

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต [Polyhydroxyalkanoate (PHA)]

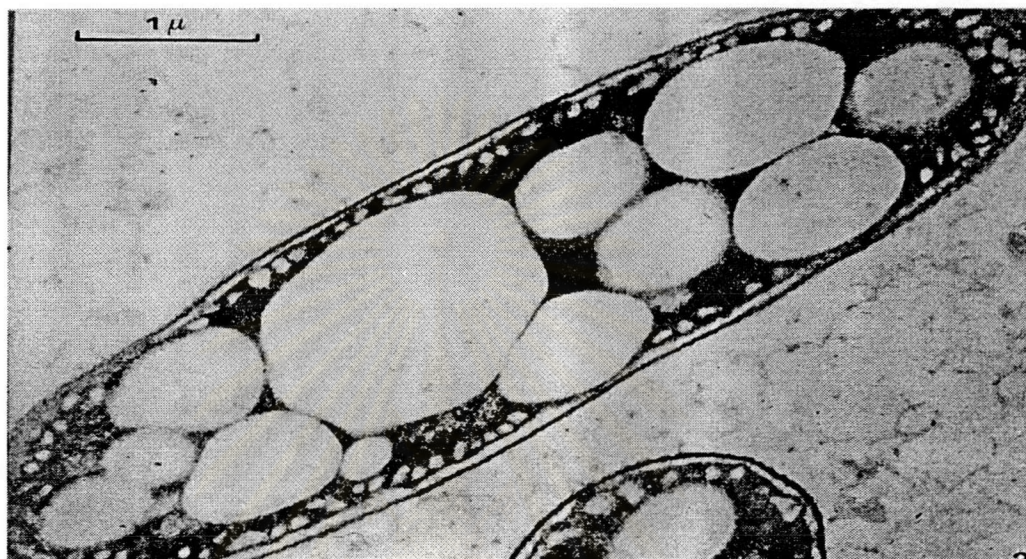
เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของ hydroxyalkanoate ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นและสะสมได้ทั้งในสิ่งมีชีวิตประเภทโปรคาริโอต (prokaryote) และ ยูคาริโอต (eukaryote) ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก แบคทีเรียแกรมลบ รา สาหร่ายและยีสต์ PHA ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1926 จากรายงานของ Lemoigne (อ้างถึงในBraunegg,1998) โดยจากรายงานพบ พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate,PHB) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งในกลุ่มของ PHA ในเชื้อ *Bacillus megaterium* และเชื่อว่าทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสะสม ต่อมาในปี 1958 ความสนใจเกี่ยวกับการสร้างและสะสม PHB ในเซลล์ของ *Bacillus* spp. กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งหนึ่งโดย MacraeและWilkinson พบว่า *Bacillus megaterium* สะสม PHB ในสภาวะที่อาหารมีสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) อยู่ในสัดส่วนที่สูง และอัตราการย่อยสลายของ PHB ในเซลล์ *Bacillus megaterium* และ *Bacillus cereus* เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเซลล์อยู่ในสภาวะที่ขาดแหล่งคาร์บอนและพลังงาน จากรายงานนี้เป็นการสนับสนุนว่าเซลล์สร้างและสะสม PHB เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน จากนั้นจึงได้มีการศึกษาสมบัติด้านอื่น ๆ ของ PHB ทั้งทางด้านเคมี และเชิงกล นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1974 Wallen และ Rohwedder ได้รายงานว่าพบโมโนเมอร์ชนิดใหม่ เช่น 3-hydroxyvalerate หรือ 3HV 3-hydroxyoctanoate หรือ 3HC และ 3-hydroxyheptanoate หรือ 3HH ซึ่งจะประกอบรวมกับ PHB เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ที่สกัดด้วยคลอโรฟอร์ม โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่แตกต่างจาก PHB คือ มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าและละลายในเอทานอลร้อน จึงเสนอให้เรียกสารกลุ่มนี้ว่า PHA จากการค้นพบข้างต้นทำให้นักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาและรายงานการค้นพบ PHA ในจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มากถึง 80 ชนิด (Braunegg, 1998) ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จุลินทรีย์ที่สามารถสร้างและสะสม PHA (Brandl และคณะ, 1990; Doi, 1990; Hassanและคณะ, 1996; Suzuki และคณะ, 1996)

<i>Acidovorax</i>	<i>Gamphosphaeria</i>	<i>Photobacterium</i>
<i>Acinetobacter</i>	<i>Hamophilus</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Actinobacillus</i>	<i>Halobacterium</i>	<i>Rhizobium</i>
<i>Actinomycetes</i>	<i>Hydrogenophaga</i>	<i>Rhodobacter</i>
<i>Alcaligenes</i>	<i>Hyphomicrobium</i>	<i>Rhodospirillum</i>
<i>Aphanothece</i>	<i>Lamprocystis</i>	<i>Sphaerotilus</i>
<i>Aquaspirillum</i>	<i>Lampropedia</i>	<i>Spirillum</i>
<i>Azotobacter</i>	<i>Leptotrix</i>	<i>Spirulina</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Methylobacterim</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Beggiatoa</i>	<i>Methylocystis</i>	<i>Synechococcus</i>
<i>Beijerinckia</i>	<i>Methylosinus</i>	<i>Syntrophomonas</i>
<i>Burkladeria</i>	<i>Micrococcus</i>	<i>Thiobacillus</i>
<i>Caulobacter</i>	<i>Microcoleus</i>	<i>Thiocapsa</i>
<i>Chlorofrexeus</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Thiocystis</i>
<i>Chlorogloea</i>	<i>Moraxella</i>	<i>Thiodictyon</i>
<i>Chromatium</i>	<i>Mycoplana</i>	<i>Thiopedia</i>
<i>Chromobacterium</i>	<i>Nitrobacter</i>	<i>Thiosphaera</i>
<i>Clostridium</i>	<i>Nitococcus</i>	<i>Vibrio</i>
<i>Dexia</i>	<i>Nocardia</i>	<i>Xanthobacter</i>
<i>Ectothiorhodospira</i>	<i>Oceanospirillum</i>	<i>Zoogloea</i>
<i>Escherichia</i>	<i>Paracoccus</i>	
<i>Ferrobacillus</i>	<i>Paucispirillum</i>	

โดยการสะสมของ PHA นี้ เป็นการสะสมอยู่ในรูปของแกรนูลภายในเซลล์ ซึ่งพบว่ามี การสะสม แกรนูล ในระดับที่สูงถึง 90 % ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (Madison,1999) จุลินทรีย์ใช้ PHA เป็นแหล่งพลังงาน/แหล่งคาร์บอน หรือเป็น reducing – power ในจุลินทรีย์ รวมทั้งใช้ สำหรับการสร้างสปอร์ (sporulation) ใน *Bacillus* spp.(Willamson และ Wilkinson, 1958) และ การสร้างซีสต์ (encysment) ใน *Azotobacter* spp. (Dawes, 1974) เช่นเดียวกับการสะสมแป้งในพืชและการสะสมไกลโคเจนในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง (Bloembergen และคณะ, 1986) เริ่มมีการสะสม

