

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ (Polymer)

พอลิเมอร์ (polymer) คือ สารที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีพอลิเมอไรเซชัน (polymerization reaction) ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำกัน (repeating unit) ของโมโนเมอร์ (monomer) ซึ่งจัดเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (micromolecule) หลาย ๆ โมเลกุลเกาะกันเป็นสายโซ่และมีมวลโมเลกุลสูง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดจัดเป็น โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เช่น แป้ง (starch) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นต้น แต่ถ้ามีโมโนเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จัดเป็นพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) เช่น โปรตีน ซึ่งเกิดจากกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว เป็นต้น พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติ (natural polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก เส้นใย โฟม และกาว เป็นต้น พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ พลาสติก ซึ่งเป็นคำที่ใช้อ้างถึงกลุ่มของวัสดุธรรมชาติและสังเคราะห์ กลุ่มใหญ่ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานต่างกัน วัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ นั่นคือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก พอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากโมโนเมอร์หลายชนิดจึงมีสมบัติที่หลากหลายและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ส่งผลให้อัตราการผลิตและใช้ประโยชน์วัสดุประเภทนี้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ก็สร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้นอย่างมากเช่นกัน เนื่องจากอัตราการกำจัดพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วไม่สอดคล้องกับอัตราการผลิต ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์เหล่านี้ย่อยสลายได้ยากมากหรือไม่สามารถสลายตัวได้ การแก้ปัญหานี้ในปัจจุบันมี 2 แนวทาง คือ การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) และการส่งเสริมการใช้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สามารถย่อยสลายได้ (degradable polymers)

2.2 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymers)

พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม (American Society for Testing and Materials, ASTM) หมายเลขมาตรฐานที่ D-5488-94d คือ พลาสติกที่มีความสามารถในการย่อยสลายโดยการทำงานของจุลินทรีย์ การย่อยสลายเป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่เกิดจากกิจกรรมทางชีวภาพทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในช่วง

เวลาที่กำหนดอย่างสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ สารอนินทรีย์ และชีวมวลส่วนที่เหลือหรือตกค้างต้องไม่มีความเป็นพิษ หรือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถแบ่งพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (natural polymers) ไม่ว่าจะเป็นพืช หรือสัตว์ รวมถึงอนุพันธ์ของพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้มาจากพืช เช่น ยาง แป้ง เซลลูโลส คาร์ราจีแนน (carrageenan) แอลจีเนต (alginate) เฟอเซลล์ลารัน (fercellaran) และวุ้น (agar) เป็นต้น พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้มาจากสัตว์ เช่น ไคติน (chitin) ไคโตซาน (chitosan) ไกลโคเจน (glycogen) และ เคซีน (casein) เป็นต้น พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากจุลินทรีย์ เช่น แซนแทนกัม (xanthan gum) ที่สกัดได้จากเมือกที่สร้างโดย แบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* เป็นต้น โดยมากอยู่ในจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโพรตีน ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทนี้มักชอบความชื้น

2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนเมอร์ชีวภาพ เช่น กรดพอลิแลคติก (polylactic acid, PLA) จากกรดแลคติกที่ได้จากแป้ง เช่น แป้งข้าวโพด นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นที่สามารถสังเคราะห์ได้จากแป้ง ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone) เป็นต้น สำหรับพอลิยูรีเทน (polyurethane) สามารถผลิตได้จากน้ำมันมะพร้าว และพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) สามารถสังเคราะห์ได้จากอนุพันธ์ของพอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น

3. พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์ (microbial polymers) ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น เส้นใยเซลลูโลสจากแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ได้แก่ *Acetobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* และ *Sarcina* และพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต หรือ พีเอชบี (polyhydroxybutyrate, PHB) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานคาร์บอนของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Alcaligenes eutrophus* เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอีกจำพวกหนึ่ง (ตารางที่ 2.1) การสลายตัวทางชีวภาพเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจมาศึกษาวิจัยและทดสอบผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นโดยผ่านการย่อยของเอนไซม์หรือการเสื่อมสภาพทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต การเสื่อมสภาพประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการกระจายตัวของเม็ดพลาสติกให้มีขนาดโมเลกุลลดลง ขั้นตอนนี้จะเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การสลายตัวด้วยแสง หรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต เป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ พอลิเมอร์จะถูกเปลี่ยนสภาพจากสารหนึ่งไปเป็นอีกสารหนึ่ง โดยทั่วไปพลาสติกย่อยสลายได้สามารถจำแนกตามกลไกการย่อยสลายได้ 4 ประเภท (สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553) ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ตามแหล่งที่มา รวมถึงข้อดีและข้อจำกัด

แหล่งที่มา ของพอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อจำกัด	ตัวอย่าง
พอลิเมอร์ ธรรมชาติ (natural polymers)	สามารถผลิตได้จาก ทรัพยากรธรรมชาติที่ สามารถทดแทนใหม่ ได้ ส่วนใหญ่มีราคาต่ำ	มีความเมื่อยาน้อย จากการวิเคราะห์ซ้ำ มีความแปรผันใน สมบัติเฉพาะตัวสูง	แป้ง (starch), เซลลูโลส (cellulose), พีเอชบี (PHB)
พอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่ผ่านการตัด- แปลงโครงสร้าง (modified natural polymers)	บางส่วนผลิตได้จาก ทรัพยากรธรรมชาติที่ ทดแทนได้ คุณสมบัติ ของพอลิเมอร์มีความ หลากหลาย	มีราคาสูง และการควบคุม โครงสร้างทำได้ยาก	เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate), แป้งอะซิเตต (starch acetate)
ผลิตภัณฑ์ โมโนเมอร์จาก กระบวนการหมัก (fermentatively produced monomers)	ผลิตได้จากทรัพยากร- ธรรมชาติที่ทดแทนได้ ควบคุมคุณสมบัติทาง โครงสร้าง ความ เมื่อยานจากการผลิต วัสดุซ้ำได้ดี	มีราคาสูง	พีแอลเอ (PLA)
ผลิตภัณฑ์ โมโนเมอร์จาก กระบวนการทาง ปิโตรเคมี (petrochemically produced monomers)	วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีใน ด้านการผลิตซ้ำ ราคา ต่ำ และสามารถผลิต หรือสังเคราะห์ได้เร็ว	ไม่สามารถผลิต ได้จากทรัพยากร- ธรรมชาติที่ทดแทน ได้	พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyester amides), พอลิ เอสเทอร์ยูรีเทน (poly ester urethanes), เอลิฟา ติกโฮโมพอลิเอสเทอร์ (aliphatic homopoly esters), เอลิฟาติกอะโร มาติก โคพอลิเอสเทอร์ (aliphatic-aromatic copolyesters)

(Abou-Zeid, 2001)

1. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) พลาสติกประเภทนี้ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ของแบคทีเรียในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ
2. พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation plastics) เป็นการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก โดยไม่ต้องอาศัยแบคทีเรียในธรรมชาติ
3. พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics) พลาสติกชนิดนี้มีการเติมสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อแสงและแตกหักง่ายภายใต้แสงยูวี (UV) การย่อยสลายของพลาสติกประเภทนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้หากปราศจากแสงยูวี
4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation plastics) เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolysis) และหากตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ในกรณีนี้จะถูกจัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ

การสลายตัวของพอลิเมอร์หรือพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นอกจากชนิดของพอลิเมอร์แล้วยังมีปัจจัยทางด้าน โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพอลิเมอร์ รวมทั้งสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์อีกด้วย โดยปัจจัยที่กำหนดความเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพ ได้แก่ น้ำหนักและโครงสร้างทางเคมีโมเลกุลของพอลิเมอร์ จุดหลอมตัว (melting point) ปริมาณความเป็นผลึก (crystallinity) ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณสารอาหารในสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปพบว่า พลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำ มีความเป็นระเบียบในการจัดเรียงลำดับในโมเลกุลต่ำ หรือมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรงจะสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ดีกว่า พลาสติกที่มีค่าดังกล่าวสูง (Bhatt et al., 2007) ประเภทและตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทและตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
(Biodegradable polymers)

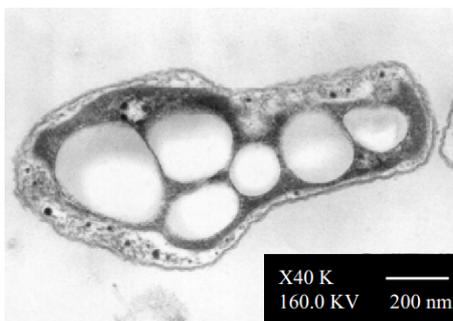
ประเภทของพอลิเมอร์	ตัวอย่าง
Polyesters	Poly(α -ester)s, polylactones, poly(β/γ -ester)s
Polyamides	Hydroxylated nylon
Polyurethanes	Hydrophilic ether urethanes
Polyureas	Urea formaldehyde
Polyethers	สูตรทั่วไป $-(O-(CH_2)_x-)_n$ Poly (ethylene oxide) (PEO), $x = 2$
Polyanhydrides	Poly(bis(p-carboxyphenoxy))alkane anhydride หรือ PCPX
Poly-(orthoester)s	Poly(3,9-bis(ethylidene-2,4,8,10-tetraoxaspiro[5,5]) undecane-cohexanediol) หรือ DETOSHU-HD
Polypeptides หรือ proteins	$-(C(R)-OH-CO-NH-)_n$ กับหมู่ฟังก์ชันและความยาวสายโซ่ที่แตกต่างกัน กัน เช่น โปรตีนธรรมชาติจำพวกคอลลาเจนและเจลาติน
Polysaccharides	แป้งและเซลลูโลสที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในรูปแบบที่แตกต่างกัน

(Abou-Zeid, 2001)

2.3 พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ หรือพีเอชเอ (Polyhydroxyalkanoates: PHAs)

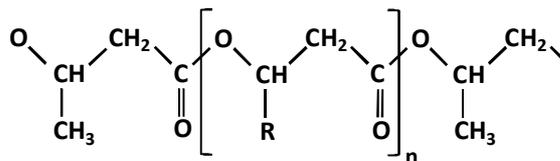
Polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งสามารถพบได้ทั้งจากเซลล์ยูคาริโอตและโปรคาริโอต เซลล์ยูคาริโอตสามารถพบ PHAs ได้ในเชื้อหุ้มเซลล์ทั้งพืชและสัตว์ (Chen, 2010) เซลล์โปรคาริโอตสามารถพบการสะสมของ PHAs ในไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ภายในเซลล์จุลินทรีย์หลายชนิด ทั้งรา ยีสต์ และแบคทีเรีย แต่ส่วนใหญ่มักสังเคราะห์จากแบคทีเรียสายพันธุ์ต่าง ๆ มากกว่า 150 สายพันธุ์ อาทิ เช่น *Ralstonia eutropha*, *Halomonas hydrothermalis*, *Alcaligenes. latus*, *Azotobacter vinelandii*, *Methylotrophs*, *Pseudomonads* และ *Escherichia coli recombinant* (Volova et al., 2010; Modi et al., 2011) แบคทีเรียเหล่านี้จะสร้างและสะสมไว้ในเซลล์ (intracellular product) ในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ (ดังภาพที่ 2.1) ในขณะที่เซลล์อยู่ในสภาวะไม่สมดุลของอาหาร (imbalance nutrient condition) เช่น สภาวะขาดสารอาหาร หรือในสภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินไปเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน การผลิต PHAs สามารถผลิตได้โดยการหมักใช้สารตั้งต้นเป็นวัสดุจากธรรมชาติและสามารถสลายได้สมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายตามธรรมชาติ เช่น ในดิน น้ำ หรือสิ่งปฏิกูล เป็นต้น (Brandl et al., 1990; Byrom, 1987; Swift,

1993; Steinbüchel and Valentin, 1995; Jendrossek and Handrick, 2002) ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม คือ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะที่มีอากาศ และได้แก๊สมีเทนและน้ำในสภาวะที่ไร้อากาศ (Kim et al., 2003) แบคทีเรียสามารถผลิตและสะสม PHAs ไว้ในเซลล์ได้ร้อยละ 30 - 80 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (Avérous and Pollet, 2012) โดยแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีวิถีในการสังเคราะห์ PHAs ที่แตกต่างกัน (Bhatt et al., 2007) PHAs เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างหลายประเภท คุณสมบัติของ PHAs จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้าง (ภาพที่ 2.2) ประเภทของโครงสร้าง ได้แก่ พอลิเมอร์เดี่ยว (homopolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบไม่เป็นระเบียบ (random copolymer) และ พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) โครงสร้างเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาวะการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Chen, 2010)



ภาพที่ 2.1 การสะสมตัวของของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจาก *Achromobacter* sp. PSU-M (ศิริวรรณ ระเด่นอามัด, 2552)

การควบคุมการทำงานของกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น การควบคุมการทำงานของ PHAs synthesizing genes ที่ถูกควบคุมโดยผลจากสภาวะการขาดแคลนอาหาร รวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเซลล์หรือสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึมที่ใช้ในการสังเคราะห์ PHAs ตลอดจนทำหน้าที่ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้องหรือเข้ามาใช้สารที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึมที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ PHAs (Kessler and Witholt, 2001) ส่วนการควบคุมการสร้าง PHAs นั้นเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ (enzyme) โดยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง คือ β -ketothiolase และ acetoacetyl-CoA reductase นอกจากนี้ยังพบว่า PHAs synthase เป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการทำให้เกิดการรวมตัวกันของ (R)-3-hydroxyacyl-CoA เป็นสารโมเลกุลใหญ่ (Rehm, 2003) โดย PHAs synthase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์และพบว่าปริมาณ PHAs synthase มีผลต่อการผลิต PHAs อย่างมีนัยสำคัญทั้งในหลอดทดลองหรือในสิ่งมีชีวิต (Zhang et al., 2004)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Khanna and Srivastava, 2005)

