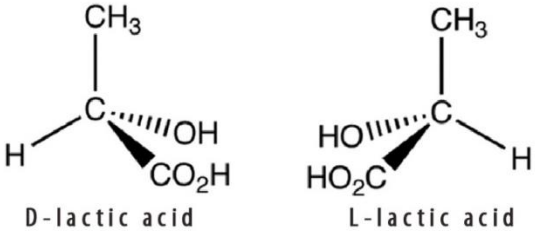
บทที่ 4 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท พอลิแลคติคแอซิด (Poly(Lactic Acid))

1. ข้อมูลทั่วไป

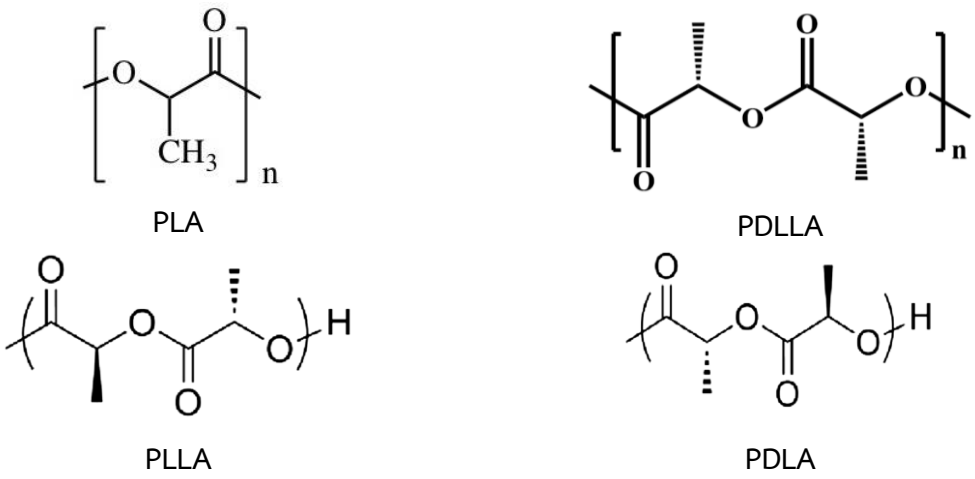
พอลิแลคติคแอซิด (Poly(lactic acid) : PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สลายตัวได้ (Compostable polymer) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้จากทรัพยากรที่เกิดขึ้นใหม่ได้ เช่น แป้งที่ได้จากพืชพวกข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น เริ่มแรกการนำ PLA ไปประยุกต์ใช้งานจะถูกจำกัดในวงแคบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง สังเคราะห์ได้ปริมาณน้อย และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ตัวอย่างเช่น การใช้งานด้านการแพทย์ นำไปใช้เป็นสแคฟโฟลด์สำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue scaffolds) อุปกรณ์ปลูกถ่าย (Medical implants) และไหมเย็บแผลที่ใช้ในร่างกาย (Internal sutures) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันนักวิจัยได้ค้นพบเทคนิคการผลิต PLA ที่ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ PLA ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น [1] และ PLA ยังมีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่นสามารถสลายตัวได้ ผลิตจากวัตถุดิบยั่งยืน (Sustainable sources) มีความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2-4] จึงทำให้ PLA จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสามารถแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะในสังคม อีกทั้งถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่นๆ [5]

มอนอเมอร์ของ PLA คือ กรดแลคติกซึ่งมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ ได้แก่ แบบดี-ไอโซเมอร์ และแบบแอล-ไอโซเมอร์ (ภาพที่ 1) ซึ่งเป็นอิแนนชิโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ต่างกัน กล่าวคือมีสูตรเคมีเหมือนกัน การจัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และมีการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์หรือในรูปของผสมระหว่างแอล-ไอโซเมอร์และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่าของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ที่ไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically inactive) ในปัจจุบันการผลิตกรดแลกติกใช้การหมักเป็นหลักซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ที่ดี



ภาพที่ 1 โครงสร้างของกรดแลกติก

เนื่องจากกรดแลคติกมีสองไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด จะได้เป็นพอลิแอล-แลคติกแอซิด (Poly(L-lactic acid : PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิกจะได้พอลิดีแอล-แลคติกแอซิด (Poly(D,L-lactic acid : PDLLA) ปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลกติกบริสุทธิ์ทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดดีหรือพอลิดี-แลคติกแอซิด (Poly(D-lactic acid : PDLA) ยังไม่มีในเชิงพาณิชย์ โดยไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นผลึก (Crystalline) ของพอลิเมอร์ กล่าวคือ PLLA จะมีความเป็นผลึกสูง ในขณะที่ PDLA จะมีความเป็นอสัญฐาน (Amorphous) สูง



ภาพที่ 2 โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA [6,7]

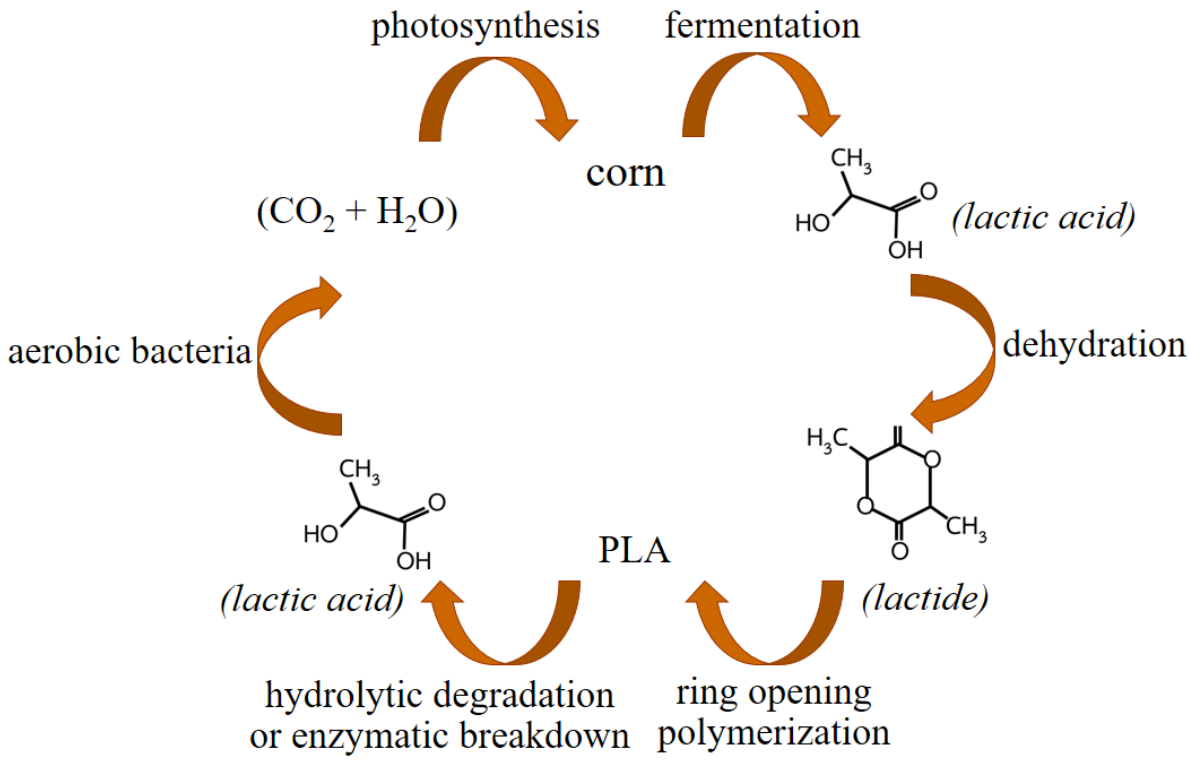
PLA มีชื่อทางเคมี คือ Poly(lactic acid), polylactic acid และ polylactide และชื่อทางการค้าของ PLA จะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อทางการค้า (Trade name) ของ PLA ตามบริษัทผู้ผลิต

Manufacturers	Trade name
NatureWorks LLC	NatureWorks® PLA, Ingeo® Fiber
Chronopol	Heplon™
PURAC	Purasorb®
Biomer	Biomer®
Hycail BV	Hycail®
Unitika Ltd.	Terramac®
Torey Industries, Inc.	Ecodear®
Mitsui Chemical, Inc.	Lacea®
Mitsubishi Plastic, Inc.	Ecoloju
Toyota Motor Corp. (TMC)	Toyota Eco-Plastics

การผลิต PLA สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติและการผลิตโดยการสังเคราะห์ โดยการผลิต PLA โดยวิธีการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือแป้งที่มาจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และ มันสำปะหลัง โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic acid : $C_3H_6O_3$) ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่า แลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้นเรียกว่า พอลิแลคติคแอซิด โดยคุณสมบัติของ PLA ขึ้นกับการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์

ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม กลไกการสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3

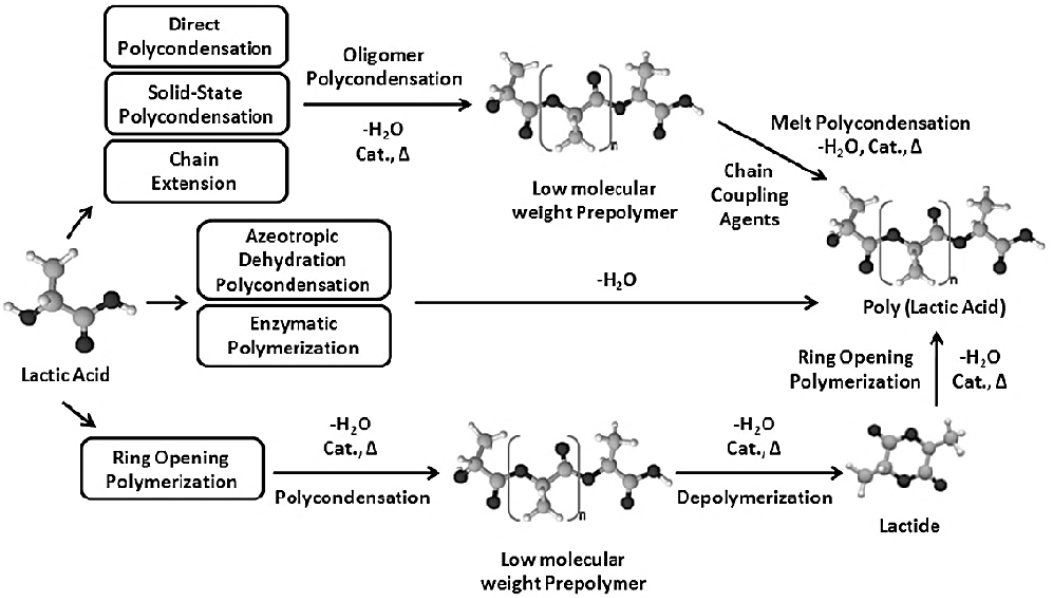


ภาพที่ 3 ขั้นตอนผลิตและการย่อยสลายของ PLA

การผลิต PLA โดยการสังเคราะห์ สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น ปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรง (Direct polycondensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นในสภาวะของแข็ง (Solid-state polycondensation) ปฏิกิริยาต่อสายโซ่ (Chain extension) ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโอโทรปิค (Azeotropic dehydration polycondensation) ปฏิกิริยาควบแน่นโดยเอนไซม์ (Enzymatic polycondensation) และการสังเคราะห์โดยการเปิดวง (Ring-opening polycondensation) (ภาพที่ 4)