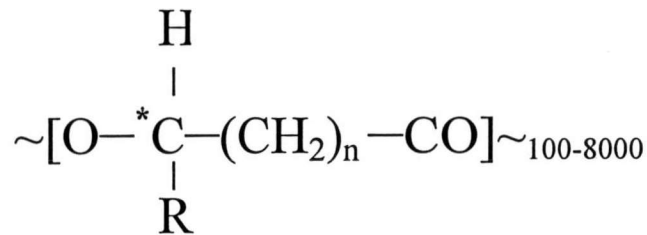
PHA ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์เมื่อการเจริญอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณแหล่งคาร์บอนมากเกินไป แต่มีปริมาณของแหล่งไนโตรเจนจำกัด ลักษณะของแกรนูลที่สะสมในเซลล์แบคทีเรียดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แกรนูลของ PHB ที่สะสมอยู่ในเซลล์แบคทีเรีย (<http://www.friendlypackaging.org.uk>)

โครงสร้างของ PHA

PHA มีโครงสร้างเป็นพอลิเอสเทอร์สายตรง ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ในกลุ่มไฮดรอกซีที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ระหว่าง หมู่คาร์บอกซิลิกของโมโนเมอร์ตัวหนึ่ง กับหมู่ไฮดรอกซีของโมโนเมอร์อีกตัวหนึ่ง ตรงตำแหน่งปีต้าคาร์บอน ซึ่งเป็นไครัลคาร์บอน (chiral carbon) ที่แสดงโครงสร้างเป็น R-configuration การเชื่อมกันของแต่ละโมโนเมอร์เป็นแบบหางต่อหัว (isotactic) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของ PHA ซึ่ง ~ หมายถึง พันธะเอสเทอร์ และ * หมายถึง ตำแหน่งปีตา คาร์บอน (Lee, 1996a; Lee, 1996b; Doi, 1990)

เมื่อ n = 1	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีโพรพิโอเนต)	; P(3HP)
	R = เมทิล (CH ₃)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต)	; P(3HB)
	R = เอทิล (C ₂ H ₅)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต)	; P(3HV)
	R = โพรพิล (C ₃ H ₇)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีเอกซะโนเอต)	; P(3HC)
	R = บิวทิล (C ₄ H ₉)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีเฮปตะโนเอต)	; P(3HH)
	R = เพนทิล (C ₅ H ₁₁)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีออกตะโนเอต)	; P(3HO)
	R = เฮกซิล (C ₆ H ₁₃)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีโนนาโนเอต)	; P(3HN)
	R = เฮปทิล (C ₇ H ₁₅)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีเดคาโนเอต)	; P(3HD)
	R = ออกทิล (C ₈ H ₁₇)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีอันเดคาโนเอต)	; P(3HUD)
	R = โนนิล (C ₉ H ₁₉)	สารนี้คือ พอลิ(3-ไฮดรอกซีโดเดคาโนเอต)	; P(3HDD)
เมื่อ n = 2	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ พอลิ(4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต)	; P(4HB)
เมื่อ n = 3	R = ไฮโดรเจน (H)	สารนี้คือ พอลิ(5-ไฮดรอกซีวาเลอเรต)	; P(5HV)

การจำแนกกลุ่มของ PHA โดยการใช้ชนิดของโมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในสาร PHA (Valentin และคณะ, 1994) แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียวมาต่อกัน เช่น พอลิ(β-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ Poly(β-hydroxybutyrate) ; P(3HB) เป็นต้น
2. เฮเทอโพลิเมอร์ (heteropolymer) คือ พอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด ซึ่งจะเรียกชื่อตามจำนวนชนิดของโมโนเมอร์ ดังนี้
 - 2.1 โคพอลิเมอร์ (copolymer) ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 2 ชนิด มาต่อกันเป็น

สายพอลิเมอร์ เช่น พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) ; P(3HB-co-3HV) พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) ; P(3HB-co-4HB) พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีเฮกซะโนเอต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) ; P(3HB-co-3HH) และพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีโพรพิโอเนต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxypropionate) ; P(3HB-co-3HP) เป็นต้น

2.2 เทอร์พอลิเมอร์ (terpolymer) ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 3 ชนิด เช่น พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต-โค-4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-4-hydroxybutyrate) ; P(3HB-co-3HV-co-4HB) พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต-โค-4-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-4-hydroxyvalerate) ; P(3HB-co-3HV-co-4HV) และพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีเฮกซะโนเอต-โค-4-ไฮดรอกซีออกตะโนเอต) หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate-co-3-hydroxyoctanoate) ; P(3HB-co-3HH-co-3OH) เป็นต้น

การแบ่งประเภทของ PHA ตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมโนเมอร์ (Doi และคณะ, 1995 ; Jendrossek และคณะ, 1996) แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

