

## บทที่ 1

### บทนำ



ปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้นทุกขณะ ดังจะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์จำนวนมากจะมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติพิเศษที่ดีกว่าวัสดุอื่น มีความเหนียว ยืดหยุ่น สามารถทนต่อกรด-ด่างและสารเคมีอื่นๆ รวมทั้งมีความทนทานและราคาถูก จึงทำให้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ผลที่ตามมาคือปัญหาในการกำจัดวัสดุเหล่านี้หลังจากการใช้งาน จึงทำให้ขยะพลาสติกเหล่านี้ได้สะสมในสิ่งแวดล้อมและเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่ย่อยสลายหรือต้องใช้เวลานานมากในการย่อยสลายทำให้ไม่สามารถกำจัดได้ทัน โดยมีปริมาณสูงถึง 25 ล้านตันต่อปี ( Lee และคณะ, 1991) ก่อให้เกิดปัญหาภาวะอย่างรุนแรงเพิ่มมากขึ้นโดยลำดับ การแก้ปัญหาเรื่องขยะจากพลาสติกนั้น องค์การป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา ( Environmental Protection Agency) หรือ EPA ได้แบ่งแนวทางการแก้ไขปัญหาออกเป็น 4 แนวทาง (กัญจนา ตระกูล, 2533) นอกจากนี้ยังมีคณะผู้วิจัยบางกลุ่มได้ให้ข้อมูลบางประการเพิ่มเติมไว้ดังนี้

1 การลดปริมาณขยะพลาสติกด้วยการลดการใช้งานในบางด้าน เช่น พลาสติกจ๊าวกหีบห่อ, ถุงหูหิ้วต่างๆ เป็นต้น

2 เพิ่มอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

2.1 การนำกลับมาใช้โดยไม่ผ่านการแปรสภาพ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือจะต้องนำกลับมาใช้อย่างถูกวิธี ถุงพลาสติกซึ่งเคยบรรจุอาหารหรือสารอื่นๆมาแล้ว ไม่สมควรนำกลับมาใช้สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์สำหรับบริโภคอีก เนื่องจากอาจมีจุลินทรีย์หรือสารพิษตกค้างอยู่ ( Evans และ Sikdar, 1990)

2.2 การนำพลาสติกไปผ่านการแปรสภาพก่อนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการรวบรวมขยะพลาสติกที่ใช้แล้วมาล้างทำความสะอาด แยกชนิดของพลาสติกแล้วทำการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำมาล้างด้วยสารเคมีก่อนนำไปหลอมโดยใช้ความร้อน อาจมีการเติมสีเพื่อความน่าใช้และปิดบังสิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่แล้วผสมกับวัตถุดิบใหม่อื่นๆในอัตราส่วนที่เหมาะสม แต่พลาสติกที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้จะมีการสูญเสียคุณสมบัติบางด้านไป ทำให้มีข้อจำกัดในการนำกลับมาใช้งานและไม่สามารถนำมาบรรจุผลิตภัณฑ์สำหรับบริโภคได้อีก จึงทำให้ไม่คุ้มทุน (Leaversuch, 1987)

3 การกำจัดขยะพลาสติกโดยการเผา เป็นวิธีที่ต้องมีการลงทุนในการสร้างเตาเผาความร้อนสูง จุดสำคัญของกระบวนการนี้คือ การควบคุมเขม่า คาร์บอน และฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด โดยนำพลาสติกมาบดให้ละเอียดแล้วนำไปเผาในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่จะลุกไหม้เหมือนก๊าซธรรมชาติ ในแง่ของการเผาไหม้ที่ปราศจากฝุ่นละออง จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้ามมีการเผาในปริมาณมากอาจก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันเนื่องจาก การเผาไหม้ โดยเฉพาะพลาสติกบางอย่าง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) เมื่อถูกเผาไหม้จะเกิดสารไดออกซิน (dioxins) ซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และยังมีกลุ่มสารที่มีพิษ ขณะเผาไหม้ เช่น สารแคดเมียม หรือโลหะหนักอื่นๆ ผงเถ้าที่เกิดจากการเผาอีกร้อยละสิบของขยะที่ถูกเผาทิ้งไปเหล่านี้ยังมีพิษ นอกจากนี้ค่าก่อสร้างโรงงานมีราคาไม่ต่ำกว่า 300 ล้านดอลลาร์สหรัฐ<sup>๔</sup> ซึ่งนับว่าแพงมากอีกทั้งยังไม่สามารถกำจัดปัญหาได้ทั้งหมด เกียรติศักดิ์ คูหา (2538) รายงานว่าในประเทศญี่ปุ่นมีโครงการ ซันโยเด็นกิ (Sanyo Denki) เป็นโครงการกำจัดขยะพลาสติก โดยการทำให้สลายด้วยความร้อน (pyrolysis) เป็นกระบวนการหลอมพลาสติกโดยใช้ความร้อน จากคลื่นไมโครเวฟและการเผา แล้วนำน้ำมันที่ได้ส่งเข้าหอกลั่นเพื่อกลั่นแยก จะได้น้ำมันเชื้อเพลิง ชนิดหนัก (heavy fuel oil) และน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดเบา (light fuel oil) ขึ้นกับชนิดของพลาสติก นอกจากนี้ยังได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลพลอยได้ สำหรับสิ่งที่เหลือชิ้นสุดท้ายต้องนำมาผ่าน กระบวนการกำจัดพิษก่อนทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาหมอกควันต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากต้องผ่านหลาย กระบวนการ รวมถึงปัญหาจากการแยกชนิดของพลาสติกทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงจึงยังไม่มีให้นำไป ประยุกต์ใช้ในขณะนี้และยังต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป

4 การวิจัยและพัฒนาพลาสติกซึ่งสามารถย่อยสลายได้ แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของพลาสติก ที่ต้องการไว้ แบ่งเป็น 2 แนวทางคือ

4.1 พลาสติกที่เสื่อมสภาพได้ เป็นลักษณะที่พลาสติกจะเกิดการเสื่อมสภาพเองเมื่อหมดอายุการใช้งานหรือเมื่อเวลาได้ผ่านไปจนถึงจุดหนึ่ง โดยเติมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (additive based polymer) มี 3 ลักษณะ คือ

4.1.1 การเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (biodegradable plastic) โดยอาศัยการนำสาร ที่ก่อให้เกิดจุดอ่อนในโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก เพื่อเปิดโอกาสให้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติ สามารถเข้าไปย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆได้ ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการผลิตพลาสติก ชนิดที่เสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) เป็น พอลิเมอร์พื้นฐาน นำมาผสมกับแป้งที่ได้จากผลิตผลทางการเกษตรแล้วเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อให้โซโมเลกุลของพอลิสไตรีนเกาะติดโครงสร้างหลักของแป้ง จะได้โคพอลิเมอร์ที่ประกอบ

ด้วยเซลล์โลส 20-30 เปอร์เซ็นต์ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพลาสติก เมื่อนำพลาสติกชนิดนี้ไปทิ้งในดิน จุลินทรีย์ในดินจะย่อยสลายเซลล์โลสในพลาสติก ทำให้ชั้นพลาสติกมีขนาดเล็กลงเหลือส่วนที่เป็นพอลิस्टาไดรีนช่วยให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป ในประเทศแคนาดามีการผลิตพอลิเมอร์ของพลาสติกที่เคลือบด้วยแป้งข้าวโพด ซึ่งผลิตได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าพลาสติกชนิดแรก โดยการปรับสภาพผิวให้เป็นส่วนที่ไม่จับกับน้ำ (hydrophobic surface) เมื่อทิ้งพลาสติกลงในดิน จุลินทรีย์จะย่อยสลายแป้งข้าวโพด เหลือส่วนที่เป็นพลาสติกในรูปโครงสร้างที่เป็นรูพรุน จากนั้นน้ำมันจากข้าวโพดจะทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) โดยทำปฏิกิริยากับเกลือที่อยู่ในดินหรือน้ำไดสารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ทำให้พันธะของพอลิเมอร์แตกออกจากกัน Evans และ Sikdar (1987) รายงานว่าในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้น พลาสติกชนิดนี้จะเสื่อมสภาพจนหมดภายในสองถึงสามปี

4.1.3 การเสื่อมสภาพด้วยแสง (photodegradable plastic) โดยทำการผลิตพลาสติกให้อยู่ในรูปของคีโตนคาร์บอนิล (ketone carbonyl system) ซึ่งประกอบด้วยโคพอลิเมอร์ของพอลิस्टาไดรีนกับพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) หรือโคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ พลาสติกประเภทนี้จะสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ เมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง ที่เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาทำลายสายพอลิเมอร์เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต (photoinitiator) ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ เช่น เหล็ก หรือ ทองแดง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชัน (antioxidation) ไดสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะแตกตัวได้อิออนของโลหะทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลเกิดการแตกสลายพลาสติกจะเริ่มกรอบ, เปราะและค่อยๆเสื่อมสภาพเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยทำให้ง่ายต่อการกำจัดในชั้นต่อไป (Leaversuch, 1987)

4.2 พลาสติกซึ่งผลิตโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biopolymer) สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (biodegradable) อย่างสมบูรณ์เกิด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะต่อสิ่งแวดล้อม พลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate, PHA) พอลิแลคไทด์ (polylactide, PLA) อลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) รวมถึงโคพอลิเมอร์และอนุพันธ์ผสมของพอลิเมอร์เหล่านี้ ได้มีการประเมินว่า ตลาดเป้าหมายของพลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้จะสูงถึง 1.4 ล้านตันต่อปีในปี ค.ศ. 2000 (Leversuch, 1987 อ้างถึงใน Lee, 1996) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติในด้านต่างๆ พบว่า PHA มีความเป็นไปได้มากที่สุดในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จึงมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาให้ PHA มีส่วนประกอบ

ของโมโนเมอร์ใหม่ๆ ศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและเคมี เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในแต่ละด้าน (Lee, 1996)

## PHA

มีการสร้างและสะสม PHA ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตประเภทโพรคาริโอต (Prokaryote) จากการศึกษาพบว่าจุลินทรีย์มากกว่า 80 ชนิด สามารถสร้างและสะสม PHA ในสภาพที่ถูกจำกัดสารอาหารอื่นๆและมีแหล่งคาร์บอนมากเกินไปเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน รวมทั้งใช้สำหรับการงอกของสปอร์ (sporulation) ใน *Bacillus* (Williamson และ Wilkinson, 1958) และการสร้างซิสต์ (encysment) ใน *Azotobactor* (Dawes, 1974) เช่นเดียวกับการสะสมแป้งในพืชและการสะสมไกลโคเจนในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง (Bloembergen และ คณะ, 1986) PHA จะถูกสะสมอยู่ในรูปของแกรนูล ขนาดและจำนวนของแกรนูลต่อเซลล์จะแตกต่างกันในแต่ละชนิดของจุลินทรีย์ เช่น *Alcaligenes eutrophus* มีแกรนูลขนาด 0.24-0.50  $\mu\text{m}$  จำนวน 8-13 แกรนูลต่อเซลล์ จุลินทรีย์ที่มีการสะสม PHA สามารถตรวจสอบเบื้องต้นได้โดยการย้อมสีชูดานแบล็คบี หรือ ไนลบลู (Byrom, 1994)

ตารางที่ 1 จุลินทรีย์ที่สามารถสร้างและสะสม PHA ( Brandl และคณะ, 1990)