2.3.1 คุณสมบัติของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates properties)

เนื่องจากพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นพอลิเมอร์ประเภทแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก ซึ่งจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยองค์ประกอบของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจะประกอบด้วยโมโนเมอร์หลัก คือ กรดไฮดรอกซีอัลคาโนอิก (hydroxyalkanoic-acids) ซึ่งสามารถจำแนกได้ 3 กลุ่มตามความยาวของสายโซ่ของหมู่แทนที่ (R) ในหน่วยโมโนเมอร์ คือ ความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้น ประกอบด้วยคาร์บอน 3-5 อะตอม หรือเรียกอีกอย่างว่าเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ปานกลางประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 6-14 อะตอม หรืออีลาสโตเมอร์ และความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ยาว ประกอบด้วยคาร์บอนมากกว่า 14 อะตอม ซึ่งพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่ผลิตได้โดยทั่วไป จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ 100-30,000 หน่วยและมีความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้น ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของโมโนเมอร์ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้นเป็นเทอร์โมพลาสติก ในขณะที่พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ปานกลางเป็นอีลาสโตเมอร์ (elastomers) นอกจากนี้ชนิดของหมู่แทนที่ (ตารางที่ 2.3) และระดับความอิมิตัวของพันธะมักมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ที่กว้าง คือ ตั้งแต่ 50 – 180 องศาเซลเซียสจึงทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกได้หลากหลาย เช่น การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม การฉีดและการเป่า (นันทนิตย์ ยี่มวาสนา และคณะ, 2555)

อนุพันธ์หลักในตระกูลของ PHAs คือ พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต หรือ พีเอชบี (polyhydroxybutyrate, PHB) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์ชนิดเดียวหรือโฮโมพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบ PHAs ที่เกิดจากโมโนเมอร์ 2 ชนิดรวมกันเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) เช่น poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV), poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyhexanoate) (PHBHx), poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyoctanoate) (PHBO) และ poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyoctadecanoate) (PHBOd) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4, poly(3-hydroxybutyrate-co-

rate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ P(3HB-co-3HV) เป็นตัวอย่างของพอลิเมอร์แบบสลับระหว่างหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ หมู่เมทิลและหมู่เอทิล เนื่องจากพอลิเมอร์นี้มีโมโนเมอร์ 2 ประเภท คือ HB และ HV สลับกันอยู่ในสายพอลิเมอร์ (ภาพที่ 2.3) คุณสมบัติของพอลิเมอร์ร่วมประเภทยังขึ้นอยู่กับประเภทของโมโนเมอร์ (ตารางที่ 2.5) ที่อยู่ในสายและจำนวนของโมโนเมอร์ที่อยู่ในสายเห็นได้ชัดจากตารางที่ 2.6 ที่แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของ Poly(HB-co-HV) ที่มีปริมาณของอนุพันธ์ HV ที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติของ PHAs

ตารางที่ 2.3 หมู่แทนที่ (R group) ของอนุพันธ์ที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์หลักของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต

ชื่อทางเคมี	อักษรย่อ	หมู่ทำหน้าที่
Poly(3-hydroxypropionate)	P(3HP)	Hydrogen
Poly(3-hydroxybutyrate)	P(3HB)	Methyl
Poly(3-hydroxyvalerate)	P(3HV)	Ethyl
Poly(3-hydroxyhexanoate) or poly (3-hydroxycaproate)	P(3HHx) or P(3HC)	Propyl
Poly(3-hydroxyhexanoate)	P(3HH)	Butyl
Poly (3-hydroxyoctanoate)	P(3HO)	Pentyl
Poly (3-hydroxynonanoate)	P(3HN)	Hexyl
Poly(3-hydroxydecanoate)	P(3HD)	Heptyl
Poly(3-hydroxyundecanoate) or	P(3HUD) or P(3HUd)	Octyl
Poly(3-hydroxydodecanoate)	P(3HDD) or P(3HDd)	Nonyl
Poly(3-hydroxyoctadecanoate)	P(3HOD) or P(3HOd)	Pentadecanoyl
Poly(4-hydroxybutyrate)	P(4HB)	Hydrogen
Poly(5-hydroxybutyrate)	P(5HB)	Methyl
Poly(5-hydroxyvalerate)	P(5HV)	Hydrogen

(Avérous and Pollet, 2012)

ตารางที่ 2.4 ชื่อย่อแบบสั้นและแบบยาวพร้อมลักษณะโครงสร้างของอนุพันธ์
พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต

อักษรย่อแบบสั้น	อักษรย่อแบบเต็ม	โครงสร้าง
PHB	P(3HB)	Homopolymer
PHV	P(3HV)	Homopolymer
PHBV	P(3HB-co-3HV)	Copolymer
PHBHx	P(3HB-co-3HHx)	Copolymer
PHBO	P(3HB-co-3HO)	Copolymer
PHBD	P(3HB-co-3HD)	Copolymer
PHBOd	P(3HB-co-3HOd)	Copolymer

(Avérous and Pollet, 2012)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนของอนุพันธ์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต

PHAs	Poly- (3HB)	Poly-(3HB -co- 20%3HV)	Poly- (4HB)	Poly-(3HB -co- 16%4HV)	Poly-(3HO -co- 12%3HH)
Melting temperature [T_m , °C]	177	145	53	152	61
Glass transition temperature [T_g , °C]	4	-1	-48	-8	-35
Tensile strength [MPa]	40	32	104	26	9
Tensile modulus [GPa]	3.5	1.2	0.149	n.d.	0.008
Elongation at break [%]	6	50	1000	444	380

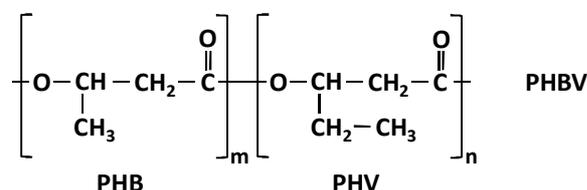
(Steinbüchel and Doi, 2001)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของ Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) หรือ Poly(HB-co-HV) ที่มีร้อยละโมลของอนุพันธ์ hydroxyvalerate หรือ HV ที่ต่างกัน

Poly(HB-co-HV) (mol% HV)	T _m (°C)	T _g (°C)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Notched Izod impact strength (Jm ⁻¹) ^a
0	179	10	3.5	40	50
3	170	8	209	38	60
9	162	6	1.9	37	95
14	150	4	1.5	35	120
20	145	-1	1.2	32	200
25	137	-6	0.7	30	400

^aWith 1-mm radius notch

(Holmes, 1987)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ Poly(3-hydroxy butyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ P(3HB-co-3HV) (Tao et al, 2009)