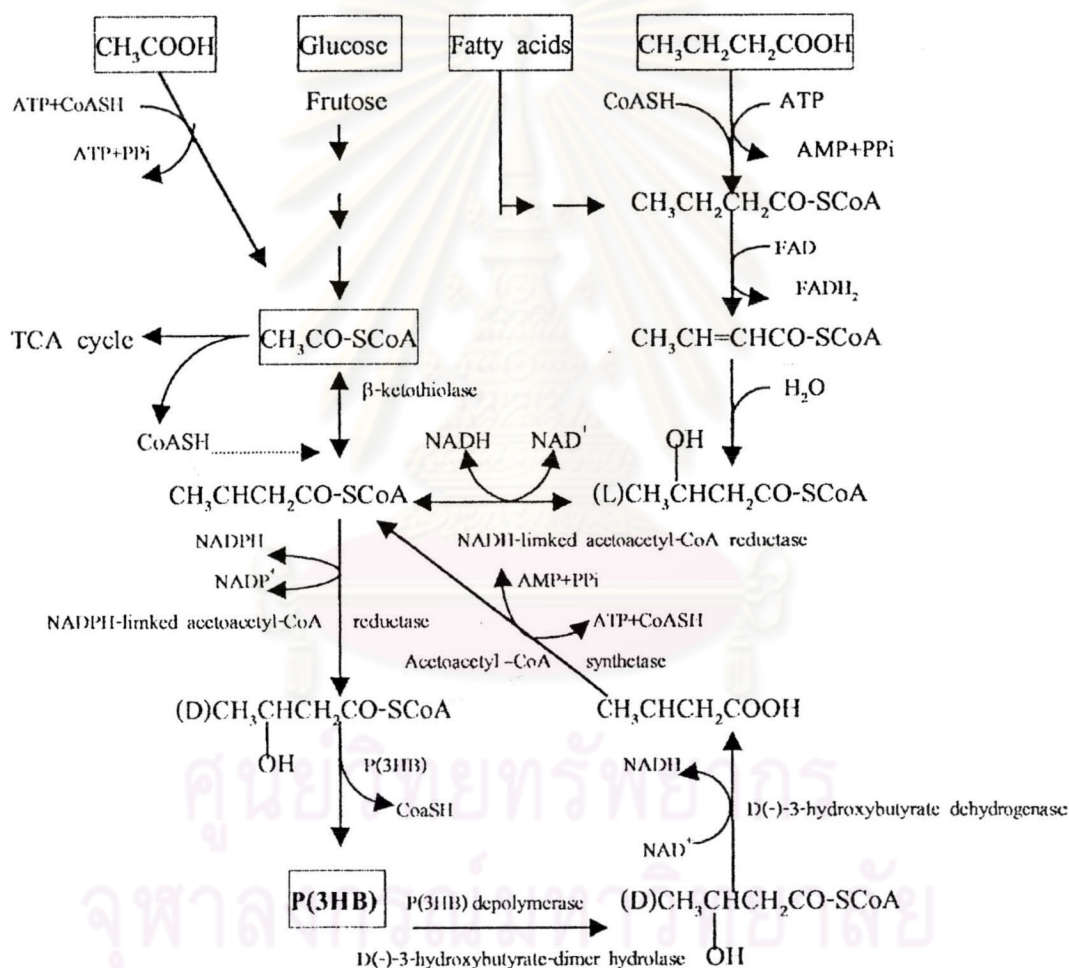
1. Short-chain-length PHA (PHA_{SCL}) มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 3-5 อะตอม
2. Medium-chain-length PHA (PHA_{MCL}) มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 6-15 อะตอม
3. Long-chain-length PHA (PHA_{LCL}) มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากกว่า 15 อะตอม

PHA ที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ขึ้นจะเป็น PHA ชนิดใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่ประกอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ และสภาวะในการเลี้ยงเชื้อ

การสังเคราะห์ PHA

วิธีการสังเคราะห์ PHB

ในปี ค.ศ. 1973 Dawes และ Senior ; Oeding และ Schlegel ได้รายงานการสังเคราะห์ PHB ไว้ว่า อะเซทิลโคเอ (acetyl CoA) เป็นสารตั้งต้นของวิธีการสังเคราะห์ PHB และศึกษาถึงความเกี่ยวข้องกับสารมัธยันตร์ของวัฏจักรทีซีเอ (TCA cycle) และการที่อะเซทิลโคเอจะถูกออกซิไดซ์เข้าสู่วัฏจักรทีซีเอ หรือเข้าสู่วิธีการสังเคราะห์ PHB นั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมภายนอก

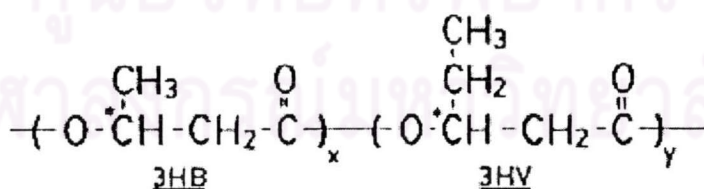


รูปที่ 5 วิธีการสังเคราะห์ PHB โดย *A. eutrophus* เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน (Doi, 1990)

จากรูปที่ 5 แสดงวิธีการสังเคราะห์ PHB โดยสารตั้งต้นคือ อะเซทิลโคเอ ถูกเปลี่ยนไปเป็น อะซิโตอะเซทิลโคเอ (acetoacetyl-CoA) และ ไฮดรอกซีบิวทิลโคเอ (hydroxybutyryl-CoA)

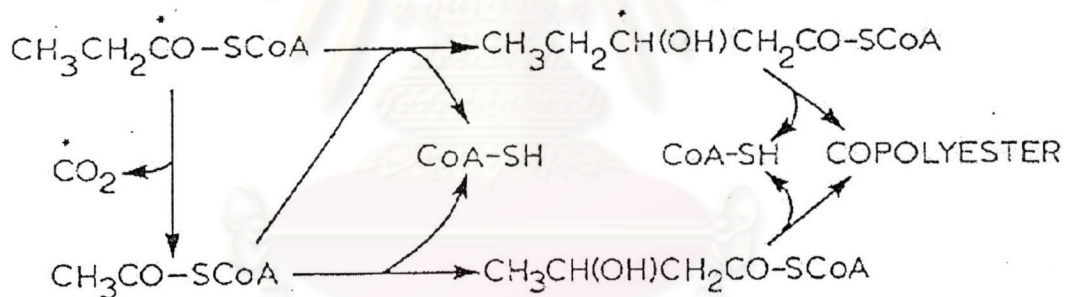
โดยการทำงานของเอนไซม์ บีต้า-คีโตไทโอเลส (β -ketothiolase) และเอ็นเอดีพีเอส/เอ็นเอดีเอส-ลิงค์ อะซิโตอะซีทิลโคเอรีดักเตส (NADPH/NADH-linked acetoacetyl-CoA reductase) ตามลำดับ หลังจากนั้นจะเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของไฮดรอกซีบีวทิริลโคเอ ไปเป็น PHB ด้วยเอนไซม์ PHB ซินเทส (PHB synthase) การสะสม PHB จะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีปริมาณของแหล่งคาร์บอนมากเกินไปและมีการจำกัดปริมาณธาตุบางชนิด เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟต แมกนีเซียม ฟอสเฟต โพแทสเซียมและเหล็ก (Braunegg และคณะ, 1998) โดยในสภาวะที่ถูกจำกัดไนโตรเจน เอนไซม์ซิเตรตซินเทส (citrate synthase) ในวัฏจักรที่ซีเอจะถูกยับยั้งเป็นผลให้ปริมาณโคเอนไซม์เอภายในเซลล์ลดลง อะซีทิลโคเอจึงเข้าสู่วิถีการสังเคราะห์ PHB แต่ถ้าอยู่ในสภาวะสมดุลไม่ถูกจำกัดแหล่งไนโตรเจน อะซีทิลโคเอจะเข้าสู่วัฏจักรที่ซีเอ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานและกรดอะมิโน ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณโคเอนไซม์เอภายในเซลล์เพิ่มขึ้น จึงไปยับยั้งวิถีการสังเคราะห์ PHB แต่มีข้อยกเว้นคือถ้าใช้กรดไขมันเป็นแหล่งคาร์บอน กรดไขมันจะถูกเมตาบอลิซึมในวิถีของบีต้าออกซิเดชัน (β -oxidation) ได้เป็น อะซิโตอะซีทิลโคเอ(acetoacetyl-CoA) ดังนั้นภาวะการจำกัดแหล่งไนโตรเจนจึงไม่มีผลต่อการสังเคราะห์ PHB (Heinzle และ Lafferty, 1980 ; Suzuki และคณะ,1986 ; Steinbuchel และ Schlegel, 1989 ; Doi, 1990 และ Doi, 1992)

วิถีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV)



รูปที่ 6 สูตรโครงสร้างของ P(3HB-co-3HV) (Doi, 1990)

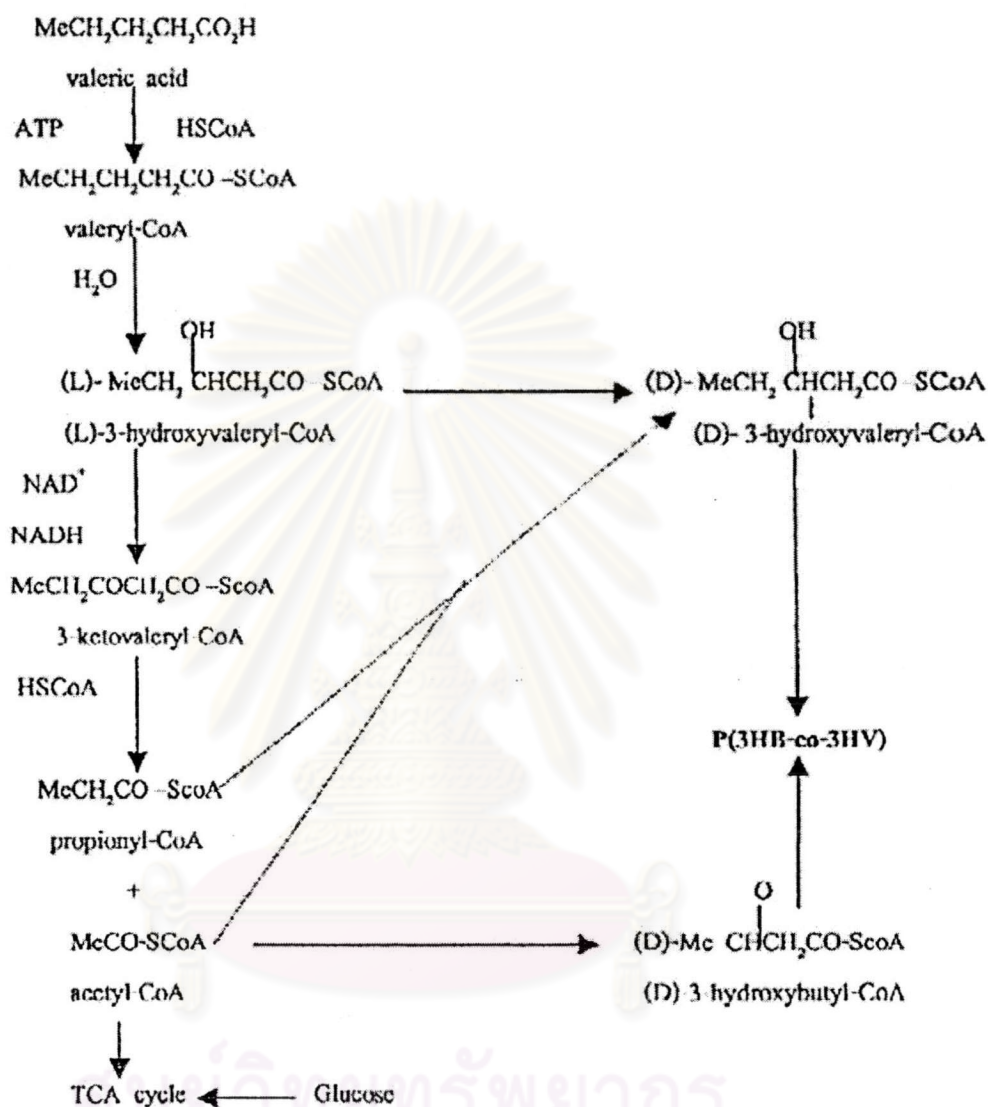
Holmes (1985) รายงานว่าแบคทีเรียที่สังเคราะห์โฮโมพอลิเมอร์ PHB ได้จะสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ในรูปแบบของโคพอลิเมอร์ (copolymer) ได้ ได้แก่ P(3HB-co-3HV) ซึ่งโคพอลิเมอร์มีสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างไปจาก PHB หลายประการ เช่น จุดหลอมเหลวและความสามารถในการตกผลึกที่ลดลง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็ง (stiffness : Young's modulus) ลดลงโดยที่ความเหนียว (Toughness : Impact strength) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น ในการศึกษาวิธีการสร้างและสะสม P(3HB-co-3HV) จากโพรพิโอเนต (C₃) โดยการตรวจสอบโมโนเมอร์ 3HB และโมโนเมอร์ 3HV จากการติดฉลากสารกัมมันตภาพรังสี [1-C¹³] จากรายงานของ Doi และคณะ ในปี ค.ศ. 1987 ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่าโพรพิโอเนตถูกเปลี่ยนเป็นโพรพิโอนิลโคเอ (propionyl-CoA) ซึ่งโพรพิโอนิลโคเอสามารถถูกเปลี่ยนเป็นอะเซทิลโคเอได้โดยปล่อยคาร์บอนในหมู่คาร์บอนี่ออกมา ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ดังนั้น 3-ไฮดรอกซีวาลเอเรต (3-hydroxyvalerate); 3HV ที่ได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างโพรพิโอนิลโคเอร่วมกับอะเซทิลโคเอ และได้ 3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต (3-hydroxybutyrate) ; 3HB จากการรวมตัวกันของอะเซทิลโคเอสองโมเลกุล



รูปที่ 7 วิธีการสังเคราะห์ของโคพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยหน่วยของ 3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต (3HB) และ 3-ไฮดรอกซีวาลเอเรต (3HV) (Doi และคณะ, 1987a)

Doi และคณะ (1987a) ได้ทดลองใช้กรดเพนทานอิก(กรดวาลเอเรอิก) เพื่อการผลิตโคพอลิเมอร์โดย *A. eutrophus* ซึ่งได้สัดส่วนโมโนเมอร์ของ 3HB เท่ากับ 10 โมลเปอร์เซ็นต์ และ 3HV เท่ากับ 90 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยที่กรดเพนทานอิกจะถูกเมตาบอลิซึมด้วยปฏิกิริยาบีตาออกซิเดชัน (β -oxidation) เป็น D-3-hydroxyvaleryl-CoA ซึ่งเป็น 3HV โดยตรงที่ไม่มีการตัดสายคาร์บอน (Carbon skeleton) ส่วน L-3-hydroxyvaleryl-CoA ถูกสลายไปเป็นอะเซทิลโคเอ และโพรพิโอนิลโคเอ ซึ่ง อะเซทิลโคเอ ถูกเมตาบอลิซึมเข้าวิถีที่ซีเอ และบางส่วนจะถูกเปลี่ยนอยู่ใน