การจำแนกสายพันธุ์โดย Bergey's Manual	จีโนม	ปริมาณ PHA สูงสุด (%ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง)	แหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิต PHA
Group 1	<i>Chloroflexus</i>	<1	yeast extract/glycylglycine
Phototrophic bacteria	<i>Chromatium</i>	20	acetate
	<i>Ectothiorhodospira</i>	ND	NS
	<i>Lamprocystis</i>	ND	NS
	<i>Rhodobacter</i>	80	acetate
	<i>Rhodospirium</i>	47	acetate
	<i>Thiocapsa</i>	ND	NS
	<i>Thiocystis</i>	ND	NS
	<i>Thiodictyon</i>	ND	NS
	<i>Thiopedia</i>	ND	NS
	<i>Thiosphaera</i>	ND	acetone/CO <sub>2</sub>
Group 2 Gliding bacteria	<i>Beggiatia</i>	57	acetate
Group 3 Sheathed bacteria	<i>Leptothrix</i>	67	pyruvate

ตารางที่ 1 (ต่อ)

การจำแนกสายพันธุ์โดย Bergey's Manual	จีโนส	ปริมาณ PHA สูงสุด (%ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง)	แหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิต PHA
Group 4 Budding and/or curved bacteria	<i>Sphaerotilus</i>	45	glucose/peptone
	<i>Caulobacter</i>	36	glucose/glutamate
	<i>Azospirillum</i>	75	malate
	<i>Oceanospirillum</i>	ND	NS
	<i>Spirillum</i>	40	lactate
Group 7 Gram-negative aerobic rods and cocci	<i>Alcaligenes</i>	96	fructose
	<i>Azotobacter</i>	73	glucose
	<i>Beijerinckia</i>	38	glucose
	<i>Derxia</i>	26	glucose
	<i>Methylobacterium</i>	47	methanol
	<i>Methylosinus</i>	25	methanol
	<i>Pseudomonas</i>	67	methanol
	<i>Rhizobium</i>	57	methanol
	<i>Xanthobacter</i>	ND	NS
	<i>Zoogloea</i>	ND	yeast extract/casamino
Group 8 Gram-negative facultative anaerobic rods	<i>Chromobacterium</i>	37	glucose/peptone
	<i>Escherichia</i>	ND	tryptone/yeastextract/glucose
	<i>Haemophilus</i>	ND	brain heart infusion
	<i>Photobacterium</i>	ND	NS
	<i>Vibrio</i>	ND	NS
Group 9 Gram-negative anaerobic bacteria	<i>Syntrophomonas</i>	30	glutamate
Group 10 Gramnegative cocci and cocibacilli	<i>Acinetobacter</i>	<1	glucose
	<i>Lampropedia</i>	ND	NS
	<i>Moraxella</i>	ND	NS
	<i>Paracoccus</i>	ND	NS
Group 12 Gram-negative chemolithotrophic	<i>Nitrobacter</i>	ND	NS
	<i>Nitrococcus</i>	ND	NS
	<i>Thiobacillus</i>	ND	glucose
Group 13 Archaeobacteria	<i>Halobacterium</i>	38	glucose

ตารางที่ 1 (ต่อ)

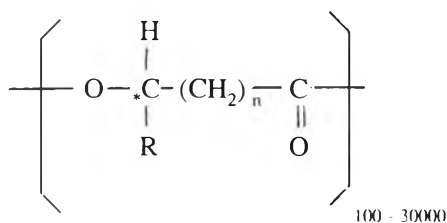
การจำแนกสายพันธุ์โดย Bergey's Manual	จีนัส	ปริมาณ PHA สูงสุด (%ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง)	แหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิต PHA
Group 14 Gram-positive cocci	<i>Micrococcus</i>	28	peptone/tryptone
Group 15 Endospore-forming rods and cocci	<i>Bacillus</i>	25	glucose
	<i>Clostridium</i>	13	tryptone/peptone/glucose
Group 17 Actinomycetes  Cyanobacteria	<i>Mycoplana</i>	ND	methanol
	<i>Nocardia</i>	14	butane
	<i>Streptomyces</i>	4	glucose
	<i>Aphanothece</i>	<1	NS
	<i>Chlorogloea</i>	10	acetate, CO <sub>2</sub>
	<i>Gamphosphaeria</i>	ND	ND
	<i>Microcoleus</i>	<1	ND
	<i>Microcystis</i>	ND	ND
	<i>Spirulina</i>	6	CO <sub>2</sub>

หมายเหตุ ND = ปริมาณ PHA สูงสุดไม่ได้ทำการวิเคราะห์

NS = แหล่งคาร์บอนไม่จำเพาะ

### โครงสร้างของ PHA

PHA มีโครงสร้างเป็นพอลิเอสเทอร์สายตรง (linear polyester) ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ในกลุ่มไฮดรอกซีที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของโมโนเมอร์ตัวหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซีของโมโนเมอร์อีกตัวหนึ่ง ตรงตำแหน่งบิดคาร์บอนจะเป็นไครัลคาร์บอน (chiral carbon) แสดงโครงสร้างเป็น R-configuration และแต่ละโมโนเมอร์จะเชื่อมต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail configuration) เช่นเดียวกับ พอลิโพรพิลีน (Brandl, และคณะ, 1990)



\* แสดงตำแหน่งปีตาकारบอน

n = 1	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีโพรพิโอเนต) หรือ P(3HP)
	R = เมทิล (CH <sub>3</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ P(3HB)
	R = เอทิล (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ P(3HV)
	R = โพรพิล (C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีคาโปรเอต) หรือ P(3HC)
	R = บิวทิล (C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีเฮกซะโนเอต) หรือ P(3HH)
	R = เพนทิล (C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีออกตะโนเอต) หรือ P(3HO)
	R = โนนิล (C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> )	สารนี้คือ	พอลิ(3-ไฮดรอกซีโดเดคะโนเอต) หรือ P(3HD)
n = 2	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ	พอลิ(4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ P(4HB)
n = 3	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ	พอลิ(5-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ P(5HV)

รูปที่ 1 โครงสร้างของโพลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (Findlay และ White, 1983)

### การค้นพบ PHA

Lemoigne (1926) รายงานการค้นพบ PHA ชนิดแรกคือ PHB จากเชื้อ *Bacillus megaterium* ในปีค.ศ. 1959 บริษัท Bephist ทำการจดลิขสิทธิ์การนำ PHB ไซเป็นโพลิเมอร์ละลายเพื่อการค้า (Bephist, 1959 US. patent 303659 และ Bephist, 1962 US. patent 3044942) ต่อมา Wallen และ Rohwedder (1974) รายงานการค้นพบเฮเทอโรโพลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยกรด(3-ไฮดรอกซี) ชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติต่างจาก PHB คือ มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าและละลายได้ในเอทานอลร้อนได้แก่ 3HV, 3HC และ 3HH จึงเสนอให้เรียกสารในกลุ่มนี้ว่า PHA

PHA สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามชนิดของโมโนเมอร์ที่มาต่อกันเป็นสายโพลิเมอร์ ดังนี้

1 โพลิโพลิเมอร์ (homopolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียว ได้แก่ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) [Poly(β-hydroxybutyrate) หรือ P(3HB)]

2 เฮเทอโรโพลิเมอร์ (heteropolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด ตัวอย่าง เช่น โคลิโพลิเมอร์ (copolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) [P(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ P(3HB-co-

3HV)] พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) [P(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)] หรือ P(3HB-co-4HB) เป็นต้น ถ้าเป็นเทอร์พอลิเมอร์ (terpolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) [P(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-4-hydroxybutyrate)] หรือ P(3HB-co-3HV-co-4HB) พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีเฮกซะโนเอต-โค-4-ไฮดรอกซีเฮกซะโนเอต) [P(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate-co-4-hydroxyhexanoate)] หรือ P(3HB-co-3HH-co-4HH)] เป็นต้น

หรือเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสังเคราะห์สามารถแบ่งตามความหมายทางวัสดุศาสตร์ได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้ (เสาวรจน ชวยจุลจิติน, 2538)

- 1 โฮโมพอลิเมอร์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียว
- 2 โคพอลิเมอร์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่า โดยแต่ละโมโนเมอร์ต้องสามารถเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ได้ด้วย
- 3 เฮเทอโรพอลิเมอร์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งโมโนเมอร์ชนิดหนึ่งไม่สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันกันเองได้ แต่โมโนเมอร์อีกชนิดสามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันกันเองได้

### ความสามารถในการสร้างและสะสม PHA โดย *Alcaligenes eutrophus*

Holmes (1985) รายงานว่า *A. eutrophus* สามารถสร้างและสะสม PHB ได้สูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนักเซลล์แห้งเมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และเมื่อใช้กรดโพธิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนจะสร้างและสะสมโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) นอกจากนี้ PHA ที่ผลิตโดย *A. eutrophus* จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number average molecular weight,  $M_n$ ) สูงกว่าและมีค่าดัชนีกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity index,  $M_w/M_n$ ) น้อยกว่า PHA ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นดังแสดงในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PHA จากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ (Doi, 1990)

จุลินทรีย์	แหล่งคาร์บอน	สัดส่วน(โมล%)ของ PHA			น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	
		3HB	3HV	4HB	$M_n \times 10^{-3}$	$M_w/M_n$
<i>Alcaligenes eutrophus</i>	fructose	100	0	0	737	1.9
	butyric acid	100	0	0	432	2.1
	pentanoic acid	21	79	0	254	2.0
	$\gamma$ -butyrolactone	83	0	17	369	1.8
<i>Bacillus megaterium</i>	glucose	100	0	0	166	1.8
<i>Zoogloea ramigera</i>	glucose	100	0	0	542	2.5
<i>Protomonas extorquens</i>	propanol	67	33	0	437	2.3

บริษัทอิมพีเรียล เคมีเคิล อินดัสตรี (Imperial Chemical Industries) หรือ ICI ซึ่งในปัจจุบันคือบริษัทซันนิคา ไบโอโปรดักท์ (ZENECA Bio Product) ประเทศอังกฤษ ได้จดลิขสิทธิ์การผลิตและการสกัด PHA โดย *A.eutrophus* กล่าวคือในการผลิต PHB เมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและการผลิต P(3HB-co-3HV) เมื่อใช้กลูโคสร่วมกับกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนผสมในการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (fed-batch culture) ระดับอุตสาหกรรม สัดส่วน(โมลเปอร์เซ็นต์)ของ 3HV ขึ้นกับการแปรอัตราส่วนของกลูโคสและกรดโพรพิโอนิกในอาหาร สามารถผลิตโคพอลิเมอร์ P(67%3HB-co-33%3HV) ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง (Holmes, P.A. และคณะ, 1983 European patent 0069497 และ 1985 European patent 0052459) Holmes (1985) รายงานว่า *A.eutrophus* สามารถใช้กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวผลิตโคพอลิเมอร์ P(57%3HB-co-43%3HV) แต่มีปริมาณลดลงเหลือ 35 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง และเมื่อใช้กรดบิวทริกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวจะผลิต PHB เพียงชนิดเดียว ต่อมา Doi และคณะ (1987) รายงานว่า *A.eutrophus* สามารถใช้กรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวผลิตโคพอลิเมอร์ P(10%3HB-co-90%3HV) และเมื่อใช้กรดวาเลอริกและกรดบิวทริกเป็นแหล่งคาร์บอนผสมจะผลิตโคพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของ 3HV สูงกว่าเมื่อใช้กลูโคสร่วมกับกรดโพรพิโอนิก Kim และคณะ (1994) รายงานว่าเมื่อทำการควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสในอาหารให้อยู่ในช่วง 10-20 กรัมต่อลิตร ในการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง *A.eutrophus* จะสามารถผลิต PHB สูงถึง 121 กรัมต่อลิตรและปริมาณมวลชีวภาพ 164 กรัมต่อลิตร คิดเป็น 76 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง มีอัตราการผลิตสูงสุดชั่วโมงที่ 50 ได้