การผลิต PLA จากปฏิกิริยาการควบแน่น เริ่มต้นจากการนำแลคติกแอซิดซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก (-CO_2H) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้ด้วยตัวเอง กระบวนการนี้ประกอบด้วยสารละลาย เช่น น้ำและตัวทำละลายออแกนิก เพื่อกำจัดน้ำที่เกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดน้ำออก (Removal of water) การควบแน่นของโอลิโกเมอร์ (Polycondensation of oligomer) และการควบแน่นแบบหลอมเหลว (Melt condensation) ซึ่งกระบวนการนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำ ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นจะกลับมาทำให้ PLA ที่ผลิตขึ้นเสื่อมสภาพ

การผลิต PLA จากการสังเคราะห์โดยการเปิดวงเป็นวิธีที่นิยมเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถผลิต PLA ได้บริสุทธิ์มาก โดยการนำแลคไทด์มอนอเมอร์รวมกับแลคติกแอซิด 2 โมเลกุล และเปิดวงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาการควบแน่น (Polycondensation) ปฏิกิริยาไม่ผ่านการควบแน่น (De-polycondensation) และการสังเคราะห์โดยการเปิดวง (Ring-opening polycondensation) [8-19]

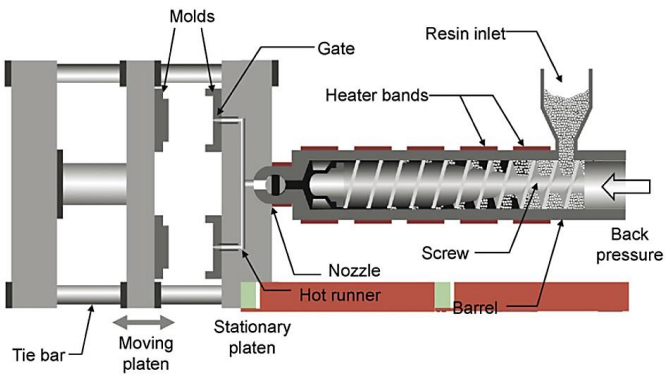


ภาพที่ 4 กลไกการสังเคราะห์ PLA [8]

2. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

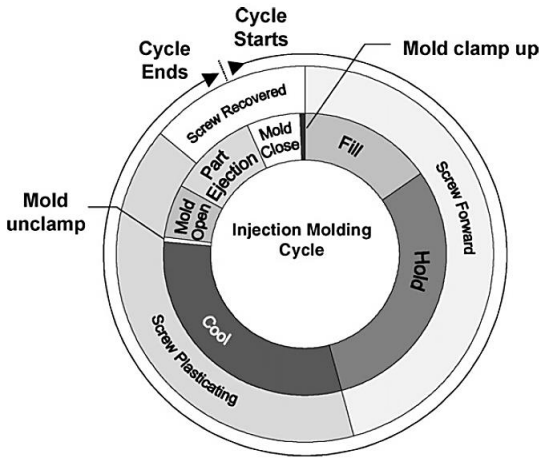
2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding)

เนื่องจาก PLA จัดเป็นพลาสติกชีวภาพ ดังนั้นเครื่องขึ้นรูปจึงมีความแตกต่างกับพลาสติกทั่วไป ในกรณีของเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์สำหรับ PLA ส่วนใหญ่ประกอบด้วยระนาบแบบ 2 ขั้นตอน กล่าวคือ มีการรวมส่วนฉีด (Shooting pot) และเครื่องอัดรีดอยู่ภายในเครื่องเดียวกัน โดยความแตกต่างของเครื่องขึ้นรูปชนิดนี้ คือ เกลียวหนอน (Screw) ถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาหน้าหลังได้ในกระบอกใส่เกลียวหนอน (Barrel) เพื่อให้มีความดันฉีดเพียงพอที่สามารถส่งพอลิเมอร์หลอมไปยังช่องว่างของแม่พิมพ์ (ภาพที่ 5) กระบวนการทำงานเริ่มจากเครื่องอัดรีดจะดันพอลิเมอร์หลอมไปยังส่วนฉีดด้วยความดันฉีดต่ำ แล้วพอลิเมอร์หลอมจะถูกรีดเข้าไปยังทางวิ่งร้อน (Hot runner) ของพลาสติกภายใต้ความดันสูงโดยลูกสูบในส่วนฉีดเกลียวหนอนสำหรับเครื่องจักรแบบ 2 ขั้นตอน สามารถหมุนในเฟสการทำงานหลักของรอบการฉีดได้ ในขณะที่มีเกลียวหนอนเคลื่อนที่ไปมาหน้าหลัง (Reciprocating machine) จะต้องหยุดในช่วงเฟสการฉีดและเฟสย้ำ (Packing phase) เครื่องจักรระบบ 2 ขั้นตอนจึงมีข้อดีมากกว่าคือมีเกลียวหนอนเคลื่อนที่ไปมาหน้าหลัง ทำให้ระยะเวลาต่อรอบสั้นกว่ามอเตอร์ขับเคลื่อนเกลียวหนอนเล็กกว่า คุณภาพวัสดุหลอมและปริมาณพลาสติกที่ถูกฉีดเข้าไปมีความสม่ำเสมอมากกว่า [20]



ภาพที่ 5 เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์สำหรับ PLA [21]

รอบการผลิตชิ้นงานโดยทั่วไปสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์แสดงในภาพที่ 6 ขั้นตอนแรกของการฉีดเข้าแม่พิมพ์คือ การปิดแม่พิมพ์ จากนั้นหัวฉีดจะเปิดและเกลียวหนอนจึงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อฉีดพอลิเมอร์หลอมไปยังช่องว่างของแม่พิมพ์ และเกลียวหนอนหยุดนิ่งในตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความดันย้ำ (Holding pressure) เพื่อชดเชยการหดตัวของวัสดุในระหว่างการทำให้เย็น (Cooling) ในแม่พิมพ์ และช่วงสุดท้ายของเฟสย้ำหัวฉีดจะปิดและเกลียวหนอนเริ่มเคลื่อนที่กลับ ในขณะที่ชิ้นงานยังคงถูกทำให้เย็นตัวในแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง ในระหว่างเฟสการเคลื่อนที่กลับ (Recovery phase) เกลียวหนอนจะหมุนและทำการนำส่งพอลิเมอร์หลอมที่จะฉีดเข้าในแม่พิมพ์รอบถัดไปเข้าข้างหน้าตามเกลียวหนอน ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมที่อยู่ด้านหน้าบริเวณปลายเกลียวหนอนจะทำให้เกิดแรงดันจนเกลียวหนอนถอยกลับไปยังทิศทางของถังกรวยเติมเม็ดพลาสติก (Hopper) ขั้นตอนนี้จะใช้แรงดันที่เรียกว่า ความดันต้านกลับ (Back pressure) ในการต้านการถอยกลับของเกลียวหนอนเพื่อควบคุมความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอม ที่อยู่ด้านหน้าบริเวณปลายเกลียวหนอนฉีดให้มีค่าคงที่ และเวลาในการทำให้เย็นตัวจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานมีความเสถียรของขนาดเพื่อทนต่อการเปิดแม่พิมพ์ในรอบของการขึ้นรูป (Molding cycle) การเคลื่อนย้ายของความร้อนเกิดขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างเฟสเดิม เฟสย้ำและเฟสทำให้เย็นตัว [22]



ภาพที่ 6 รอบการผลิตชิ้นงานสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ [21]

อุณหภูมิระหว่างการผลิตจะส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป PLA เป็นอย่างมากเนื่องจาก PLA เป็นพลาสติกชีวภาพ ความสามารถในการทนต่อความร้อนจึงต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถใช้ระหว่างการฉีดขึ้นรูป PLA อยู่ในช่วง 25-30 ^{o}C การใช้อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะทำให้เกิดการควบแน่นของแลคไทด์บนพื้นผิวของเครื่องมือ ซึ่งจะส่งผลต่อพื้นผิวและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ขึ้นรูป แต่สามารถใช้แม่พิมพ์ที่พื้นผิวขัดเงาร่วมกับการเพิ่มความเร็วในการฉีดในช่วงเฟสฉีดเพื่อลดการเกาะของชั้นแลคไทด์ได้

งานวิจัยของ Natureworks (2004) และ Sato et al., (2000) พบว่าเกรดของ PLA ที่แตกต่างกัน ความดันและอุณหภูมิย้ำในกระบวนการขึ้นรูปจะส่งผลให้มีโพรไฟล์ที่แตกต่างกันด้วย เนื่องจากในระหว่างการขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ พอลิเมอร์หลอมจะถูกฉีดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal injection) เข้าไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ ระหว่างนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมถูกฉีดและทำให้แน่นด้วยความดันย้ำ จากนั้นพอลิเมอร์หลอมจะถูกทำให้เย็นตัวที่ปริมาตรคงที่ (Isochoric cooling) เมื่อพอลิเมอร์เย็นต่ำกว่าจุดเยือกแข็งทางเข้าพอลิเมอร์หลอมจะแข็งตัวและความดันในช่องว่างของแม่พิมพ์จะลดลงถึงความดันบรรยากาศหนึ่ง ดังนั้นความดันและอุณหภูมิย้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน

โดยทั่วไปชิ้นงาน PLA ที่ขึ้นรูปโดนกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์จะค่อนข้างเปราะ ความเปราะของ PLA เกิดขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพสมบัติตามอายุ (Aging) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับ PLA เนื่องจาก T_g สูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C [23-25] โดยการเสื่อมสมบัติตามอายุของ PLA สามารถตรวจสอบได้จากการศึกษาข้อมูลในช่วง T_g ของเทอร์โมแกรม DSC โดยการวัดการเพิ่มขึ้นของ Endothermic enthalpy relaxation (ΔH_{rel}) Cai H., และคณะ พบว่า ΔH_{rel} ของ PLA ที่ขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ที่มีปริมาณแลคไทด์ชนิดแอล 96% เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการบ่ม (Aging time) นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ T_g อัตราการเสื่อมสมบัติตามอายุทางกายภาพจะเกิดเร็วขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงกว่า T_g (60 °C) Excess enthalpy relaxation จะลดลง แสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสมบัติตามอายุทางกายภาพไม่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงกว่า T_g [26] Celli A. และคณะ พบการเสื่อมสภาพของ PLLA จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC และการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis : DMA) โดยระดับการเสื่อมสมบัติตามอายุของ PLA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง เกิดจากส่วนของปลายโซ่ (Chain terminal) ที่มีอิสระในการเคลื่อนไหวมากกว่าส่วนที่อยู่ในโซ่มีจำนวนเพิ่มขึ้น [24] Witzke D. และคณะ พบว่า PLA ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์มีลักษณะเปราะเมื่อทดสอบทันทีหลังการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วไปจนถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3-8 ชั่วโมง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์เนื่องจากการคลายตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid relaxation) ในกรณีของการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g การเสื่อมสมบัติตามอายุของพอลิเมอร์จะลดลง เมื่อความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการปรับองค์ประกอบของดี-ไอโซเมอร์ หรือการใช้ก่อสร้างผลึกและผลึกที่ฟอร์มสามารถทำหน้าที่เป็นสารครอสลิงค์ทางกายภาพที่หน่วงการเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ [25]

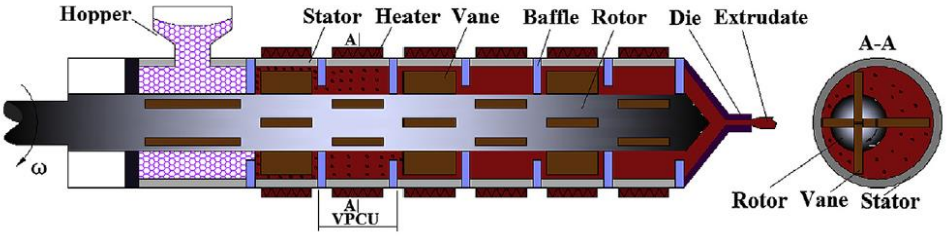
ตารางที่ 2 ตัวอย่างสภาวะในการขึ้นรูป PLA ด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์

Injection	Nominal Value	Unit
Drying temperature	113 to 172	°F
Drying time	2,9 to 6,0	hr
Suggested max moisture	0,010 to 0,30	%
Rear temperature	302 to 365	°F
Middle temperature	338 to 410	°F
Front temperature	374 to 393	°F
Nozzle temperature	375 to 402	°F
Processing (melt) temp	353 to 464	°F
Mold temperature	608 to 224	°F
Injection pressure	11400 to 11500	psi
Back pressure	72,5 to 160	psi
Screw speed	75 to 153	rpm

2.2 กระบวนการการอัดรีด (Extrusion)

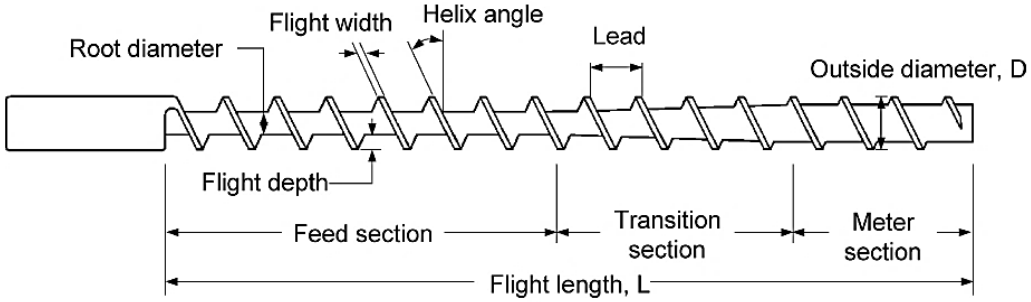
กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดหรือเอกซ์ทรูเดอร์ (Extrusion molding process) เครื่องจักรที่ใช้สำหรับกระบวนการขึ้นรูปมีลักษณะคล้ายกับวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ แตกต่างกันตรงที่เครื่องอัดรีดไม่มีส่วนแม่พิมพ์และอุปกรณ์ควบคุมสำหรับแม่พิมพ์ ตรงปลายกระบอกฉีดพลาสติกจะติดตั้งดาย (Die) ซึ่งมีลักษณะ

เป็นช่องรีดพลาสติกออกมาเป็นเส้นหรือแผ่นที่มีรูปหน้าตัดตามรูปดาย การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้สามารถประยุกต์เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากมาย เช่น ท่อหรือเส้นพลาสติก ถุงพลาสติก ฟิล์มแผ่น หรือแท่งพลาสติกที่มีรูปหน้าตัดพิเศษ แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่องอัดรีดหรือเอกซ์ทรูเดอร์ [27]

การอัดรีดเป็นเทคนิคที่สำคัญที่สุดสำหรับการขึ้นรูปแบบหลอมอย่างต่อเนื่องของ PLA เนื่องจากเครื่องอัดรีดสามารถเป็นส่วนประกอบของระบบเครื่องจักรที่ใช้เพื่อใช้ขึ้นรูป (Forming machine system) สำหรับการขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ การเป่าขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (Blow molding) การขึ้นรูปฟิล์มเป่า (Film blowing) และการปั่นหลอม (Melt spinning) โดยองค์ประกอบสำคัญของเครื่องขึ้นรูปแบบอัดรีด คือ เกลียวหนอน (ภาพที่ 8) โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนป้อน (Feed section) ทำหน้าที่รับเม็ดพอลิเมอร์และส่งพอลิเมอร์ไปยังเกลียวหนอน ส่วนทรานสิชัน (Transition section) หรือส่วนอัด (Compression section) หรือส่วนหลอม (Melting section) ในส่วนนี้สันเกลียวหนอนมีความลึกลดลงอย่างช่วยในการอัดเม็ดพลาสติกเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานและการสัมผัสกับกระบอกใส่เกลียวหนอน และส่วนส่ง (Metering section) สันเกลียวหนอนมีความลึกคงที่และตื้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นปั๊มเพื่อส่งพอลิเมอร์หลอมไปยังแม่พิมพ์ด้วยปริมาณที่เหมาะสม โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเกลียวหนอน (L/D) จะเป็นตัวกำหนดแรงเฉือนและระยะเวลาคงเหลืออยู่ในเครื่องของวัสดุหลอม เกลียวหนอนที่มีอัตราส่วนของ L/D มากจะให้ความร้อนเฉือนเพิ่มขึ้น การผสมดีขึ้นและระยะเวลาคงอยู่ในเครื่องอัดรีดนานขึ้น PLA เชิงพาณิชย์ใช้อัตราส่วน L/D ของเกลียวหนอนในช่วง 24-30 และสามารถใช้เครื่องอัดรีดที่ใช้สำหรับขึ้นรูป PET ได้ด้วย เนื่องจากเกลียวหนอนในเครื่องดังกล่าวถูกออกแบบให้มีความเฉือนต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับการผสมเพื่อลดการเสื่อมสลายของเรซินและลดการสร้างแอซิทัลดีไฮด์ อัตราส่วนการอัด (Compression ratio) เป็นอีกพารามิเตอร์ที่สำคัญพารามิเตอร์หนึ่งของเกลียวหนอน สามารถบอกอัตราส่วนของความลึกของสันเกลียวหนอนในส่วนป้อนต่อความลึกของสันเกลียวหนอนในส่วนส่ง โดยเกลียวหนอนมีอัตราส่วนการอัดสูง จะให้ความร้อนเฉือนสูงด้วย แลพอัตราส่วนการอัดสำหรับการขึ้นรูป PLA อยู่ในช่วง 2-3 [28]



ภาพที่ 8 เกลียวหนอนแบบเดี่ยวสำหรับกระบวนการอัดรีด [21]

ตารางที่ 3 สภาวะในการขึ้นรูป PLA ด้วยกระบวนการอัดรีด

Extrusion	Nominal value	Unit
Drying temperature	120 to 195	°F
Drying time	2,8 to 10	hr
Suggested max moisture	5,0E-3 to 0,30	%
Cylinder zone 1 temp.	327 to 374	°F
Cylinder zone 2 temp.	331 to 377	°F
Cylinder zone 3 temp.	335 to 402	°F
Adapter temperature	338 to 390	°F
Melt temperature	373 to 446	°F
Die temperature	329 to 392	°F

ตารางที่ 4 สภาวะการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม PLA ด้วยกระบวนการอัดรีด

