

ห่วงโซ่คุณค่าของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท

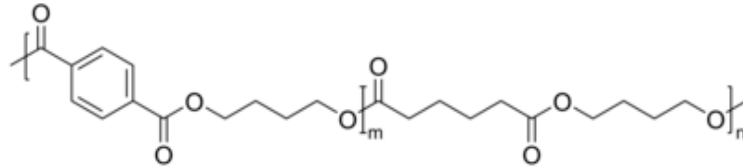
การศึกษาข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (PBAT)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate Terephthalate หรือ เรียกโดยย่อว่า PBAT) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จากผลิตภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และเนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ชนิดหนึ่งของกรดอะดิพิค (adipic acid), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และ dimethyl terephthalate และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายสายโซ่หลัก (Synthetic aliphatic-aromatic polyester) ทำให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆ ทั้งฟิล์มห่ออาหาร ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ทดแทนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งปิโตรเคมี เช่น พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน ซึ่งไม่สามารถย่อยสลาย ได้เองตามธรรมชาติและทำให้เกิดปัญหาโลกร้อน แผ่นฟิล์มคลุมหน้าดินทางการเกษตร เพื่อทดแทนการใช้แผ่นฟิล์มคลุมหน้าดินจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene) เนื่องจาก PBAT เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงไม่เป็นอันตรายต่อต้นกล้า และประหยัดเวลาในการดำเนินงานอีกด้วย แต่ต้นทุนการผลิต PBAT ยังมีราคาสูง จึงนิยมผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch : TPS), พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid : PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate : PBS) ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกเชิงประกอบให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ PBAT ในวงการแพทย์ซึ่งนิยมนามาประยุกต์ใช้กับร่างกายมนุษย์ทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) เช่น กระดูกอ่อน (Cartilage), วงเดือน (Meniscus), เนื้อเยื่อ (Tissue), ข้อต่อ (Joint) เพื่อรักษา ซ่อมแซมหรือทดแทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่สูญเสียไป เนื่องจาก PBAT มีความแข็งและความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นต่ำ ต้านทานการกัดกร่อนและการสึกกร่อนได้ดี (ข้อมูลอ้างอิงจาก Southeast Asian Fisheries Development Center/Training Department (SEAFDEC/TD))

PBAT ถูกผลิตขึ้นจากผู้ผลิตที่หลากหลายและเป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้า เช่น ecoflex® , Wango, Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi เป็นต้น ในทางการตลาดทั่วไป PBAT เป็นพลาสติกทางเลือกหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติก Low density polyethylene (LDPE) โดยพลาสติกทั้งสองมีคุณสมบัติที่เหมือนกันรวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน อาทิเช่น ถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT แสดงดังรูปที่ 1 มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่างบล็อกโคพอลิเมอร์ 2

บล็อกเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่แท้จริงยังคงเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของหลายบล็อกมาเกิดพันธะกัน

รูปที่ 1 โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT



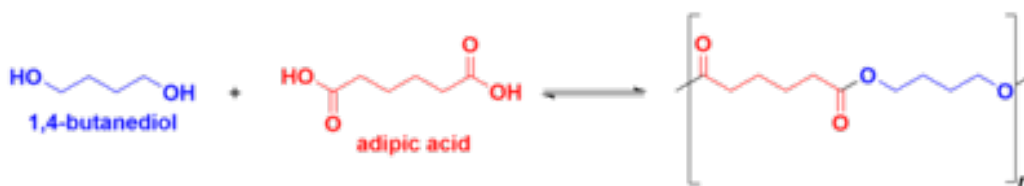
ที่มา: https://hmong.in.th/wiki/Polybutylene_adipate_terephthalate

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ PBAT

พอลิเอสเทอร์ของกรด adipic ถูกสังเคราะห์โดยใช้ 1,4 บิวเทน ความยาวของโซ่ถูกรักษาให้ต่ำโดยใช้ไดออลมากเกินไปในปฏิกิริยา PBAT ถูกสังเคราะห์จากพอลิเมอร์ของ 1,4-butanediol และ adipic acid และพอลิเมอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) ที่มี 1,4-butanediol กรด Adipic และ 1,4-butanediol ถูกพอลิเมอร์เพื่อสร้างพอลิเอสเทอร์ (บวกน้ำ) DMT และ 1,4-butanediol ยังทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างพอลิเอสเทอร์ (บวกเมทานอล) พอลิเอสเทอร์นี้จะถูกเพิ่มไปยังพอลิเอสเทอร์ butylene กรด adipic โดยใช้ tetrabutoxytitanium (TBOT) เป็น transesterification ตัวเร่งปฏิกิริยา; ส่วนเกินของ 1,4-butanediol ส่งผลต่อความยาวของสายโซ่ ผลที่ได้คือโคพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์ทั้งสองที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้

