พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต: วัสดุชีวภาพทางเลือกทดแทนพลาสติก

ฉันท์ชนก ดวงศรี และวุฒินันท์ รักษาจิตร์*

สาขาวิชาเทคโนโลยีสุขภาพสัตว์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

*E-mail: cvtwnr@ku.ac.th

รับบทความ: 6 กันยายน 2559 ยอมรับตีพิมพ์: 11 พฤศจิกายน 2559

บทคัดย่อ

พลาสติกปิโตรเคมีที่ไม่ย่อยสลายจะสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเพิ่มขึ้นตามมา พลาสติกที่ย่อยสลายได้ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) จึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกมาทดแทนและลดการใช้พลาสติกปิโตรเคมี PHAs เป็นพอลิเอสเทอร์สายตรงที่ผลิตขึ้นจากจุลินทรีย์หลากหลายสายพันธุ์ ความยืดหยุ่นและความเหนียวขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ PHAs แต่ละชนิด PHAs สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ PHAs ยังได้รับการพิสูจน์ว่ามีสมบัติที่เข้ากันได้ทางชีวภาพโดยไม่มีความเป็นพิษในเซลล์สัตว์ PHAs สังเคราะห์จากแอคติวิตีของกลุ่มเอนไซม์ซึ่งถูกแปลรหัสจากกลุ่มยีน *phaABC* โดย PHA synthase เป็นเอนไซม์หลักในวิถีชีวสังเคราะห์ PHAs ดังนั้นการคัดกรองจุลินทรีย์หรือสร้างจุลินทรีย์สายพันธุ์ใหม่ที่มีศักยภาพในการผลิตและสะสม PHAs ภายในเซลล์สูง จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาผลิตวัสดุทางเลือกเชิงพาณิชย์ในอนาคต บทความนี้กล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต สมบัติ ประโยชน์ และการประยุกต์ใช้

คำสำคัญ: พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต พลาสติกชีวภาพ สมบัติเข้ากันได้ทางชีวภาพ วิถีชีวสังเคราะห์ PHAs

Polyhydroxyalkanoates: an Alternative Biomaterial for Renewable Plastic

Chanchanok Duangsri and Wuttinun Raksajit*

Program of Animal Health Technology, Faculty of Veterinary Technology,
Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*E-mail: cvtwnr@ku.ac.th

Received: 6 September 2016 Accepted: 11 November 2016

Abstract

Currently, the non-degradable petrochemical plastics accumulated in the environment are concerned problem. Biodegradable plastics, such as polyhydroxyalkanoates (PHAs), have been developed for use as alternative materials to replace and reduce the using of petro-chemicals plastics. PHAs are linear polyester produced by different microbial strains. The flexibility and toughness of PHAs depends on their formulations. PHAs are environmental biodegradable polymers. In addition, PHAs have been proved biocompatible, which means they have no toxic effects on animal cells. PHAs are synthesized from the activities of enzymes, which are encoded from the *phaABC* genes. PHA synthases are the key enzymes of PHAs biosynthesis. Therefore, screening of microorganisms or microbial strains that have the potential to produce PHAs and accumulate within cells are significant for alternative material development produced commercially in the future. This short article attempts to provide back-ground on the polyhydroxyalkanoates, properties, versatility and their applications.

Keywords: Polyhydroxyalkanoates, Bioplastic, Biocompatibility, PHAs biosynthesis pathway

บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีนำมาใช้เป็นวัสดุภัณฑ์ทดแทนบรรจุภัณฑ์จำพวกกระดาษ ไม้ โลหะ ยาง และแก้วมากขึ้น โดยเฉพาะวัสดุภัณฑ์ทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และอุตสาห-กรรม ด้วยสมบัติของพลาสติกที่มีความแข็งแรง คงทนต่อสารเคมี ความยืดหยุ่นสูง และอายุการใช้งานที่ยาวนาน อย่างไรก็ตาม พลาสติกสังเคราะห์ดังกล่าวย่อยสลายได้ยากมากและต้องใช้ระยะเวลานาน อีกทั้งการเผาทำลายพลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจก (green house gas) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน (global warming) ตามมา ดังนั้นการพัฒนาการผลิตพลาสติกชีว-ภาพที่สามารถย่อยสลายตัวโดยวิธีทางธรรมชาติได้ (biodegradable plastic) จึงเป็นนวัตกรรมที่

สร้างมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่นำมาทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) เป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นได้ และมีสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งพลาสติกชีวภาพได้ 2 ประเภท ตามความหมายของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป (European Bioplastics, EuBP) ได้แก่

1. พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ (bio-based plastics) คือ พลาสติกที่ผลิตมาจากแหล่งวัตถุดิบชีวมวล (biomass) โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล แป้ง เซลลูโลส หรือพืชน้ำมัน ไม่รวมถึงที่ผลิตจาก วัตถุดิบปิโตรเคมี โดยพืชที่นำมาใช้ผลิต เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ละหุ่ง อ้อย พลาสติกกลุ่มนี้มีสมบัติทั้งสลายตัวได้ทางชีวภาพ (biodegradable) หรือไม่สลายตัวได้ทางชีวภาพ (non-biodegradable) เช่น พลาสติกกลุ่มพอลิเอทีลีนจากเอทานอลที่ผลิตมาจากอ้อย พลาสติกกลุ่มไนลอนที่ผลิตมาจากน้ำมันเมล็ดละหุ่ง

2. พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ (bio-compostable plastics) คือ พลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดทั้งจากวัตถุดิบชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (bio-based หรือ renewable) หรือวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมี (petro-based) และสามารถสลายตัวทางชีวภาพได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate, PHAs) พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (polybutylene Succinate, PBS)

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs)

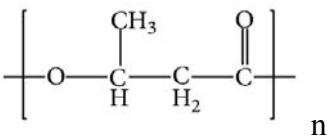
PHAs เป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ สังเคราะห์ขึ้นและสะสมภายในเซลล์แบคทีเรียและไซยาโนแบคทีเรียภายใต้ภาวะปกติ (normal condition) ภาวะเครียด (stress condition) หรือภายใต้ภาวะการเจริญเติบโตที่ไม่สมดุล (unbalance growth condition) (Drosg et al., 2015) เพื่อควบคุมระดับ acetyl CoA ภายในเซลล์ที่มากเกินพอและลดปริมาณ $NADH+H^+$ (Bhati et al., 2010) โดยเฉพาะในภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ เช่น กลูโคส กรดอะซิติก (acetic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) หรือมีแหล่งอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต เช่น ขาดแหล่งอาหารฟอสเฟต ขาดแหล่งอาหารไนเตรต (Kaewbai-ngam et al., 2016) ในภาวะที่ไม่สมดุลดังกล่าว เซลล์จะสังเคราะห์และสะสม PHAs เพิ่มขึ้น (ตาราง 1) แบคทีเรียและไซยาโนแบคทีเรียสายพันธุ์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต PHAs ในระดับอุตสาหกรรม เช่น *Azotobacter vinelandii* (Díaz-Barrera et al., 2016) *Ralstonia eutropha* (Riedel et al., 2015; Kozhevnikov et al., 2010)

PHAs ประกอบขึ้นด้วยมอโนเมอร์สองกลุ่มที่แตกต่างกัน คือ พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอโนเมอร์ชนิดเดียวกันเรียกว่า โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เช่น พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (poly-3-hydroxybutyrate:P3HB) (ภาพที่ 1) และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอโนเมอร์หลายชนิดเรียกว่า โคพอลิเมอร์ (copolymer) เช่น โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตกับพอลิไฮดรอกซีวาเลเรต (poly-3-hydroxybutyrate-copolymer-3-hydroxyvalerate, P3HB-co-3HV) โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตกับพอลิไฮดรอกเด-

ตาราง 1 ปริมาณและชนิดของ PHAs ที่สะสมในแบคทีเรียและไซยาโนแบคทีเรียสายพันธุ์ต่าง ๆ

จุลินทรีย์ (microorganisms)	แหล่งคาร์บอน (carbon source)	ปริมาณ PHA (%cell dried weight, %CDW)	ชนิดของ PHA (monomer or polymer)
Anabaena cylindrica	CO_2	< 0.005	P3HB
	acetate	2.0	P3HB
Azohydromonas australica	malt waste	70.1	P3HB
Azotobacter beijerinckii	glucose	24.8	P3HB
Bacillus megaterium	citric acid, glucose	9.0 – 50.0	P3HB
Burkholderia sp. USM	lauric acid, myristic acid, oleic acid, palmitic acid, stearic acid	1.0 – 69.0	P3HB
Corynebacterium glutamicum	acetic acid, citric acid, glucose, glycerol	4.0 – 32.0	P3HB
C. hydrocarboxydans	acetate, glucose	8.0 – 21.0	3HB, 3HV
Halomonas boliviensis LC1	hydrolyzed starch	56.0	P3HB
Methylobacterium extorquens	methanol	40.0 – 46.0	P3HB
Microlunatus phosphovorus	glucose	20.0 – 30.0	3HB, 3HV
Nocardia lucida	acetate, succinate	7.0 – 20.0	3HB, 3HV
Novosphingobium nitrogenifigens Y88	glucose	81.0	P3HB
Oscillatoria limosa	acetate	6.0	P3HB
Paracoccus denitrificans	*n*-pentanol	22.0 – 24.0	P3HV
P. marginalis	1,3-butanediol, octanoate	11.9 – 31.4	scl-mcl-PHAs, mcl-PHAs
P. oleovorans	octanoic acid	–	mcl-PHAs
P. putida KT2440	nonanoic acid	26.8 – 75.4	mcl-PHAs
	4-hydroxyhexanoic acid	25.3 – 29.8	mcl-PHAs
	glucose	32.1	mcl-PHAs
Spirulina platensis	CO_2	6.0	P3HB
Synechococcus MA19	CO_2	55 – 62	P3HB
Thermus thermophilus HB8	whey	35.6	scl-mcl-PHAs

ที่มา: ดัดแปลงจาก Drosg et al., 2015; Tan et al., 2014; Verlinden et al., 2007



ภาพที่ 1 โครงสร้างของพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (P3HB)
ที่มา: ดัดแปลงจาก Daranarong et.al., 2014

คาโนเอต (poly-3-hydroxybutyrate-copolymer-3-hydroxydecanoate:P3HB-co-3HD) (Anjum et al., 2016) ซึ่งมีสมบัติคงทนแข็งแรงมากขึ้นกว่าโฮโมพอลิเมอร์ อีกทั้งสามารถแบ่งโครงสร้างของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตตามจำนวนของมอโน-

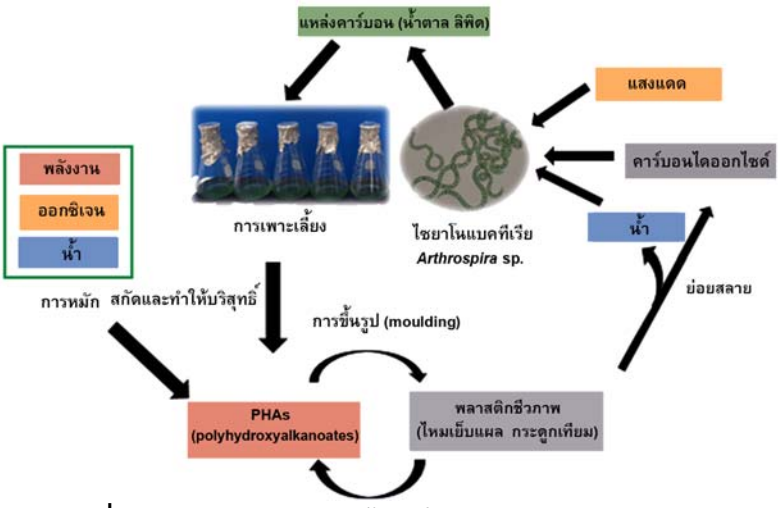
เมอร์ ได้แก่ short-chain-length PHAs (scl-PHAs) medium-chain-length PHAs (mcl-PHAs) และ long-chain-length PHAs (lcl-PHAs) ซึ่งประกอบด้วยมอโนเมอร์ 3 – 5 หน่วยคาร์บอน มอโนเมอร์ 6 – 14 หน่วยคาร์บอน และมอโนเมอร์มากกว่า 14 หน่วยคาร์บอน ตามลำดับ สมบัติทั่วไปของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต คือ ไม่ละลายน้ำ มีความต้านทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต มีความยืดหยุ่นและยืดตัว มีสมบัติพื้นฐานของวัสดุอสัณฐาน (ตาราง 2) สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและมีสมบัติเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเซลล์สัตว์ (biocompatibility) จึงไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง ในปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้พลาสติก PHAs ในการผลิตอุปกรณ์ทางด้านการพยาบาลสัตว์ เช่น อุปกรณ์ในการเย็บแผล การผลิตไหมเทียม อุปกรณ์ในการศัลยกรรมกระดูก กระดูกเทียม วัสดุค้ำจุนสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (tissue scaffolds) อุปกรณ์ในการผ่าตัด ระบบนำส่งยา (drug delivery system) (Gumel et al., 2013) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ PHAs เป็นสารตั้งต้นของโมเลกุลที่ป้องกันโรคไขข้อ (anti-rheumatic) ด้านการเกษตรสามารถนำ PHAs มาใช้ผลิตเส้นใยและพลาสติกสายเบ็ดใช้ในอุตสาหกรรมประมง ด้านอุตสาหกรรมนำมาเป็นสารเติมแต่งเชื้อเพลิงชีวภาพ สารเคลือบกระดาษ

อย่างไรก็ตาม สมบัติของพลาสติก PHAs ยังมีข้อด้อยหลายประการ เช่น มีความเปราะบางของตัวพลาสติก ต้นทุนการผลิตสูงกว่าพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากต้องผ่านหลายขั้นตอนเป็นสาเหตุทำให้ต้นทุนในการผลิตจากจุลินทรีย์มีต้นทุนสูง ดังนั้นการคัดกรองจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพชนิดใหม่หรือการสร้างจุลินทรีย์สายพันธุ์ใหม่ (engineered microorganisms) ที่มีความสามารถในการผลิตและสะสมพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตในปริมาณสูง การปรับปรุงกระบวนการเลี้ยง ระยะเวลา การลดต้นทุนในการเลี้ยง รวมทั้งการพัฒนาเทคนิคใหม่ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ในช่วง 200,000 – 300,000 ดาลตัน จึงเป็นแนวทางในการสร้างนวัตกรรมที่นำมาทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์และเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้

การสังเคราะห์ PHAs จากไซยาโนแบคทีเรีย

ไซยาโนแบคทีเรียเป็นโพรแคริโอตที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมที่อาศัยได้ดี เช่น แหล่งน้ำจืด แหล่งน้ำกร่อย ทะเลสาบ รวมทั้งน้ำเสีย ไซยาโนแบคทีเรียสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้โดยตรงในรูปของน้ำตาลกลูโคสและเมแทบอไลต์อื่น ๆ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ในภาวะเครียดและในภาวะมีออกซิเจนจำกัด ไซยาโนแบคทีเรียสามารถสังเคราะห์ PHAs ได้สูง โดยสะสม PHAs ประเภท Poly-3-hydroxybutylate:P(3HB) ได้เป็นหลักซึ่งสามารถสลายตัวทางชีวภาพได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Omar et al., 2016) (ภาพที่ 2)