2.42 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และในสถานะเดียวกันนี้สามารถผลิต P(3HB-co-3HV) ได้ 110 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนผสมเป็นกลูโคสรวมกับกรดโพรพิโอนิก Doi และคณะ (1995) รายงานว่าแต่ละโมโนเมอร์สามารถรวมเป็นโคพอลิเมอร์หรือเทอร์พอลิเมอร์ขึ้นกับการเลือกชนิดของแหล่งคาร์บอน นอกจากการศึกษาสถานะการเลี้ยงเชื้อและชนิดของแหล่งคาร์บอนของแต่ละโมโนเมอร์แล้วยังมีการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนราคาถูกเพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากแหล่งคาร์บอนที่เป็นกรดอินทรีย์มีราคาสูง Alderete และคณะ (1993) รายงานว่า *A. eutrophus* สายพันธุ์กลายสามารถใช้อีทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนผลิต PHB ได้ 47 กรัมต่อลิตร และเมื่อใช้อีทานอลร่วมกับโพรพานอลภายใต้สภาวะจำกัดแหล่งฟอสเฟตสามารถผลิต P(3HB-co-30.8%3HV) ได้ 32 กรัมต่อลิตร อัตราการผลิตสูงสุดชั่วโมงที่ 44 ได้ 0.16 กรัมต่อน้ำหนักเซลล์แห้งต่อชั่วโมง (Park และ Damodaram, 1994) Tamaka และคณะ (1995) รายงานว่าในประเทศญี่ปุ่นได้มุ่งความสนใจในการใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิต PHB ในระดับอุตสาหกรรม แต่ประสบปัญหาทางด้านอันตรายจากการรั่วไหลของก๊าซติดไฟและการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จึงเกิดความร่วมมือระหว่างกลุ่มนักวิทยาศาสตร์กับบริษัทไซบู-ก๊าซ (Saibu Gas) ทำการศึกษาการผลิต PHB ในถังหมักที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ทำการปรับปรุงปัญหาการรั่วไหลของก๊าซโดยการใช้ก๊าซหมุนเวียนในระบบปิด สามารถผลิต PHB ได้ 62 กรัมต่อลิตร ปริมาณมวลชีวภาพ 91.3 กรัมต่อลิตรคิดเป็น 67.8 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง ภายในเวลา 40 ชั่วโมง นอกจากนี้ Eggink และคณะ (1993) รายงานว่า *A. eutrophus* สายพันธุ์กลายยังสามารถใช้กรดโอเลอิกเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิต PHB ได้ 32.5 กรัมต่อลิตร ภายในเวลา 60 ชั่วโมงในการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องและสามารถใช้น้ำมันพืชรวมทั้งกรดไขมันพันธะยาวในการผลิต PHA ได้ Kunioka และ Doi (1988) รายงานการค้นพบเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB)] เป็นครั้งแรกจาก *A. eutrophus* เมื่อใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริกและกรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนผสมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การผลิตเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) โดย *A.eutrophus* เมื่อใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริกและกรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอน (Doi, 1990)

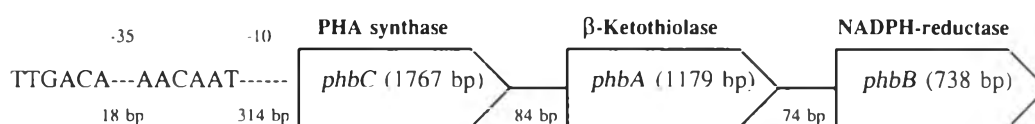
ปริมาณแหล่งคาร์บอน (กรัมต่อลิตร)		น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณ PHA (%) โดยน้ำหนัก	สัดส่วน (โมล%) ของ PHA		
HO(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> )COOH			3HB	3HV	4HB
17.5	2.5	7.8	18	32	45	23
15.0	5.0	9.6	17	34	30	36
10.0	10.0	10.4	24	31	14	55
7.5	12.5	10.5	24	28	5	67

Valentine และคณะ (1992) รายงานการค้นพบเทอร์พอลิเมอร์ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทริเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต-โค-4-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) [P(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-4-hydroxyvalerate) หรือ P(3HB-co-3HV-co-4HV)] จาก *A.eutrophus* สายพันธุ์ NCIB 11599 เมื่อใช้ กรด 4-ไฮดรอกซีวาเลอริกหรือกรด 4-วาลูลินิก (4-hydroxyvalulinic) เป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวผลิต P(42%3HB-co-52.2%3HV-co-5.64%4HV) ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง และต่อมาในปี ค.ศ. 1994 ได้รายงานการค้นพบเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HH-co-4HH) จาก *A.eutrophus* สายพันธุ์ PHB 4 Jang และ Rogers (1996) รายงานว่า *A.eutrophus* สายพันธุ์ SH-69 สามารถสร้างและสะสมเทอร์พอลิเมอร์ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทริเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต-โค-ลิวูลิเนต) [P(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-levulinate) หรือ P(3HB-co-3HV-co-LV)] เมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวในการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง 2 ขั้นตอนผลิตเทอร์พอลิเมอร์ได้สูงสุด 10.2 กรัมต่อลิตร ต่อปริมาณมวลชีวภาพ 23.4 กรัมต่อลิตร อัตราการผลิตสูงสุด 0.85 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง โดยเทอร์พอลิเมอร์ที่ผลิตได้มีสัดส่วนโมลเปอร์เซ็นต์ของ 3HV และลิวูลิเนตในระดับต่ำเพียง 3.2 และ 8.1 โมลเปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

## วิธีการสังเคราะห์ PHA ใน *A. eutrophus*

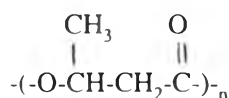
ยีนและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ PHA

ยีนซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ PHA ใน *A. eutrophus* เป็น single operon ประกอบด้วย *phbC-A-B* ซึ่งทำหน้าที่ควบคุม PHA synthase,  $\beta$ -ketothiolase และ NADPH-dependent acetoacetyl-CoA reductase ตามลำดับ

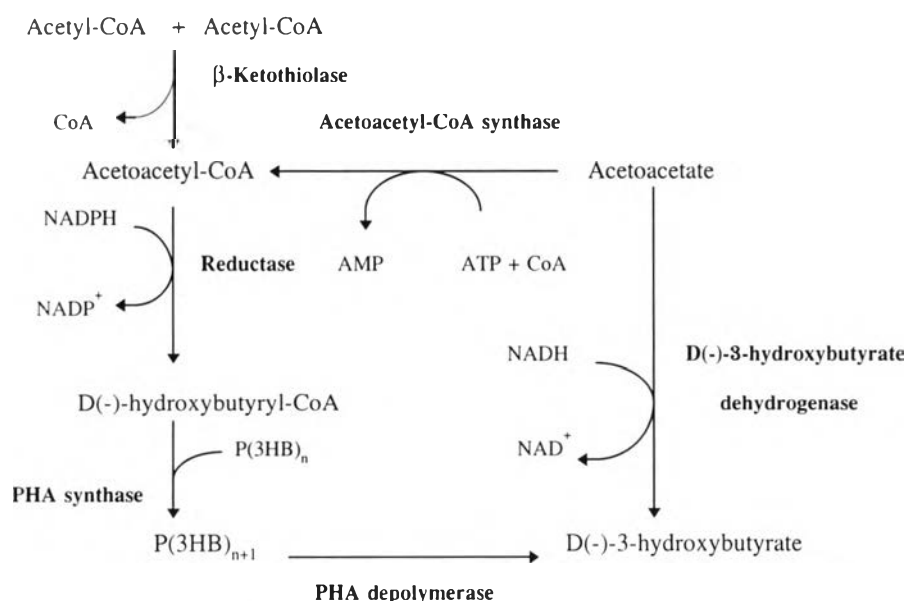


รูปที่ 2 โครงสร้างของ single operon ที่ควบคุมการสังเคราะห์ PHA ใน *A. eutrophus* (Steinbuchel, 1992)

## วิธีการสังเคราะห์ PHB

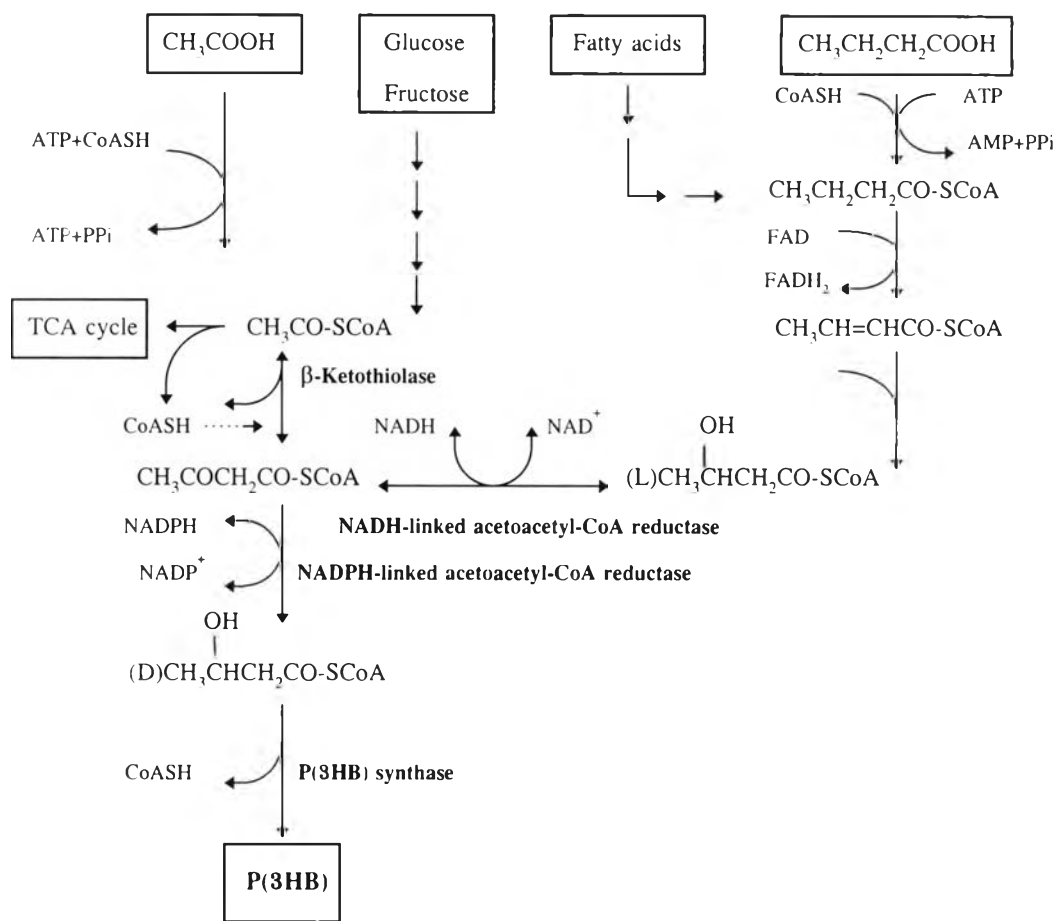


Senior และ Aawes รวมทั้ง Oeding และ Schlegel (1973) ได้สรุปว่าสารตั้งต้นของวิธีการสังเคราะห์ PHB คือ อะซิติลโคเอ (acetyl-CoA) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วิธีการสังเคราะห์และการย่อยสลาย PHB โดย *A. eutrophus* (Lee, 1996)