รูป ดี-3-ไฮดรอกซีบิวทิริวโคเอ แล้วถูกเมตาบอไลซ์ เป็น 3HB ต่อมา 3HV และโมโนเมอร์ 3HB เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยเอนไซม์พอลิเมอร์เรส (PHA polymerase) รวมกันได้เป็น P (3HB-co-3HV) แสดงวิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) จากกรดวาเลอริกในรูปที่ 8

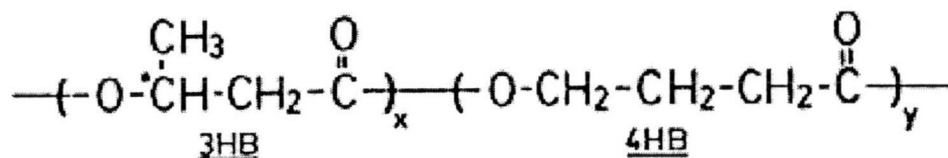


รูปที่ 8 วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) โดย *A. eutrophus* เมื่อใช้กรดวาเลอริกเป็นแหล่งคาร์บอนเดี่ยว (Doi และคณะ 1987b)

การศึกษาการสร้างและสะสม P(3HB-co-3HV) โดยจุลินทรีย์

ปี 1990 Ramsay และคณะ ได้รายงานการศึกษาผลของชนิด และความเข้มข้นสารตั้งต้น ต่อสัดส่วนของ 3HV จากเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ได้แก่ *Alcaligenes latus* *Bacillus cereus* *Pseudomonas pseudoflava* *Pseudomonas cepacia* *Micrococcus halodenitrificans* และ *Alcaligenes eutrophus* สามารถผลิต P(3HB-co-3HV) โดยใช้สารตั้งต้นผสมที่ประกอบด้วย กลูโคสและกรดโพธิโธนิคเป็นสารตั้งต้นพบว่า การเจริญและการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ โดยการศึกษาสามารถผลิต 3HV ได้สูงถึง 50 มิลเปอร์เซ็นต์ จาก *B. cereus* ถึงแม้ว่าปริมาณพอลิเมอร์ที่ได้จะมีปริมาณน้อย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังรายงานว่าเมื่อใช้กรดวาลेरริกแทนกรดโพธิโธนิคใน *A. latus* พบว่ามีการผลิต 3HV ได้สูงขึ้น สำหรับการศึกษามูลของสารตั้งต้นเดี่ยวต่อสัดส่วนของ 3HV จากการศึกษาของ Son และ Lee (1996) โดยใช้ กรดกลูโคนิค กรดโพธิโธนิค กรดวาลेरริก อย่างใดอย่างหนึ่ง เป็นสารตั้งต้นเดี่ยวในการผลิต 3HV โดยเชื้อ *Pseudomonas* sp. EL-2 พบว่าเชื้อสามารถผลิต 3HV สูงถึง 49.3 มิลเปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้กรดโพธิโธนิคเป็นสารตั้งต้น ซึ่งจากการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนโมโนเมอร์ที่ผลิตขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ โดยอาจมีเอนไซม์สำคัญ ในการสังเคราะห์ 3HV หรือมีผลต่อการเชื่อมต่อของสายพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ในการผลิต P(3HB-co-3HV) นั้นสามารถควบคุมให้มีสัดส่วนของ 3HV ได้โดยการแปรผันชนิดและความเข้มข้นของสารตั้งต้นหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และ เกลือแร่อื่น ๆ นอกจากนี้การแปรผันของระยะเวลาการเลี้ยงและสภาวะอื่น ๆ ก็มีผลต่อสัดส่วนของ 3HV เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่นการศึกษาถึงผลของชนิด และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ต่อสัดส่วนของ 3HV จากแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* ATCC 17699 ในอาหารที่มีการเติมกรดโพธิโธนิกร่วมกับฟรักโตสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของโพธิโธนิคเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ให้เปอร์เซ็นต์ของ 3HV สูงสุด และเมื่อปรับปรุงวิธีการเลี้ยงเป็นแบบเฟดแบช (fed-batch) พบว่า มีการสังเคราะห์ 3HV มีค่าสูงถึง 50 มิลเปอร์เซ็นต์ (Kim, J.H. และคณะ, 1992) แหล่งคาร์บอนที่มีการศึกษาเป็นสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งคือ แอลกอฮอล์ ได้แก่ Bourgue และคณะ (1992) รายงานว่า *Methylobacterium extorques* สามารถใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิต PHB และเมื่อใช้ โซเดียมวาลेरริกพร้อมกับเมทานอลเป็นสารตั้งต้นผสม สามารถสังเคราะห์ P(3HB-co-3HV) Park และ Damodaran (1994) รายงานการผลิต P(3HB-co-3HV) จากเอทานอลและเพนทานอล จาก *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 12080 ด้วยการเลี้ยงแบบเฟดแบช ซึ่งสามารถสังเคราะห์ 3HV ได้สูงถึง 99 มิลเปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-4HB)

