

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป พลาสติกการไหล ลักษณะทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid หรือ PLA) ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน และสมบัติเชิงกลบางประการของพอลิแลคติกแอซิดที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ดังนั้นในบทนี้จะขอกล่าวถึงข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิแลคติกแอซิด กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน การทดสอบค่าดัชนีการไหล การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางมาพอสังเขป รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมา

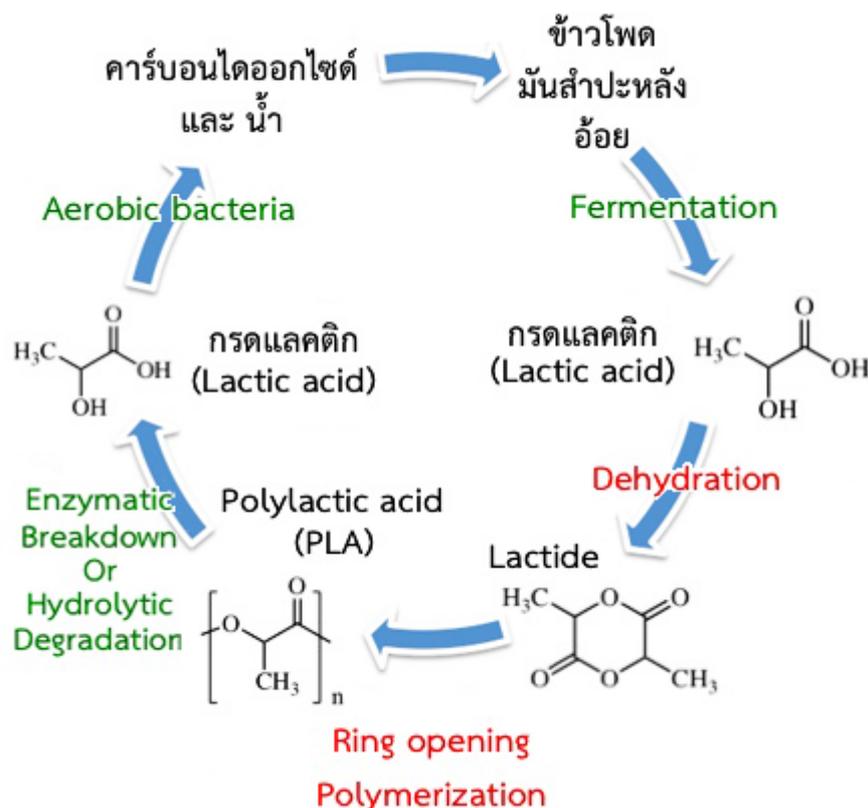
2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA)

ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา มนุษย์ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งประมาณการได้ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยเฉพาะการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะ ซึ่งได้ขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศน์ของโลก ทำให้การคิดค้นและพัฒนากระบวนการใหม่ รวมถึงการสร้างนวัตกรรมเพื่อผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีอย่างครบวงจรภายในเวลาอันรวดเร็ว เป็นสิ่งหนึ่งที่ทุกประเทศจำเป็นต้องพัฒนา ทั้งนี้นอกจากจะหมายถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีของประเทศของตนแล้ว ยังหมายถึงการเพิ่มศักยภาพและโอกาสในการแข่งขันอันจะเชื่อมโยงไปสู่ความเป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศอีกด้วย

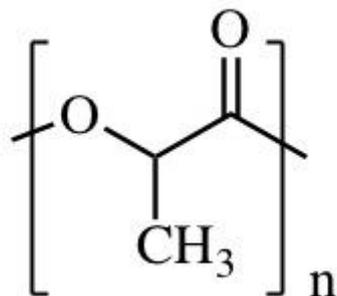
พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (biodegradable plastic) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งาน โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity Plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