2.3.2 การสลายตัวของพอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Degradation of polyhydroxyalkanoates)

เนื่องจากพอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์อยู่ในสายของโมเลกุลเรียกว่าพอลิเอสเทอร์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่าย โดยปกติแล้ว PHAs สามารถถูกผลิตและสะสมไว้ในเซลล์ เมื่อจุลินทรีย์เหล่านั้นตาย PHAs จึงถูกปล่อยออกนอกเซลล์ PHAs เหล่านี้จึงถูกใช้เป็นแหล่งอาหารของทั้งแบคทีเรียและเชื้อรา จุลินทรีย์จำนวนมากจึงสามารถย่อยสลาย PHAs ได้ (ตารางที่ 2.7) PHAs ที่สะสมภายในเซลล์สามารถสลายตัวได้โดย

ตารางที่ 2.7 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย PHAs

ชื่อจุลินทรีย์	แหล่งที่อยู่	อ้างอิง
<i>Acidovorax facilis</i>	Soil, compost	Mergaert et al. (1992a)
<i>Acidovorax delafieldii</i>	Soil	Chowdhury (1963)
<i>Acrermonium</i> sp.	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Acidovorax facilis</i>	Soil	Jendrossek et al. (1993)
<i>Acinetobacter</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Actinomyces</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Acremonium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Alcaligenes faecalis</i>	Sewage sludge	Tanio et al. (1982)
<i>Alcaligenes</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Arthrobacter viscosus</i>	Soil	Mergaert et al. (1992b)
<i>Arthrobacter</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Aspergillus</i> sp.	Soil, compost	Mergaert et al. (1992a)
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Soil	Mergaert et al. (1992b)
<i>Aspergillus penicilloides</i>	Soil, compost	Mergaert et al. (1992a)
<i>Aureobacterium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Bacillus megaterium</i>	Soil, compost	Mergaert et al. (1993)
<i>Bacillus polymyxa</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Bacillus</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Beltrania</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Cellulomonas</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Cephalosporium</i> sp.	Soil	Matavulj and Molitoris (1992)
<i>Cladosporium</i> sp.	Soil	Matavulj and Molitoris (1992)
<i>Clostridium</i> sp.	Anaerobic sludge	Mergaert et al. (1996)
<i>Comarnonas testosteroni</i>	Sea water	Mukai et al. (1993)

(Brandl et al., 1995)

ตารางที่ 2.7 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย PHAs (ต่อ)

ชื่อจุลินทรีย์	แหล่งที่อยู่	อ้างอิง
<i>Comamonas acidovorans</i>	Lake water	Mukai et al. (1994)
<i>Corynebacterium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Cytophaga johnsonae</i>	Soil	Mergaert et al. (1993)
<i>Eupenicillium</i> sp.	Soil	McLellan and Halling (1988)
<i>Flavimonas</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Hyphoderma</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Ilyobacter delafieldiia</i>	Estuarine sediment	Janssen and Harfoot (1990)
<i>Micrococcus</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Mucor</i> sp.	Soil	Mataavlj and Molitoris (1992)
<i>Mycobacterium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Paecilomyces marquandii</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Paecilomyces</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Penicillium adametzii</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Penicillium chermisinum</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Penicillium daleae</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Penicillium funiculosum</i>	Soil	Brucato and Wong (1991)
<i>Penicillium ochrochloron</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Penicillium restrictum</i>	Soil	Mergaert et al. (1992a)
<i>Penicillium simplicissimum</i>	Soil, compost	McLellan and Halling (1988)
<i>Penicillium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Pimelobacter</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Polyporus circinatus</i>	Soil	Mataavlj and Molitoris (1992)
<i>Pseudomonas</i> sp.	Soil, compost	Mergaert et al. (1992)
<i>Pseudomonas cepacia</i>	Lake water	Mukai et al. (1994)

(Brandl et al., 1995)

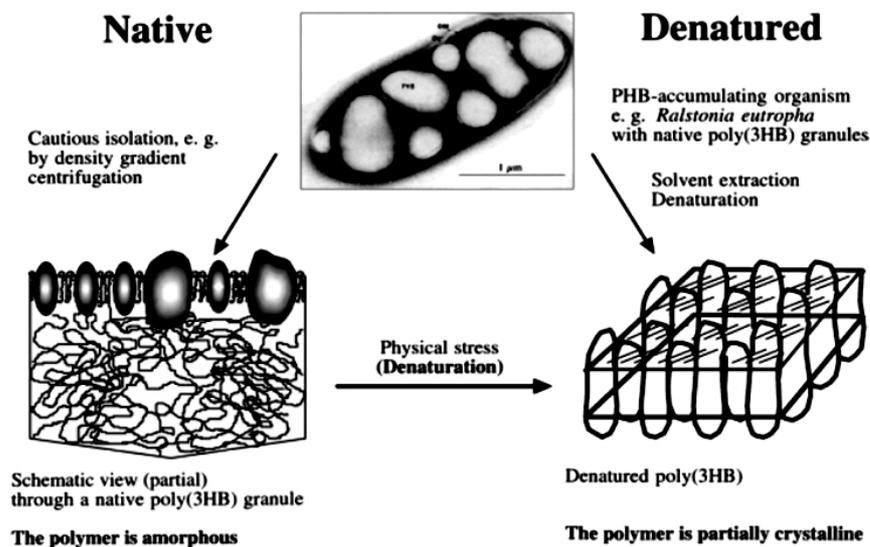
ตารางที่ 2.7 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย PHAs (ต่อ)

ชื่อจุลินทรีย์	แหล่งที่อยู่	อ้างอิง
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Sewage sludge	Schirmer et al. (1993)
<i>Pseudomonas lemoignei</i>	Soil	Delafield et al. (1965)
<i>Pseudomonas pickettii</i>	Laboratory	Mukai et al. (1994)
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Lake water	Mukai et al. (1994)
<i>Pseudomonas syringae</i>	Soil	Mergaert et al. (1993)
<i>Pseudomonas vesicularis</i>	Lake water	Mukai et al. (1994)
<i>Pseudomonas</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Pytium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Stenotrophomonas</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Streptomyces</i> sp.	Soil, compost	Mergaert et al. (1992a)
<i>Variovorax paradoxus</i>	Soil, compost	Mergaert et al. (1992a)
<i>Variovorax</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Verticillium leptobactrum</i>	Compost	Mergaert et al. (1992b)
<i>Verticillium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Xanthomonas maltophilia</i>	Soil	Mergaert et al. (1992b)
<i>Xanthomonas</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)
<i>Zoogloea ramigera</i>	Soil	Jendrossek et al. (1993)
<i>Zygosporium</i> sp.	Soil	Boyandin et al. (2012)

(Brandl et al., 1995)