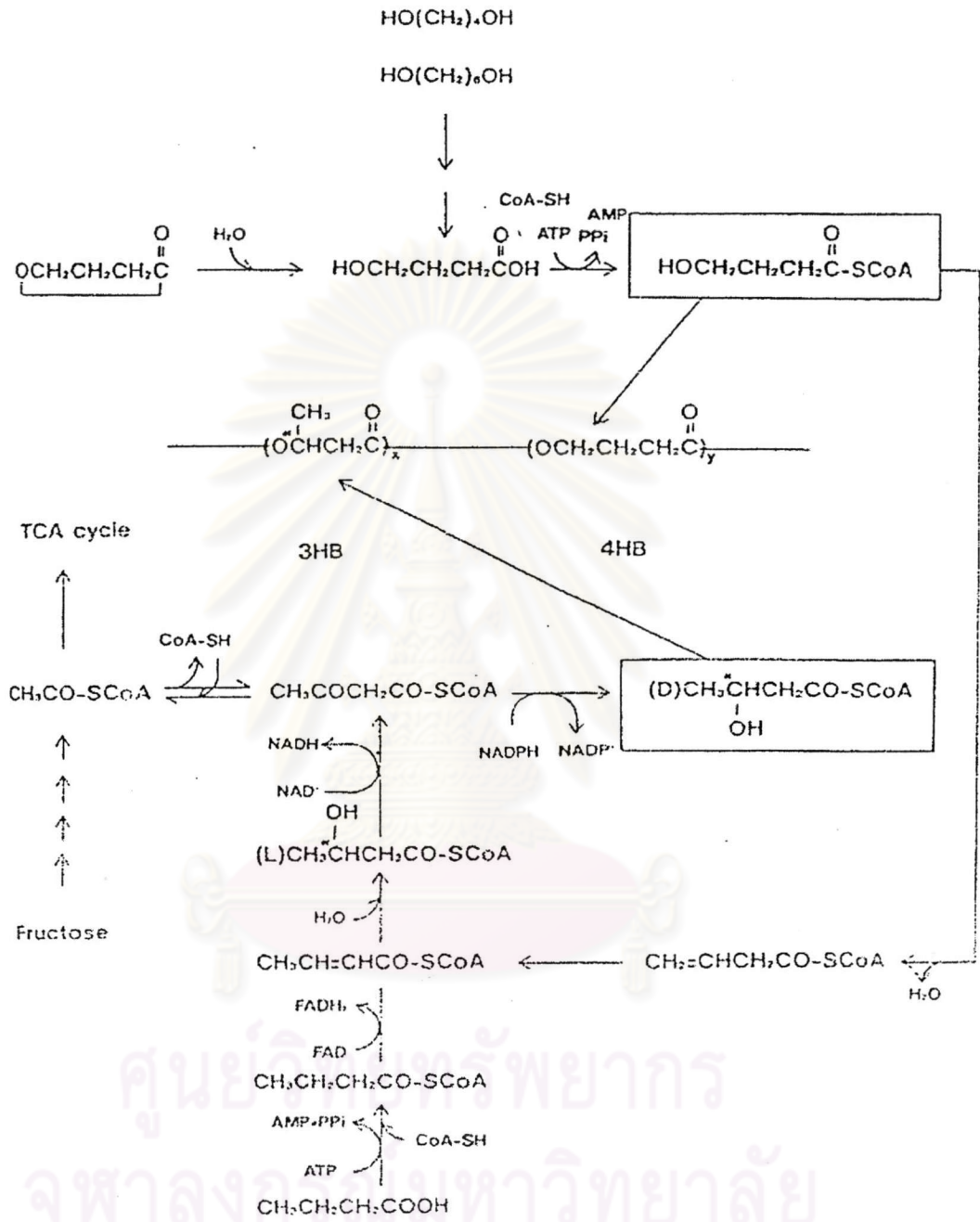


รูปที่ 9 โครงสร้างของ P(3HB-co-4HB) (Doi, 1990)

P(3HB-co-4HB) ถูกพบครั้งแรกโดย Doi, Kunioka และคณะ ในปี 1988 ซึ่งผลิตจากเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* เมื่อเลี้ยงเชื้อโดยใช้ 3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต และ 4-ไฮดรอกซีบิวทิเรต เป็นสารตั้งต้น ต่อมาในปี 1989 Kunioka และ Doi ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ P(3HB-co-4HB) จาก *Alcaligenes eutrophus* โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมพันธะกันอย่างอิสระระหว่าง โมโนเมอร์ 2 ชนิด โดยสัดส่วนของ 4HB มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นของ 4HB ในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อการผลิต โดยสารตั้งต้นที่สามารถใช้ในการสร้าง 4HB ได้มีหลายชนิด เช่น กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก (4-hydroxybutyric acid) กรด 4-คลอโรบิวทิริก (4-chlorobutyric acid) 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) แกมมา-บิวทิโรแลกโตน (γ-butyrolactone) หรือ 1,6-บิวเทนไดออล (1,6-butanediol) เป็นต้น (Kimura และคณะ, 1999 ; Choi, 1999 ; Doi, 1990 และ Mitomo และคณะ, 2001) โดยเมื่อใช้สารตั้งต้น เป็นกรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก จะถูกเมตาบอลิซึม ไปเป็น 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ (4-hydroxybutyryl-CoA) จากนั้น 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ส่วนหนึ่งผ่านเข้าสู่ปฏิกิริยา บีต้า-ออกซิเดชัน ซึ่งในปฏิกิริยานี้พบว่า 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ถูกเปลี่ยนเป็น 3-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ และจะถูกเปลี่ยนเป็นโมโนเมอร์ของ 3HB ในที่สุด และเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ของ 3-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ กับ 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ภายใต้การทำงานของเอนไซม์ PHB ซินเทส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนสารตั้งต้นชนิดอื่นจะต้องผ่านปฏิกิริยาอื่นก่อน เช่น แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็นสารตั้งต้น แกมมา-บิวทิโรแลกโตน ถูกไฮโดรไลซ์ เป็น 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ในขณะที่ กรด 4-คลอโรบิวทิริก ต้องผ่านปฏิกิริยาดีคลอรีเนชัน (dechlorination) เพื่อเปลี่ยนให้เป็น 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ส่วน 1,4-บิวเทนไดออล 1,6-บิวเทนไดออล รวมทั้ง อัลเคนไดออล

(alkanediol) อื่น ๆ ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จะถูกเปลี่ยนเป็น 4-ไฮดรอกซีบิวทิริลโคเอ ได้โดยผ่านขั้นตอนออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 วิธีการสังเคราะห์ P(3HB-co-4HB) โดย *Alcaligenes eutrophus* จากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน (Doi และคณะ, 1990)

การเลือกใช้ ฟรุกโตส และ แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็นสารตั้งต้น พบว่า ดี-3-ไฮดรอกซีบิวทิริวโคเอ ที่ได้มาจากสารตั้งต้นทั้งสองชนิด ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณ 4HB ในโคพอลิเมอร์ลดลง แต่ถ้าใช้ กรดบิวทิริก คู่กับ แกมมา-บิวทิโรแลกโตน พบว่า กรดบิวทิริก เปลี่ยนเป็น ดี-3-ไฮดรอกซีบิวทิริวโคเอ โดยผ่านอะซิโอะอะซิลโคเอ ใน วิถีบีต้า-ออกซิเดชัน สารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นในวิถีบีต้า-ออกซิเดชัน ของ กรดบิวทิริก อาจยับยั้งการเปลี่ยน 4-ไฮดรอกซีบิวทิริวโคเอ ไปเป็น ดี-3-ไฮดรอกซีบิวทิริวโคเอ ซึ่งมีผลให้โคพอลิเมอร์ ที่ได้จาก กรดบิวทิริก กับ แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็นสารตั้งต้น มีอัตราส่วนของปริมาณ 4HB สูง (Doi, 1990)