2.1.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอลิแลคติกแอซิดคือ แป้งที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ซึ่งได้แก่พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยมีวัฏจักรของกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.1 เริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชจำพวก ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย หรือพืชที่ให้แป้งจำพวกอื่นๆ นั้นให้ละเอียด จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมัก (fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic Acid) จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนเรียกว่าแลคไทด์ (lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นโพลิเมอร์ของแลคไทด์ ที่เป็นสายยาวขึ้นเรียกว่าพอลิแลคติกแอซิด หรือตัวย่อคือ PLA ซึ่งการกำหนดความยาวของสายโพลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการจะเป็นสิ่งที่ทำให้คุณสมบัติของ PLA เปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม อีกทั้ง PLA ยังมีคุณสมบัติพิเศษคือมีความใสไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน



รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรของการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด [6]



รูปที่ 2.2 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของพอลิแลคติกแอซิด [6]

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติกดั่งที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ซึ่งการสังเคราะห์ PLA สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยา Azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำให้ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 หรือปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 1,000 – 5,000 บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์) นอกจากนี้ เมื่อนำพรีพอลิเมอร์ดังกล่าวไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแลคไทด์ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ เช่น LL, LD, และ DD ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็น PLA อีกครั้ง ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในระดับมากกว่า 100,000 เช่นเดียวกัน ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของ PLA ที่สังเคราะห์ได้ เช่น สมบัติเชิงกล ความเหนียว ความแข็งแรงขณะหลอม สมบัติด้านการไหล และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างเช่น PLA ที่มีปริมาณ D-lactide เท่ากัน จะมีค่า T_g และ T_m สูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10,000–30,000 กรัมต่อโมล (ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ L-lactide โมโนเมอร์ใน PLA) อย่างไรก็ตาม เมื่อเลขจุดดังกล่าว ค่า T_g จะเริ่มไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น PLA ที่ใช้ในทางการค้าจะเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA กับ PDLA ซึ่งสังเคราะห์โดยผ่านกลไกแบบปฏิกิริยาเปิดวงของ L-lactide และ L,D-lactide ตามลำดับ โดยที่พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมี L-lactide เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า เนื่องจากโมโนเมอร์ที่สกัดได้จากธรรมชาติจะอยู่ในรูปของ L-lactic acid มากกว่า ซึ่งปริมาณ D-lactide และหรือปริมาณ L-lactide จะส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของ PLA เช่น ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ L-lactide โมโนเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี [7-8]

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีช่วงการหลอมเหลว (Melting range) 173-178 °C แต่อย่างไรก็ตามทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 °C มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 37% และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) อยู่ระหว่าง 60-65 °C มีสมบัติขวางกั้น (Barrier properties) ดี เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) คุณสมบัติพิเศษคือมีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เอง เมื่อนำไปฝังกลบในดิน การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีด (Injection molding) เป็นต้น

ในด้านของความเป็นผลึก พบว่า PLA ที่มีปริมาณ L-lactide มากกว่าร้อยละ 10 จะมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกได้ดีซึ่งปริมาณความเป็นผลึก อาจจะเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์หรือไม่เป็นประโยชน์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณความเป็นผลึกที่สูงขึ้นจะส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ได้แข็งแรงและทนต่อการเปลี่ยนสถานะหรือเสีรูปร่างเมื่อโดนความร้อนได้ดี ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกสูงจะไม่เหมาะสำหรับนำไปผลิตพรีฟอร์ม (Preform) โดยกระบวนการแบบฉีดเป่า (Injection blow molding) เนื่องจากพรีฟอร์มดังกล่าวจะถูกนำไปผลิตต่อโดยกระบวนการเป่า (blow molding) ซึ่งความเป็นผลึกอาจจะทำให้การยึดตัวของพรีฟอร์มในระหว่างกระบวนการเป่าทำได้ยากและยังอาจจะส่งผลต่อความใสของขวดพลาสติก PLA ที่ได้จากการเป่าด้วย ดังนั้น PLA ที่มีปริมาณ L-lactide มากกว่าร้อยละ 99 จึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (injection molding) ในขณะที่ PLA ที่มีปริมาณ L-lactide โมโนเมอร์ ร้อยละ 94-96 จะเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (blow molding) และแบบเทอร์โมพรีฟอร์ม หรือแบบอัดรีด (extrusion) มากกว่า

