

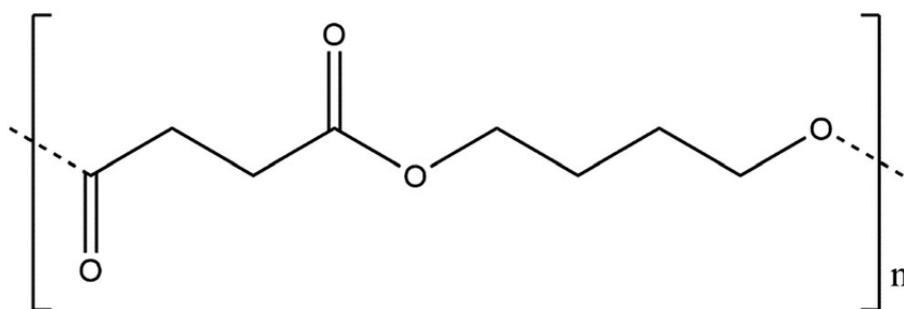
ห่วงโซ่พหุพันธพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate: PBS)

1. ข้อมูลทั่วไปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate: PBS) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า พอลิ(เตตระเมทิลีนซัคซิเนต) (Poly(tetramethylene succinate)) จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเตอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable thermoplastic polyesters) โดยได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับโพลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ในบรรดาพอลิเอสเตอร์ชนิดอะลิฟาติกที่สามารถย่อยสลายได้ PBS ถือเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นเนื่องจากสมบัติทางความร้อนและเชิงกลที่ใกล้เคียงกับโพลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP)

PBS มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหน่วยซ้ำของบิวทิลีนซัคซิเนต ($C_8H_{12}O_4$) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดซัคซินิก (succinic acid) และบิวทานไดออล (1,4-butanediol) ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตขึ้นได้จากทั้งแหล่งปิโตรเคมีหรืออาศัยวัตถุดิบจากธรรมชาติได้ โดยมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymer) โครงสร้างนี้ส่งผลให้ PBS มีสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่ดี เช่น สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดี เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถขึ้นรูปด้วยความร้อนได้หลายประเภท มีความแข็งแรงและทนทาน และ ทนต่อสารเคมี จึงมีการนำ PBS การนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ พลาสติกชีวภาพ และวัสดุทางการแพทย์¹

รูปที่ 1 โครงสร้าง พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate: PBS)



ที่มา: Jingwen Xu., et al. (2019)

1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate: PBS) เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม โดย PBS มีความหนาแน่นประมาณ 1.25

¹ ที่มา: Barletta, M., Aversa, C., Ayyoob, M., Gisario, A., Hamad, K., Mehrpouya, M., & Vahabi, H. (2022). Poly (butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications. *Progress in Polymer Science*.

กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อยู่ในช่วงประมาณ -45 ถึง -10 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) อยู่ที่ประมาณ 114 – 120 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปแล้ว PBS ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพอีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ได้หลากหลาย ในด้านคุณสมบัติเชิงกล PBS มีความสามารถในการยืดตัวสูง โดยมีค่าการยืดเมื่อขาด (Strain at break) สูงถึงร้อยละ 330 ซึ่งอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) วัสดุทั้งสองชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลาสติกทั่วไป² PBS มีสมบัติทางกลที่ดีโดยมีความเหนียวและความยืดหยุ่นที่ดี รวมถึงความต้านทานแรงกระแทก (impact strength) ที่ค่อนข้างสูง³ เมื่อนำสมบัติเชิงกลของ PBS มาเปรียบเทียบกับ พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE) จะพบว่า PBS มีค่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ที่สูงกว่า รวมถึงค่าการยืดตัวเมื่อขาด (Elongation at break) ที่อยู่ในระดับใกล้เคียงหรือสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ความต้านทานแรงกระแทกของ PBS อาจต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ LDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูงเป็นพิเศษ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมบัติทางกล PBS PP และ PBS⁴

รายละเอียด	PBS	PP	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.260	0.90	0.92
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature), °C	-32	-5	-120
จุดหลอมเหลว (Melting temperature), °C	114	163	110
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), MPa	34	33	10
ค่าการยืดตัวเมื่อขาด (Tensile elongation at break), %	560	415	300
ความต้านทานแรงกระแทกแบบ Izod (Izod impact strength), J/m	300	20	>400
ความเป็นผลึก (Crystallinity), %	34-35	56	49

² ที่มา: Jiang, L., & Zhang, J. (2017). Biodegradable and biobased polymers. In L. A. Rosato (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition): Processing, Materials, and Applications* (pp. 127–143). Plastics Design Library.