Doi และคณะ (1986-1988) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ PHB โดย *A.eutrophus* เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสหรือกรดบิวทริกด้วยการติดฉลากสารกัมมันตภาพรังสี [ $1-C^{13}$ ] อะซีเตต, [ $2-C^{13}$ ] อะซีเตต และ [ $1-C^{13}$ ] บิวทรีต และสรุปว่าจุดสำคัญในการควบคุมวิธีการสังเคราะห์ PHB คือ เอนไซม์ บีตา-คีโตไทโอเลส ( $\beta$ -Ketothiolase) ซึ่งจะถูกยับยั้งเมื่อปริมาณโคเอนไซม์เอ (CoA) ภายในเซลล์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



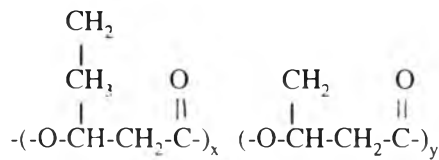
รูปที่ 4 วิธีการสังเคราะห์ PHB โดย *A.eutrophus* เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน (Doi, 1990)

Oeding และ Schlegel (1973) รายงานว่าเมื่อใช้กลูโคสหรือฟรักโทสเป็นแหล่งคาร์บอน จะถูกเมตาโบไลซ์เป็นอะซีติลโคเอโดยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะถูกจำกัดแหล่งไนโตรเจน เอนไซม์ซิเตรตซินเทส (citrate synthase) ในวัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิกจะถูกยับยั้งเป็นผลให้ปริมาณโคเอนไซม์เอภายในเซลล์ลดลง อะซีติลโคเอจึงเข้าสู่วิธีการสังเคราะห์ PHB แต่อยู่ในสภาวะสมดุลไม่ถูกจำกัดแหล่งไนโตรเจน อะซีติลโคเอจะเข้าสู่วัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิกแอซิด

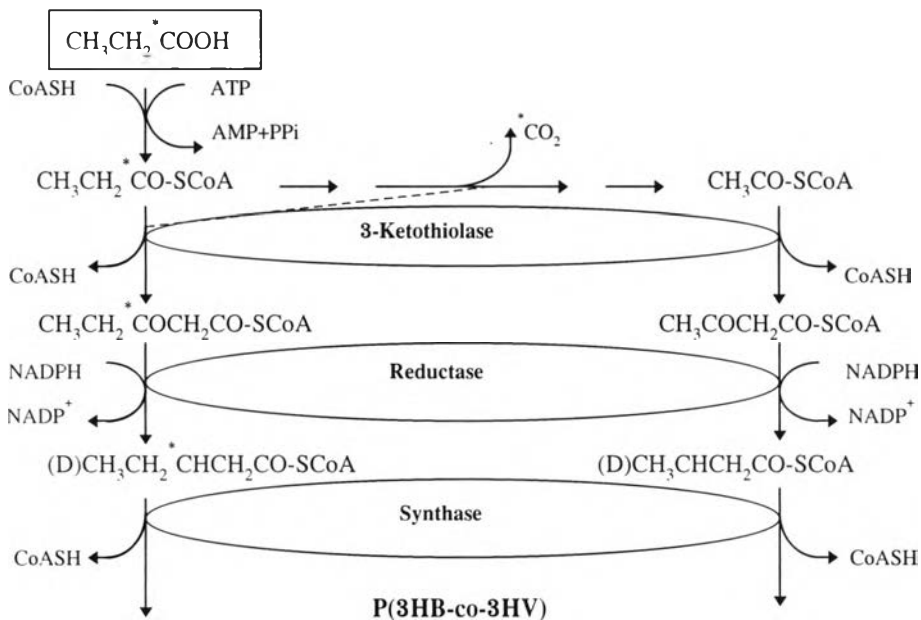
(TCA cycle) เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานและกรดอะมิโน ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณโคเอนไซม์เอภายในเซลล์เพิ่มขึ้น จึงไปยับยั้งวิถีการสังเคราะห์ PHB

เมื่อใช้กรดบิวทิริกหรือกรดไขมันเป็นแหล่งคาร์บอน กรดไขมันจะไม่ถูกเมตาโบไลซ์เพื่อลดจำนวนคาร์บอนไปเป็นอะซิติลโคเอ (C<sub>2</sub>) แต่จะเข้าสู่ปฏิกิริยาบีตา-ออกซิเดชัน (β-oxidation) ของกรดไขมันเป็น อะซิโตอะซิติลโคเอ (acetoacetyl-CoA) ดังนั้นสภาวะจำกัดแหล่งไนโตรเจนจึงไม่มีผลต่อวิถีการสังเคราะห์ PHB (Heinzle และ Lafferty, 1980 ; Suzuki และ คณะ, 1986)

วิถีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV)



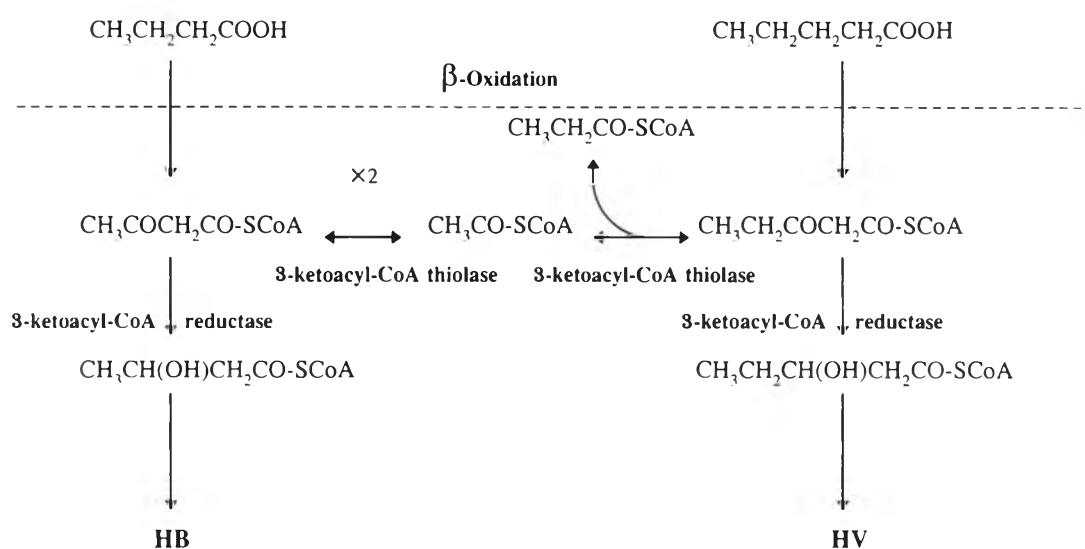
Doi และคณะ (1988) ศึกษาวิถีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) ด้วยการติดฉลากสารกัมมันตภาพรังสี [1-C<sup>13</sup>]โพรพิโอเนต และเสนอวิถีการสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วิถีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) โดย *A.eutrophus* เมื่อใช้กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอน (Doi, 1990)

เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกรดบิวทิริกและกรดวาเลอริก จะถูกเมตาโบไลซ์โดยปฏิกิริยาบีตา-ออกซิเดชัน กรดวาเลอริก (C<sub>5</sub>) จะถูกเมตาโบไลซ์เป็น 3-ketovaleryl-CoA แล้วถูกเมตาโบไลซ์เป็น

3-hydroxyvaleryl-CoA โดยเอนไซม์ 3-ketoacyl-CoA reductase ในขณะที่ 3-ketovaleryl-CoA บางส่วนจะถูกเมตาโบไลซ์โดยเอนไซม์ 3-ketoacyl-CoA thiolase ไปเป็นอะซิติลโคเอ (C<sub>2</sub>) และ โพรพิโอนิลโคเอ (C<sub>3</sub>) ซึ่งอะซิติลโคเอ (×2) จะถูกเมตาโบไลซ์เป็น 3HB ได้โดยเอนไซม์ 3-ketoacyl-CoA thiolase ดังนั้นเมื่อใช้กรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวจึงไม่ได้ไฮโมพอลิเมอร์ของ P(3HV) ดังแสดงในรูปที่ 6 Doi (1988) รายงานว่าเมื่อใช้กรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยวจะผลิตได้ P(3HB-co-97%3HV)

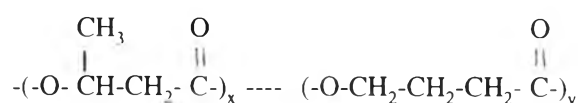


รูปที่ 6 วิธีการสังเคราะห์ PHB และ P(3HB-co-3HV) โดย *A. eutrophus* เมื่อใช้กรดบิวทิริกและกรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอน (Ishihara และคณะ, 1996)

Doi (Unpublished Manuscript, n.d.) ได้สรุปวิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) จากแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆดังนี้ เมื่อใช้กรดบิวทิริกและกรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอน กรดทั้งสองชนิดจะถูกเมตาโบไลซ์เป็น 3HB acetoacetyl-CoA และ 3HV acetoacetyl-CoA โดยผ่านปฏิกิริยาบีตา-ออกซิเดชัน จุดสำคัญในการควบคุมการสังเคราะห์คือ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะไม่ถูกควบคุมโดยเอนไซม์อะซิติลโคเอและ 3-คีโตไทโอเอส ดังนั้นเมื่อใช้กรดบิวทิริกและกรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนผสมในการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องที่สภาวะจำกัดแหล่งไนโตรเจน (กำหนดให้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 40) พบว่ายังคงสามารถผลิต P(3HB-co-3HV) ได้สูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง ในขณะที่เมื่อใช้ฟรักโทสและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนผสมและอยู่ในสภาวะไนโตรเจนมากเกินไป พบว่าเซลล์มีการเจริญดี แต่ความสามารถในการสร้างและสะสม P(3HB-co-3HV) ถูกยับยั้ง

ในการผลิต P(3HB-co-3HV) โดย *A. eutrophus* ในระดับอุตสาหกรรม บริษัท ZENECA ประเทศอังกฤษ ได้ปรับปรุงการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องเป็น 2 ชั้น โดยใช้กลูโคสและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนผสม ในขั้นแรกจะทำการเลี้ยงเชื้อให้มีการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณเชื้อในอาหารสูตร glucose-salts medium ภายใต้สภาวะการบอณและสารอาหารมากเกินไป ต่อมาเมื่อฟอสเฟตในอาหารถูกใช้ไปจนเข้าสู่สภาวะถูกจำกัด จึงเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 ทำการเติมกรดโพรพิโอนิกเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิตโคพอลิเมอร์ พบว่าสามารถผลิต P(3HB-co-3HV) ได้สูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง ระยะเวลาในการผลิต 110-120 ชั่วโมง ผลิต P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วน 3HV ตั้งแต่ 0-47 โมลเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเติมกรดโพรพิโอนิกและปริมาณกลูโคสเริ่มต้น (Doi, Unpublish Manuscript, n.d.)

#### วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-4HB)

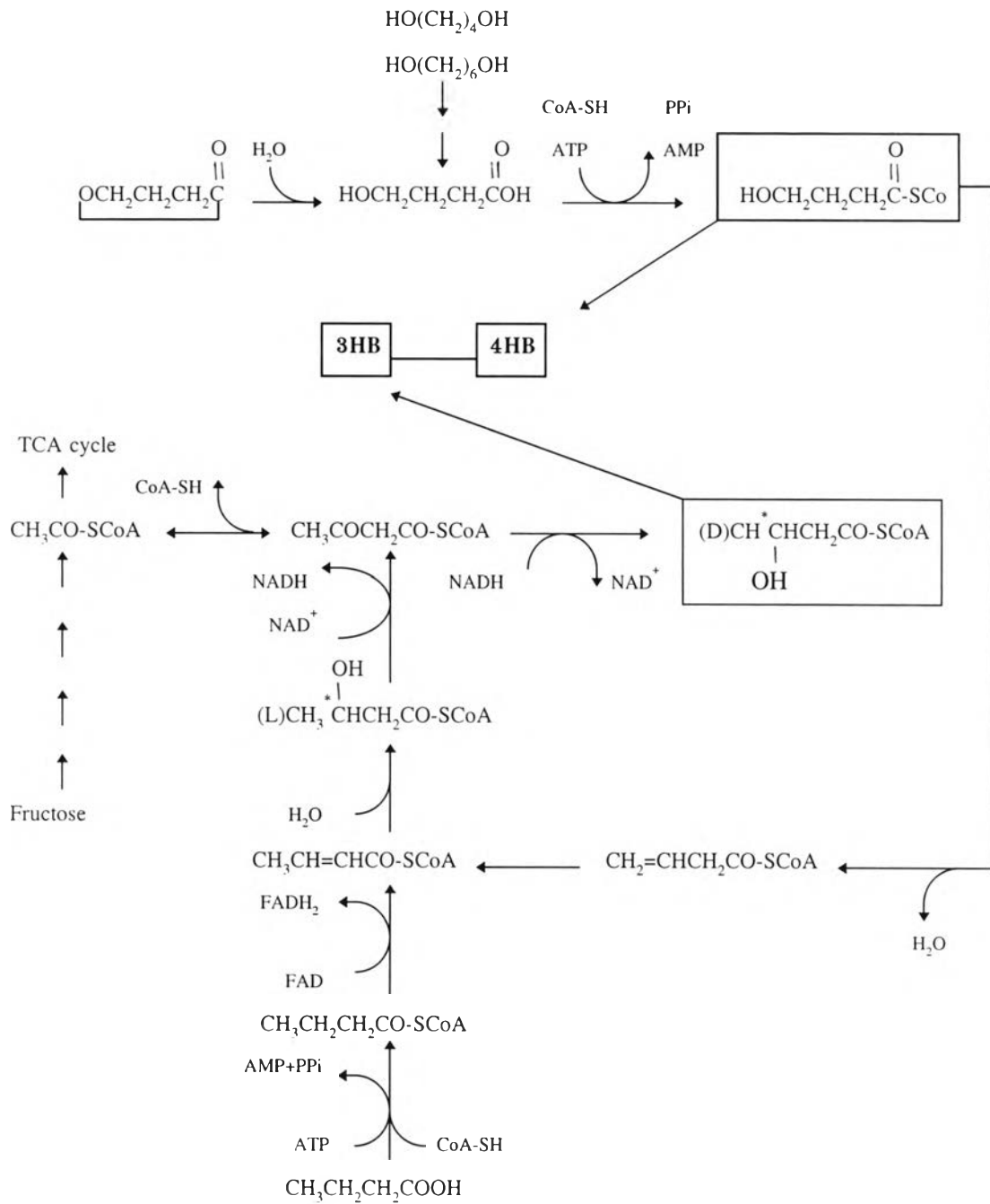


Doi และ Kunioka (1988) รายงานการค้นพบโคพอลิเมอร์ชนิด P(3HB-co-4HB) เป็นครั้งแรกโดย *A. eutrophus* เมื่อใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริกเป็นแหล่งคาร์บอน ต่อมาปีค.ศ. 1989 ได้รายงาน การทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างและสะสม P(3HB-co-4HB) เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็น กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก กรด 4-คลอโรบิวทิริก 1,4-บิวเทนไดออล 1,6-บิวเทนไดออล และ  $\gamma$ -บิวทิโรแลคโตน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างและสะสม P(3HB-co-4HB) โดย *A. eutrophus* เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน (Doi, 1990)

แหล่งคาร์บอน (20 กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณ PHA (%โดยน้ำหนัก)	สัดส่วน(โมล%)ของ PHA	
			3HB	4HB
4-hydroxybutyric acid	4.9	19	69	31
$\gamma$ -butyrolactone	6.2	21	83	17
1,4-butanediol	5.3	22	89	11
1,6-butanediol	5.5	25	84	16
4-chlorobutyric acid	5.1	27	89	11





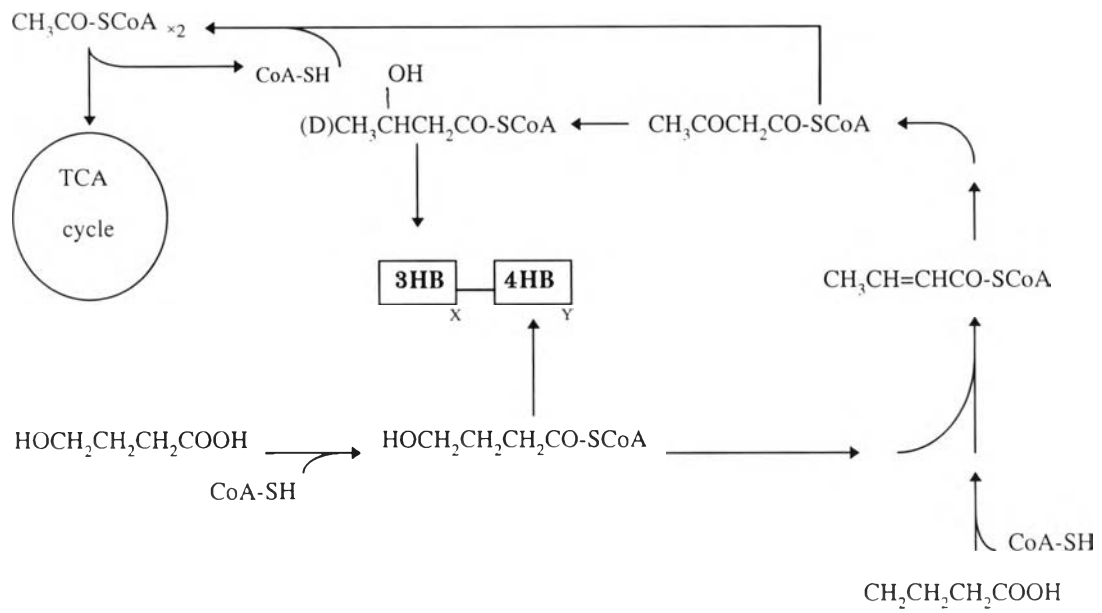
รูปที่ 7 วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-4HB) โดย *A. eutrophus* จากแหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน (Kunioka และคณะ, 1989)

เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก จะถูกเมตาโบไลซ์เปลี่ยนเป็น 4-hydroxybutyryl-CoA แล้วเข้าสู่ปฏิกิริยาปีตา-ออกซิเดชัน ซึ่งในปฏิกิริยานี้พบว่า 4-hydroxybutyryl-CoA ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนเป็น D-3-hydroxybutyryl-CoA ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นโมโนเมอร์ของ 3HB ดังนั้น

ถึงแม้จะใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริกเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงชนิดเดียวจะสามารถผลิต P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วนของ 4HB โมโนเมอร์สูงสุดเพียง 33 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้กรดบิวทริกและกรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริกเป็นแหล่งคาร์บอนผสม กรดบิวทริกจะถูกเมตาโบไลซ์เป็น D-3-hydroxybutyryl-CoA ทั้งหมด ซึ่งจะมีผลไปยับยั้งการเมตาโบไลซ์กรดบิวทริกและกรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริก ทำให้ผลิต P(3HB-co-4HB) ได้ปริมาณน้อยและมีสัดส่วน 4HB โมโนเมอร์ต่ำ

เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นแกมมา-บิวทิโรแลคโตน ( $\gamma$ -butyrolactone) จะถูกเปลี่ยนเป็น 4-hydroxybutyryl-CoA โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในขณะที่กรด 4-คลอโรบิวทริก (4-chlorobutyric) จะเปลี่ยนเป็น 4-hydroxybutyryl-CoA โดยปฏิกิริยาคีคลอรีเนชัน (dechlorination) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) รวมทั้งอัลเคนไดออล (alkanediol) ชนิดอื่นๆ ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่เช่น 1,6-hexanediol, 1,8-octanediol, 1,10-decanediol และ 1,12-dodecanediol จะเปลี่ยนโครงสร้างย้อนกลับเป็น 4-hydroxybutyryl-CoA โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งแหล่งคาร์บอนดังกล่าวมีราคาถูกกว่ากรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริก แต่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และผลิต P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของ 4HB ได้ปริมาณต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริก เป็นแหล่งคาร์บอน

Doi และคณะ (1992) รายงานว่าสามารถผลิต P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน 4HB โมโนเมอร์ 70-100 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทริกเป็นแหล่งคาร์บอน โดยเติมแอมโมเนียมซัลเฟตและซิเตรต ซึ่งมีผลทำให้ในปฏิกิริยาบีตา-ออกซิเดชันเมื่อ 4-hydroxy butyryl-CoA ถูกเมตาโบไลซ์เป็นอะซิโตะซิติลโคเอแล้วจะถูกเมตาโบไลซ์เป็นอะซิติลโคเอมากกว่าเปลี่ยนเป็น D-3-hydroxybutyryl-CoA เป็นผลทำให้เพิ่มโมลเปอร์เซ็นต์ของ 4HB ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-4HB) โดยเติมแอมโมเนียมซัลเฟตและซีเตรต เพื่อผลิต P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน 4HB โมโนเมอร์ 70-100 เปอร์เซ็นต์ (Doi, Unpublish, Manuscript, n.d.)