นอกจากนั้น ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว กล่าวคือพอลิเมอร์หลอมที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) จะมีความเป็นผลึกต่ำ ในขณะที่ PLA หลอมที่ผ่านการเย็นตัวอย่างช้าๆ จะมีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า [9] นอกจากนี้จะควบคุมปริมาณความเป็นผลึกโดยอาศัยปริมาณ L-lactide และอัตราการเย็นตัวในแม่พิมพ์ในระหว่าง การขึ้นรูปแล้ว วิธีการที่ได้ผลอีกประการหนึ่งคือการเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) ลงไปผสมในระหว่างกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น การเติมทัลคัม (talc) ลงไปในปริมาณ 6% สามารถเพิ่มอัตราการเกิดผลึกของ PLA หรือเวลาครึ่งชีวิตในการเกิดผลึกลดลงจากเดิมเป็นเวลา 3 นาที (ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส) เป็น 25 วินาที ที่อุณหภูมิเดียวกัน [10] ในทำนองเดียวกัน Li และ Huneault พบว่าการเติมสารทัลคัมในปริมาณร้อยละ 1 ส่งผลให้เวลาครึ่งชีวิตในการเกิดผลึกของ 4.5% D-PLA ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ลดลงจากหลายชั่วโมงเป็น 8 นาที ในขณะที่การเติมสารนาโนเคลย์

(Cloisite Na) จะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อผลึกที่ด้อยกว่า กล่าวคือค่าเวลาครึ่งชีวิตที่ต่ำที่สุดที่ได้จากการใช้สารดังกล่าวคือ 30 นาที

แม้ว่า PLA จะมีข้อดีหลายประการ เช่นการมีฐานวัตถุดิบที่มาจากผลิตผลทางการเกษตร และมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีอุณหภูมิหลอมอยู่ในระดับสูงพอสมควร แต่ขณะเดียวกัน PLA ก็ยังคงมีสมบัติบางประการที่เป็นข้อเสียหรือข้อจำกัด ซึ่งต้องมีการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ดังนี้

- PLA มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ ซึ่งลักษณะดังกล่าว ทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้งานบางด้าน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกซีเซอร์ลงไปในสูตร PLA คอมพาวด์และหรือผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรแลคโตน และ ECOFLEX
- PLA ไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ด PLA ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ใน PLA ควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้น
- ความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์ม PLA จากกระบวนการดังกล่าว จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

2.1.3 การใช้งานและผลิตภัณฑ์ [6]

พอลิแลกติกแอซิดมักถูกขึ้นรูปเป็นพลาสติกใส ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

- ด้านการแพทย์ เนื่องจากพอลิแลกติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้ทางด้านนี้มานานกว่า 2 ทศวรรษ เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์

สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยด้วยยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

- ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาศ

- ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน

- ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers) แผ่นรองพื้น (floor mats) และ อุปกรณ์ตกแต่งภายใน

- ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์ เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี

- อื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาศ สารยึดติด ท่อพลาสติกชั่วคราว

ไม่พบข้อมูลการเกิดพิษแบบเฉียบพลัน แต่อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ ถ้ามีการสัมผัสถูกโดยตรงควรล้างด้วยน้ำหรือสบู่ หรือ มีการสูดหายใจเข้าไปควรพาออกไปบริเวณที่มีอากาศหายใจสะดวก หรือกลืนกินเข้าไปโดยตรง ให้กลั้วปากด้วยน้ำหลายครั้ง และอาจต้องพาไปพบแพทย์ นอกจากนี้ในกรดแลคติก ยังไม่พบองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง มีความปลอดภัยต่อ สิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