การศึกษาการสร้างและสะสม P(3HB-co-4HB) โดยจุลินทรีย์

Kunioka และคณะ (1989) ได้ศึกษาการผลิต P(3HB-co-4HB) จาก *Alcaligenes eutrophus* โดยใช้สารตั้งต้นหลาย ๆ ชนิด ดังนี้ กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก กรด 4-คลอโรบิวทิริก 1,4-บิวเทนไดออล และ แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็นสารตั้งต้นของ 4HB โดยแปรความเข้มข้นร่วมกับการแปรความเข้มข้นของกรดบิวทิริก ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ 3HB ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ กรด 4-ไฮดรอกซีบิวทิริก เป็นสารตั้งต้นทำให้ได้สัดส่วนของ 4HB สูงที่สุดถึง 36 โมลเปอร์เซ็นต์ Kimura และคณะ(1992) ได้ทำการศึกษาการผลิต P(3HB-co-4HB) โดยใช้เชื้อ *Pseudomonas acidovorans* ในการผลิต สารตั้งต้นที่ถูกเลือกใช้ในการศึกษาคือ 1,4-บิวเทนไดออล และ เพนทานอล ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของ 4HB สูงถึง 93-99 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ 1,4-บิวเทนไดออล เป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ในปี 1993 Hiramitsu ได้รายงานการศึกษาการผลิตโคพอลิเมอร์จาก *Alcaligenes latus* (ATCC 29713) โดยใช้การเลี้ยงแบบขั้นตอนเดียว(one-stage cultivation) สารตั้งต้นที่ให้ก็คือ ซูโครส และ แกมมา-บิวทิโรแลกโตน ได้สัดส่วนของ 4HB สูงสุด 45 โมลเปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความเข้มข้นของแกมมา-บิวทิโรแลกโตนเพิ่มขึ้นกลับทำให้การเจริญลดลงและปริมาณ PHAในเซลล์แห้งลดลงจากรายงานของ Doi (1990) ได้รายงานการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสะสม 4HB จากเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* ซึ่งสามารถเปลี่ยน แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็น 4HB ได้เพียง 3 โมลเปอร์เซ็นต์ เท่านั้น แต่ใน *Alcaligenes latus* พบว่า มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยน แกมมา-บิวทิโรแลกโตน เป็น 4HB สูงกว่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความสามารถในการสังเคราะห์ 4HB ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ชนิดของสารตั้งต้นในการผลิต ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น สำหรับเชื้อ *Hydrogenophaga pseudoflava* สามารถผลิต

สมบัติทางกายภาพ (physical property) และสมบัติเชิงกล (mechanical property) ของ PHA

โครงสร้างของ PHA เป็นแบบหัวต่อหาง (head-to-tail configuration) และเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic) โดยทั่วไป PHA มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular mass) อยู่ในช่วง 50,000 – 1,000,000 ดาลตัน ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน เช่น พอลิโพรไพลีน เป็นต้น (Madison, 1999) สมบัติของ PHA เป็นเทอร์โมพลาสติก คือเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) และเมื่อเย็นตัวลงจะสามารถขึ้นรูปเป็นของแข็งได้ใหม่ (rehardness) ซึ่งจัดเป็นข้อดีของพลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติกคือสามารถเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้

ความหลากหลายของ PHA ที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโมโนเมอร์ที่อยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการพิจารณาว่าพอลิเมอร์ชนิดใดจะเหมาะสมกับการใช้งานประเภทใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทั้งสองนี้

สมบัติทางกายภาพ

1. อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature; T_g) เป็นอุณหภูมิซึ่งพอลิเมอร์ในสภาวะอสัณฐานเปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว ไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เมื่อได้รับความร้อน ทำให้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พอลิเมอร์จะมีลักษณะแข็งและเปราะคล้ายแก้ว เนื่องจากมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเพียงการสั่น ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ปริมาตรของพอลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจลน์ ทำให้บางส่วนของโมเลกุลมีการเคลื่อนไหวมากขึ้นและเกิดการหมุนรอบแกนพันธะเดี่ยว โมเลกุลจึงอ่อนตัวและยืดหยุ่น (flexible) แต่ไม่ถึงกับหลอมเหลวยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง

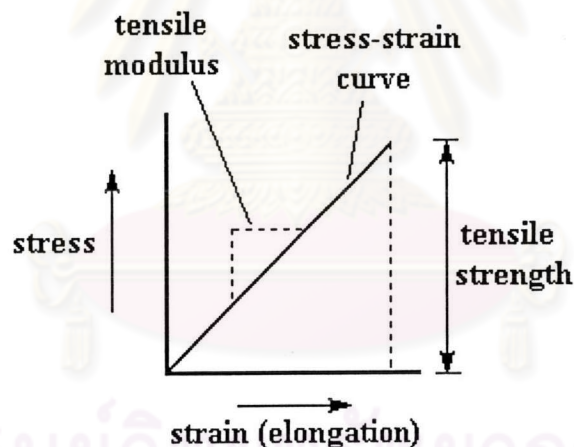
2. อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature; T_m) คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหนืด พอลิเมอร์อสัณฐานจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว ไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวจึงหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด

สมบัติเชิงกล

1. **ความเค้น (stress)** คือแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงจากภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่าง ซึ่งความเค้นจะกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่รับแรง ความเค้นเป็นอัตราส่วนของแรง ที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ มีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ นิวตันต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร หรือ ปาสกัล

2. **ความเครียด (strain)** เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ เช่น เมื่อได้รับแรงดึง วัสดุจะยืดตัวออก (elongate) ความเครียดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการยืดหรือหดตัวความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ ค่าความเครียดจะไม่มีหน่วย นิยมแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (% elongation)

3. **ค่ายังส์โมดูลัส (Young's modulus หรือ tensile modulus)** เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke) คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress/strain) ซึ่งใช้ในการบอกถึงความสามารถในการต่อต้านการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น - ความเครียด
(<http://www.mechanical.co.th>)

โดยการทนแรงดึง (tensile strength) คือ ความเค้นสูงสุดซึ่งวัสดุสามารถทนทานได้โดยไม่เกิดการแตกหัก จากกราฟ ความสูงของเส้นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด ส่วนค่าความชันของเส้นกราฟคือค่า tensile modulus ยิ่งความชันมาก ค่า tensile modulus ก็จะมีค่าสูง ซึ่งนั่นหมายถึงวัสดุมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก ในขณะที่ค่าความชันของกราฟน้อยแสดงว่าวัสดุนั้นอ่อนนุ่มทนต่อแรงกระทำและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายนั่นเอง

ผลของสัดส่วน 3HB, 3HV และ 4HB (โมลเปอร์เซ็นต์) ที่มีผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของเทอร์พอลิเมอร์

องค์ประกอบของโมโนเมอร์ใน PHA ส่งผลโดยตรงกับสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ โดยไฮโปพอลิเมอร์ PHB มีหมู่เมทธิลภายในเส้นสายพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้ PHB มีความเป็นผลึก (crystallinity) แข็งและเปราะมาก มีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 180 องศาเซลเซียส) ส่วนสมบัติด้านเชิงกลของ PHB ทั้งค่า Young's modulus และ tensile strength มีค่าใกล้เคียงกับ พอลิโพรไพลีน แต่ PHB จะเปราะกว่า (Doi, 1990) จากจุดหลอมเหลวที่สูงของ PHB ทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นการผลิตโคพอลิเมอร์ และเทอร์พอลิเมอร์จึงได้รับความสนใจ เพื่อพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดนี้ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถนำมาทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ได้มากขึ้น (Amass, 1998)