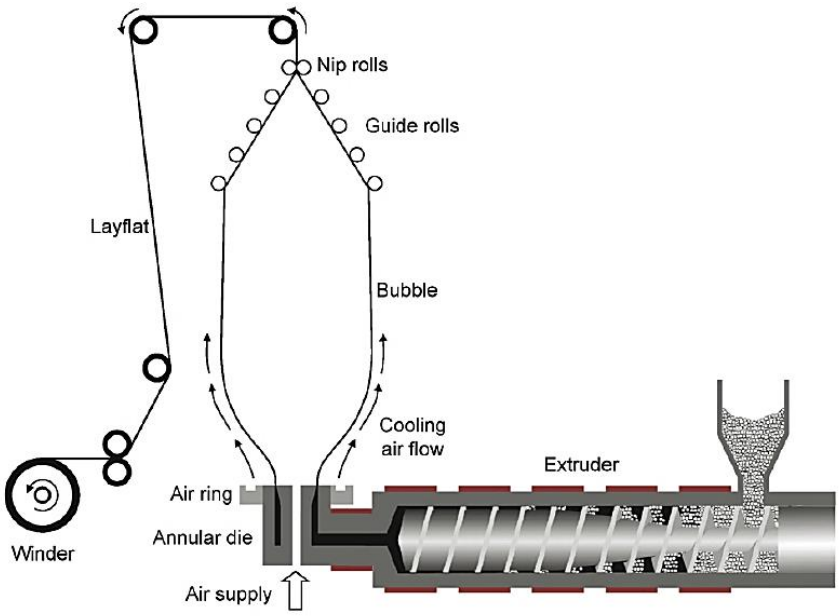
Section	Standard temperature profile, °F (°C)	Reverse temperature profile, °F (°C)
Feed throat	113 (45)	113 (45)
Zone 1	355 (180)	430 (220)
Zone 2	375 (190)	410 (210)
Zone 3	390 (200)	390 (200)
Melt pump	390 (200)	390 (200)
Die	375 (190)	375 (190)

2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบฟิล์มเป่า (Extrusion blown film)

กระบวนการอัดรีดฟิล์มเป่า PLA หลอมจะถูกอัดรีดผ่านดายวงแหวน (annular die) เพื่อฟอร์มท่อ ซึ่งถูกทำให้พองตัวเป็นลูกโป่งที่มีผนังบางและถูกทำให้เย็นตัวโดยการเป่าอากาศผ่านหัวดาย จากนั้นท่อถูกทำให้แบนด้วยลูกกลิ้งหนีบและม้วนเก็บ (ภาพที่ 9) อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางลูกโป่งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย เรียกว่า Blow-up-ratio (BUR) ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการอัดรีดฟิล์มเป่าของ PLA อยู่ในช่วง 2:1 – 4:1 และอุณหภูมิดายที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 190-200 °C [29-30] ซึ่งการผันแปร BUR ความเร็วเกลียวหนอน ความดันอากาศ และความเร็วลูกกลิ้งม้วนเก็บ จะส่งผลต่อความหนา (ประมาณ 10-150 μm) และระดับการจัดเรียงตัวของฟิล์ม

PLA มีความหนาแน่นจำเพาะประมาณ 1.24 g/cm^3 ซึ่งมากกว่าพอลิโอเลฟินส์ (0.91-0.96 g/cm^3) ดังนั้นการแปรรูป PLA สามารถใช้เครื่องอัดรีดที่ถูกออกแบบสำหรับพอลิโอเลฟินส์ได้ แต่เมื่อเครื่องอัดรีดทำงานใกล้กำลังสูงสุดของการขับเกลียวหนอนอาจไม่มีกำลังเพียงพอต่อการผลิต PLA เนื่องจากความหนาแน่นจำเพาะที่สูงกว่า [31] และ PLA มีความแข็งแรงของหลอมต่ำกว่าพอลิโอเลฟินส์ ดังนั้นการฟอร์มลูกโป่งที่เสถียรในระหว่างการอัดรีดจึงเป็นไปได้ยากกว่า



ภาพที่ 9 เครื่องอัดรีดฟิล์มเป่า PLA [21]

แนวทางแก้ไขคือเติมสารเติมแต่ง เช่น สารเพิ่มความหนืดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงขณะหลอมของ PLA โดยสารเติมแต่งจะทำหน้าที่ป้องกันการแตกสลายของพอลิเมอร์และ/หรือคู่ควบสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของพอลิเมอร์หลอม สารคู่ควบชนิดที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ของ PLA คือ โคพอลิเมอร์ของสไตรีน เมทิลเมทาคริเลต และไกลซิดิลเมทาคริเลต [30] Sodergard A. และคณะ พบว่าการเติมสารประกอบเปอร์ออกซีอินทรีย์ (Organic peroxy compound) เช่น เทอท์-บิวทิลเปร์ออกซีเบนโซเอต (Tert-butylperoxybenzoate) ไดเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Dibenzoylperoxide) เทอท์-บิวทิลเปอร์ออกซีแอซิเทต (Tert-butylperoxyacetate) ลงไปในระหว่างกระบวนการหลอม PLA สามารถช่วยเพิ่มความเสถียรและความแข็งแรงขณะหลอมของ PLA ได้โดยปริมาณสารประกอบเปอร์ออกซีอินทรีย์ที่เติมอยู่ในช่วง 0.01-3 wt% PLA [29]

ปัญหาอีกประเด็นที่เกิดขึ้นคือ การเกิดรอยยับของฟิล์ม PLA เนื่องจากมีลักษณะค่อนข้างแข็งแรงและมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่าฟิล์มพอลิโอเลฟินส์มาก สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารตัวเติม (fillers) บางชนิดลงไปใน PLA ในระหว่างกระบวนการอัดรีด เพื่อลดการติดกันระหว่างฟิล์ม Hiltunen E. และคณะ ผสม PLA กับพลาสติไซเซอร์ไตรแอซิติน (Triacetin) คือ กลีเซอรอลไตรแอซิเตตและสารต้านการยึดติด (Anti-adhesion agents) เช่น ทัลค์ ไททาเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าความต้านทานแรงดันทะลุของฟิล์มเป่าที่เตรียมดีกว่าฟิล์มเอทิลีนและฟิล์มพอลิพรอพิลีนทั่วไป [32] สารเติมแต่งประเภทสารช่วยลดแรงเสียดทาน (Slip additive) เช่น โอเลเอไมด์ สเตียราไมด์ N,N'เอทิลีนบิสสเตียราไมด์ และโอเลอิลปาล์มิตาไมด์ ได้ถูกใช้เพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างฟิล์มที่ซ้อนทับกัน โดยการใช้งานทั่วไปสารตัวเติมประเภทสารช่วยลดแรงเสียดทานถูกใช้ในอัตราน้อยกว่า 0.5-1.0 %wt ของพอลิเมอร์ หากใช้มากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการพิมพ์ติดลดลงและลดการติดของสติกเกอร์กับพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากการปรับปรุงการขึ้นรูปของ PLA โดยใช้เทคนิคโคพอลิเมอร์ไรเซชัน การผสม หรือการใช้พลาสติไซเซอร์แล้ว Tweed E. และคณะ พัฒนาวิธีการผลิตฟิล์มเป่า PLA โดยการเพิ่มความหนืดของ PLA ผ่านขั้นตอนการทำให้พอลิเมอร์เย็นตัว ซึ่งเกิดขึ้นภายในแมนเดรลดาย (Die mandrel) โดยใช้อากาศหรือของเหลวเพื่อควบคุมอุณหภูมิของดาย Mitsui

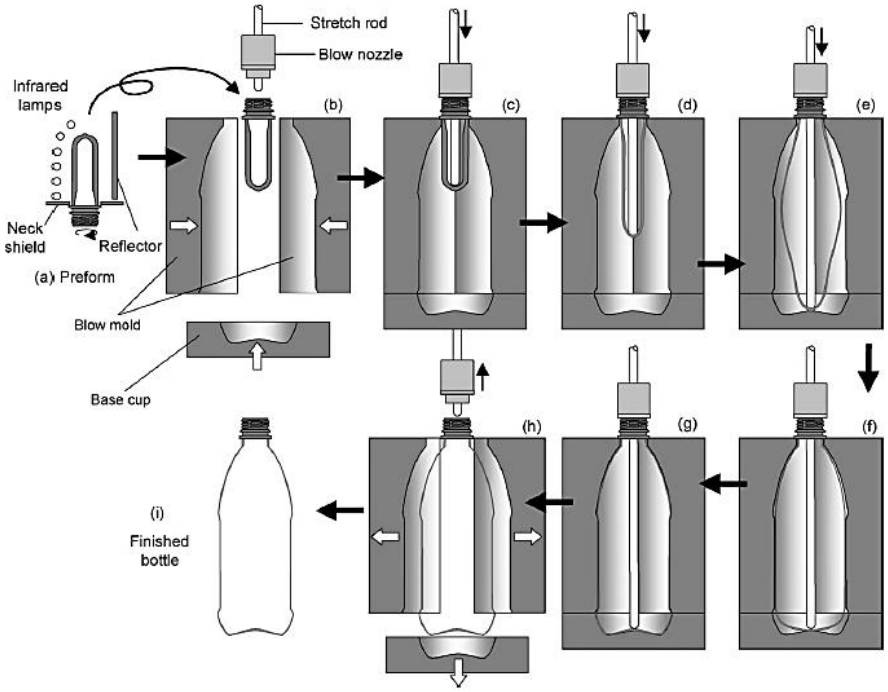
Dhemicals ได้พัฒนาฟิล์มฐาน PLA เป็นผลสำเร็จโดยใช้เทคโนโลยีโคพอลิเมอร์ไรเซชัน และวัสดุดังกล่าวถูกผลิตเชิงพาณิชย์และจำหน่ายในรูปของเรซินภายใต้แบรนด์ LACEA [30]

การขึ้นรูปแบบเป่าแล้วยืด (Stretch blow molding)