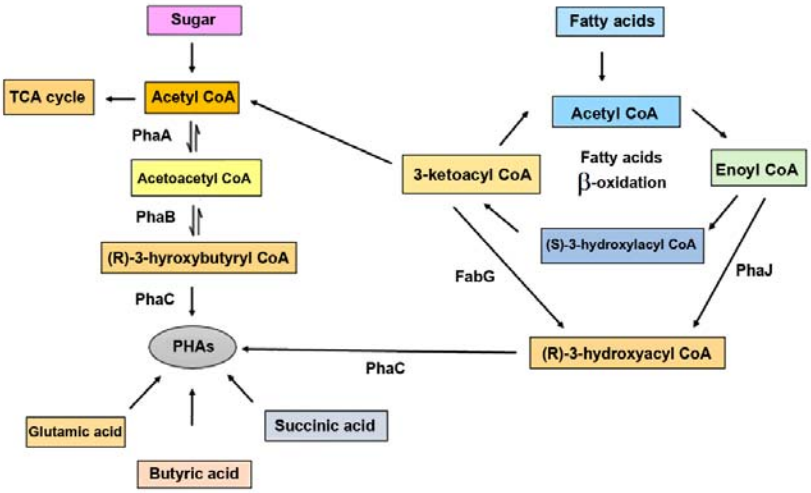
การสังเคราะห์และสะสม PHAs หรือ P(3HB) พบได้ในไซยาโนแบคทีเรียหลากหลายสายพันธุ์ซึ่งวิถีในการสังเคราะห์ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสายพันธุ์ *Synechocystis* sp. PCC6803 และ *Arthrospira* sp. PCC8005 (Janssen et al., 2010) เป็นสายพันธุ์ต้นแบบในการศึกษากระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์เนื่องจากมีข้อมูลจีโนมที่สมบูรณ์และมีระบบส่งถ่ายยีนที่มีประสิทธิภาพ (natural transformation) จากการศึกษาระดับยีนของไซยาโนแบคทีเรีย พบว่า พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตสังเคราะห์จากกลุ่มยีน *phaABC*



ภาพที่ 2 วัฏจักรของ PHAs กับไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira* sp.

ที่มา: ดัดแปลงจาก Verlindenet al., 2007

(*phaA*, *phaB*, *phaC*) (Hondo et al., 2015) โดยยีน *phaA* แปลรหัสให้โปรตีน β-ketothiolase (PhaA) ทำหน้าที่เปลี่ยน acetyl CoA ไปเป็น acetoacetyl CoA (Taroncher-Oldenburg et al., 2000) ยีน *phaB* แปลรหัสให้โปรตีน acetoacetyl CoA reductase (PhaB) ทำหน้าที่เปลี่ยน acetoacetyl CoA ไปเป็น 3-hydroxylbutyryl CoA และยีน *phaC* แปลรหัสให้โปรตีน PHA synthase (PhaC) หรือ PHA polymerase (Sudesh et al., 2002) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยน 3-hydroxylbutyryl CoAไปเป็น poly-3-hydroxylbutyrate หรือ P(3HB) (ภาพที่ 3) กระบวนการสังเคราะห์ PHAs ยังมีความเชื่อมโยงกับ



ภาพที่ 3 วิถีเมแทบอลิซึมในการสังเคราะห์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเคต (PHAs) ในจุลินทรีย์

ที่มา: ดัดแปลงจาก Verlindenet al., 2007

เมแทบอลิซึมและกลไกระดับเซลล์ เช่น วิถีไกลโคลิซิส วัฏจักรเครบส์ วัฏจักรการสลายกรดไขมัน วัฏจักรการสลายกรดอะมิโน วัฏจักรแคลวิน (López et al., 2015) ในการศึกษาก่อนหน้า พบ ว่า PHA synthase เป็นเอนไซม์หลักที่ควบคุมการสังเคราะห์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตภายในเซลล์โดยเมื่อเอนไซม์ PHA synthase มีแอกทิวิทีมากขึ้น จะส่งผลให้เซลล์เพิ่มการสะสม PHA ภายในเซลล์ (Kozhevnikov et al., 2010) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า การควบคุมการแสดงออกของยีน *phaC* ในไซยาโนแบคทีเรีย *Ralstonia eutropha* H16 สามารถเพิ่มการสังเคราะห์และสะสม PHA ในสายพันธุ์กลายเช่นกัน (Klask et al., 2015) นอกจากนี้ยังพบว่าการสังเคราะห์และสะสม PHA ใน *Synechocystis* sp. PCC6803 ไม่ได้เกิดจากแอกทิวิทีของเอนไซม์ PHA synthase เพียงอย่าง เดียว แต่เกิดจากปฏิกิริยาอื่นหรือเมแทบอลิซึมอื่นในวิถีการสังเคราะห์ PHA ร่วมด้วย (Numata et al., 2015)

การสะสม PHAs ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการทำงานของยีนอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับภาวะในการเพาะเลี้ยงด้วย ซึ่งปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการสะสม PHAs เช่น อาหารเลี้ยงที่มีปริมาณคาร์บอนเกินพอ อาหารเลี้ยงที่ขาดแคลนหรือถูกจำกัดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ *Spirulina* ที่เลี้ยงในภาวะ photoautotrophic มีอัตราการผลิตและสะสม P(3HB) ต่ำเพียง 0.3%CDW แต่เมื่อเปลี่ยนไปเลี้ยงในภาวะ mixotrophic ที่เติมแอซีเทต (acetate) ลงในอาหารเลี้ยง พบว่า อัตราการผลิตและสะสม P(3HB) สูงถึง 3%CDW ซึ่งเพิ่มขึ้น 10 เท่า (Vincenzini et al., 1990) *Spirulina* LEB18 สามารถสังเคราะห์และสะสม poly(3-hydroxybutyrate) ภายในเซลล์และเมื่อสกัด P(3HB) ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์จะได้ P(3HB) ที่สามารถขึ้นรูปเป็นนาโนไฟเบอร์ได้ ในการทดลองนี้สามารถขึ้นรูปนาโนไฟเบอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 199 – 816 นาโนเมตรด้วยวิธี electrospining ได้ (de Morais et al., 2015) *S. platensis* UMACC159 สามารถสังเคราะห์ P(3HB) ได้เมื่อเลี้ยงในภาวะขาดแหล่งไนโตรเจน โดยอัตราการสังเคราะห์ P(3HB) มากที่สุดถึง 10%CDW ภายใต้ภาวะ mixotrophic (Jau et al., 2005) *S. platensis* สามารถสะสม PHAs ได้ 3.5%CDW ภายใต้ภาวะขาดแหล่งฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม การสะสม PHAs น้อยกว่า 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการสะสมของ *Nostoc muscorum* (Panda et al., 2005) *S. sulsalsa* ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยง ASNIII ที่เพิ่มเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% ลงไป เพิ่มการผลิตและสะสมพอลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตมากขึ้น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบเซลล์ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยง ASNIII ที่ไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Shrivastav et al., 2010)

บทสรุป

ในการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ เช่น PHAs จากจุลินทรีย์นั้น การคัดกรองจุลินทรีย์หรือสร้างจุลินทรีย์สายพันธุ์ใหม่ที่มีศักยภาพมีความสำคัญ โดยสายพันธุ์ที่เหมาะสมควรสะสม PHAs ภายในเซลล์ในปริมาณมากและสามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารเพาะเลี้ยงที่มีราคาถูก นอกจากสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพ กระบวนการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสม สามารถส่งเสริมการผลิต PHAs ในปริมาณมาก และลดต้นทุนในการผลิตเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาในการที่จะพัฒนาการผลิตวัสดุทางเลือกชีวภาพนี้เพื่อนำมาทดแทนการใช้พลาสติก

สังเคราะห์เชิงพาณิชย์ในอนาคต โดย PHAs ที่สังเคราะห์ขึ้นต้องไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์สัตว์ รวมทั้งมีสมบัติและโครงสร้างของพลาสติกชีวภาพที่ใกล้เคียงกับพลาสติกสังเคราะห์ทางเคมี

เอกสารอ้างอิง

Anjum, A., Zuber, M., Zia, K. M., Noreen, A., Anjum, M. N., and Tabasum, S. (2016). Microbial production of polyhydroxyalka noates (PHAs) and its copolymers: A review of recent advancements. **International Journal of Biological Macromolecules** 89: 161–174.

Bhati, R., Samantaray, S., Sharma, L., and Mallick, N. (2010). Poly-β-hydroxybutyrate accumulation in cyanobacteria under photoautotrophy. **Biotechnology Journal** 5(11): 1181–1185.

Daranarong, D., Chan, R. T. H., Wanandy, N. S., Molloy, R., Punyodom, W., and Foster, L. J. R. (2014). Electrospun polyhydroxy butyrate and poly(L-lactide-co-ε-capro lactone) composites as nanofibrous scaffolds **BioMed Research International** Article ID 741408.

de Morais, M. G., Stillings, C., Dersch, R., Rudisile, M., Pranke, P., Costa, J. A. V., and Wendorff, J. (2015). Extraction of poly(3-hydroxybutyrate) from *Spirulina* LEB 18 for developing nanofibers. **Polimeros** 25(2): 161–167.

Díaz-Barrera, A., Andler, R., Martínez, I., and Peña, C. (2016). Poly-3-hydroxybutyrate production by *Azotobacter vinelandii* strains in batch cultures at different oxygen transfer rates. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology** 91:1063–1071.

Drosg, B., Fritz, I., Gattermayr, F., and Silvestrini, L. (2015). Photo-autotrophic production of poly(hydroxyalkanoates) in cyanobacteria. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly** 29(2): 145–156.

Gumel, A. M., Annuar, M. S. M., and Chisti, Y. (2013). Recent advances in the production, recovery and applications of polyhydroxyalkanoates. **Journal of Polymers and the Environment** 21(2):589–605.

Hondo, S., Takahashi, M., Osanai, T., Matsuda, M., Hasunuma, T., Tazuke, A., Nakahira, Y., Chohnan, S., Hasegawa, M., and Asayama, M. (2015). Genetic engineering and metabolite profiling for overproduction of polyhydroxybutyrate in cyanobacteria. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 120(5): 510–517.

Janssen, P. J., Morin, N., Mergeay, M., Leroy, B., Wattiez, R., Vallaeys, T., Waleron, K., Waleron, M., Wilmotte, A., Quillardet, P., Tandeau De Marsac, N., Talla, E., Zhang, C.-C., and Leys, N. (2010). Genome sequence of the edible cyanobacterium *Arthrospira* sp. PCC 8005. **Journal of Bacteriology** 192(9): 2465–2466.

Jau, M.-H., Yew, S.-P., Toh, P.S.Y., Chong,

A. S. C., Chu, W.-L., Phang, S.-M., Najimudin, N., and Sudesh, K. (2005). Biosynthesis and mobilization of poly(3-hydroxybutyrate) [P(3HB)] by *Spirulina platensis*. **International Journal of Biological Macromolecules** 36(3):144–151.

Kaewbai-ngam, A., Incharoensakdi, A., and Monshupanee, T. (2016). Increased accumulation of polyhydroxybutyrate in divergent cyanobacteria under nutrient-deprived photoautotrophy: An efficient conversion of solar energy and carbon dioxide to polyhydroxybutyrate by *Calothrixs cytnemicola* TISTR 8095. **Bioresource Technology** 212: 342–347.

Khanna, S., and Srivastava, A. K. (2005). Recent advances in microbial polyhydroxy alkanoates. **Process Biochemistry** 40: 607–619.

Klask, C., Raberg, M., Heinrich, D., and Steinbüchel, A. (2015). Heterologous expression of various PHA synthase genes in *Rhodospirillum rubrum*. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly** 29(2): 75–85.

Kozhevnikov, I. V., Volova, T. G., Hai, T., and Steinbüchel, A. (2010). Cloning and molecular organization of the polyhydroxy alkanoic acid synthase gene (*phaC*) of *Ralstonia eutropha* strain B5786. **Applied Biochemistry and Microbiology** 46(2): 140–147.

López, N. I., Pettinari, M. J., Nikel, P. I., and Méndez, B. S. (2015). Polyhydroxyalka noates: Much more than biodegradable Plastics. **Advances in Applied Microbiology** 93: 73–106.

Mozejko-Ciesielska, J., and Kiewisz, R. (2016). Bacterial polyhydroxyalkanoates: Still fabulous? **Microbiological Research** 192: 271–282.

Numata, K., Motoda, Y., Watanabe, S., Osanai, T., and Kigawa, T. (2015). Co-ex pression of two polyhydroxyalkanoate synthase subunits from *Synechocystis* sp. PCC 6803 by cell-free synthesis and their specific activity for polymerization of 3-hydroxybutyryl-coenzyme A. **Biochemistry** 54(6): 1401–1407.

Omar, H. H., Aly, M. M., Al-Malki, W. J., and Balkhair, K. S. (2016). Production and enhancement of poly-β-hydroxybutyrate in cyanobacteria. **Main Group Chemistry** 15(2): 153–161.

Panda, B., Sharma, L., and Mallick, N. (2005). Poly-β-hydroxybutyrate accumulation in *Nostoc muscorum* and *Spirulina platensis* under phosphate limitation. **Journal of Plant Physiology** 162(12):1376–1379.

Riedel, S. L., Jahns, S., Koenig, S., Bock, M. C. E., Brigham, C. J., Bader, J., Stahl, U. (2015). Polyhydroxyalkanoates production with *Ralstonia eutropha* from low quality waste animal fats. **Journal of Biotech-**

nology 214: 119–127.

Shrivastav, A., Mishra, S. K., and Mishra, S. (2010). Polyhydroxyalkanoate (PHA) synthesis by *Spirulina subsalsa* from Gujarat coast of India. **International Journal of Biological Macromolecules** 46(2): 255–260.

Sudesh, K., Taguchi, K., and Doi, Y. (2002). Effect of increased PHA synthase activity on polyhydroxyalkanoates biosynthesis in *Synechocystis* sp. PCC6803. **International Journal of Biological Macromolecules** 30(2): 97–104.

Tan, G. A., Chen, C.-L., Li, L., Ge, L., Wang, L., Razaad, I. M. N., Li, Y., Zhao, L., Mo, Y., and Wang, J.-Y. (2014). Start a research on biopolymer polyhydroxyalka noate (PHA): A review. **Polymers** 6(3): 706–754.

Taroncher-Oldenburg, G., Nishina, K., and Stephanopoulos, G. (2000). Identification and analysis of the polyhydroxyalkanoate-specific β-ketothiolase and acetoacetyl coenzyme a reductase genes in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. strain PCC 6803. **Applied and Environmental Microbiology** 66(10): 4440–4448.

Verlinden, R. A. J., Hill, D. J., Kenward, M. A., Williams, C. D., and Radecka, I. (2007). Bacterial synthesis of biodegradable poly hydroxyalkanoates. **Journal of Applied Microbiology** 102: 1437–1449.

Vincenzini, M., Sili, C., de Philippis, R., Ena, A., and Materassi, R. (1990). Occurrence of poly-β-hydroxybutyrate in *Spirulina* species. **Journal of Bacteriology** 172(5): 2791–2792.