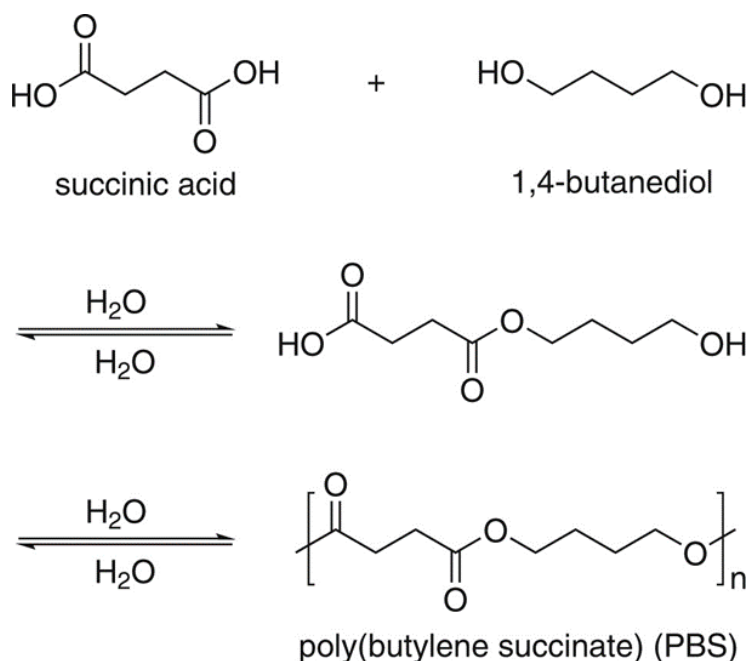
³ ที่มา : Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 159-177.

⁴ ที่มา: Greene, J. P. (2021). Bio-based and biodegradable plastics. In *Automotive Plastics and Composites: Materials and Processing* (pp. 149–174). Plastics Design Library.

2. กระบวนการสังเคราะห์

Polybutylene succinate หรือ PBS กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์พอลิเมอร์ PBS (Polybutylene Succinate) โดยทั่วไปดำเนินการผ่านกระบวนการพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ระหว่างกรดซัคซินิก (Succinic acid) หรือไดเมทิลซัคซิเนต (Dimethyl succinate) กับ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน ระหว่าง กรดซัคซินิก กับ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol)



ที่มา: Nagahata, R., *et al.* (2018)

ซึ่งโมโนเมอร์ทั้งสองชนิดนี้สามารถผลิตได้ทั้งจากแหล่งชีวภาพ (Biobased sources) หรือจากปิโตรเลียม (Fossil-based sources) ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่เลือกใช้ โดย PBS ในอดีตและปัจจุบันถูกผลิตจากแหล่งปิโตรเคมี (Petrochemical sources) มาเป็นเวลานานโดยผู้ผลิตรายใหญ่ เช่น Showa Highpolymer และ Mitsubishi Chemicals ซึ่งก่อตั้งโรงงานผลิต PBS ที่มีกำลังการผลิต 3,000 ตันต่อปี ตั้งแต่ปี 2003 โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า GS Pla (Green and Sustainable Plastic) แม้ว่าปัจจุบันจะมีแนวโน้มใหม่ในการผลิต PBS จากทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และ ข้าวโพดในช่วงสิบปีที่ผ่านมาแต่ส่วนใหญ่ยังคงมาจากปิโตรเคมี⁵

⁵ ที่มา : Aliotta, L., Seggiani, M., Lazzeri, A., Gigante, V., & Cinelli, P. (2022). A Brief Review of Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Its Main Copolymers: Synthesis, Blends, Composites, Biodegradability, and Applications. *Polymers*, 14(4), 844.

2.1 การสังเคราะห์กรดซัคซินิก (Succinic acid)

กระบวนการผลิตกรดซัคซินิกในระดับอุตสาหกรรมสามารถผลิตได้หลากหลายวิธี โดยทั่วไปใช้วัตถุดิบจากปิโตรเคมี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน โดยตัวอย่างกระบวนการผลิตที่สำคัญ มีดังนี้

- การออกซิเดชันของพาราฟิน (Paraffin oxidation) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแมงกานีสหรือแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพาราฟิน ส่งผลให้ได้กรดไดคาร์บอกซิลิก (Dicarboxylic acids) ชนิดต่าง ๆ รวมถึงกรดซัคซินิก อย่างไรก็ตาม ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ แม้จะผ่านกระบวนการกลั่นและตกผลึกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์แล้วก็ตาม
- การเติมไฮโดรเจนของกรดมาเลอิก (Hydrogenation of the maleic acid) กระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาใช้ตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1930 โดยอาศัยการเติมไฮโดรเจนเข้าสู่กรดมาเลอิกผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด ซึ่งสามารถให้ผลผลิตของกรดซัคซินิกในปริมาณสูงและมีความบริสุทธิ์ดี อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีความซับซ้อน ใช้ต้นทุนสูง และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