พอลิเอสเทอร์ของ DMT จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ 1,4 บิวเทน นี่คือนพอลิเมอร์ตัวที่สองที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จากกรดอะดิพิคและ 1,4-Butanediol ความยาวของสายโซ่จะถูกควบคุมให้สั้น โดยการเติม 1,4-Butanediol ที่มากเกินไปลงในปฏิกิริยา

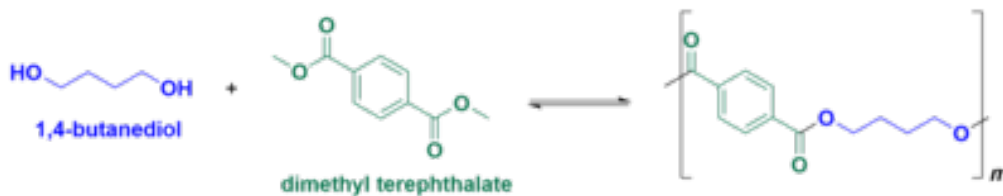
รูปที่ 2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของกรดอะดิพิค



ที่มา: https://hmong.in.th/wiki/Polybutylene_adipate_terephthalate

ในขั้นที่ 2 พอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ 1,4-Butanediol ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ตัวที่ 2 ที่จะถูกใช้กับผลิตภัณฑ์ของขั้นที่ 1 ในการสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์ PBAT

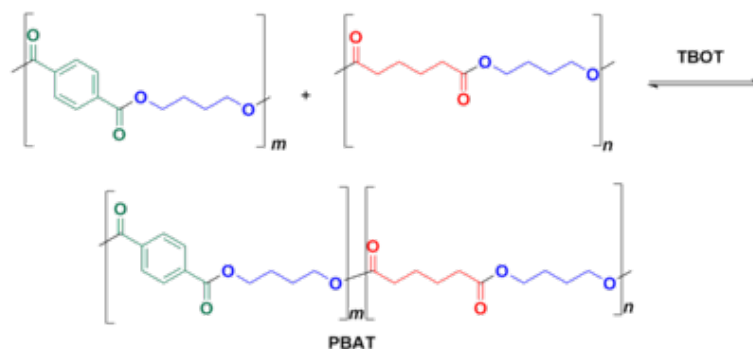
รูปที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์โพลีเอสเทอร์ของ DMT



ที่มา: https://hmong.in.th/wiki/Polybutylene_adipate_terephthalate

ขั้นที่ 3 TBOT ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของกรดอะดิพิคและ DMT เพื่อใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PBAT แบบสุ่ม

รูปที่ 4 กระบวนการสังเคราะห์ PBAT โคโพลิเมอร์แบบสุ่ม



ที่มา: https://hmong.in.th/wiki/Polybutylene_adipate_terephthalate

การศึกษาและวิเคราะห์ห่วงโซ่อุปทานของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท

จากการศึกษาข้อมูลทั่วไปของผลิตภัณฑ์ชีวภาพในกลุ่มของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (PBAT) ซึ่งเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จากผลิตภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเคมี โดย Bio-PBAT มาจากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ฐานปิโตรเลียม เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ในทางการตลาดทั่วไป PBAT เป็นพลาสติกทางเลือกหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติก โดยพลาสติกชนิดนี้มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นและ

การคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน เช่น กระจกพลาสติก และพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น (ข้อมูลอ้างอิงจาก เว็บไซต์ sync-innovation, 2563)

PBAT กระจกพลาสติกในเชิงพาณิชย์ในฐานะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์โดย ecoflex ของ BASF แสดงการย่อยสลาย 90% หลังจากระยะเวลา 80 วันในการทดสอบ การนำไปใช้งานที่มีความจำเพาะนี้ถูกให้ความสำคัญโดยผู้ผลิตรวมถึงการห่อหุ้มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ กระจกพลาสติกสำหรับสวนและใช้ในการเกษตรและเป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่น ๆ เช่น ถ้วยกระดาษ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงและธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT จึงถูกวางในท้องตลาดเป็นสารเติมแต่งสำหรับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความแข็งแรงมากขึ้นเพื่อให้มีความยืดหยุ่นในขณะที่ยังคงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

PBAT ออกสู่ตลาดอย่างกว้างขวางและใช้สำหรับแอปพลิเคชันข้างต้นทั้งหมด แต่ยังคงอยู่ระหว่างการตรวจสอบว่าเป็นส่วนประกอบในฟิล์มด้านจุลชีพ PBAT ทำหน้าที่เป็นส่วนใหญ่ของฟิล์มที่มีสารต้านจุลชีพถูกรวมเข้าไว้ในระหว่างการประมวลผล ฟิล์มด้านจุลชีพจะใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ช่วยรักษาผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างปลอดภัย (ข้อมูลอ้างอิงจาก เว็บไซต์ <https://hmong.in.th>)

ตารางที่ 1 Co-polyester PBAT ที่มีจำหน่ายทั่วไป

Company	Country	Brand name	Capacity (t/y)
BASF	Germany	ECOFLEX®	60,000
KINGFA	China	ECOPOND®	50,000
NOVAMONT	Italy	Origo-Bi®	40,000
TUNHE	China	-	30,000
XINFU	China	-	20,000
JINHUI	China	ECOWORD®	20,000

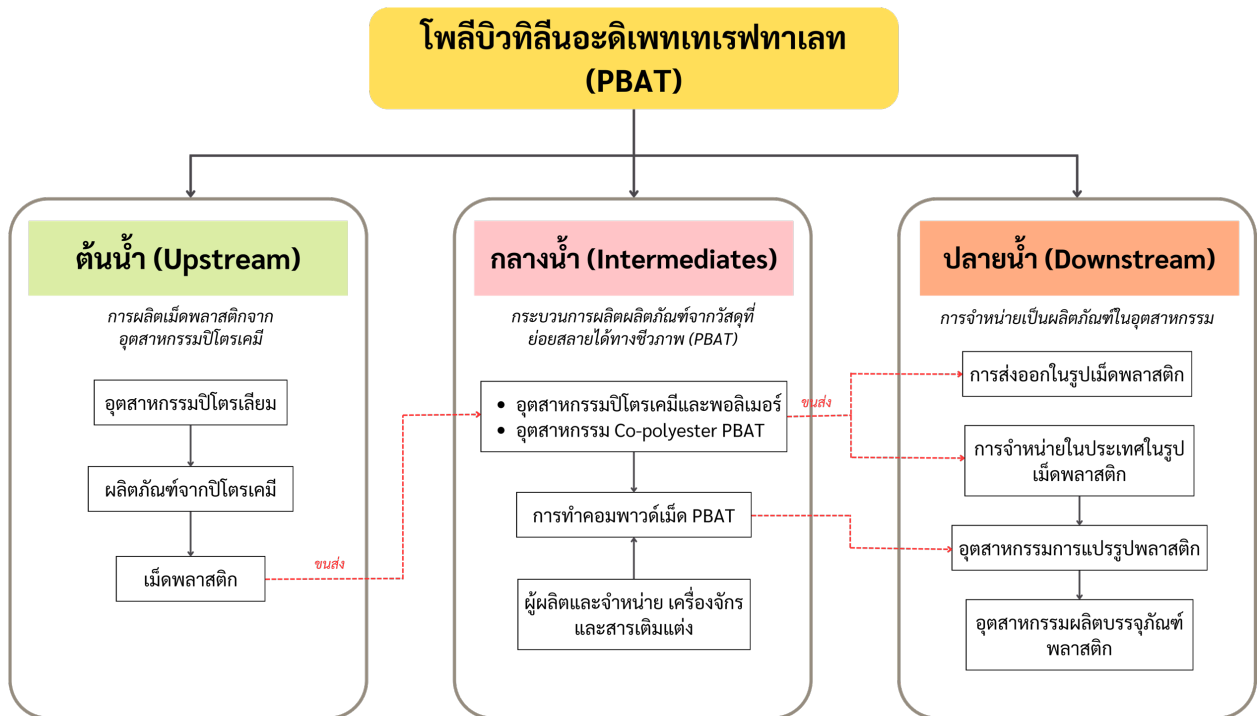
(อ้างอิงข้อมูลจาก Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2563)

เนื่องจากพบว่าพอลิเอสเตอร์อะโรมาติก PET หรือ PBT มีความทนทานต่อการ Hydrolysis จึงต้องเพิ่มคุณสมบัติให้พอลิเมอร์มีความไวต่อ Hydrolytic ใช้สารเสริมสภาพเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสอง ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการปรับองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเอสเตอร์อะโรมาติก จากการศึกษาพบว่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ PBAT ขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดเทเรพทาติกบิสูทธิ (PTA) ในพอลิเมอร์ แม้ว่าอัตราการย่อย

สลายทางชีวภาพจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากการปรับปริมาณของ PTA เพิ่มขึ้น แต่ในปริมาณที่เหมาะสมคือประมาณ 50 mol% ในสัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนที่พบว่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเหมาะสมต่อคุณสมบัติที่ดีของวัสดุ (ข้อมูลอ้างอิงจาก Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2563)

คุณสมบัติของ PBAT คือ เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก โดยปกติอุณหภูมิการตกผลึกจะอยู่ที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 130 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.18g/ml~1.3g/ml ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ PBAT ประมาณ 30% ซึ่งพอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆ ทั้งฟิล์มห่ออาหาร ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ทดแทนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งปิโตรเคมีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