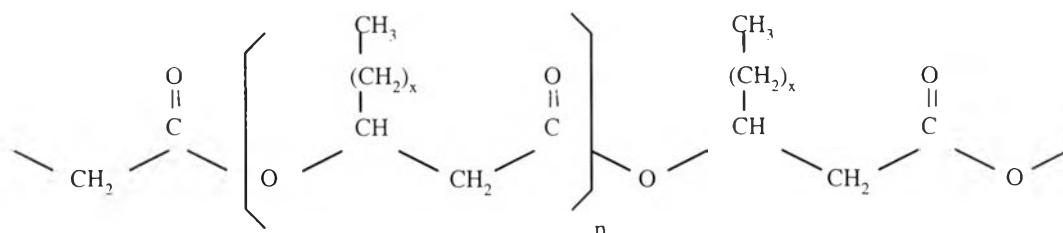


### สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของ PHA

PHA มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) (Holmes, 1985) เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบเส้น (Gross และคณะ, 1989) PHA สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) และกลับมาแข็งตัวได้อีก (rehardness) เมื่ออุณหภูมิลดลง จึงสามารถนำ PHA มาขึ้นรูปได้และนำกลับมาหลอมเหลวด้วยความร้อนได้อีก

สมบัติทางเทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานหรือไม่เป็นผลึก (amorphous, non-crystalline thermoplastic) จะมีสมบัติแข็ง เปราะ และใส เช่น พอลิสไตรีน กลุ่มที่สองคือเทอร์โมพลาสติกที่เป็นผลึกบางส่วน (partial, semi-crystalline thermoplastic) จะมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ สามารถเกิดผลึกได้บางส่วน จึงมีสมบัติขุ่น หนึบและมีลักษณะขุ่นทึบแสง (cloudy) เนื่องจากผลึกจะขวางทางเดินของแสงและทำหน้าที่กระจายแสง เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน

โครงสร้างของ PHA เป็นแบบหัวต่อหาง (head-to-tail configuration) และเป็นแบบไอโซแทกติก (stereoregular isotactic) (Dawes และ Senior, 1973) คือมีหมู่อัลคิลทุกหมู่ต่ออยู่ด้านเดียวกันของระนาบอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 9 จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกได้



รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างของ PHA แบบหัวต่อหาง และมีลักษณะเป็นไอโซแทกติก (หมายเหตุ  $n = 100-30000$ ;  $x = 0-10$ ) (Eggink และคณะ, 1992)

ในการพิจารณาว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดเหมาะกับการใช้งานประเภทใดนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยสำคัญที่สุดคือจะต้องทราบสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และสมบัติทางเชิงกล (mechanical properties) ของพอลิเมอร์เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

## สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร

1. อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) เป็นอุณหภูมิซึ่งพอลิเมอรในส่วนอสัณฐานเปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว (glass like) ไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubber like) เมื่อได้รับความร้อน ทำให้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  พอลิเมอรจะมีลักษณะแข็งและเปราะคล้ายแก้วเนื่องจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเพียงการสั่น ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  ปริมาตรของพอลิเมอรจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจลน ทำให้บางส่วนของโมเลกุลมีการเคลื่อนไหวมากขึ้นและเกิดการหมุนรอบแกนพันธะเดี่ยว โมเลกุลจึงอ่อนตัวและยืดหยุ่น (flexible) แต่ไม่ถึงกับหลอมเหลวและยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง

2. อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) คืออุณหภูมิที่พอลิเมอรเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหนืด พอลิเมอรอสัณฐานจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่เปราะคล้ายแก้วไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวจึงหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด

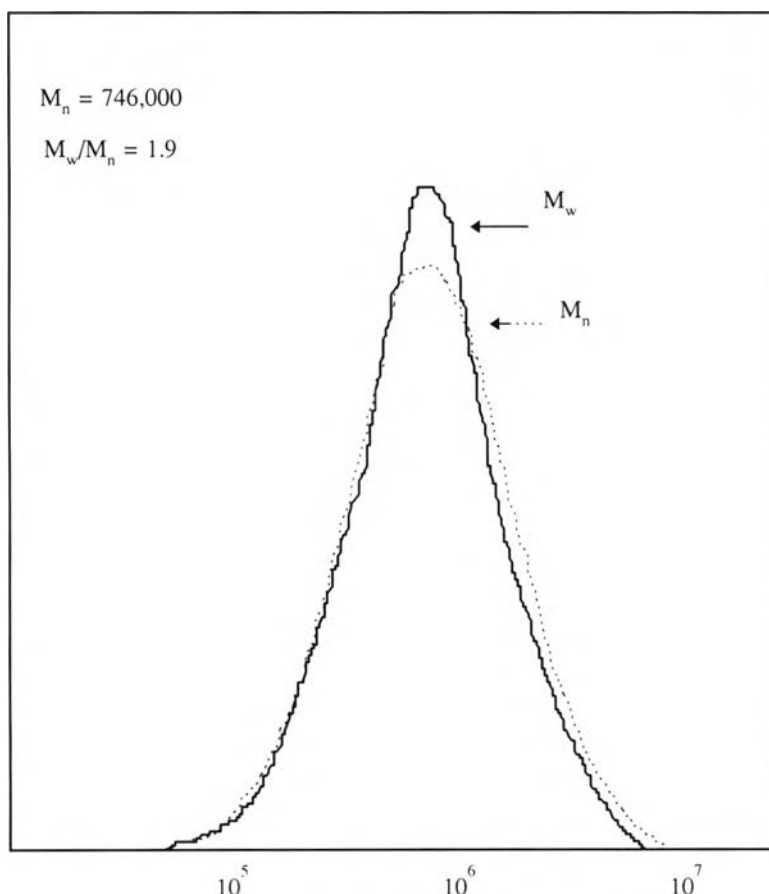
Scandola และคณะ (1992) รายงานว่า วิเคราะห์หาค่า  $T_m$  และ  $T_g$  ของ PHA เมื่อให้ความร้อนจนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวแล้วต้องทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (quench-cooled) จนมีสถานะเป็นของเหลวเย็นตัวยิ่งยวด (super cooled liquid) ที่กึ่งเสถียร (metastable) เนื่องจากโมเลกุลไม่มีเวลาพอในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบจึงกลายเป็นพอลิเมอรอสัณฐาน จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวอีกครั้งจะทำให้วิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันได้ง่ายขึ้น

3. น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) และ ค่าดัชนีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity index, PDI)

พอลิเมอรชนิดเดียวกันอาจประกอบด้วยโมเลกุลที่มีความยาวหรือน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน เรียกว่ามีน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบ พอลิดีสเพอร์ส (polydisperse) ดังนั้นจึงไม่สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลที่แน่นอนของพอลิเมอรได้ ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอรจะหาเป็นค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลมี 2 วิธี คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average molecular weight,  $M_n$ ) เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากจำนวนโมเลกุลเป็นหลัก และ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight average molecular weight,  $M_w$ ) เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากน้ำหนักของพอลิเมอร เมื่อมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution) จะทำให้ค่า  $M_w$  มากกว่า  $M_n$  เสมอ เนื่องจากโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีเป็นจำนวนมากกว่าโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และค่า  $M_w$  จะเท่ากับ  $M_n$  เมื่อทุกโมเลกุลมีขนาดและน้ำหนักเท่ากันหรือเป็น โมโนดีสเพอร์ส (monodisperse) การหาค่าดัชนีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลคำนวณจากสูตร

$$PDI = M_w/M_n$$

เมื่อใดที่ PDI มีค่าสูงแสดงว่ามีการกระจายของขนาดและน้ำหนักโมเลกุลมาก (โมเลกุลเล็กๆ มีมาก) พอลิเมอร์แบบเส้นจะมีช่วงการกระจายของขนาดและน้ำหนักโมเลกุลแคบกว่าพอลิเมอร์แบบกิ่ง ค่า PDI ของพอลิเมอร์แบบเส้นจะมีค่าประมาณ 2 ในขณะที่พอลิเมอร์แบบกิ่งจะมีค่า PDI ประมาณ 20 ถึง 50



รูปที่ 10 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PHB จาก *A. cutrophus* เมื่อใช้ฟรักโทสเป็นแหล่งคาร์บอน (Doi, 1990)

#### สมบัติทางเชิงกลของพอลิเมอร์

1. ความเค้น (stress,  $S$ ) คือแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงจากภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง ซึ่งความเค้นจะกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่รับแรง ความเค้นเป็นอัตราส่วนของแรง ( $F$ ) ที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ( $A$ ) มีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi), นิวตันต่อพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร ( $N/mm^2$ ) หรือ ปาสกัล (Pa) (สูตร  $S = F/A$ )

2. ความเครียดคิลาสติก (Elastic strain,  $\epsilon$ ) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำและสามารถคืนตัวกลับได้ (reversible) วัสดุที่มีความเครียดคิลาสติกสูงจะเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (elasticity) โดยความเครียดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta L$ ) เนื่องจากการยืดหรือหดต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ ( $L_0$ ) (สูตร  $\epsilon = \Delta L/L_0$ )

3. โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) หรือค่ายังส์โมดูลัส (Young's Modulus) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดคิลาสติกตามกฎของฮุก (Hooke's Law) (สูตร  $E = S/\epsilon$ )

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของ PHA จาก *A.eutrophus* เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์จากปิโตรเคมี (Lee, 1996)

PHA	Tg (°c)	Tm (°c)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation to break(%)
P(3HB)	10	179	3.5	40	5
P(3HB-co-3HV)					
3 mol% 3HV	8	170	2.9	38	-
9 mol% 3HV	6	162	1.9	37	-
14 mol% 3HV	4	150	1.5	35	-
20 mol% 3HV	-1	145	1.2	32	-
25 mol% 3HV	-6	137	0.7	30	-
P(3HB-co-4HB)					
3 mol% 4HB	-	166	-	28	45
10 mol% 4HB	-	159	-	24	242
16 mol% 4HB	-	-	-	26	444
64 mol% 4HB	-	50	30	17	591
90 mol% 4HB	-	50	100	65	1080
Polypropylene	-10	170	1.7	34.5	400
Polyethylene terephthalene	69	262	2.2	56	7300
Polystyrene	-	110	3.1	50	-

### ผลของสัดส่วน 3HB, 3HV และ 4HB (โมลเปอร์เซ็นต์) ที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆของ PHA

Holmes (1985) รายงานว่า PHB มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับพอลิเอทิลีน แต่มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน เช่น ระดับความเป็นผลึก  $T_g$  และ  $T_m$  เมื่อพิจารณาสมบัติทางเชิงกลของ PHB พบว่ามีความแข็งและเปราะ จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

เมื่อมีการค้นพบโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) Bluhum (1986) จึงทำการศึกษาผลของสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของ 3HV โมโนเมอร์ที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆของโคพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับ PHB และรายงานว่ P(3HB-co-3HV) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีการเรียงตัวของโมโนเมอร์แบบสุ่ม แสดงลักษณะ ไอโซไดมอร์ฟิก (isodimorphic) เนื่องจากการเกิดผลึกร่วมกัน (cocrystallization) ระหว่าง 3HB และ 3HV โมโนเมอร์เพราะมีโครงสร้างของผลึกที่คล้ายคลึงกัน Organ และ Barham (1988) ศึกษาลักษณะผลึกและการเกิดนิวคลีโอชัน (nucleation) ของ P(3HB-co-3HV) พบว่า เมื่อมีสัดส่วนของ 3HV โมโนเมอร์เพิ่มมากขึ้นจะไปลดระดับความเป็นผลึก (% crystallinity),  $T_m$  และ  $T_g$  ของโคพอลิเมอร์ ทำให้ความแข็งลดลง มีความเหนียวและใสเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานได้กว้างมากขึ้น

Doi (1990) รายงานว่าการเพิ่มความเหนียวของ P(3HB-co-3HV) โดยการเพิ่มสัดส่วนของ 3HV โมโนเมอร์นั้นมีข้อจำกัด เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของ 3HV โมโนเมอร์สูงถึง 40 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ( $T_m = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และพบว่าเมื่อสัดส่วนของ 3HV โมโนเมอร์อยู่ในช่วง 30 ถึง 60 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีลักษณะนิ่มมาก (very soft) เพราะเกิดผลึกแบบซูดิโอยด์ (pseudoeutactic) แต่ถ้ามี่ความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของแต่ละโมโนเมอร์มาก เช่น P(3HB-co-71%3HV) จะมีสมบัติแข็งและเปราะคล้าย PHB เนื่องจากการเกิดผลึกร่วมกันของ 3HB และ 3HV จะลดลง โดยเกิดเป็นผลึกของ 3HB (PHB lattice) และผลึกของ 3HV (PHV lattice) จึงทำให้ระดับความเป็นผลึกและค่า  $T_m$  เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 6



ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลของการเพิ่มสัดส่วน 3HV ในช่วง 0-71 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆของ P(3HB-co-3HV) (Holmes, 1988 และ Doi, unpublished result ref. อ้างถึงใน Doi, 1990)

สัดส่วน(โมลเปอร์เซ็นต์)		Tm	Tg	Young's Modulus	Stress	Tensile strength	Elongation
3HB	3HV	°c	°c	GPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
100	0	179	10	3.5	-	40	5
97	3	170	8	2.9	-	38	-
91	9	162	6	1.9	-	37	-
86	14	150	4	1.5	-	35	-
80	20	145	-1	1.2	-	32	-
75	25	137	-6	0.7	-	30	-
66	34	97	-8	-	13	18	970
45	55	77	-10	-	12	16	1200
29	71	83	-13	-	-	11	5

Kunioka และ Doi (1990) ศึกษาลักษณะของโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน 4HB โมโนเมอร์ในช่วง 0 ถึง 44 โมลเปอร์เซ็นต์และรายงานว่ P(3HB-co-4HB) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีการเรียงตัวเป็นแบบสุ่ม ระดับความเป็นผลึกลดลงจาก 55 เปอร์เซ็นต์ เป็น 14 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งอุณหภูมิหลอมเหลวจะลดลงจาก 180 °c เป็น 150 °c เมื่อมีสัดส่วนของ 4HB โมโนเมอร์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อมีสัดส่วนของ 4HB โมโนเมอร์สูงกว่า 40 โมลเปอร์เซ็นต์ โคพอลิเมอร์จะมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง (elastic rubber) ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลของการเพิ่มสัดส่วน 4HB ในช่วง 0-44 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆของ P(3HB-co-4HB) (Doi, 1990)

สัดส่วน(โมลเปอร์เซ็นต์)		ระดับความเป็นผลึก (%)	Stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
3HB	4HB				
100	0	60	-	43	5
97	3	55	34	28	45
90	10	45	28	24	242
84	16	45	19	26	444
56	44	15	-	10	511

Scandola และคณะ (1990) ทำการศึกษา P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน 4HB โมโนเมอร์ในช่วง 7 ถึง 82 โมลเปอร์เซ็นต์ และรายงานว่า P(3HB-co-4HB) เป็นโคพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกบางส่วน (partial crystalline) นอกจากนี้ 4HB ไม่สามารถเกิดผลึกร่วมกับ 3HB ได้ สัดส่วนของ 4HB โมโนเมอร์จะมีผลไปลดค่า  $T_g$  ของโคพอลิเมอร์มากกว่า 3HV โมโนเมอร์ จึงเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติของวัสดุหลากหลายตั้งแต่พลาสติกที่มีความเป็นผลึก (plastic crystalline) ไปจนถึงพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นคล้ายยาง Anderson (1990) ได้รายงานสรุปว่าโคพอลิเมอร์ของ P(3HB-co-4HB) มีความน่าสนใจมากกว่า PHB และ P(3HB-co-3HV) เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างมากขึ้น

### การนำ PHA มาขึ้นรูป

Holmes (1988) รายงานว่า PHB สามารถนำมาขึ้นรูปได้โดยการฉีดเข้าแบบ (injection molding) และการอัดรีด (extrusion molding) แต่กระบวนการผลิตจะต้องใช้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุดเนื่องจาก PHB จะไม่เสถียร (melt unstable) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว

เนื่องจาก PHB เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งและเปราะจึงเหมาะสำหรับการผลิตเป็นเส้นใย (fiber) เพราะโครงสร้างของ PHB เป็นพอลิเอสเทอร์จึงสามารถดึง (drawn) เป็นเส้นใย โดยใช้เทคนิคพิเศษซึ่งปรับปรุงให้เหมาะกับ PHB ด้วยการปั่น (spin) และดึงเป็นเส้นใยด้วยการละลาย

PHB ให้เป็นเจลในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-dichloroethane) ซึ่งสามารถผลิตเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง (ค่า Modulus = 8 GPa และ tensile strength = 900 MPa)

ในการนำ P(3HB-co-3HV) มาขึ้นรูปจะเลือกโคพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของ 3HV ไม่เกิน 25 โมลเปอร์เซ็นต์มาเติมสาร nucleating agent เพื่อช่วยเพิ่มขนาด spherulite ซึ่งจะให้มีระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีความยืดหยุ่นและความเหนียว เมื่อนำ P(3HB-co-17%3HV) มาดึงเป็นเส้นใยด้วยวิธีการเดียวกันจะได้เส้นใยที่มีความเหนียวและใสมากขึ้น สำหรับแผ่นฟิล์มที่ผลิตจาก PHB และ P(3HB-co-17%3HV) โดยวิธี biaxially drawn มีคุณสมบัติที่ดีกว่าแผ่นฟิล์มพอลิโอเลฟิน (polyolefin film) เนื่องจากกาซออกซิเจนแพร่ผ่านได้น้อยกว่า จึงเหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ (Holmes, 1988 อ้างถึงใน Doi, 1990)

### การนำ PHA ไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

Reusch และคณะ [1992 อ้างถึงใน Lee, (1996)] รายงานว่า D(-)-3-hydroxybutyrate เป็นสารมัธยฐานของการสันดาป (intermediate metabolite) ในสัตว์ชั้นสูง โดยตรวจพบ D(-)-3-hydroxybutyrate ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำความยาวประมาณ 100-200 โมโนเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเป็นองค์ประกอบของ ion channel บริเวณเซลล์เมมเบรน

ในร่างกายมนุษย์จะตรวจพบ (D)-3-hydroxybutyrate ปริมาณค่อนข้างมากในส่วนพลาสมาของเลือด ดังนั้นการปลูกถ่าย (implant) วัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) ที่ผลิตจาก PHB ในร่างกายมนุษย์จึงไม่ทำให้เกิดภาวะการต่อต้านสิ่งแปลกปลอม

วัตถุประสงค์ของการนำ PHA มาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพสำหรับการปลูกถ่ายในร่างกายของมนุษย์และสัตว์นั้น เนื่องจาก PHA มีคุณสมบัติสามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์เอสเทอร์เรส (Holmes, 1988 อ้างถึงใน Anderson และ Dawes, 1990) รวมทั้งคุณสมบัติสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Galgut และคณะ, 1991 อ้างถึงใน Gogolewski และคณะ, 1993)

Korsako และคณะ [1983 และ 1984 อ้างถึงใน Anderson และ Dawes (1990)] เกิดความคิดที่จะนำ PHA มาผลิตเป็นแคปซูลเพื่อบรรจุยารักษาโรคหรือวัคซีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งต้องการให้ค่อยๆซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายทีละน้อยเป็นระยะเวลานาน จึงทำการทดลองนำ PHB ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆกันมาผลิตเป็นแคปซูล ซึ่งภายในบรรจุยา 7-ไฮดรอกซีเอทิลทีโอฟิลลีน (7-hydroxyethyltheophylline) ปลูกถ่ายในส่วนเนื้อเยื่อใต้ผิวหนังของหนูทดลอง เพื่อศึกษาการถูกย่อยสลายและความสามารถในการปลดปล่อยยา พบว่า PHB ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า  $10^5$  ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านนี้

ในการนำ PHA มาผลิตเป็นวัสดุปลูกถ่ายในระยะสั้น จำเป็นที่จะต้องทราบถึงวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ เช่น ในการใช้เพื่อเป็นหลอดเลือดเทียม (blood vessel) จะต้องการ PHA ชนิดที่สามารถรักษาสมบัติทางเคมีและเชิงกลได้ตลอดระยะเวลาที่ทำการปลูกถ่าย หากนำมาใช้เพื่อการบำบัดรักษาโรคที่เกี่ยวกับกระดูก (เช่น โรคกระดูกเปราะ, กระดูกร้าวหรือหัก) โดยนำมาขึ้นรูปเป็นข้อต่อ กระดูกเทียม นอตยึดกระดูก หรือเล็บในส่วน intramedulla จะต้องการ PHA ชนิดที่สามารถรักษาสมบัติทางเคมีและเชิงกลได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วสามารถถูกย่อยสลายและถูกแทนที่ด้วยกระดูกซึ่งถูกกระตุ้นให้เจริญด้วยกระแสไฟฟ้า (piezoelectric healing) (Daniels และคณะ, 1990 อ้างถึงใน Gogolewski และคณะ, 1993)

Gogolewski และคณะ (1993) ทำการทดลองปลูกถ่ายชิ้น PLA, PHB และ P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วนของ 3HV ในช่วง 5 ถึง 22 โมลเปอร์เซ็นต์ ในส่วนเนื้อเยื่อไตผิวหนังของหนูทดลองเป็นระยะเวลา 6 เดือน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการตอบสนองของเนื้อเยื่อและอัตราการถูกย่อยสลาย ผลการทดลองยืนยันว่าในช่วงระยะเวลา 3 เดือนแรกไม่พบการตอบสนองที่รุนแรงของเนื้อเยื่อ ไม่มีการอักเสบหรือเป็นหนองและไม่ตรวจพบการเน่าของเนื้อเยื่อ เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของเนื้อเยื่อจากการสังเกตปริมาณของเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) และเซลล์เนื้อเยื่อรูปกระสวย (fibroblast tissue) พบว่าเนื้อเยื่อมีการตอบสนองต่อ PHB และ P(3HB-co-3HV) ต่ำกว่า PLA เพราะ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรต่อความร้อน ดังนั้นในการขึ้นรูปจึงต้องมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ในขณะที่ PHB และ P(3HB-co-3HV) ค่อนข้างเสถียรต่อความร้อนจึงไม่ต้องเติมสารเร่งปฏิกิริยา จึงสามารถทำให้วัสดุชีวภาพที่ผลิตจาก PHA บริสุทธิ์ได้ง่ายกว่า PLA เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อ PHB และ P(3HB-co-3HV) พบว่า P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของ 3HV เพิ่มขึ้น จะมีการปนเปื้อนเพิ่มมากขึ้นจาก 3HV โมโนเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงไปเพิ่มอัตราการตอบสนองของเนื้อเยื่อ อย่างไรก็ตามสารน้ำหนักโมเลกุลต่ำเหล่านี้จะถูกย่อยสลายจนหมด ดังนั้นอัตราการตอบสนองของเนื้อเยื่อที่มีต่อพอลิเมอร์เมื่อปลูกถ่ายนาน 6 เดือนจึงเท่ากันทุกชนิด ในการตรวจสอบอัตราการถูกย่อยสลายพบว่าเมื่อปลูกถ่ายนาน 6 เดือน PLA จะถูกย่อยสลายที่บริเวณแกนกลางมากกว่าพื้นผิวสามารถถูกย่อยสลาย (56-99%) และสูญเสียน้ำหนัก (weight loss = 0-50%) มากกว่า PHA ซึ่งจะถูกย่อยสลายเพียง 15-43 เปอร์เซ็นต์ สูญเสียน้ำหนัก 0-1.6 เปอร์เซ็นต์ โดย P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของ 3HV เพิ่มขึ้นจะถูกย่อยสลายมากขึ้น