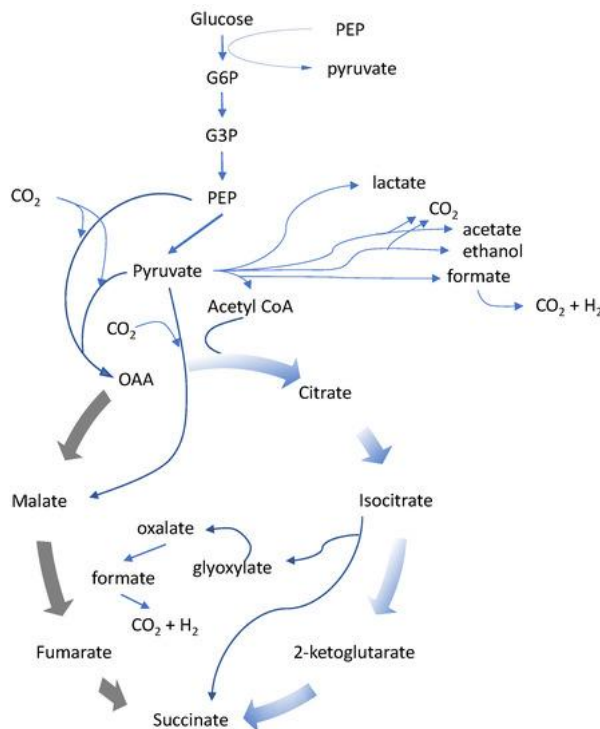
ปัจจุบัน กรดซัคซินิกเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ผลิตโดยการเติมไฮโดรเจนทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ให้เป็นซัคซินิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นจึงเติมน้ำเพื่อให้ได้กรดซัคซินิก โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้มาจากการออกซิเดชันของบิวเทน (Butane) หรือเบนซีน (Benzene) กรดซัคซินิกความบริสุทธิ์สูงสามารถผลิตได้จากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารและยา

ในขณะเดียวกัน การผลิตกรดซัคซินิกทางชีวภาพ (Biological production of succinic acid) โดยใช้กระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย กำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นแนวทางที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตจากปิโตรเคมี กรดซัคซินิก ซึ่งเป็นกรดไดคาร์บอกซิลิก (dicarboxylic acid) ที่มีความต้องการสูงในอุตสาหกรรม สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ง่ายและมาจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น กลูโคส (Glucose) ไซโลส (Xylose) แป้ง (Starch) อนุพันธ์ของอัลฟาเซลลูโลส (Alpha-cellulose derivatives) ขยะอาหาร (Food waste) และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร (Agricultural residues) การผลิตกรดซัคซินิกในจุลินทรีย์เกิดขึ้นผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ โดยเฉพาะในวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก (Tricarboxylic acid cycle: TCA cycle หรือ Krebs cycle) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการสร้างพลังงานในสิ่งมีชีวิต การหมักสามารถดำเนินการได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic fermentation) และไม่มีออกซิเจน (Anaerobic fermentation) ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะที่ควบคุม⁶ จุลินทรีย์ที่รู้จักกันดีที่สุด ได้แก่ *Actinobacillus succinogenes*, *Anaerobiospirillum*

⁶ ที่มา: Wang, J., Zeng, A., & Yuan, W. (2022). Succinic acid fermentation from agricultural wastes: The producing microorganisms and their engineering strategies. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100313.

succiniciproducens, *Mannheimia succiniciproducens*, *Basfia succiniciproducens*, *Yarrowia lipolytica*, *Pichia kudriavzevii*, *Clostridium spp.*, *S. cerevisiae*, และ *Escherichia coli*⁷

รูปที่ 3 เส้นทางเมแทบอลิซึมที่นำไปสู่การสังเคราะห์กรดซัคซินิก (Metabolic pathways to succinic acid)



ที่มา: Nhuan P. Nghiem., Susanne Kleff., Stefan Schwegmann (2017)

2.2 การสังเคราะห์ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol: BDO)

โดยกระบวนการผลิต BDO สามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นที่เป็นสารเคมีจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในขณะที่เดียวกันสามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติ เช่น กลูโคสจากข้าวโพด โดยผ่านกระบวนการทางชีวภาพ โดยตัวอย่างกระบวนการผลิต มีดังนี้

- กระบวนการ Reppe Reaction: เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรม โดยเริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง อะเซทิลีน (acetylene) กับ ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เพื่อผลิตสารประกอบตัวกลาง ก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอน ไฮโดรจิเนชัน เพื่อให้ได้ BDO เทคโนโลยีนี้พัฒนาโดย Walter Reppe ตั้งแต่ช่วงปี 1930 และในปัจจุบันยังคงถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยบริษัทชั้นนำ เช่น BASF และ BASF/Idemitsu โดยใช้ก๊าซธรรมชาติแทนแคลเซียมคาร์ไบด์ในกระบวนการผลิตอะเซทิลีน ซึ่งกระบวนการนี้ครองสัดส่วนราวร้อยละ 42 ของการผลิต BDO ทั่วโลก
- กระบวนการ Mitsubishi Acetoxylation: บริษัท Mitsubishi Chemical ได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิต BDO ที่เรียกว่า Acetoxylation Process ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1970 กระบวนการ

⁷ ที่มา: Barletta, M., Aversa, C., Ayyoob, M., Gisario, A., Hamad, K., Mehrpouya, M., & Vahabi, H. (2022). Poly (butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications. *Progress in Polymer Science*.