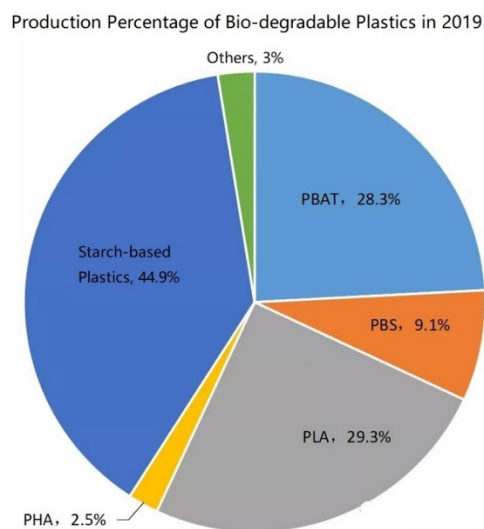
รูปที่ 5 ห่วงโซ่อุปทานของพอลิบิวทีลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate Terephthalate supply chain)



จากแผนภาพของห่วงโซ่อุปทานของพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดพอลิบิวทีลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (PBAT) ข้างต้น จะเห็นได้ว่า มีองค์ประกอบที่สำคัญภายในห่วงโซ่อุปทานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

อุตสาหกรรมต้นน้ำ (Upstream) คือการผลิตวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการใช้แปรรูปผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมกลางน้ำ (Intermediate) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของ PBAT มาจากผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีซึ่งได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate Terephthalate) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น นอกเหนือจากการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลาไม่นาน ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับอาหารได้แล้ว และยังมีคุณสมบัติการยืดตัวได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ (ข้อมูลอ้างอิงจาก PSU Grant Report_2013)

รูปที่ 6 แสดงสัดส่วนการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพในปี 2562



ที่มา: <https://ilucku.com/brief-introduction-of-pbat/>

- การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate Terephthalate) PBAT ถูกสังเคราะห์จากพอลิเมอร์ของ 1,4-butanediol และ adipic acid และพอลิเมอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) ที่มี 1,4-butanediol

กรด Adipic และ 1,4-butanediol ถูกพอลิเมอร์เพื่อสร้างโพลีเอสเตอร์ (บวกน้ำ) DMT และ 1,4-butanediol ยังทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างโพลีเอสเตอร์ (บวกเมทานอล) โพลีเอสเตอร์นี้จะถูกเพิ่มไปยังโพลีเอสเตอร์ butylene กรด adipic โดยใช้ tetrabutoxytitanium (TBOT) เป็น transesterification ตัวเร่งปฏิกิริยา; ส่วนเกินของ 1,4-butanediol ส่งผลต่อความยาวของสายโซ่ ผลที่ได้คือโคพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์ทั้งสองที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ นี่คือนิโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีการควบคุมการกระจายตัวของความยาวโซ่โพลีเมอร์หรือ

โครงสร้างบล็อกในปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชัน ตำแหน่งซ้ำไม่ได้ถูกควบคุม ถ้า A = โพลีเอสเตอร์ของกรดอะดิปิก และ B = โพลีเอสเตอร์ของ DMT แต่ละตัวมี 1,4-บิวเทนไดออล โครงสร้างสายโซ่อาจมีลักษณะดังนี้: AABABBABA หรือ ABABAAAABB หรือ ABABABBBBA; ไม่มีการเลือกสำหรับ A และ B ที่ทำปฏิกิริยากับตัวเองหรือกันและกัน (ข้อมูลอ้างอิงจากเว็บไซต์ <https://hmong.in.th>)

อุตสาหกรรมกลางน้ำ (Intermediate) เป็นอุตสาหกรรมการคอมพาวด์เม็ดพลาสติก PBAT จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นเม็ดพลาสติก โดยเริ่มจากกระบวนการนำวัตถุดิบจากปิโตรเคมีมาคอมพาวด์เป็นเม็ดพลาสติกที่สามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไปได้โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ

อุตสาหกรรมปลายน้ำ (Downstream) เป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องในการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีมาคอมพาวด์เป็นเม็ดพลาสติก PBAT เพื่อนำไปใช้ในการแปรรูปพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ รวมถึงภาคส่วนทางด้านการค้าเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศ ต่อเนื่องจนถึงอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกจากเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทีลีนอะดิเพทเทรพทาเลท (PBAT) เช่น การทอหุ้มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร, ถุงเพาะชาที่ย่อยสลายได้และการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร และเป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่น ๆ เช่น ถ้วยกระดาษ จากการที่มีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ PBAT ในท้องตลาดจึงถูกนำไปเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพลาสติกแข็งที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

รูปที่ 7 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์ PBAT



ที่มา: <https://www.sync-innovation.com/3d-printing-technology/bio-base-material/>