Bluhum (1986) รายงานการศึกษา P(3HB-co-3HV) ที่มีสัดส่วนโมโนเมอร์ 3HV ต่าง ๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับ PHB พบว่า P(3HB-co-3HV) มีการเรียงตัวของโมโนเมอร์เป็นแบบสุ่ม แสดงลักษณะเป็นไอโซไดมอร์ฟิซึม (isodimorphism) ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์สองชนิดที่คล้ายกันจึงสร้างผลึกร่วมกัน (cocrystallization) ด้วยโครงสร้างที่ต่างไปจึงทำให้สมบัติด้านต่าง ๆ ของ P(3HB-co-3HV) แตกต่างจาก PHB ดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน และค่าความร้อนของการหลอมเหลว โดยเมื่อสัดส่วนของโมโนเมอร์ 3HV เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่สัดส่วนของโมโนเมอร์ 3HV เท่ากับ 40 ให้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุดเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส ระดับความเป็นผลึกของ P(3HB-co-3HV) ลดลงเมื่อสัดส่วนของ 3HV เพิ่มขึ้น โดย 3HV อยู่ในช่วง 20 ถึง 40 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดความไม่เป็นระเบียบในแผ่นพอลิเมอร์ แต่เมื่อสัดส่วนของ 3HV สูงขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากระดับความเป็นผลึกของ PHBV น้อยจึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะที่ใสกว่า PHB Kunioka และคณะ (1989) รายงานสมบัติเชิงกลของ P(3HB-co-3HV) โดยพบว่าค่า Young's modulus และ tensile strength ลดลงตามสัดส่วนของ 3HV ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น (toughness) และยืดหยุ่นดีขึ้น ในทางการค้า โคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) มีการควบคุมสัดส่วนของ 3HV ให้อยู่ในช่วง 10-20 โมลเปอร์เซ็นต์ เพื่อความเหมาะสมโดยผลิตภัณฑ์จะมีความยืดหยุ่น ความเหนียว และความแข็งแรง (Cox, 1994; Lee และคณะ, 1998 และ <http://www.monsato.com>)

จากรายงานของ Kunioka ในปี 1988 (อ้างถึงใน Doi, 1990) ศึกษาระดับความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์ม P(3HB-co-4HB) ฟิล์ม ที่มีสัดส่วนของ 4HB ตั้งแต่ 0-49 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าเมื่อ 4HB เพิ่มขึ้นระดับความเป็นผลึกลดลงจาก 55-14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการที่มีองค์

ประกอบของโมโนเมอร์ 4HB อยู่ในพอลิเมอร์จะมีผลต่อการทำลายการเรียงตัวเป็นผลึกของ P (3HB) โดยสมบัตินี้จะทำให้ P(3HB-co-4HB) มีสมบัติระหว่างลักษณะเป็นผลึก หรือยืดหยุ่น อยู่ในช่วงที่กว้างมากขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโมโนเมอร์ 4HB ในโคพอลิเมอร์นั้น Madison และ Huisman (1999) รายงานสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วนของ 4HB ต่าง ๆ กันพบว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนของโมโนเมอร์ 4HB เท่ากับ 44 โมลเปอร์เซ็นต์ ทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวมากขึ้นและสมบัติในการยืดตัว (elongation) นั้นมากถึง 444 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นยางยืด (elastic rubber) จากรายงานของ Doi (1990) พบว่า P(3HB-co-4HB) ที่มีสัดส่วนของ 4HB ในช่วง 0-18 โมลเปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 178 องศาเซลเซียส เป็น 150 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วนของ 4HB สูงขึ้น นอกจากนี้ จากรายงานของ Nakamura (1992) และ Mitomo และคณะ (2001) พบว่าเมื่อสัดส่วนของ 4HB ในองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์ มากกว่า 20 โมลเปอร์เซ็นต์ มีผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงอย่างรวดเร็ว และต่ำที่สุดเท่ากับ -46 และ 51 องศาเซลเซียส (เมื่อสัดส่วนของ 4HB สูงถึง 94 โมลเปอร์เซ็นต์) จึงเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติของวัสดุหลากหลายตั้งแต่พลาสติกที่มีความเป็นผลึก ไปจนถึงพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นคล้ายยาง

Kunioka และ Doi (1989) ได้รายงานการย่อยสลายพอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ในดิน พบว่า อัตราการย่อยสลายพอลิเมอร์ P(3HB-co-9%4HB) ดีที่สุด รองลงมาคือ P(3HB) และ P(3HB-co-50%3HV) ซึ่งใกล้เคียงกัน อัตราการย่อยสลายของ P(3HB-co-9%4HB) จะเร็วกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น และถูกย่อยสลายโดยสมบูรณ์ภายใน 2 สัปดาห์ จากรายงานของ Doi และคณะ ในปี 1990 พบว่าเมื่อสัดส่วนของ 4HB ในโคพอลิเมอร์มากขึ้น อัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์นั้นมากขึ้น โดย P(3HB-co-27%4HB) มีอัตราการย่อยสลายมากกว่า P(3HB-co-17%4HB) P(3HB-co-10%4HB) P(3HB-co-45%3HV)

Madden และคณะ (2000) ได้รายงานการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเทอร์พอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV-co-4HB) โดยพบว่า 3HB ในสายเทอร์พอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดผลึกร่วมกับ 3HV ทำให้เทอร์พอลิเมอร์มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น รวมทั้งเพิ่มค่า Young's modulus ดังนั้นเทอร์พอลิเมอร์จึงมีทั้งความเหนียว ความใส ความยืดหยุ่นและแข็งแรง และสามารถถูกย่อยสลายในธรรมชาติได้เร็วขึ้น เช่น เทอร์พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย 3HB 78 โมลเปอร์เซ็นต์ 3HV 11 โมลเปอร์เซ็นต์ และ 4HB 11 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่ามีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความยืดหยุ่น และการย่อยสลายของแผ่นพอลิเมอร์ ดีกว่า P(3HB-co-30% 3HV) และมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพช้ากว่าสัดส่วนอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา จากรายงานของ สุชาติา จันทรืประทีป(2539) พบว่า เทอร์พอลิเมอร์ P(11%3HB-co-34%3HV-co-55%4HB) ซึ่งผลิตจาก *Alcaligenes* sp. A-04 มีค่า Young's modulus ใกล้เคียงกับถุงร้อนชนิดใส (PP) ดังนั้นการผลิตเทอร์พอลิเมอร์ให้มี

สมบัติหลากหลายให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน นั้นขึ้นอยู่กับการแปรสัดส่วนของโมโนเมอร์แต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบในเทอร์พอลิเมอร์นั้น สรุปว่า PHA แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากชนิดและสัดส่วนของโมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย