty, P., Mhaisalkar, V., and Chakrabarti, T. 2010. Study on Polyhydroxyalkanote (PHA) Production in Pilot Scale Continuous Mode Waste Water Treatment System. *Bioresource Technology* 101: 2896-2899.
8. Jantima, T., Tsuyoshi, I., Alissara, R., Xuehang, C., Emma, Y., Jiruthakorn, T., Nathaporn, P., Junki, Y., Anan, J., Takaya, H., and Koichi, Y. 2012. Characterization of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Biosynthesis by Isolated *Novosphingobium* sp. THA_AIK7 Using Crude Glycerol. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 39: 749-758.
9. Boyandin, N. A., Prudnikova, V. S., Filipenko, L. M., and Khrapov, A. E. 2012. Biodegradation of Polyhydroxyalkanoates by Soil Microbial Communities of Different Structures and Detection of PHA Degrading Microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology* 48(1): 28-36.
10. Vert, M. 2005. Aliphatic Polyester: Great Degradable Polymers That Cannot Do Everything. *Biomacromolecules* 6: 538-546.
11. Zinn, M., Witholt, B., and Egli, T. 2001.Occurrence, Synthesis and Medical Application of Bacterial Polyhydroxyalkanoate. *Advanced Drug Delivery Reviews* 53: 5-21.
12. Somyoonsap, P. 2010. Bioplastics: Innovation of Green Products. *Srinakharinwirot Science Journal* 26(2): 77-195.
13. Pranamuda, H., and Tokiwa, Y. 1999. Degradation of Poly (L-lactide) by Strains Belonging to Genus *Amycolatopsis. Biotechnology Letters* 21: 901-905.
14. Lee, S.Y. 1996. Plastic Bacteria? Progress and Prospects for Poly-Hydroxyalkanoate Production in Bacteria. *Trends in Biotechnology* 14: 431-438.

15. สิริลักษณ์ บัวทอง. 2551. การศึกษาศักยภาพในการผลิตสารโพลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
16. ศิริวรรณ ระเด่นอาหมัด. 2552. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-ไฮดรอกซีวาเลอเรต จากน้ำเสียโรงงานอาหารทะเลโดยใช้แบคทีเรียที่ได้แยกได้จากระบบเอสบีอาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
17. Luengo, J. M., García, B., Sandoval, A., Naharro, G., and Olivera, E. R. 2003. Bioplastics from Microorganisms. *Current Opinion in Microbiology* 6: 251-260.
18. Steinbuchel, A. 1991. Polyhydroxyalkanoaic Acids. In: Byrom, D., Editor. Biomaterials: Novel Materials from Biological Sources. New York. Stockton Press. p. 124-213.
19. Madison, L. L., and Huisman, G. W. 1999. Metabolic Engineering of Poly (3-Hydroxyalkanoates): from DNA to Plastic. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63: 21-53.
20. Cevallos, M. A., Encarnacion, S., Leija, A., Mora, Y., and Mora, J. 1996. Genetic and Physiological Characterization of a *Rhizobium etli* Mutant Strain Unable to Synthesize Poly (β-Hydroxybutyrate). *Journal of Bacteriology* 178: 1646-1654.
21. Naik, S., Venu Gopal, S. K., and Somal, P. 2008. Bioproduction of Polyhydroxyalkanoate from Bacteria: A Metabolic Approach. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 24: 2307-2314.
22. Philip, S., Keshavarz, T., and Roy, I. 2007. Polyhydroxyalkanoates: Biodegradable Polymers with a Range of Applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 82: 233-247.
23. Tokiwa, Y., and Suzuki, T. 1977. Hydrolysis of Polyesters by Lipases. *Nature* 270: 76-78.
24. Nishida, H., and Tokiwa, Y. 1992. Distribution of Poly (β-Hydroxybutyrate) and Poly (ε-Caprolactone) Degrading Microorganisms and Microbial Degradation Behaviour on Plastic Surfaces. *Polymeric Material: Science Engineering* 67: 137-138.
25. Tokiwa, Y., and Calabia, B. P. 2004. Degradation of Microbial Polyesters. *Biotechnology Letters* 26: 1181-1189.
26. Alejandra, R. C., Margarita, C. M., and María, S. M. C. 2012. Enzymatic Degradation of Poly (3-Hydroxybutyrate-Co-4-Hydroxybutyrate) by Commercial Lipases. *Polymer Degradation and Stability* 97: 597-604.
27. Holmes, P. A. 1985. Application of PHB: A Microbially Produced Biodegradable Thermoplastic. *Physics in Technology* 16: 32-36.
28. Tanaka, Y., Saito, T., Fukui, T., Tanio, T., and Tomita, K. 1981. Purification and Properties of D (-)-3-Hydroxybutyrate-Dimer Hydrolase from *Zoogloea ramigera* I-16-M. *European Journal of Biochemistry* 118: 177-182.

29. Urementa, J., Jordi, M., and Guerrero, R. 1995. Biodegradation of Poly-β-Hydroxyalkanoates in a Lake Sediment Sample Increases Bacterial Sulfate Reduction. *Applied and Environmental Microbiology* 61: 2046-2048.
30. Jendrossek, D. 2001. Microbial Degradation of Biopolyesters. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 71: 294-325.
31. Abe, H., and Doi, Y. 2002. Molecular and Material Design of Biodegradable Poly(Hydroxyalkanoates). In: Doi, Y., and Steinbuchel, A., Editors. Biopolymers, Polyesters II. Weinheim. Wiley-VCH. p. 105-132.
32. Tomohiro, H., Koichi, Y., Masafumi, S., Jun, N., Liu-Tzea, T., Kumar, S., Hideki, A., and Mizuo, M. 2012. Display of Functionally Active PHB Depolymerase on *Escherichia coli* Cell Surface. *Macromolecular Bioscience* 12: 218-224.
33. Jendrossek, D., and Handrick, R. 2002. Microbial Degradation of Polyhydroxyalkanoates. *Annual Review of Microbiology* 56: 403-432.
34. Khanna, S., and Srivastana, A. K. 2005. Statistical Media Optimization Studies for Growth and PHB Production by *Ralstonia eutropha. Process Biochemistry* 40: 2173-2182.
35. Reddy, C. S. K., Ghai, R., Rashmi and Kalia, V. C. 2003. Polyhydroxyalkanoates: An Overview. *Bioresource Technology* 87: 137-146.
36. Suriyamongkol, P., Weselake, R., Narine, S., Moloney, M., and Shah, S. 2007. Biotechnological Approaches for the Production of Polyhydroxyalkanoates in Microorganisms and Plants-A Review. *Biotechnology Advances* 25: 148-175.
37. Volova, T. G., Kalacheva, G. S., Kozhevnikov, I. V., and Steinbuchel, A. 2007. Biosynthesis of Multicomponent Polyhydroxyalkanoates by *Wautersia eutropha. Microbiology* 76(6): 704-711.
38. Lenz, R. W., and Marchessault, R. H. 2004. Bacterial Polyester: Biosynthesis, Biodegradable Plastic and Biotechnology. *Biomacromolecules* 6: 1-8.
39. Anderson, A. J., and Dawes, E. A. 1990. Occurrence, Metabolism, Metabolic Role, and Industrial Uses of Bacterial Polyhydroxyalkanoates. *Microbiological Reviews* 54: 450-472.
40. Byrom, D. 1987. Polymer Synthesis by Microorganisms: Technology and Economics. *Trends in Biotechnology* 5: 246-250.
41. Chowdhury, A. A. 1963. Poly-β-Hydroxybuttersaure Abbauende Bakterien und Exo-Enzyme. *Archives of Microbiology* 47: 167-200.
42. Suyama, T., Tokiwa, Y., Oichanpagdee, P., Kanagawa, T., and Kamagata, Y. 1998. Phylogenetic Affiliation of Soil Bacteria That Degrade Aliphatic Polyesters Available Commercially as Biodegradable Plastics. *Applied and Environmental Microbiology* 64: 5008-5011.
43. Tseng, M., Hoang, K. C., Yang, M. K., Yang, S. F., and Chu, W. S. 2007. Polyester-Degrading Thermophilic Actinomycetes Isolated from Different Environment in Taiwan. *Biodegradation* 18: 579-583.

44. Pramkaew, S. 2010. Selection of Lactic Acid Bacteria for D-Lactic Production from Cassava Starch. M. Sc. Thesis. Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. Suranaree University of Technology.
45. Tomita, K., Nakajima, T., Kikuchi, Y., and Miwa, N. 2004. Degradation of Poly (L-Lactic Acid) by a Newly Isolated Thermophile. *Polymer Degradation and Stability* 84: 433-438.
46. Pranamuda, H., Tokiwa, Y., and Tanaka, H. 1997. Polylactide Degradation by an *Amycolatopsis* sp. *Applied and Environmental Microbiology* 63: 1637-1640.
47. Chomchoei, A., Pathom-aree, W., Yokota, T., Kanonguch C., and Lumyong, S. 2011. *Amycolatopsis thailandensis* sp. nov., A Poly (L-Lactic Acid)-Degrading Actinomycete, Isolated from Soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 61: 839-834.
48. Jarerat, A., and Tokiwa, Y. 2003. Poly (L-Lactide) Degradation by *Kibdelosporangium aridum. Biotechnology Letters* 25: 2035-2038.
49. Nampoothiri, M. K., Nair, R. N., and John, P. R. 2010. An Overview of the Recent Developments in Polylactide (PLA) Research. *Bioresource Technology* 101: 8493-8501.
50. Tokiwa, Y., and Jarerat, A. 2004. Biodegradation of Poly (L-Lactide). *Biotechnology Letters* 26: 771-777.
51. Li, F., Wang, S., Liu. W., and Chen, G. 2008. Purification and Characterization of Poly (L-Lactide)-Degrading Enzyme from *Amycolatopsis orientalis* ssp. *orentalis. FEMS Microbiology Letters* 282:52-58.
52. Sangwan, P., and Wu, D. Y. 2008. New Insight into Polylactide Biodegradation from Molecular Ecological Techniques. *Macromolecular Bioscience* 8: 304-315.
53. Konkit, M., Jarerat A., Kanongnuch, C., Lumyong, S., and Pathom-aree, W. 2012. Poly (Lactide) Degradation by *Pseudonocardia alni* AS4.1531^{T}. *Chiang Mai Journal of Science* 39(1): 128-132.
54. Sukkhum, S., Tokuyama, S., Tamura, T., and Kitpreechavanich, V. 2009. A Novel Poly (L-Lactide) Degrading Actinomycetes Isolated from Thai Forest Soil, Phylogenic Relationship and the Enzyme Characterization. *Journal of General and Applied Microbiology* 55: 459-467.

ได้รับบทความวันที่ 3 กันยายน 2555
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 9 พฤศจิกายน 2555