การผลิตขวด PLA โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบฉีดเป่าแล้วยืด (Injection stretch blow molding : ISBM) กระบวนการนี้ให้ขวด PLA มีการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Biaxial orientation) เพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติกันการซึมผ่านดีขึ้น เมื่อเทียบกับ PLA อสัณฐานที่ขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าแม่พิมพ์ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแบบ ISBM สามารถลดผลของการเสื่อมสมบัติตามอายุได้ และการเหนี่ยวนำโดยความเครียดสามารถลดการเสื่อมสมบัติตามอายุของผลิตภัณฑ์ได้ด้วย เนื่องจากผลึกทำหน้าที่เป็นสารครอสลิงค์ทางกายภาพที่ทำให้เฟสอสัณฐานเสถียร ดังนั้นจึงลดความเปราะของ PLA [33] กระบวนการ ISBM สำหรับการผลิตขวด PLA แสดงในภาพที่ 10 ขั้นตอนแรกคือการพรีฟอร์ม หรือ Parison ใช้เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ จากนั้นพรีฟอร์มจะถูกส่งไปยังเครื่องขึ้นรูปแบบเป่าแล้วยืดพรีฟอร์มจะถูกยืดในทิศทางตามแนวแกน (Axial direction) และเป่าในทิศทางรัศมีหรือห่วง (Hoop direction) เพื่อให้มีการจัดเรียงตัวแบบ 2 ทิศทาง โดยพรีฟอร์มจะได้รับความร้อนจากตัวทำความร้อนอินฟาเรด (Infrared heater) เพื่อให้ได้โพรไฟล์อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเป่า (85-110 °C) หรือการยืด พรีฟอร์มเป็นขวดที่มีความหนาของผนังเท่ากันตลอดชิ้นงาน (ภาพที่ 10a) บางครั้งการสารเติมแต่งประเภท Reheat additives เช่น คาร์บอนแบล็ก ลงในเครื่องอัดรีดเพื่อเพิ่มการดูดซับพลังงานอินฟราเรดด้วย พรีฟอร์ม PLA มีแนวโน้มที่จะหดตัวหลังจากการให้ความร้อนซ้ำ โดยเฉพาะบริเวณใกล้คอและก้นขวดที่มีความเค้นขณะฉีดขึ้นรูปตกค้างมากที่สุด ปรากฏการณ์นี้จะลดลงถ้ามีการออกแบบพรีฟอร์มที่เหมาะสม เมื่อพรีฟอร์มได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสม พรีฟอร์มจะถูกส่งไปยังแม่พิมพ์เป่า (ภาพที่ 10b) จากนั้นหัวฉีดเป่า (Blow nozzle) จะถูกลดระดับลงเพื่อผนึกพรีฟอร์ม และแท่งยืด (Stretch rod) จะเคลื่อนที่ไปตามพรีฟอร์มด้วยความเร็วปกติในช่วง 1-1.5 m/s และยืดพรีฟอร์มไปยังฐานแม่พิมพ์ (ภาพที่ 10c-e) ในระหว่างเฟสก่อนเป่า (ภาพที่ 10d และ e) อากาศประมาณ 0.5-2.0 MPa จะถูกกอัดผ่านหัวเป่าไปยังพรีฟอร์มที่มีการขยายตัวบางส่วนเพื่อป้องกันจากการสัมผัสแท่งยืดในระหว่างการยืดในระหว่างการยืดตัวตามแนวแกน เมื่อแท่งยืดมาถึงก้นขวดและพรีฟอร์มสัมผัสกับฐานแม่พิมพ์ ความดันอากาศถูกเพิ่มเป็น 2.8-4.0 MPa เพื่อทำให้พรีฟอร์มพองหรือขยายตัวเต็มที่ ทำให้มีรูปร่างและรายละเอียดพื้นผิวของขวดตามแม่พิมพ์เป่า (ภาพที่ 10f-g) ความดันเป่าที่สูงที่สุดถูกให้ค้างไว้หลายวินาทีเพื่อให้ขวดมีอุณหภูมิลดลงอย่างเพียงพอก่อนที่จะถูกปลดออกจากแม่พิมพ์

PLA สามารถขึ้นรูปผ่านกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว (One-step process) ได้ โดยในกระบวนการนี้การฉีดและการขึ้นรูปแบบเป่าของพรีฟอร์มเกิดขึ้นในเครื่องจักรเดียวกันที่มีทั้งหน่วยฉีดและหน่วยเป่าขึ้นรูปพรีฟอร์มที่ถูกขึ้นรูปแบบฉีดถูกทำให้อุณหภูมิลดลงเป็น 100-120 °C จากนั้นจะถูกเป่าและยืดในหน่วยเป่าขึ้นรูป พรีฟอร์ม PLA ที่ผลิตโดยใช้กระบวนการแบบขั้นตอนเดียวจะไม่ผ่านการบ่มหรือการเก็บ ซึ่งในระหว่างการเก็บนั้นพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเปราะ ดังนั้นการออกแบบและการขึ้นรูปของพรีฟอร์ม PLA สำหรับกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว และ 2 ขั้นตอนจึงแตกต่างกัน

คอขวดของพรีฟอร์มมีความเป็นอสัณฐานสูงและมีลักษณะเปราะ ดังนั้นต้องถูกออกแบบให้มีผนังหนาพอที่จะป้องกันคอขวดจากการแตกเนื่องจากการเป่าหรือการอัดแรงจากหัวฉีดเป่า โดยปกติอุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าสำหรับ PLA ใช้ประมาณ 35 °C ความร้อนคงค้างสามารถทำให้ฐานของขวดแผ่ออกหลังจากขวดถูกขับออกจากแม่พิมพ์เป่า เนื่องจากอสัณฐานของขวดมีลักษณะค่อนข้างหนา ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติม Radial ribs เพื่อเสริมแรงฐานและ/หรือการหล่อเย็นฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าแม่พิมพ์ [34]



ภาพที่ 10 เครื่องขึ้นรูปขวด PLA แบบเป่าแล้วยืด [21]

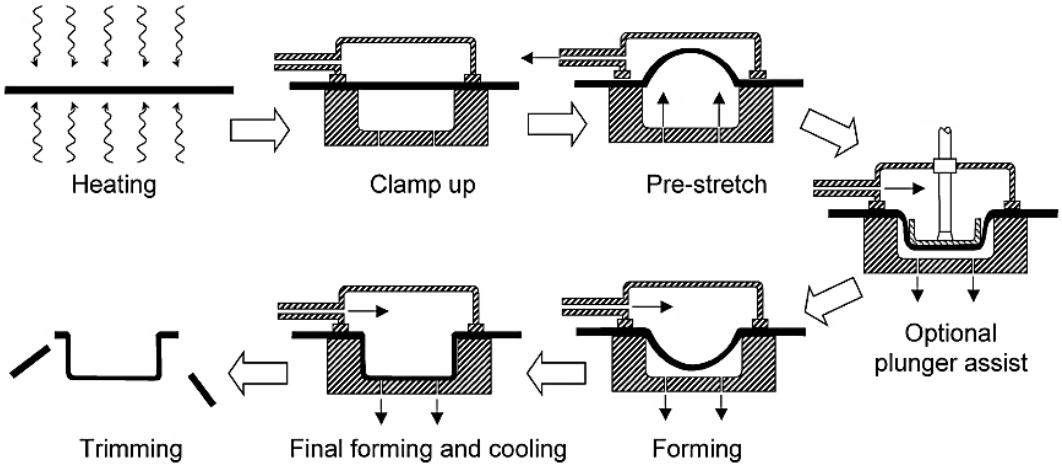
2.4 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อนของ PLA มีกระบวนการขึ้นรูปเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แตกต่างกันที่สภาวะที่ใช้ทดสอบ โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนเมื่อเม็ดพอลิเมอร์ได้รับความร้อนผ่านแม่พิมพ์จะทำให้สายโซ่ภายในโมเลกุลเริ่มขยับส่งผลให้เกิดการคลายตัวของสายโซ่จึงเกิดการหลอม จากนั้นเมื่ออัดด้วยความร้อนจะทำให้พอลิเมอร์เชิงประกอบมีจัดเรียงตัวใหม่ เมื่อทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง พอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวในส่วนของผลึกของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่เรียงชิดติดกันอาจส่งผลให้เกิดการหดตัวของพอลิเมอร์เชิงประกอบ (ภาพที่ 11) [35]

ภาพที่ 11 กระบวนการขึ้นรูป PLA ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน [36]

2.5 กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น (Thermoforming)

กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นของภาชนะบรรจุเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่แผ่น PLA โดยการฉายรังสีอินฟราเรดจากเครื่องทำความร้อนเพื่อให้มีลักษณะนิ่ม จากนั้นให้แรงลมหรือแรงทางกลเพื่อให้แผ่น PLA สัมผัสแม่พิมพ์ โดยทั่วไปอุณหภูมิอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นของ PLA ในแม่พิมพ์ อยู่ในช่วง 80-110 °C ซึ่งต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่น (เช่น PET PS และ PP) ค่อนข้างมาก [37-38] แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวก่อนนำออกจากแม่พิมพ์ (ภาพที่ 12) โดยการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ PLA โดยการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นนิยมใช้แผ่นแม่พิมพ์อลูมิเนียม แม่พิมพ์เครื่องมือตัดแต่ง และเตาให้ความร้อน ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับ PET, HIPS และ OPS ได้ แต่มาสามารถใช้ร่วมกับแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นของ PP เนื่องจาก PP หดตัวมากกว่า PLA



ภาพที่ 12 เครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น PLA [21]

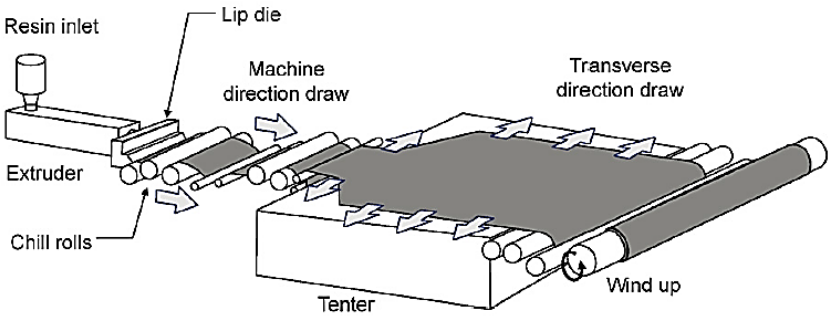
การเพิ่มความเหนียวของ PLA สามารถทำได้จากการจัดเรียงตัวของ PLA โดยบริเวณของชิ้นงานที่มีอัตราการดึงสูงจะมีความเปราะลดลงเมื่อเทียบกับหน้าแปลนและขอบซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่ำที่สุด แผ่น PLA ที่ได้จากการอัดรีดมีลักษณะเปราะที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น จึงต้องแน่ใจว่าแผ่นสามารถถูกป้อนเข้าไปได้อย่างต่อเนื่องและไม่มีการแตกของแผ่นเกิดขึ้น รัศมีของการม้วนแผ่นพลาสติกต้องไม่น้อยเกินไป ไม่ควรต่ำกว่า 25 cm [39] ในกรณีที่แผ่น PLA จำเป็นต้องถูกตัดแต่งก่อนการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น ควรมีการให้ความร้อนแก่แผ่นที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C เพื่อป้องกันการแตกหักของแผ่น นอกจากการเก็บแผ่น PLA ต้องมีสภาวะที่เหมาะสมคือ ไม่ควรสัมผัสกับสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 40°C หรือความชื้นสัมพันธ์มากกว่า 50% เนื่องจากมีอุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนต่ำ หลังจากการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น PLA ควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °C เนื่องจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูง (Auras R., et al., 2006b) และการใช้ PLA ที่มีการบดซ้ำปริมาณ 40-50% จะไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของบรรจุภัณฑ์ [40]

2.6 ฟิล์มและชีทหล่อ (Cast film and sheet)

ความแตกต่างระหว่างฟิล์มกับชีทคือ ความแข็งและความอ่อนตัว (flexibility) ซึ่งเกิดจากความหนาที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปฟิล์มมีความหนาน้อยกว่าหรือประมาณ 0.076 mm แต่ชีทมีความหนามากกว่าหรือประมาณ 0.25 mm กระบวนการอัดรีดฟิล์ม (Cast film extrusion) PLA หลอมถูกอัดรีดผ่านดายแบบชีทและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วบนลูกกลิ้งโครเมียมขัดเงาซึ่งหล่อเย็นด้วยน้ำวน เนื่องจาก PLA เป็นวัสดุที่ว่องไว

ต่อความร้อน จึงไม่ควรใช้อุปกรณ์กำหนดขนาดของฟิล์มและชีท (External deckles) บนดาย เนื่องจากเรซินที่แตกสลายด้านหลังอุปกรณ์ทำให้เกิดความไม่เสถียรของขอบ โดยทั่วไปช่องว่างของดาย (Die gap) ถูกตั้งค่าให้มากกว่าความหนาที่ต้องการประมาณ 10% หรือ 25-50 μm [41]

กระบวนการผลิตฟิล์มและชีททำได้โดยใช้ ลูกกลิ้งวางเรียงกัน 3 ลูก (Three-roll stack) ในแนวระนาบ และใช้อุณหภูมิของลูกกลิ้งในช่วงที่สูงกว่ากรณีทั่วไป (25-50 °C) เพื่อป้องกันการควบแน่นของมอนอเมอร์แลคไทด์และการไหลของแผ่นบนลูกกลิ้ง การป้องกันการก่อตัวของมอนอเมอร์แลคไทด์สามารถทำได้โดยใช้ระบบการระบายออกของไอ (Exhaust system) แต่ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปเพราะจะทำให้ แผ่นที่รีดออกมาเหนียวติดลูกลิ้งและทำให้ชีทมีคุณภาพต่ำ การลดการสัมผัสกับอากาศและตำหนิของฟิล์มหรือชีทสามารถทำได้โดยการวางตำแหน่งดายให้ใกล้กับทางเข้าของลูกกลิ้งหนีบมากที่สุดและสูงกว่าลูกกลิ้งหนีบเพียงเล็กน้อย เพื่อรองรับการห้อยของแผ่น PLA หลอม [41] และการสัมผัสระหว่างแผ่นและลูกกลิ้งยังสามารถลดการก่อตัวของแลคไทด์ได้ กล่าวคือ ในการหล่อฟิล์ม PLA ต้องมีการยึดขอบ เพื่อลดการเกิดริ้วและการคอดของแผ่น และเพิ่มความเสถียรของขอบ (Edge stability) [42] ในส่วนของการตัดและม้วนเก็บ PLA ควรใช้มีดเลเซอร์แบบหมุน (Rotary shear knifes) ตัวอย่างเครื่องอัดฟิล์มแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 เครื่องอัดรีดฟิล์มหล่อที่มีการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง [21]

2.7 การปั่นเส้นใย (Fiber spinning)

การผลิตเส้นใย PLA สามารถทำได้โดยกระบวนการปั่นแห้ง (Dry spinning) กระบวนการปั่นเปียก (Wet spinning) และกระบวนการปั่นหลอม (Melt spinning) ในกระบวนการปั่นแห้ง จะสนใจการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย โดยทั่วไปนิยมใช้ คลอโรฟอร์ม โทลูอีน หรือใช้ตัวทำละลายผสม และการอัดรีดสารละลายพอลิเมอร์ในอากาศหรือก๊าซเฉื่อย การระเหยของตัวทำละลายในระหว่างการอัดรีดส่งผลให้เส้นใยที่ถูกรีดออกมามีลักษณะแข็ง กระบวนการปั่นเปียกมีลักษณะคล้ายกระบวนการปั่นแห้ง แต่สารละลายพอลิเมอร์จะถูกปั่นในอ่างที่มีสารละลายที่จะทำให้พอลิเมอร์จับตัวเป็นก้อน (Coagulating solution) ซึ่งจะทำให้เส้นใยพอลิเมอร์แข็งตัว โดยทั่วไป PLA จะถูกละลายในคลอรฟอร์ม จากนั้นจึงนำไปอัดรีดลงไปในอ่างที่มีโทลูอีนหรือเอทานอล แต่ในเชิงพาณิชย์นิยมใช้เทคนิคการปั่นหลอม โดยเส้นใยถูกปั่นที่อุณหภูมิช่วง 185-240 °C ผ่านหัวฉีด มีอัตราส่วน L/D ในช่วง 2-10 อุณหภูมิการแปรรูปใกล้เคียงกับพอลิเลฟินส์ [43-44] โดยการเลือกใช้อุณหภูมิต้องคำนึงถึงความบริสุทธิ์เชิงแสงของ PLA ด้วย กล่าวคือถ้าใช้ PLA ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำต้องใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปต่ำด้วย ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลดการเสื่อมสลายทางความร้อนและการเสื่อมสลายด้วยน้ำของ PLA ได้ อีกทั้งเกรดของ PLA ที่ใช้ในการผลิตเส้นใยจำเป็นต้องทำแห้ง โดยให้มีปริมาณความชื้นน้อยกว่า 0.005 wt% ก่อนนำไปหลอมในเครื่องอัดรีด เพื่อป้องกันการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล

3. บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่าย

3.1 บริษัทผู้ผลิต PLA

3.1.1 ภายในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายชื่อบริษัทผู้ผลิต PLA ภายในประเทศ

ชื่อบริษัท	ที่อยู่	เบอร์โทร	ประเทศ	เว็บไซต์
บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด	622 ห้อง1-6 อาคารเอ็มโพเรี่ยม ทาวเวอร์ ชั้น 23 ถ.สุขุมวิท 24 แขวงคลองตัน เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110	02-624-1999	ไทย	http://www.thaiautoparts.or.th/
บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคม จำกัด	555/1ศูนย์เอเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ ถ.วิภาวดี-รังสิตแขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900	02-265-8400	ไทย	http://www.pttmcc.com/new/
บริษัท พีทีที โกลบอลเคมิคอล จำกัด (มหาชน)	555/1ศูนย์เอเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ ถ.วิภาวดี-รังสิตแขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900	02-265-8400	ไทย	http://www.pttgcgroup.com/th/
บริษัท SCG Performance Chemicals จำกัด	1 ถ.สยามซีเมนต์บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800	02 5863898	ไทย	https://www.scgchemicals.com/
บริษัท สาลี่คัลเล่อร์ จำกัด	100-100/1 หมู่ที่ 21 ซ.ที่ดินไทย ถ.เทพารักษ์ ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540	02-3243216-20	ไทย	www.saleecolour.com/
บริษัท เอ็ช เอ็ม ซี โปลีเมอส์ จำกัด	อาคารสาธรซิตี้ทาวเวอร์ ชั้น 20 175 ถนน สาทรใต้ แขวงทุ่มมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120	0-3868-3861 - 9	ไทย	www.hmcpolymers.com/
บริษัท พูแรค (ประเทศไทย) จำกัด	3 หมู่ 2 ต.บ้านฉาง อ.ระยอง จ.ระยอง 21130	038 698 868	ไทย	http://www.amchamthailand.com/
บริษัท เนชั่นแนลสตาร์ท (ไทยแลนด์) จำกัด	40/14 หมู่12 ถ.บางนา-ตราด ต.บางแก้ว อ.บางพลี สมุทรปราการ 10540	0-2312-0530	ไทย	- natpitchaya.iamchareonchok@ingredion.com

3.1.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายชื่อบริษัทผู้ผลิต PLA ในต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Web site
NatureWork	15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, Minnesota 55345.	-	United State	http://www.natureworksllc.com/What-is-Ingeo/How-Ingeo-is-Made
Corbion Purac	PO Box 21 Post address: 4200 AA Gorinchem	+31 183 695 695	Netherlands	https://www.total-corbion.com/ab out-pla/pla-life cycle/
Sulzer	Neuwiesenstrasse 158401 WinterthurSwitzerland	+41 52 262 30 00.	Switzerland	https://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/
Futerro	Place d'Escanaffles 23, 7760 Celles, Belgium	+32 (0)69 45 22 76	France	http://www.futerro.com/index_pla.html
TORAY	461 Fifth Avenue, 9th Floor, New York, NY 10017	(212) 697-8150	United State	http://www.toray.com/products/plastics/pla_008.html
Thyssenkrupp	thyssenkrupp Allee 1 Essen	+49 201 8440	Germany	https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/

3.2 บริษัทผู้จัดจำหน่าย PLA

3.2.1 ภายในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 รายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย PLA ภายในประเทศ