นี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก โดยขั้นตอนที่ 1 Acetoxylation เพื่อเติมหมู่แอซิดซิงในสารตั้งต้น จากนั้นขั้นตอนที่ 2 Hydrogenation เพื่อเติมไฮโดรเจน และขั้นตอนที่ 3 Hydrolysis เป็นการสลายพันธะด้วยน้ำ

- กระบวนการ Davy Process: กระบวนการนี้พัฒนาโดยบริษัท Davy Process Technology ร่วมกับ CONSER และ SISAS โดยใช้ maleic anhydride ซึ่งผลิตได้จากการออกซิไดซ์ บิวเทน (butane) หรือ เบนซีน (benzene) ในกระบวนการนี้ maleic anhydride จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดมาลิก (maleic acid) แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอน ไฮโดรจิเนชัน เพื่อผลิต BDO นอกจากนี้ ยังสามารถได้ผลิตภัณฑ์ร่วม เช่น Tetrahydrofuran (เตตระไฮโดรฟิวแรน) และ γ -butyrolactone (GBL) ภายในกระบวนการเดียวกัน
- กระบวนการจาก Propylene Oxide (พัฒนาโดย LyondellBasell): บริษัท LyondellBasell ได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิต BDO จาก propylene oxide โดยผ่าน 3 ขั้นตอนหลัก โดยขั้นตอนที่ 1 Isomerization ของ propylene oxide ให้เป็น allyl alcohol จากนั้นขั้นตอนที่ 2 Hydroformylation เพื่อเปลี่ยน allyl alcohol ให้เป็น 4-hydroxybutyraldehyde และขั้นตอนที่ 3 Hydrogenation ของสารตัวกลางเพื่อให้ได้ BDO โดยกระบวนการนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถควบคุมสภาพการผลิตได้ดีและให้ผลผลิตสูง

สำหรับการผลิตด้วยกระบวนการทางชีวภาพของ 1,4-บิวเทนไดออล สามารถทำได้โดยกระบวนการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ที่ผ่านการดัดแปลงพันธุกรรม (Genetically engineered microorganisms) หนึ่งในจุลินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้ในการผลิต BDO คือ *Escherichia coli* ซึ่งถูกวิศวกรรมพันธุกรรมเพื่อผลิต BDO จากกลูโคสโดยตรง⁸ โดยในปัจจุบันมีบริษัท Genomatica ประเทศสหรัฐอเมริกาพัฒนา biotechnological route สำหรับผลิต 1,4-BDO โดยใช้ *engineered E. coli* สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมจากน้ำตาล และได้มีการผลิตเชิงพาณิชย์⁹

3. การวิเคราะห์ห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปกรดแลคติก

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและสามารถผลิตได้จากชีวมวล ในปี 2566 มีมูลค่าตลาดทั่วโลก 399.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยคาดว่าจะเติบโตถึง 2.0 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2573 โดยมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (CAGR) ที่ร้อยละ 20.2 ในช่วงระยะ 2567-2575¹⁰ และในปี 2567 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีสัดส่วนการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 1.3 ของการผลิตพลาสติกชีวภาพรวมทั่วโลก¹¹ หรือคิดเป็นกำลังการผลิตที่ 0.032 ล้านตันโดยประมาณ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่

⁸ ที่มา : Yim, H., Haselbeck, R., Niu, W., Pujol-Baxley, C., Burgard, A., Boldt, J., ... & Van Dien, S. (2011). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol. *Nature Chemical Biology*, 7(7), 445-452.

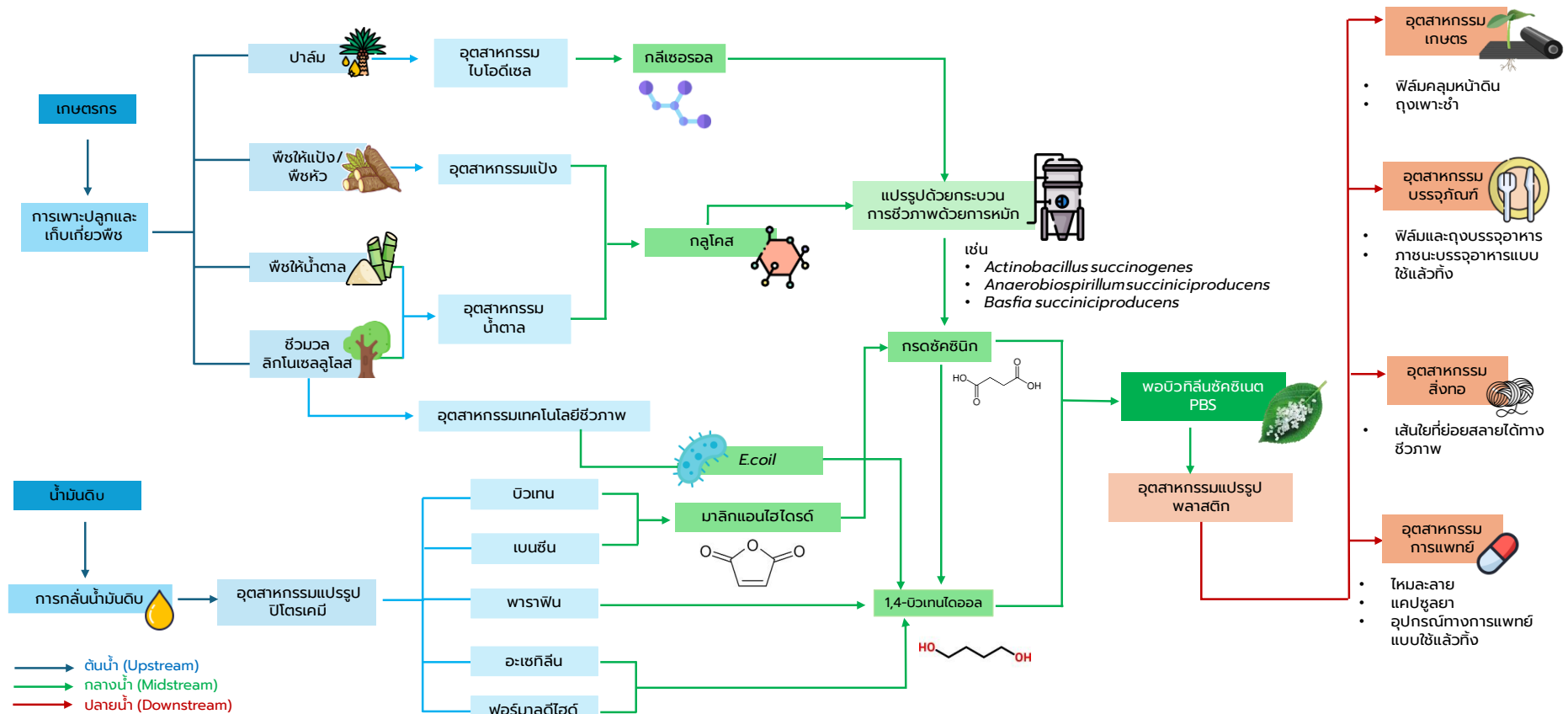
⁹ ที่มา : bioplasticsnews

¹⁰ ที่มา: straits research

¹¹ ที่มา : european-bioplastics

หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ ฟิล์ม พลาสติกขึ้นรูป หรือวัสดุการเกษตร แม้ว่า PBS จะสามารถผลิตจากวัตถุดิบชีวภาพได้ แต่ในปัจจุบันกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ยังคงพึ่งพาวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมีโดยจากข้อมูลทั้งหมด ซึ่งสามารถวิเคราะห์และจัดทำแผนภาพห่วงโซ่อุปทานของการผลิต PBS ได้ตามที่แสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 ห่วงโซ่อุปทานพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต



ที่มา : Nath et al., ปรับปรุงโดย PIC PITH

จากการวิเคราะห์ห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate Industry Supply Chain) ที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบชีวภาพ พบว่า องค์ประกอบหลักที่สำคัญประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

3.1 อุตสาหกรรมต้นน้ำ (Upstream) อุตสาหกรรมต้นน้ำของ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต คือกระบวนการจัดหาวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตโมโนเมอร์หลัก ได้แก่ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวทานไดออล (1,4-Butanediol) ซึ่งสามารถได้มาจาก 2 แหล่งหลัก ได้แก่

- **อุตสาหกรรมเกษตรหรือชีวมวล (Biomass-based Industry):** สำหรับอุตสาหกรรมเกษตรแหล่งวัตถุดิบตั้งต้นได้จาก พืชที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย และพืชอื่น ๆ ที่ให้แป้งและน้ำตาล ซึ่งสามารถนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปผ่านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแปรรูปน้ำตาล อุตสาหกรรมแปรรูปแป้ง เป็นต้น เพื่อให้กลายเป็นกลูโคส กลูโคสนี้จะเข้าสู่กระบวนการหมักทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำกลีเซอรอล จากอุตสาหกรรมปาล์มมาหมักโดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะ เพื่อผลิตกรดซัคซินิก และอาจนำไปต่อยอดเป็น 1,4-บิวทานไดออล ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสังเคราะห์ PBS นอกจากนี้ยังสามารถใช้ วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด ฟางข้าว หรือเปลือกมันสำปะหลัง มาผ่านกระบวนการย่อยชีวภาพเพื่อแปลงเป็นกลูโคสได้เช่นกัน ซึ่งถือเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุ ลดปัญหาของเสีย และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

- **อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical Industry):** ในอีกทางหนึ่ง กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล เป็นสารตั้งต้นสำคัญในการสังเคราะห์ PBS นั้น สามารถผลิตได้จากกระบวนการทางเคมีที่ใช้สารตั้งต้นที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น บิวเทน หรือเบนซีน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ การผลิตในลักษณะนี้เป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีขนาดใหญ่ โดยมีข้อดีด้านต้นทุนและความพร้อมของวัตถุดิบในปัจจุบัน แต่ก็ยังเป็นกระบวนการที่พึ่งพาทรัพยากรฟอสซิลและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งชีวภาพ

3.2 อุตสาหกรรมกลางน้ำ (Intermediate) อุตสาหกรรมกลางน้ำของ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นที่ได้จากอุตสาหกรรมต้นน้ำ เช่น กลูโคสหรือวัตถุดิบจากปิโตรเคมี ให้กลายเป็นสารเคมีพื้นฐาน ได้แก่ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวทานไดออล ก่อนนำไปสังเคราะห์เป็น PBS อุตสาหกรรมกลางน้ำของ PBS ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ส่วน ได้แก่ การผลิตกรดซัคซินิก การผลิต 1,4-บิวทานไดออล และการสังเคราะห์ PBS ดังนี้

- **การผลิตกรดซัคซินิก:** วัตถุดิบหลักคือกลูโคสที่ผ่านกระบวนการแปรรูปจากอุตสาหกรรมแป้งและน้ำตาล ก่อนนำเข้าสู่วัฏจักรหมัก โดยอาศัยจุลินทรีย์เฉพาะ เช่น *Actinobacillus succinogenes*, *Anaerobiospirillum succiniciproducens* และ *Basfia succiniciproducens* เพื่อผลิตกรดซัคซินิก ซึ่งเป็นหนึ่งในสารตั้งต้นสำคัญของการผลิต PBS ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสามารถผลิตได้จากมาลิกแอตไฮโดรต์โดยนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่นิยมใช้ใน

การผลิตกรดซัคซินิกจากปิโตรเคมี โดยมาลิกแอโนไฮไดรด์เองสามารถผลิตได้จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น บิวเทน (Butane) หรือ เบนซีน (Benzene) ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

- **การผลิต 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol)** 1,4-บิวเทนไดออลสามารถผลิตได้จากทั้งแหล่งชีวภาพและปิโตรเคมี โดยในกระบวนการชีวภาพจะใช้น้ำตาลจากพืชเป็นวัตถุดิบหลักผ่านการหมักด้วยจุลินทรีย์เฉพาะ ขณะที่กระบวนการจากปิโตรเคมีจะใช้วัตถุดิบ เช่น บิวเทน เบนซีน พาราฟิน อะเซทิลีน หรือ ฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งถูกแปรรูปผ่านกระบวนการทางเคมีหรือเทคโนโลยีชีวภาพขั้นสูง เพื่อให้ได้ BDO ที่มีความบริสุทธิ์สูง

- **การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS Polymerization)** เมื่อได้กรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลแล้ว สารทั้งสองจะถูกนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation Polymerization) โดยมีการปล่อยน้ำออกเป็นผลพลอยได้ เพื่อผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ในรูปของเม็ดพลาสติกชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปลายทางได้หลากหลาย สำหรับประเทศไทยถือเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีความได้เปรียบในการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่น กรดซัคซินิก และบิวเทนไดออล สามารถได้จากกระบวนการแปรรูปทางชีวภาพโดยใช้ผลผลิตจากเกษตรกรรมเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีฐานการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 1 โรงงาน คือ โรงงานของบริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคมี จำกัด (PTT MCC Biochem) ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมเอเชีย จังหวัดระยอง โดยมีการผลิต 20,000 ตันต่อปี

นอกจากนี้ยังมีผู้จัดจำหน่ายเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตภายในประเทศไทย โดยตัวอย่างผู้จัดจำหน่ายดังกล่าว ¹² แสดงใน **ตารางที่ 2**

ตารางที่ 2 ตัวอย่างรายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตภายในประเทศ

ชื่อบริษัท	ที่อยู่	เบอร์โทร
บริษัท พีทีที โพลีเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด	555/1 วิภาวดี-รังสิต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900	0-2140-4488
บริษัท เอสซีจี เพอร์ ฟอร์ มานซ์ เคมีคอลส์ จำกัด	1 ถนนปูนซีเมนต์ไทย แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กทม 10800	02-5864204
บริษัท พูแอนด์ (ประเทศไทย) จำกัด	3 หมู่ 2 นิคมอุตสาหกรรม เอเชีย ต.บ้านฉาง อ.ระยอง จ.ระยอง 21130	038-698868

¹² ที่มา: โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ และ Bio innovation linkage

ชื่อบริษัท	ที่อยู่	เบอร์โทร
หจก.เอ็มแอนด์พี อิมแป็กซ์	2/8 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขต ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520	02-012-9044
บริษัท อีวิคท์ (ประเทศไทย) จำกัด	968 พระรามที่ 4 สีสม บางรัก กรุงเทพมหานคร 10500	02-632-4115
บริษัท ไทย เคเค อุตสาหกรรม จำกัด	56 ซอย ธรรมศิริ ต.บาง เสาธง อ.บางเสาธง สมุทรปราการ 10500	02-3384900

3.3 อุตสาหกรรมปลายน้ำ (Downstream) อุตสาหกรรมปลายน้ำของพอลิবিທိລິນສັດซินเนต (PBS) เป็นกระบวนการต่อยอดจากอุตสาหกรรมกลางน้ำที่ได้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยอาศัยคุณสมบัติสำคัญของ PBS ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น และทนความร้อนได้ดี ทำให้เหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานสั้น หรือมีเป้าหมายเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยพอลิবিທိລິນສັດซินเนตสามารถนำมาใช้ได้ ในอุตสาหกรรม ดังนี้

- **อุตสาหกรรมเกษตร:** ในปัจจุบันมีการนำพอลิবিທိລິນສັດซินเนต (Polybutylene Succinate: PBS) มาใช้ในภาคการเกษตรเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเติบโตของระบบการปลูกพืชภายใต้สภาวะควบคุม (Controlled Environment Agriculture: CEA) ส่งผลให้ความต้องการวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อย่างฟิล์มคลุมดิน (Mulch films) ฟิล์มคลุมเรือนกระจก รวมถึง ถุงเพาะชำ ดังแสดงใน **รูปที่ 5** ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในระบบการเกษตรสมัยใหม่ โดยฟิล์มที่ใช้ในภาคเกษตรส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังคงผลิตจากพลาสติกปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและก่อให้เกิดปัญหาขยะตกค้างในดินและสิ่งแวดล้อม ทำให้ PBS ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable bioplastic) จึงถูกพัฒนาและนำมาใช้เป็นในอุตสาหกรรมการเกษตรมากขึ้น โดย PBS มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น ทนทาน และสามารถปรับแต่งสูตรให้เหมาะกับการใช้งานในภาคการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ใช้งานง่ายและสะดวก ประหยัดแรงงานและเวลา ลดอัตราการตายของต้นกล้า¹³

¹³ ที่มา: Nath, D., Misra, M., Al-Daoud, F., & Mohanty, A. K. (2024). Studies on poly(butylene succinate) and poly(butylene succinate-co-adipate)-based biodegradable plastics for sustainable flexible packaging and agricultural applications: a comprehensive review. RSC Sustainability, 3(3), 1267-1302.

รูปที่ 5 ก) फिल्मคลุมดิน และ ข) फिल्मคลุมเรือนกระจก



ที่มา: PTT

● **อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์:** จากกระแสนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยการลดใช้พลาสติก มีการหันมาใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกโดยเฉพาะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (single-use plastics) หนึ่งในวัสดุทางเลือกที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น คือ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate: PBS) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและทนทานต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกับพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป นอกจากนี้ยังคุณสมบัติในการกันน้ำ แก๊ส และกลิ่นได้ดี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอาง เพื่อช่วยรักษาความสดใหม่และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย โดยในปัจจุบันมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ดังนี้

- **บรรจุภัณฑ์อาหาร (Food Packaging):** PBS ถูกนำมาใช้ผลิตเป็น ฟิล์มห่ออาหาร สำหรับห่อผัก ผลไม้ ขนมปัง และอาหารสดอื่น ๆ เนื่องจากสามารถช่วย ยืดอายุการเก็บรักษา โดยลดการสัมผัสกับอากาศและความชื้น ลดการเน่าเสีย และช่วยลดปริมาณขยะจากอาหารที่สูญเสียไปโดยไม่จำเป็น
- **ภาชนะบรรจุอาหาร:** เช่น กล่องอาหาร จาน ชาม ซ้อนส้อมแบบใช้แล้วทิ้ง ซึ่งผลิตจาก PBS สามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งาน และทนต่อการใช้งานทั่วไปได้ดี ลดการพึ่งพาภาชนะจากโฟมหรือพลาสติกที่ย่อยสลายยาก
- **แก้วสำหรับเครื่องดื่ม:** PBS มีความทนทานต่อความร้อน จึงเหมาะสำหรับการทำแก้วกาแฟหรือชาแบบใช้แล้วทิ้ง ซึ่งในอดีตนิยมใช้แก้วเคลือบ PE ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ
- **ถุงและฟิล์มทั่วไป (General Bags and Films):** มีการนำ PBS ไปผลิตเป็นถุงหิ้วและฟิล์มพลาสติกทั่วไป ที่สามารถทดแทนถุงพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้งได้ โดยยังคงความเหนียวและยืดหยุ่นเพียงพอต่อการใช้งานประจำวัน ทั้งยังสามารถย่อยสลายได้เมื่อหมดอายุการใช้งาน

รูปที่ 6 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



ที่มา: Kapook

● **อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์**ในปัจจุบัน PBS เริ่มถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งสามารถนำมาแปรรูปเป็นผ้าไม่ทอได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Non-woven fabrics) ซึ่งสามารถขึ้นรูปง่ายและและสามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่หลากหลาย เช่น สปันบอนด์ (Spunbond) เมลต์สปินนิง (Melt Spinning) และ อิเล็กโตรสปิน (Electrospinning) ซึ่งเป็นกระบวนการทั่วไปที่ใช้เครื่องจักรปั่นเส้นใยทั่วไปที่มีอยู่แล้วในอุตสาหกรรม ซึ่งผ้าไม่ทอที่ผลิตจาก PBS สามารถมีความหนาตั้งแต่ 20 - 100 แกรม และครอบคลุมการใช้งานในหลากหลายประเภท เช่น หน้ากากอนามัย แผ่นกรอง อุปกรณ์ทางการแพทย์ เสื้อผ้าแบบใช้ครั้งเดียว ไปจนถึงวัสดุบรรจุภัณฑ์ โดยมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความนุ่ม ความยืดหยุ่น (Flexibility) การยึดเกาะระหว่างเส้นใยที่ดี PBS สามารถแปรรูปได้ง่าย (Good Processability) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ PBS จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตผ้าไม่ทอที่ต้องการความยั่งยืน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตอบโจทย์อุตสาหกรรมยุคใหม่ที่เน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน¹⁴

รูปที่ 7 ตัวอย่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ



ที่มา: pttmcc

¹⁴ ที่มา : pttmcc

● **อุตสาหกรรมทางการแพทย์:** PBS เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความปลอดภัย การย่อยสลายทางชีวภาพ และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งานในด้านการแพทย์ ตัวอย่างการใช้งาน PBS ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ได้แก่

- **ไหมเย็บแผลที่ละลายได้ (Biodegradable sutures):** ถูกนำมาใช้ในการผลิตไหมเย็บแผลที่สามารถสลายตัวได้เองและถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ไม่ต้องเอาไหมออก¹⁵
- **ระบบนำส่งยา (Drug delivery systems):** ในปัจจุบัน PBS ได้ถูกนำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ระบบนำส่งยา โดยมีเป้าหมายหลักคือการควบคุมอัตราการปลดปล่อยตัวยาให้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ หรือเฉพาะจุด (targeted delivery) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาและลดผลข้างเคียงจากยา โดยถูกนำไปใช้ในหลากหลายรูปแบบ เช่น ไมโครพาร์ติเคิล/ไมโครแคปซูล (Microparticles/Microcapsules) PBS ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มตัวยาในรูปของอนุภาคนาขนาดเล็ก โดยสามารถควบคุมการปลดปล่อยของตัวยาให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาที่กำหนด ช่วยลดความถี่ในการให้ยา และเพิ่มความสม่ำเสมอของระดับยาในร่างกาย มีการพัฒนา PBS ในระดับนาโนเพื่อให้สามารถนำส่งยาเข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะสำหรับยาเฉพาะทาง เช่น ยารักษามะเร็ง ซึ่งการนำส่งที่แม่นยำสามารถช่วยลดผลข้างเคียงและเพิ่มประสิทธิภาพของยาได้อย่างมาก รวมถึงยังสามารถนำ PBS มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางที่ฝังตัวยาไว้ภายใน เหมาะสำหรับการปล่อยยาเฉพาะที่ (local delivery) เช่น การเคลือบบาดแผล หรือการเคลือบอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ปลูกถ่ายในร่างกาย เช่น stents หรือ implantable devices เพื่อป้องกันการติดเชื้อหรือการอักเสบ¹⁶
- **วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering):** PBS ถูกใช้งานในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ โดยเริ่มมีงานวิจัยและพัฒนา เช่น มีการนำ PBS มาใช้ในการสร้างโครงเลี้ยงเซลล์เพื่อทดแทนหรือซ่อมแซมกระดูกที่เสียหาย เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับกระดูก และสามารถย่อยสลายได้ในร่างกาย ทำให้เซลล์กระดูกสามารถเจริญเติบโตและสร้างเนื้อเยื่อกระดูกใหม่ขึ้นมาแทนที่โครงเลี้ยงเซลล์ที่ย่อยสลายไป¹⁷

¹⁵ ที่มา: Mazy, D., Ma, Z., Chung-Tze-Cheong, C., Lamer, S., Li, J., & Nault, M. L. (2023). Modification of the properties of a suture thread with a tough gel coating: A baseline ex-vivo study. *Journal of Orthopaedic Research*, 41(8), 1815-1820.

¹⁶ ที่มา : Freire, N. F., Cordani, M., Aparicio-Blanco, J., Fraguas Sanchez, A. I., Dutra, L., Pinto, M. C. C., Zarrabi, A., Pinto, J. C., Velasco, G., & Fialho, R. (2024). Preparation and characterization of PBS (Polybutylene Succinate) nanoparticles containing cannabidiol (CBD) for anticancer application. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 97, 105833

¹⁷ ที่มา : Vigni, G. E., Licciardi, M., D'itri, L., Terracina, F., Scirè, S., Arrabito, G., ... & Cicero, L. (2024). Improved Bone Regeneration Using Biodegradable Polybutylene Succinate Artificial Scaffold with BMP-2 Protein in a Rabbit Model. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 112(3), 123-130.

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate: PBS) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น การขึ้นรูปได้ง่าย ความยืดหยุ่นสูง และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม PBS เป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ PBS ยังสามารถผลิตได้จากวัสดุชีวมวล (biomass) เช่น กรดซัคซินิกและบิวทานไดออลที่ได้จากกระบวนการหมัก ทำให้เป็นวัสดุที่สนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ ตลอดจนการแพทย์และเป็นต้น