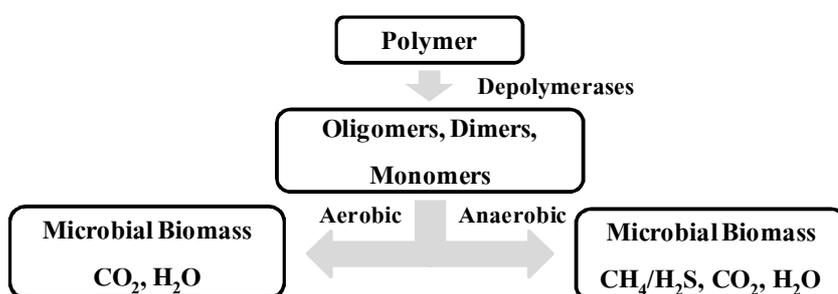
เอนไซม์อินทราเซลล์ูลาร์ฟิเอชเอตีพอลิเมอร์ส (intracellular PHAs depolymerases) สำหรับ PHAs ที่ถูกปลดปล่อยออกนอกเซลล์สามารถสลายตัวโดยเอนไซม์เอกซ์ตราเซลล์ูลาร์ฟิเอชเอตีพอลิเมอร์ส (extracellular PHAs depolymerases) PHAs ที่อยู่ภายในเซลล์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์เอกซ์ตราเซลล์ูลาร์ฟิเอชเอตีพอลิเมอร์ส (extracellular PHAs depolymerases) เช่นเดียวกันกับ PHAs ที่อยู่ภายนอกเซลล์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ อินทราเซลล์ูลาร์ฟิเอชเอตีพอลิเมอร์ส (intracellular PHAs depolymerases) เนื่องจากความแตกต่างกันทางด้านโครงสร้างทาง

กายภาพของ PHAs ภายในและภายนอกเซลล์ทำให้การเสียสภาพ (denatured) ต่างกัน โดย PHAs ที่อยู่ภายในเซลล์มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและถูกปกคลุมพื้นผิวด้วยโปรตีน (proteins) และฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ขณะที่ PHAs ที่อยู่ภายนอกเซลล์ คือ PHAs ที่เสียสภาพ PHAs กลุ่มนี้จึงมีความเป็นผลึกสูง (ภาพที่ 2.4) การย่อยสลายของ PHAs เกิดขึ้น 2 ขั้นตอน (ภาพที่ 2.5) ขั้นตอนแรก PHAs เกิดสลายตัวจากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ไปเป็นโมโนเมอร์ (monomers) ไดเมอร์ (dimers) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomers) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์ดีพอลิเมอร์เรส (depolymerases) โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น ไฮโดรจีเนส (hydrogenase) ดีพอลิเมอร์เรสและเอสเทอร์เลส (esterase) เป็นต้น ขั้นตอนที่สอง ไดเมอร์และโอลิโกเมอร์ถูกย่อยสลายให้เป็นโมโนเมอร์หรือสารโมเลกุลเล็กโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ โดยมีเอนไซม์ไฮโดรเลส (hydrolase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อ PHAs ทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) จากนั้นโมโนเมอร์ที่ได้จากการย่อยสลาย PHAs เหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าเซลล์กลายเป็นแหล่งอาหารคาร์บอนของจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเผาผลาญ (metabolism) ผลจากกระบวนการเผาผลาญได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะที่มีอากาศ สำหรับสภาวะไร้อากาศจะได้แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายของ



ภาพที่ 2.4 สถานะทางกายภาพของ PHAs (ซ้าย) PHAs ภายในเซลล์มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและถูกปกคลุมพื้นผิวด้วยโปรตีนและฟอสโฟลิพิด (กลาง) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงการสะสมของ PHAs ภายในเซลล์ (ขวา) เมื่อเซลล์ถูกทำให้เสียสภาพ PHAs จะเรียงตัวกันอยู่ในสภาวะความเป็นผลึก (Steinbüchel and Doi, 2001)

PHAs ได้แก่สภาพแวดล้อมของ ดิน น้ำทะเลสาบ น้ำทะเล ปุ๋ยหมัก เป็นต้น รวมถึงประชากร จุลินทรีย์ ความเหมาะสมของน้ำ ปริมาณสารอาหาร ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ รูปร่างและความหนาของวัสดุที่ทำจาก PHAs พื้นที่ผิวของ PHAs ที่สัมผัสกับจุลินทรีย์ ความพรุน (porosity) และความเป็นผลึก (crystallinity) และส่วนประกอบอื่น ๆ ในวัสดุ เช่น ฟิลเลอร์ (fillers) หรือสารแต่งสี (coloring agents) เป็นต้น (Lee and Choi, 1999) แบคทีเรียสามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ร่วมได้เร็วกว่าไฮโมพอลิเมอร์ (Averous and Pollet, 2012)



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสภาพที่มีอากาศและไร้อากาศ (Lewandowicz and Leja, 2010)

2.3.3 การประยุกต์ใช้พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต

การใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันก่อให้เกิดขยะเป็นจำนวนมาก หากทำการกำจัดขยะเหล่านี้โดยการเผาก็ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษและมีการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มากเกินไปจนเกิดการสะสมและเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน อีกทั้งข้อจำกัดด้านปริมาณที่ลดลงและไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ในเวลาที่จำกัด จึงเป็นที่มาของงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ PHAs โดยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้มากขึ้น เพื่อแก้ปัญหาทางด้านการจัดการของเสียที่เป็นบรรจุภัณฑ์ใช้แล้ว สำหรับการวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านทางการแพทย์และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของพอลิเมอร์ชีวภาพที่ย่อยสลายได้มีดังต่อไปนี้ (Abou-Zeid, 2001)

การประยุกต์ทางการแพทย์

1) การผลิตเข็มเย็บแผล ไหมเย็บแผล สำลีหรือผ้าก๊อชสำหรับทำความสะอาดและตกแต่งบาดแผล

2) การผลิตเป็นหลอดเลือดเทียม

3) การผลิตกระดูกเทียม (สำหรับศัลยกรรมกระดูก)

4) ใช้สำหรับการกระตุ้นการเจริญเติบโตของกระดูกโดยคุณสมบัติอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแรงกดให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

5) ตัวปลดปล่อยยารักษาโรคซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1) ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

2) ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ถุงพลาสติก ขวดน้ำ วัสดุสำหรับห่อหุ้ม (wrappings) กล่องโฟม และแผ่นฟิล์ม ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ หมวกกันน็อกเสริมไฟเบอร์สำหรับจักรยานที่ย่อยสลายได้

3) ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ non-woven ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้แล้วทิ้ง เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป หรือผลิตภัณฑ์สุขอนามัยของผู้หญิง เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม

จากงานวิจัยเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการผลิตและพัฒนา PHAs ทางการค้า (ตารางที่ 2.7) ยกตัวอย่างบริษัทที่ผลิต PHAs ในระดับอุตสาหกรรม เช่น บริษัท MetaboliX Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ แป้งหรือน้ำตาลที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ได้แก่ พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลังและอ้อย เป็นต้น จากนั้นนำไปหมัก (fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ชนิดพิเศษชื่อ *Escherichia coli* จากนั้นจึงสกัด PHAs เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติก (อรรถวิท เตชะวิบูลย์วงศ์, 2009) เพื่อตอบสนองความต้องการด้านการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ โดยคาดหวังว่าการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก PHAs ทางการค้าเหล่านี้จะมีจำนวนมากขึ้น เพื่อช่วยลดปัญหามลพิษและมลภาวะอันเกิดจากผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อีกทั้งกระบวนการผลิตและการใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะช่วยในการรักษาสมดุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโลกร สำหรับราคา PHAs ทางการค้าในปัจจุบันได้แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 บริษัทและประเทศที่มีการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตทางการค้า

บริษัท	ประเทศ	ชื่อการค้า	ชนิด PHAs	การผลิต
PHB industrial/ copersucar	Brazil	Biocycle	PHB, PHBV	Ind.
Biomatera	Canada	Biomatera	PHBV	Pilot scale
PolyFerm Canada	Canada	VersaMer PHA	PHBV and copolymers	Pilot scale
Tianan	China	Enmat	PHBV	Ind.
Tianjin & DSM	China	GreenBio	PHB-copolymers based on 3 and 4HB	Ind.
Tianzhu	China	Tianzhu	PHBHx	Pilot scale
Biomer	Germany	Biomer	PHB, PHBV	Pilot scale
Bio-On	Italy	Minerv PHA	PHB, PHBV	Pilot scale
Kaneka	Japan	Kaneka	PHBHx	Ind.
Telles (Metabolix/ADM)	US	Mirel	Copolymers	Ind.

(Avérous and Pollet, 2012)

ตารางที่ 2.9 ผู้ผลิตและปริมาณการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตทางการค้าในปัจจุบัน

พอลิเมอร์	ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	กำลังผลิต (ตัน)	ราคา (กก. ⁻¹) (ปี 2553)
PHB	Biogreen®	Mitsubishi Gas Chemical Company Inc. (Japan)	10,000	€2.5–3.0
PHB	Mirel™	Telles (US)	50,000	€1.50
PHB	Biocycle®	PHB Industrial Company (Brazil)	50	n/a
PHBV and PHB	Biomer®	Biomer Inc. (Germany)	50	€3.0–5.0
PHBV, PHBV+ Ecoflex blend	Enmat®	Tianan Biologic, Ningbo (China)	10,000	€3.26
PHBH	Nodax™	P&G (US)	20,000 – 50,000	€2.50
PHBH	Nodax™	Lianyi Biotech (China)	2000	€3.70
PHBH	Kaneka PHBH	Kaneka Corporation (Japan)	1000	n/a
P(3HB-co-4HB)	Green Bio	Tianjin Gree Bio-Science Co/DSM	10,000	n/a
Polyhydroxyalkanoate from P&G	Meredian	Meredian (US)	272,000 (2556)	n/a

(Chanprateep, 2010)

2.3.4 การปรับปรุงคุณสมบัติพลาสติก

เนื่องจาก PHAs โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติความเป็นผลึกสูงจึงส่งผลให้มีความเปราะสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งาน เพราะจะทำให้มีความทนทานต่อการแตกหักน้อยและยากต่อการขึ้นรูป การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีจึงมีส่วนช่วยในการปรับปรุงข้อจำกัดนี้ นอกจากนี้มีการนำสารชนิดอื่นมาผสมเป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสะดวก เพราะไม่ต้องผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่ยุ่งยากและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ ปัจจุบันจึงมีการสร้างวัสดุผสมเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติครอบคลุมกับ

การใช้งานที่จำเพาะเจาะจง (Avella et al., 2000) ด้วยข้อดีหลายประการจึงมีผู้ศึกษา PHAs กับวัสดุผสมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่ม PHAs เอง เช่น poly-(3-hydroxyvalerate) (HV) (Modi et al., 2011) หรือจะเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์จำพวก polyvinyl phenol หรือ PVP, polyvinyl acetate หรือ PVAc, polyvinyl alcohol หรือ PVA (Ha and Cho, 2002) รวมไปถึงพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง (Reis et al., 2008) เส้นใยพืช (Avella et al., 2000) และยางธรรมชาติ (Bhatt et al., 2007) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ PHAs ให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้มากขึ้น

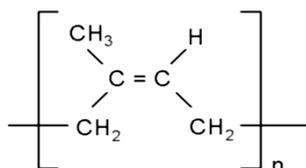
2.4 ยาง (Rubber)

ยาง (rubber) หรืออีลาสโตเมอร์ (elastomer) เป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ยางส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) และยางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR) ยางธรรมชาติ (หรือ cis-1,4-polyisoprene) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการที่วัสดุอื่นไม่สามารถเปรียบเทียบได้ โดยเฉพาะสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) นอกจากนี้ยางยังมีความเหนียว (toughness) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ มีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นดี เช่น โลหะและสิ่งทอ (เส้นใย ผ้าใบ ฯลฯ) ยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphus) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิทรานซิชันหรืออุณหภูมิที่ทำให้วัสดุมีสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) นั่นคือมีลักษณะอ่อนนุ่มที่อุณหภูมิห้อง (มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 3 MPa) ทำให้สามารถเปลี่ยนรูปได้ง่าย นิยมใช้เป็นสารยึดติด (adhesives) วัสดุกันรั่ว (seal) หรือทำแม่แบบยืดหยุ่น (flexible mould) สำหรับเทแบบ โดยทั่วไปแล้วอีลาสโตเมอร์จะเป็นเทอร์โมเซต แต่ก็มีเทอร์โมพลาสติกบางประเภทที่มีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ ยกตัวอย่างอีลาสโตเมอร์ เช่น ยาง ซิลิโคน นีโอพรีน (neoprene) พอลิยูรีเทน (polyurethane) และพอลิอะคริเลต (polyacrylate) เป็นต้น (สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2555)

2.4.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene (ภาพที่ 2.6) โดยมีไอโซพรีน (isoprene, C_5H_8) โดยที่โมโนเมอร์ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยึด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature

crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง



ภาพที่ 2.6 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

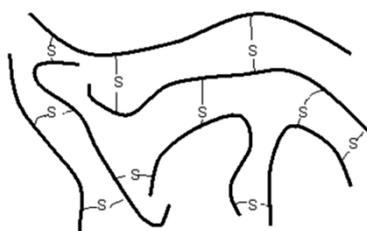
ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดของโลก ยางพาราจึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกถึง 13,500 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี (กระทรวงพาณิชย์, 2554) น้ำยางพาราสามารถนำมาเป็นยางแปรรูปขั้นต้น ได้แก่ น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางอบแห้ง และยางแท่ง ยางพาราเหล่านี้จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอื่น ๆ เช่น ยางสำหรับยานพาหนะ ประกอบด้วย ยางรถยนต์ ยางรถจักรยานยนต์ ยางรถจักรยาน ถุงมือ ยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ และท่อต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่แล้ว น้ำยางพาราจะถูกแปรรูปไปเป็นยางแปรรูปขั้นต้นสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตมากกว่านำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยคิดเป็นร้อยละ 86 ของปริมาณยางทั้งหมดที่ผลิตได้ หน่วยงานภาครัฐจึงได้สนับสนุนให้มีการใช้ยางธรรมชาติในประเทศให้เพิ่มมากขึ้น โดยมีการเพิ่มการผลิตยางที่มีศักยภาพ พัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงการสร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้ยาง (ชนิด ไสร์ตัน, 2555)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง ประมาณร้อยละ 30 แขนวลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอม โมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากเดิมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำจากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด

(two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จะได้อย่างแผ่นรมควัน

ลักษณะเด่นของธรรมชาติอีกประการหนึ่งคือความยืดหยุ่น (elasticity) ของธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบบริสุทธิ์จะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากยังมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้เมื่อต้องการใช้ประโยชน์จากยางจึงจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (vulcanization) การวัลคาไนเซชันคือการทำใหยางแข็งด้วยการใช้กำมะถันให้ยางดิบยึดติดกันแน่น (ภาพที่ 2.7) โดยกระทำที่อุณหภูมิ 142 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 5 บรรยากาศ ให้เป็นรูปชิ้นส่วนซึ่งสามารถใช้โลหะผสมเพื่อให้ยึดเหนียวกันแข็งแรงขึ้น เช่น ยางรถยนต์ สายยางน้ำ



ภาพที่ 2.7 การยึดเหนียวของกำมะถันให้ยางดิบเกาะตัวแน่น (s=กำมะถัน)

ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมายเนื่องจาก

1) ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ ยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น

2) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดีมีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

3) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งในอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน งามที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมัน และสารเคมีต่าง ๆ ต่ำจึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารต่าง ๆ ดังกล่าว

ยางธรรมชาติเมื่อถูกน้ำมันแร่ เช่น เบนซิน เบนโซล จะเกิดการบวมและทำให้คุณสมบัติเชิงกลหายไป ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศทำให้ยางแข็ง ความร้อน แสงแดด หรือความชื้นจัด เป็นตัวเร่งให้ยางแข็ง เปราะ หรืออ่อนเหลว ทำให้ความยืดหยุ่นหายไปมากที่สุด

ยางอ่อน ได้จากการผสมกำมะถันร้อยละ 3 - 20 ยางอ่อนนี้จะยืดตัวและมีความยืดหยุ่นตัวสูงขึ้นหากผสมกำมะถันน้อย ในยางรถยนต์จะมีการเติมไข (wax) เข้าไปผสมเพื่อให้เกิดชั้นผิวบาง ๆ เพื่อป้องกันรังสีจากแสงอาทิตย์ได้ดีพอควร ประโยชน์ใช้งาน คือ ใช้ทำยางรถยนต์ สายยางปะเก็น สายพาน ส่วนที่รับแรงกระแทก ลูกรีดกดในงานพิมพ์ เมมเบรน ฉนวนเคเบิล สายพานลำเลียง พื้นรองเท้า เป็นต้น

ยางแข็ง เกิดจากกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ผสมกำมะถันร้อยละ 30 - 50 ยางแข็งนี้ใช้ปาดผิวได้ง่าย แต่เครื่องมือปาดผิวจะสึกหรือเร็วจึงต้องใช้เครื่องมือปาดผิวที่ทำด้วยเหล็กความเร็วสูงหรือทำโดยโลหะแข็ง ประโยชน์ใช้งานคือใช้ทำล้อรถลาก สารประสานสำหรับแผ่นขัดชิ้นงาน เป็นต้น

ยางฟองน้ำ ผลิตจากการนำน้ำยางดิบ (สีน้ำตาล) ผสมกับผงกำมะถันและสารผสมอื่น ๆ กวนให้เป็นฟองในเครื่องกวน นำไปเทในแบบแล้วทำการวัลคาไนเซชัน ประโยชน์ใช้งานคือใช้ทำฐานรองเครื่องพิมพ์ดีด แผ่นรองเช็ดเท้าในห้องน้ำ ใช้บุเก้าอี้รองนั่ง รองเท้าฟองน้ำ เป็นต้น

ด้วยคุณสมบัติที่ดีในด้านการยืดหยุ่นของยางพาราวัลคูลยางจึงมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรงกระแทก ทำให้มีผู้สนใจศึกษาการนำยางพารามาพัฒนาโดยผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อให้ได้เป็นวัลคูลกันกระแทก ได้แก่ วัลคูลกันกระแทกจากน้ำยางพาราธรรมชาติผสมกับจีลลี่และแป้งมันสำปะหลัง วัลคูลกันกระแทกจากยางธรรมชาติและผงไม้ โฟมกันกระแทกย่อยสลายได้ที่ทำจากน้ำยางผสมกับแป้งและน้ำ วัลคูลกันกระแทกจากน้ำยางพาราผสมกับเส้นใยปาล์มและน้ำมันปาล์ม หรือแม้แต่การนำน้ำยางมาพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเป็นวัลคูลกันกระแทกโดยตรง ได้แก่ วัลคูลกันกระแทกจากยางฟองน้ำ ยางฟองน้ำมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่ต่อเนื่องกันภายในโครงสร้างจึงมีลักษณะคล้ายฟองน้ำและเมื่อถูกแรงกระทำด้วยแรงกดแล้วจะสามารถกลับคืนสู่สถานะเดิมได้ดี

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจที่จะนำยางพารามาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพเพื่อส่งเสริมการสลายตัวของเม็ดกันกระแทกหลังสิ้นสุดการใช้งานและถูกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม โดยพอลิเมอร์ชีวภาพที่น่าสนใจชนิดนี้ คือ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต หรือ พีเอชเอ

2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

เนื่องจาก PHAs เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติทั้งในระบบนิเวศในสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ Volova et al. (2010) จึงได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของ PHAs ที่มีรูปร่างและโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันในแต่ละทะเล พบว่า โครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันไม่มีผลต่อการย่อยสลาย แต่การย่อยสลายที่ต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างที่ต่างกันของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นแผ่นฟิล์มสามารถสลายตัวได้มากกว่าตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นเม็ด

Bhatt et al. (2007) ประสบความสำเร็จในการศึกษาการผสมระหว่าง PHAs กับ 3 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติ (natural rubber) ยางไนไตรล์ (nitrile rubber) และยางบิวตาไดอีน (butadiene rubber) เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลวและมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของ PHAs โดยพบว่า การผสมยางทั้ง 3 ชนิดทำให้มีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้ผลึกของ PHAs ลดลงและช่วยเพิ่มความทนทานให้ PHAs นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยวัดการเจริญของจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Pseudomonas* sp. 202 ในอาหารเหลว BH ที่มีแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม พบว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Pseudomonas* sp. 202 สามารถเจริญเติบโตได้ จากการชั่งน้ำหนักแผ่นฟิล์มพบว่าแผ่นฟิล์มมีน้ำหนักลดลง และภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พบจุลินทรีย์บนแผ่นฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน

Lee and Choi (1999) ได้ศึกษาเพื่อรวบรวมข้อมูลที่น่าสนใจของ PHAs เนื่องจาก PHAs มีคุณสมบัติคล้ายพลาสติกที่มาจากปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลังสิ้นสุดการใช้งาน PHAs จึงได้รับความสนใจในเชิงการค้า จากการศึกษาพบว่าการผลิตและการสลายตัวของ PHAs สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน โดยกระบวนการกำจัดเกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์ดูดซึม (uptake) พอลิฟอสเฟต (polyphosphate, poly P) พร้อมกับดูดซึม (uptake) คาร์บอนเข้าภายในเซลล์ จากนั้นจุลินทรีย์จะเปลี่ยนคาร์บอนที่ดูดซึมเข้ามาให้เปลี่ยนเป็น PHAs โดยอาศัยพลังงานที่ได้จากการสลายตัวของ poly P โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้อากาศ การสะสม PHAs ในแหล่งน้ำเสียจึงอาศัยการใช้ประโยชน์จากสารประกอบอินทรีย์จากแหล่งน้ำเสียนั้น ดังนั้นการสะสมและการผลิต PHAs ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเสีย (เช่น น้ำเสีย) จึงน่าสนใจที่จะนำมาพิจารณาในการนำมาช่วยลดปริมาณขยะอินทรีย์ และหลังจากการใช้งาน PHAs สามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในกากขยะหรือของเสียเทศบาลในสภาวะไร้อากาศ และมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก

Imam et al. (1999) ได้ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของ PHAs มีผลต่อการสลายตัว โดยพบว่า การสลายตัวของ poly(β -hydroxybutyrate-co- β -hydroxyvalerate) หรือ PHBV ที่ผสมแป้งมีอัตราการสลายตัวมากกว่า PHBV เพียงชนิดเดียว โดยตรวจสอบการย่อยสลายจากน้ำหนักที่หายไป และคุณสมบัติแรงดึง (tensile properties) ที่เปลี่ยนไป

Manna and Paul (2000) ได้ศึกษาการย่อยสลายของ Polyhydroxybutyrate (PHB) ในดินประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ดินเหนียว ดินสีแดง (laterite soil) ดินเค็ม (saline soil) และ ดินทราย (sandy soil) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการย่อยสลายของ PHB ในน้ำจืด ในปุ๋ยหมัก และในกากตะกอนน้ำเสียที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 15, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดลองพบว่าในกากตะกอนน้ำเสียที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีการย่อยสลายของ PHB มากที่สุด เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์และเป็นการบ่งชี้ว่า ในตะกอนกากน้ำเสียมีจุลินทรีย์ที่ทำงานได้ดีในอุณหภูมิปานกลาง

Sridewi et al. (2006) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของ PHAs ผสมพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พอลิเมอร์ poly(3-hydroxybutyrate) หรือ P(3HB) และพอลิเมอร์ผสม poly(3-hydroxybutyrate-co-5 mol% 3-hydroxy-valerate) หรือ P(3HB-co-5 mol% 3HV) และ poly(3-hydroxybutyrate-co-5 mol% 3-hydroxy-hexanoate) หรือ P(3HB-co-5 mol% 3HHx) ในป่าชายเลน 3 แห่งที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน โดย PHAs ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วตัดให้เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 1 X 1 เซนติเมตร ตรวจสอบการสลายตัวจากน้ำหนักของแผ่นฟิล์มที่หายไปเป็นเวลานาน 8 สัปดาห์ พบว่ามีการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มในป่าชายเลนทั้ง 3 แห่ง และเมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์ พบว่าโคโลนีของจุลินทรีย์จากป่าชายเลนทั้ง 3 แห่งมีลักษณะคล้ายกัน

Tanrattanakul and Chumaka (2009) ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา คุณสมบัติเชิงกลและทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของโพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลของแป้งมันสำปะหลังผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่แตกต่างกัน 3 สัดส่วน ประกอบด้วย สัดส่วนยางธรรมชาติร้อยละ 0, 15 และ 35 พบว่า เซลล์ของแป้งมีขนาดลดลงและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น มนั้เซลล์ของโพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเรียบ ในขณะที่โพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมกับยางธรรมชาติมีผนังเซลล์ที่ขรุขระ สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของโพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พบว่า ความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) ของโพลีเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น คือ โพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ 261 จูลต่อตารางเมตร (J/m^2) เมื่อผสมกับยางธรรมชาติร้อยละ 15 พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้นเป็น 347 จูลต่อตารางเมตร และเมื่อผสมกับยางธรรมชาติที่สัดส่วนร้อยละ 35 พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 729 จูลต่อตารางเมตร ทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของโพลีที่ผลิตได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมกับยางธรรมชาติโดยสังเกตลักษณะทางกายภาพของโพลีก่อนฝังลงดินและตรวจสอบการย่อยสลายของโพลีในสัปดาห์ที่ 8 จากผลการทดสอบไม่พบชิ้นส่วนของโพลีภายหลังการตรวจสอบกล่าวคือ โพลีมีการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ โดยโพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมกับยางธรรมชาติร้อยละ 15 มีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ในสัปดาห์ที่ 18 สำหรับโพลีที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมกับยางธรรมชาติร้อยละ 35 พบว่ามีการสลายตัวช้า ซึ่งมีการสลายตัวเพียงร้อยละ 20 ในเวลา 22 สัปดาห์ เนื่องจากยางธรรมชาติทำให้โพลีมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ลดลง ทำให้โพลีมีการสลายตัวช้า เพราะน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายทางชีวภาพของเชื้อรา (fungus)

Deng et al. (2001) ได้ศึกษาการสร้างวัสดุผสมระหว่างวัสดุที่มีผลึกสูงอย่าง PHB กับวัสดุอสัณฐานอย่าง poly(Y-benzyl-L-glutamate) หรือ PBLG เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติเชิงกล การผสมวัสดุทั้ง 2 เริ่มต้นโดยนำ PHB และ PBLG มาละลายในคลอโรฟอร์มให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 3 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ทิ้งไว้ให้วัสดุผสมแห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง การผสมระหว่าง PHB กับ PBLG แบ่งออกเป็นอัตราส่วน 0/100, 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 และ 100/0 ผลการศึกษาพบว่า วัสดุผสมทั้ง 2 ไม่สามารถเข้ากันได้ โดยสังเกตได้จากผลการตรวจสอบโดย DSC และจากการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ให้ผลไปในทางเดียวกัน คือ วัสดุทั้ง 2 แยกเฟสกันอย่างชัดเจน แม้วัสดุทั้ง 2 ไม่สามารถเข้ากันได้ แต่อัตราส่วนระหว่าง PHB กับ PBLG ที่ 20/80 พบว่าวัสดุผสมมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PHB และ PBLG บริสุทธิ์