ชื่อบริษัท	ที่อยู่	เบอร์โทร	ประเทศ	เว็บไซต์
บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด	622 ห้อง1-6 อาคารเอ็มโพเรี่ยม ทาวเวอร์ ชั้น 23 ถ.สุขุมวิท 24 แขวงคลองตัน เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110	02-624-1999	ไทย	http://www.thaiautoparts.or.th/
บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคม จำกัด	555/1ศูนย์เอเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ ถ.วิภาวดี-รังสิตแขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900	02-265-8400	ไทย	http://www.pttmcc.com/new/
บริษัท พีทีที โกลบอลเคมิคอล จำกัด (มหาชน)	555/1ศูนย์เอเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ ถ.วิภาวดี-รังสิตแขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900	02-265-8400	ไทย	http://www.pttgcgroup.com/th/
บริษัท SCG Performance Chemicals จำกัด	1 ถ.สยามซีเมนต์บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800	02 5863898	ไทย	https://www.scgchemicals.com/
บริษัท สาลี่คัลเล่อร์ จำกัด	100-100/1 หมู่ที่ 21 ซ.ที่ดินไทย ถ.เทพารักษ์ ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540	02-3243216-20	ไทย	www.saleecolour.com/
บริษัท เอ็ช เอ็ม ซี โปลีเมอส์ จำกัด	อาคารสาธรซิตี้ทาวเวอร์ ชั้น 20 175 ถนน สาทรใต้ แขวงทุ่มมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120	0-3868-3861 -9	ไทย	www.hmcpolymers.com/
บริษัท พูแรค (ประเทศไทย) จำกัด	3 หมู่ 2 ต.บ้านฉาง อ.ระยอง จ.ระยอง 21130	038 698 868	ไทย	http://www.amchamthailand.com/
บริษัท เนชั่นแนลสตาร์ท (ไทยแลนด์) จำกัด	40/14 หมู่12 ถ.บางนา-ตราด ต.บางแก้ว อ.บางพลี สมุทรปราการ 10540	0-2312-0530	ไทย	-natpitchaya.iamchareonchok@ingredion.com

3.2.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 รายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย PLA ในต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Web site
NatureWork	15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, Minnesota 55345.	-	United State	http://www.natureworksllc.com/What-is-Ingeo/How-Ingeo-is-Made
Corbion Purac	PO Box 21 Post address: 4200 AA Gorinchem	+31 183 695 695	Netherlands	https://www.total-corbion.com/ab out-pla/pla-life cycle/
Sulzer	Neuwiesenstrasse 158401 WinterthurSwitzerland	+41 52 262 30 00.	Switzerland	https://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/
Futerro	Place d'Escanaffles 23, 7760 Celles, Belgium	+32 (0)69 45 22 76	France	http://www.futerro.com/index_pla.html
TORAY	461 Fifth Avenue, 9th Floor, New York, NY 10017	(212) 697-8150	United State	http://www.toray.com/products/plastics/pla_008.html
Thyssenkrupp	thyssenkrupp Allee 1 Essen	+49 201 8440	Germany	https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/

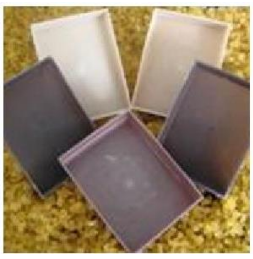
4. การประยุกต์ใช้ PLA ในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันพอลิแลกติคแอซิดสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น ฟิล์มสำหรับหุ้มอาหารผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร ได้แก่ กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ และแก้วน้ำ ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง รวมทั้ง ถุงหูหิ้ว ถุงใส่กลอง เส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเคสของมือถือ เป็นต้น

4.1 ผลิตภัณฑ์พลาสติกทางการเกษตร [45]

การนำพลาสติกชีวภาพไปประยุกต์ใช้ในการเกษตรนั้นจะส่งผลให้ลดปริมาณขยะลงได้ กล่าวคือ เมื่อใช้กระถางในการปลูกต้นไม้แทนถุงพลาสติก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกทางการเกษตร เช่น กะละมัง กระบะ และกระถาง เป็นต้น

กะละมัง



กระบะ

กระถาง

ภาพที่ 14 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกทางเกษตรที่ผลิตจาก PLA

กะละมัง	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming
กระบะ	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming
กระถาง	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming

4.2 ผลิตภัณฑ์พลาสติกบรรจุภัณฑ์ [46-49]

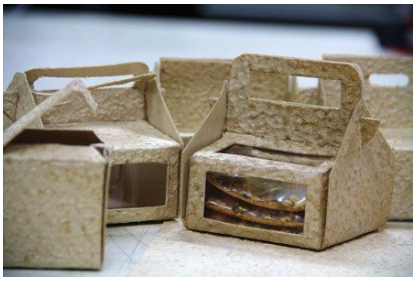
อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ถือเป็นอุตสาหกรรมสำคัญของ PLA โดยปัจจุบันนำ PLA ไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์มากมายหลายชนิด เช่น แผ่นฟิล์มสำหรับหุ้มอาหาร กล่อง ถุงหิ้ว แก้วกาแฟ และถ้วยโยเกิร์ต เป็นต้น

แผ่นฟิล์มหุ้มอาหาร

แก้วกาแฟ

ถ้วยโยเกิร์ต

ถุงหูหิ้วพลาสติก



กล่องใส่ขนมต้านแบคทีเรีย

กล่องบรรจุอาหารสดแช่แข็ง

ภาพที่ 15 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA

แผ่นฟิล์มหุ้มอาหาร	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Cast film
แก้วกาแฟ	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming
ถ้วยโยเกิร์ต	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding

ถุงหูหิ้วพลาสติก	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding
กล่องใส่ขนมต้านแบคทีเรีย	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding
กล่องบรรจุอาหารสดแช่แข็ง	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming

ตารางที่ 9 คุณสมบัติเรซินสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

Resin property	Nominal value
RV	3.9 – 4.1
Melting point, °F (°C)	300 – 320 (150 – 160)
Glass transition temperature, °F (°C)	136 (58)
Crystallization temperature, °F (°C)	212 – 248 (100 – 120)

4.3 ผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับของเล่น [50]

ความปลอดภัยทางด้านความเป็นพิษถือเป็นปัจจัยสำคัญของอุตสาหกรรมของเล่น เนื่องจากผู้ใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในวัยเด็ก ดังนั้นการผลิตของเล่นจากพลาสติกชีวภาพจึงเป็นที่สนใจ ตัวอย่างเช่น โมเดลของเล่นแบบจำลองต่างๆ และรูปปั้น เป็นต้น

โมเดลของเล่น

แบบจำลองกระดูกสันหลัง

รูปปั้น

ภาพที่ 16 ตัวอย่างของเล่นที่ผลิตจาก PLA

โมเดลของเล่น	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding และ 3D-printing
แบบจำลองกระดูกสันหลัง	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding และ 3D-printing
รูปปั้น	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding และ 3D-printing

4.4 ผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับเครื่องใช้ในบ้าน [51]

ปัจจุบันมีการทำพลาสติกชีวภาพเข้ามาประยุกต์ใช้เป็นสิ่งทอสำหรับสวมใส่ เช่น เสื้อผ้า และรองเท้า เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำข้อดีของพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยตัวเองเข้ามาประยุกต์ใช้เป็นแคปซูลสำหรับชงกาแฟอีกด้วย

เสื้อผ้า

รองเท้าสำหรับเด็ก

แคปซูลสำหรับชงกาแฟ

ภาพที่ 17 ตัวอย่างเครื่องใช้ในบ้านที่ผลิตจาก PLA

เสื้อผ้า	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Fiber spinning
รองเท้าสำหรับเด็ก	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Fiber spinning
แคปซูลสำหรับชงกาแฟ	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming

ตารางที่ 10 คุณสมบัติเรซินสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ

Resin property	Nominal value
RV	3.0 – 3.2
Melt temperature (°C)	165 – 173
Glass transition temperature(°C)	55 – 62
Crystallization temperature(°C)	100 - 120

4.5 ผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้า [52-54]

ในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้านิยมทำจากโลหะ แต่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยังเป็นขยะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ปัจจุบันมีนวัตกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้จากพลาสติกชีวภาพ ตัวอย่างเช่น แผ่นซีดีรอม เครื่องคิดเลข นาฬิกา และสายไฟ เป็นต้น

แผ่นซีดีรอม

เครื่องคิดเลขและนาฬิกา

สายไฟ

ภาพที่ 18 ตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก PLA

แผ่นซีดีรอม	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming
เครื่องคิดเลข	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding
นาฬิกา	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding
สายไฟ	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding

ตารางที่ 11 คุณสมบัติเรซิรสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

Resin property	Nominal value
RV	3.9 – 4.1
Melt temperature (°C)	(165 – 173)
Glass transition temperature(°C)	(55 – 62)
Crystallization temperature(°C)	100 - 120

4.6 ผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับเครื่องมือทางการแพทย์ [55-56]

เนื่องจากพลาสติกชีวภาพสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงมีการนำข้อดีนี้ไปประยุกต์ใช้ในการแพทย์ สำหรับวัสดุที่ต้องการย่อยสลายได้เอง เช่น สกรูทางการแพทย์และแคปซูลยา เป็นต้น

สกรูทางการแพทย์

แคปซูลยา

ภาพที่ 19 ตัวอย่างอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ผลิตจาก PLA

สกรูทางการแพทย์	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding และ 3D-printing
แคปซูลยา	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion molding และ 3D-printing

5. ความรู้และข่าวสารใหม่ๆ [57]

จากพลาสติกที่ผลิตโดยใช้ของเสียในท่อระบายน้ำไปจนถึง PET ที่ผลิตจากพืช 100% ทำให้ปี 2015 ที่ผ่านมาถือเป็นปีที่มีความก้าวหน้าในการคิดค้นและพัฒนาการใช้วัสดุจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้อื่นๆ เพื่อนำมาผลิตพลาสติกเป็นอย่างมาก สอดคล้องกับรายงานของ European Bioplastics ที่คาดว่าการผลิตพลาสติกชีวภาพจะขยายตัวอย่างมากในช่วงระหว่างปี 2014-2019 จากปริมาณ 1.7 ล้านตัน/ปี จะเพิ่มขึ้นไปถึง 7.85 ล้านตัน/ต่อปี โดยพลาสติกชีวภาพจะถูกใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์มากที่สุด ขณะที่การนำพลาสติกชีวภาพไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ยังอยู่ในช่วงการพัฒนาไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้า อิเลคทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิแลกติกแอซิดในปี 2015 ได้แก่

โลงศพ Onora : เป็นโลงศพที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดคอมปาวด์กับเส้นใยธรรมชาติ 100% ผลิตด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ โดยเมื่อนำไปฝังใต้ดินโลงศพนี้จะย่อยสลายจนหมดในระยะเวลา 10 ปี ซึ่งโลงศพ Onora นี้ได้รับรางวัลจากหลายสถาบัน ตัวอย่างเช่น รางวัล “Wood and Natural Fibre Composite Award” จากสถาบัน Nova-Institute

เมาส์คอมพิวเตอร์ The ‘fair’ mouse : บริษัท Nager IT สัญชาติเยอรมัน ได้พัฒนาเมาส์คอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า Faire Maus ตัวเมาส์ภายนอกผลิตจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลกติคแอซิด ที่บริษัทกล่าวว่าผลิตจากพืชที่ไม่ผ่านการตัดต่อทางพันธุกรรม (GMO) จากประเทศไทย ส่วนของลูกกลิ้งของเมาส์นั้นทำจากไม้

หมวกกันน็อคจักรยาน : ผลิตจากเซลลูโลสของบริษัท Cellutech จากประเทศสวีเดน โครงสร้างของหมวกผลิตจากไม้อัดและสายรัดคางทำจากกระดาษ ขณะที่โฟมบุภายในนั้นทำจากโฟมเซลลูโลสของบริษัทที่มีชื่อว่า Cellufoam ที่ผลิตด้วย nanocellulose จากไม้ ที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้อีกด้วย

ผ้า Spider silk : ของบริษัท Spiber จากประเทศญี่ปุ่นที่ค้นพบวิธีการผลิตเส้นใยสังเคราะห์จากกระบวนการหมักโปรตีนธรรมชาติที่มีลักษณะคล้ายใยแมงมุมที่มีชื่อว่า Qmonos ซึ่งเส้นใยนี้ได้ถูกบริษัท North Face ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ Outdoor รายใหญ่นำไปทดลองใช้ผลิตเสื้อกันหนาวรุ่น Moon Praka

บ้าน Canal House : สถาปนิกชาวดัชได้ออกแบบและสร้างบ้านริมน้ำโดยกระบวนการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) แบบ On-site โดยเครื่องพิมพ์ Kamermaker ที่ติดตั้งกับตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 2*2*3.5 เมตร ตัวบ้านประกอบด้วยห้องรวมกัน 13 ห้อง สร้างโดยการพิมพ์สามมิติทีละห้องแล้วนำมาประกอบกัน ซึ่งวัตถุดิบหลักในการสร้างนั้นเป็นพลาสติกชีวภาพที่มี Biocontent 80% พัฒนาโดยบริษัท Henkel

เอกสารอ้างอิง

[1] Datta R and Henry M (2006) Lactic acid: Recent advances in products, processes and technologies-a review, J Chem Technol Biotechnol 81:1119-1129.

[2] Auras R, Harte B and Selke S (2004a) An overview of polylactides as packaging materials, Macromol Biosci 4:835-864.

[3] Garlotta D (2001) A literature review of polylactic acid, J Polym Environ 9:63-84.

[4] Conn R E, Kolstad J J, Borzelleca J F, Dixler D S, Filler Jr L J, LaDu Jr B N and Pariza M W (1995) Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer, Food Chem Texicol 33:273-283.

[5] Weber C J, Haugaard V, Festersen R and Bertelsen G (2002) Production and applications of biobased packaging materials for the food industry, Food Addit Contam 19:172-177.

[6] Gu Z and Shen Q (2016) Synthesis, characterization and comparison of polyaniline 1D-structure controlled by poly(L-lactide) and poly(D-lactide), Superlattices and Microstructures 89:53-58.

[7] Balk M, Behl M, Wischke C, Zotzmann J , Lendlein A (2016) Recent Advances in Degradable Lactide-Based Shape-Memory Polymers, Advanced Drug Delivery Reviews. 1-58.

[8] Lasprilla AJ, Martinez GA, Lunelli BH, Jardini AL, Filho RM (2012) Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices - a review. Biotechnol Adv 30: 321-328.

[9] Garlotta D (2001) A literature review of poly(lactic acid). Journal of Polymers and the Environment 9: 63-84.

[10] Auras R, Harte B, Selke S (2004) An overview of polylactides as packaging materials. Macromol Biosci 4: 835-864.

[11] Mehta R, Kumar V, Bhunia H, Upadhyay S (2005) Synthesis of poly(lactic acid):a review. Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews 45: 325-349.

[12] Dutkiewicz S, Grochowska-Lapienis D, Tomaszewski W (2003) Synthesis of poly(L(+) lactic acid) by polycondensation method in solution. Fibres Text Eastern Eur 11: 66-70.

[13] Zhang W, Wang Y (2008) Synthesis and properties of high molecular weight poly(lactic acid) and its resultant fibers. Chinese J Polym Sci 26: 425-432.

[14] Lunt J (1998) Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. Polymer Degradation and Stability 59: 145-152.

[15] Gao Q, Lan P, Shao H, Hu X (2002) Direct synthesis with melt polycondensation and microstructure analysis of poly(L-lactic acid-co-glycolic acid). Polymer Journal 34: 786-793.

[16] Maharana T, Mohanty B, Negi YS (2009) Melt-solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. Progress in Polymer Science 34: 99-124.

[17] Ikeda K, Obuchi S, Ohta M (1995) Preparation process of polyhydroxycarboxylic acid. US Patent 5646238 A.

[18] Ichikawa F, Kobayashi M, Ohta M, Yoshida Y, Obuchi S, et al. (1995) Process for preparing polyhydroxycarboxylic acid. US Patent 5440008 A.

[19] Nikolic L1, Ristic I, Adnadjevic B, Nikolic V, Jovanovic J, et al. (2010) Novel microwave-assisted synthesis of poly(D,L-lactide): the influence of monomer/initiator molar ratio on the product properties. Sensors (Basel) 10: 5063-5073.

[20] Rees H (1995) Understanding injection molding technology. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, Inc.

[21] Lim L T, Auras R and Rubino M (2008) Processing technologies for poly(lactic acid), Prog Polym Sci 33:820-852.

[22] พลาสติกชีวฐาน : โครงสร้าง สมบัติ การแปรรูป และการใช้ประโยชน์ = Bio-based plastics : structure, properties, processing and applications / รังรอง ยกส้าน

[23] Dorgan J R, Jansen J and Clayton M P (2005) Melt Rheology of variable L-content poly(lactic acid), J Rheol 49:607-619.

[24] Celli L and Scandola M (1992) Thermal properties and physical ageing poly(L-lactic acid), Polymer 33:2699-2703.

[25] Witzke D R (1997) Introduction to properties, engineering, and prospects of polylactide polymer, PhD thesis. East Lansing, MI: Michigan State University.

[26] Cai H, Dave V, Gross R A and McCarthy S P (1996) Effect of physical aging, crystallinity, and orientation on the enzymatic degradation of poly(lactic acid). J Polym Sci Part B: Polym Phys 34:270-2708.

[27] Chen R, Zou W, Wu C, Jia S, Huang Z, Zhang G, Yang Z, Qu J (2014) Poly(lactic acid/ poly(butylene succinate) / calcium sulfate whiskers biodegradable blends prepared by vane extruder: Analysis of mechanical properties, morphology, and crystallization behavior. Polymer Testing 34:1–9.

[28] Natureworks (2005b) Natureworks polymer technical data sheets-PLA polymer 7032D. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[29] Sodergard A, Selin J F, Niemi M, Johaneeon C J and Meinander K (2003) Processable poly(hydroxy acids). US Patent 6,599,244B1.

[30] Tweed E C, Stephens H M and Riegent T E (2006) Polylactic acid blown film and method of manufacturing same. US Partent Application 2006/0045940A1.

[31] Natureworks (2003) Production of Natureworks polylactide films on blown film equipment designed for producing low density polyethylene film. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[32] Hiltunen E, Senlin J F and Skog M (2000) Polylactide film. US Patent 6,117,928.

[33] Mukherjee S and Labarin S A (1995) Aging characteristics of oriented poly(ethylene terephthalate), Polym Eng Sci 35:1145-1154.

[34] Cink K, Bopp R C and Sikkema K (2006) Injection stretch blow molding process using polylactide resin, WO Patent 2006/002409.

[35] Nguyen S., Perez C., Desimone M., Pastor J., Tomba J., Carella J., "Adhesion control for injection overmolding of elastomeric propylene copolymers on polypropylene. Effects of block and random microstructures." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 46 (2013): 44-55.

[36] Jatuphorn W (2017) Ring Opening Polymerization School of Energy Environment and Materials. King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand.

[37] Natureworks (2005d) Processing guide for thermoforming articles. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[38] Bosiers L and Engelmann S (2003) Thermoformed packaging made of PLA, Kunststoffe Plast Europe 12:21-24.

[39] Natureworks (2007b) Natureworks polymer processing guides-crystallizing and drying of PLA. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[40] Auras R A, Singh S P and Singh J J (2005) Evaluation of oriented poly(lactide) polymers vs. existing PET and oriented PS for fresh food service containers, Packag Technol Sci 18:207-216.

[41] Natureworks (2005a) Sheet extrusion processing guide. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[42] Natureworks (2006b) Natureworks PLA processing guide for biaxially oriented film. Minnetonka, MN: Natureworks LLC.

[43] Farrington D W, Davies J L and Blackburn R S (2005) Poly(lactic acid) fibers, in Biodegradable and sustainable fibers (Ed. Blackburn R S) Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

[44] Agrawal A K and Bhalla R (2003) Advances in the production of poly(lactic acid) fibers-a review. J Macromol Sci C 43:473-503.

[45] http://www.matichon.co.th/news_detail.php?newsid=1296020776&grpid=&catid=09&subcatid=0904
[46] http://www.toray.co.th/products/films/fil_005.html
[47] http://www.brandbuffet.in.th/2015/11/cafe-amazon-bio-cup-eco/
[48] http://plastic.oie.go.th/ReadArticle.aspx?id=5402
[49] http://www.nkrpackage.com/site/bioplastic.html
[50] http://www.print3dd.com/
[51] http://www.aecplastic.com/ArticleDetail.aspx?id=10838
[52] http://www.vcharkarn.com/varticle/18774
[53] http://www.3ders.org/articles/20141230-protoplant-announces-highly-conductive-pla-3d-printer-filament.html
[54] http://www.aecplastic.com/ArticleDetail.aspx?id=10838
[55] https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes
[56] https://3dprint.com/7793/3d-print-antibiotics-implants/
[57] http://plastic.oie.go.th/ReadArticle.aspx?id=14771