## การนำ PHA ไปใช้เพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์พลาสติกจากปิโตรเคมี

Byrom [1994 อ้างถึงใน Lee, (1996)] รายงานว่า เนื่องจากมาตรการลดปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกจากปิโตรเคมี บริษัทต่างๆทั่วโลกจึงมีความสนใจที่จะนำ PHA มาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมี รวมทั้งปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีส่วนประกอบของ PHA บริษัทชินีคา ไบโอโพรดักท์ ประเทศอังกฤษเป็นผู้ผลิต P(3HB) และ P(3HB-co-3HV) เพื่อการค้าในระดับอุตสาหกรรมเป็นบริษัทแรก โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า ไบโอโพล (BIOPOL) มีกำลังผลิต 1,000 ตันต่อปี ในราคา 16 ดอลลาร์ต่อ 1 กิโลกรัม

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากไบโอโพลชนิด P(3HB-co-3HV) ออกวางจำหน่ายเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1990 โดยบริษัทเวลลา (Wella, German Hair care) ประเทศเยอรมัน ผลิตเป็นขวดแชมพู (SANARA) ในขณะที่ประเทศญี่ปุ่นนำ PHA มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เช่น ถาดสำหรับบรรจุอาหาร ค้ามืดโกน เป็นต้น (Lee, 1996)

## แนวทางการนำ PHA ไปใช้ประโยชน์ (Lee, 1996)

### 1. การใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์

1.1 วัสดุทางด้านศัลยกรรม เช่น ไหมเย็บแผล เข็มเย็บแผล ผ้าซับเลือด และหลอดเลือดเทียม เป็นต้น

1.2 วัสดุเพื่อการรักษาโรค เช่น แคปซูลบรรจุยาหรือวัคซีน, ข้อต่อหรือกระดูกเทียม ในการรักษาโรคทางกระดูกโดยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

### 2. การใช้ประโยชน์ทางเกษตรกรรมและการปศุสัตว์

2.1 แคปซูลสำหรับบรรจุยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ปุ๋ย เมื่อโปรยลงในแปลงเพาะปลูก จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินแล้วปลดปล่อยตัวยาออกมาทีละน้อย ช่วยให้ประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการฉีดยาป้องกันโรครวมทั้งการใส่ปุ๋ย

2.2 แคปซูลสำหรับบรรจุภูมิคุ้มกันโรคสัตว์ เช่น ยาถ่ายพยาธิ วัคซีนป้องกันโรคระบาด เป็นต้น ช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการกระตุ้นซ้ำ (boost)

### 3. การใช้เพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์พลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

3.1 วัสดุและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เช่น ค้ามืดโกน ผ้าอ้อมสำเร็จรูป ผ้าอนามัย ถาดสำหรับบรรจุอาหาร แผ่นฟิล์มถนอมอาหาร เป็นต้น

3.2 เส้นใยสำหรับเครื่องนุ่งห่ม (non-woven fabric) (Egging และคณะ, 1992)

### มูลเหตุจูงใจในการทำการวิจัย

ปัจจุบันประเทศในกลุ่มที่พัฒนาแล้วต่างมีมาตรการลดปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี รวมทั้งทำการวิจัยและค้นคว้าเพื่อพัฒนาให้ได้พลาสติกที่สามารถถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติ การใช้พลาสติกชีวภาพเป็นวิธีการซึ่งสามารถช่วยบรรเทาปัญหาได้ทางหนึ่ง คณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและเล็งเห็นประโยชน์ของการใช้พลาสติกชีวภาพ จึงทำการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อผลิตพลาสติกชีวภาพให้มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ โดยเริ่มจากได้ทำการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างและสะสม PHA จากงานวิจัยของ อรุณ ชาญชัยชาววิวัฒน์ (2536) พบว่า *Alcaligenes* sp. สายพันธุ์ A-04 เป็นสายพันธุ์ที่สามารถสร้างและสะสม PHB เมื่อใช้ฟรักโทสเป็นแหล่งคาร์บอน ผลิต PHB 21 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง (คิดเป็น 0.75 กรัมต่อลิตร) เมื่อทำการทดลองในระดับขวดเขย่า โดยใช้วิธีการเลี้ยงแบบ 2 ขั้นตอนในอาหาร MSM สูตรปรับปรุง สามารถผลิต PHB เพิ่มได้เป็น 49 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง (คิดเป็น 2.03 กรัมต่อลิตร) ชนัญ ผลประไพ (2537) ศึกษาสภาวะการเลี้ยง *Alcaligenes* sp. A-04 ในถังหมักขนาด 5 ลิตร เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิต PHB โดยควบคุมอัตราการกวนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศ 1.8 vvm ที่อุณหภูมิ 30 °ซ เมื่อให้ปริมาณฟรักโทส 30 กรัมต่อลิตร และแอมโมเนียมซัลเฟตเท่ากับ 1.5 กรัมต่อลิตร สามารถผลิต PHB เพิ่มขึ้นเป็น 79 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง (คิดเป็น 7.21 กรัมต่อลิตร) แต่เนื่องจาก PHB มีสมบัติที่แข็งและเปราะ จึงมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นในขณะเดียวกันคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการผลิตโคพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากขึ้น อัญชญา ศุภดิษฐ์ (2537) ได้รายงานการสร้างและสะสมโคพอลิเมอร์โดย *Alcaligenes* sp. A-04 พบว่าสามารถสร้างและสะสมโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วน 3HV ในช่วง 0-95 โมลเปอร์เซ็นต์ และ P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วน 4HB ในช่วง 0-38 โมลเปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า *Alcaligenes* sp. A-04 สามารถสร้างและสะสมเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) โดยแหล่งคาร์บอนที่ใช้ในการผลิต 3HB โมโนเมอร์คือกรดบิวทิริก, 3HV โมโนเมอร์คือกรดวาเลอริก และ 4HB โมโนเมอร์คือ โซเดียม-4-ไฮดรอกซี-บิวทิเรต เมื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลเปรียบเทียบระหว่าง PHB P(3HB-co-3HV) และ P(3HB-co-3HV-co-4HB) พบว่าเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) มีลักษณะและสมบัติหลายประการที่น่าสนใจมากกว่าไฮโปลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถแปรสัดส่วนของโมโนเมอร์แต่ละชนิดซึ่งเป็นองค์ประกอบในเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) ได้หลากหลายมากกว่าโคพอลิเมอร์ ซึ่งสัดส่วนโมลเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมของแต่ละโมโนเมอร์ต่างมีข้อดีที่จะทำให้เทอร์พอลิเมอร์มีสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานแต่ละด้านแตกต่างกัน

โดยพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของ 3HV โมโนเมอร์ไม่เกิน 40 โมลเปอร์เซ็นต์ จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติเหนียวและใส (Holmes, 1988 และ Doi, 1990) ในขณะที่ 4HB โมโนเมอร์ในสัดส่วนที่มากกว่า 40 โมลเปอร์เซ็นต์ จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติยืดหยุ่น แต่จะมีผลลดอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (Kunioka และ Doi, 1990) ดังนั้นการมี 3HB โมโนเมอร์รวมอยู่ในสายพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดผลึกร่วมกับ 3HV โมโนเมอร์จะทำให้เทอร์พอลิเมอร์มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นรวมทั้งเพิ่มความแข็งแรง (เพิ่มค่า young's modulus) ดังนั้นเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) จึงมีสมบัติที่ดีของแต่ละโมโนเมอร์ร่วมกัน กล่าวคือ สามารถทำให้เทอร์พอลิเมอร์มีทั้งความเหนียว ความใส ความยืดหยุ่นและแข็งแรง และสามารถเพิ่มอัตราการถูกย่อยสลายโดยผลิตให้เทอร์พอลิเมอร์มีสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของ 4HB สูงขึ้น (Kunioka, 1989) ดังนั้นจึงสามารถผลิตเทอร์พอลิเมอร์ให้มีสมบัติหลากหลายตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการแปรสัดส่วน (โมลเปอร์เซ็นต์) ของแต่ละโมโนเมอร์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) โดย *Alcaligenes* sp. สายพันธุ์ A-04 ที่มีสัดส่วนของโมโนเมอร์ต่างๆกัน โดยสัดส่วนของแต่ละโมโนเมอร์ (โมลเปอร์เซ็นต์) ขึ้นกับชนิดและการแปรอัตราส่วนของแหล่งคาร์บอน (กรัมต่อลิตร) รวมถึงวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทดสอบเชิงกลของเทอร์พอลิเมอร์ต่างๆที่ผลิตได้ และเนื่องจากในปัจจุบันรายงานการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติด้านต่างๆของเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) มีน้อย ดังนั้นในการแปรสัดส่วน(โมลเปอร์เซ็นต์)ของแต่ละโมโนเมอร์ จึงอ้างอิงรายงานการวิจัยของโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) และ P(3HB-co-4HB) จากคณะผู้วิจัยกลุ่มอื่น โดยมุ่งหวังที่จะให้งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการนำเทอร์พอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งานได้เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าการผลิตเทอร์พอลิเมอร์มีต้นทุนสูงเนื่องมาจากราคาของแหล่งคาร์บอนที่ใช้ ดังนั้นจึงศึกษาการเปลี่ยนชนิดของแหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิตโมโนเมอร์ 4HB จาก โซเดียม 4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต เป็น 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งมีราคาถูกกว่าประมาณ 4 เท่า ศึกษาการผลิตเทอร์พอลิเมอร์ให้มีสัดส่วนของ 4HB โมโนเมอร์เพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถผลิตเทอร์พอลิเมอร์ได้สัดส่วนของโมโนเมอร์แต่ละชนิดตามที่ต้องการ และศึกษาการวิธีการเลี้ยง *Alcaligenes* sp. A-04 ในอาหารเพื่อการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อปรับปรุงวิธีการเลี้ยงเชื้อแบบเดิม ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและสิ้นเปลืองอาหารสำหรับเลี้ยงกล้าเชื้อ

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาข้อมูลในการผลิตเทอร์พอลิเมอร์โดย *Alcaligenes* sp. สายพันธุ์ A-04 ซึ่งมีลักษณะและสมบัติของเทอร์พอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของโมโนเมอร์ต่างๆกัน เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกผลิตเทอร์พอลิเมอร์ชนิดที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้องตามวัตถุประสงค์ต่อไป

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมกล้าเชื้อ *Alcaligenes* sp. A-04 เพื่อให้ได้ปริมาณเซลล์มาก และมีประสิทธิภาพในการสร้างเทอร์พอลิเมอร์
2. การศึกษาชนิด ปริมาณของแหล่งคาร์บอน และระยะเวลาในการเลี้ยงเชื้อ *Alcaligenes* sp. A-04 ที่เหมาะสม เพื่อผลิตเทอร์พอลิเมอร์ให้มีสัดส่วนแต่ละโมโนเมอร์แตกต่างกัน
3. การศึกษาวิธีเลี้ยง *Alcaligenes* sp. A-04 เพื่อการผลิตเทอร์พอลิเมอร์ โดยวิธีการเลี้ยงในอาหารเพื่อการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน
4. ผลิตเทอร์พอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนโมโนเมอร์แต่ละชนิดแตกต่างกัน เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของเทอร์พอลิเมอร์ โดยเลือกปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของแต่ละโมโนเมอร์ที่เหมาะสม (ทำให้มีสมบัติด้านต่างๆได้ตามความต้องการ) จากที่มีผู้รายงานไว้ในการศึกษาเรื่องโคพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์