2.1.4 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะคอมโพสท์ที่อุณหภูมิ 60°C มีการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดสั้นลงจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในขั้นตอนนี้พลาสติกจะมีสมบัติที่แตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ แต่พอลิแลคติกแอซิดย่อยสลายได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ 60°C ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดในการกำจัดพอลิแลคติกแอซิดภายหลังการใช้งานคือ ส่งไปยังโรงคอมโพสท์ หรือโรงหมักปุ๋ยอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนพร้อมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ ไม่ควรส่งไปกำจัดโดยการฝังกลบ ดังนั้นในสถานที่ที่จะมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยเฉพาะพอลิแลคติกแอซิดมาใช้งาน ควรส่งเสริมให้มีการลงทุนสร้างโรงคอมโพสท์และมีระบบการคัดแยกขยะอินทรีย์ที่เหมาะสม

และมีประสิทธิภาพจะช่วยลดปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์ ขยะอินทรีย์ และของเสียจากภาคการเกษตรที่
จะต้องส่งไปกำจัดโดยการฝังกลบได้อีกทางหนึ่ง

2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดประมาณ 32% ของพลาสติกทั้งหมด
เตรียมได้จากการพอลิเมอร์ไรซ์แก๊สเอทิลีนจนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีรูปแบบ
โครงสร้างโมเลกุล 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear) และโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา
(Branched) การมีกิ่งก้านสาขาจะลดความสามารถในการเกิดผลึก ซึ่งมีผลไปถึงความหนาแน่น
และสมบัติอื่นๆ ดังนั้นพอลิเอทิลีนที่ได้จึงมีสมบัติแตกต่างกัน โดยพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขา
มากจะมีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว ความแข็งตึง ความแข็งของพื้นผิว (Surface Hardness)
และจุดอ่อนตัว (Softening Point) ต่ำกว่า แต่จะยอมให้แก๊สหรือไอน้ำซึมผ่านได้มากกว่า ซึ่งสมบัติ
เหล่านี้ขึ้นอยู่กับการมีกิ่งก้านสาขาของโมเลกุล แต่สมบัติทางกายภาพอื่นๆ ยังต้องคำนึงถึงน้ำหนัก
โมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย [11] ซึ่งการแบ่งเกรดพอลิเอทิลีนโดยใช้
ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดของพอลิเอทิลีนโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ [11]

Polyethylene	Density , g/cm ³	Type
HDPE (High Density Polyethylene)	0.941-0.965	Hopolymer
MDPE (Medium Density Polyethylene)	0.926-0.940	Hopolymer
LDPE (Low Density Polyethylene)	0.910-0.925	Hopolymer
LLDPE (Linear Low Density Polyethylene)	0.925-0.940	Copolymer
VLDPE (Very Low Density Polyethylene)	< 0.910 g/cm ³	Copolymer

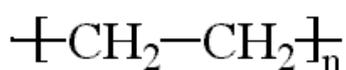
ซึ่งหลายปีที่ผ่านมาพอลิเอทิลีนจัดได้ว่าเป็นวัสดุดิบที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบ
หมุนมากที่สุด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามความหนาแน่น คือ พอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.2.1 โครงสร้าง สมบัติโดยทั่วไป การนำไปใช้งาน และการขึ้นรูป

ก. โครงสร้าง

โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่างๆ นั้นจะมีโครงสร้าง
ที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันตรงที่ความเป็นกิ่งก้านสาขาของแต่ละชนิด เช่น เกรดที่มีความ

หนาแน่นสูง สายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นตรงมีกิ่งก้านสาขาน้อย ดังนั้นสายโซ่ที่เกาะจับกันแน่นหนา มากต่อ 1 หน่วยปริมาตร ความหนาแน่นก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนเกรดที่มีความหนาแน่นต่ำจะมี กิ่งก้านสาขามากมาย โมเลกุลเกาะติดกันแบบหลวมๆไม่แน่นหนาเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลไม่ แข็งแรง ส่งผลให้สมบัติอื่นๆ เช่น ความแข็งแรง และความแข็งเปราะต่ำ แต่จะมีความเหนียวสูง ซึ่ง โครงสร้างของพอลิเอทิลีนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [12]

ข. สมบัติโดยทั่วไป

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกกึ่งผลึก โดยความหนาแน่น ความเป็นผลึก และจุด หลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อกิ่งก้านสาขาลดลง โมเลกุลของ HDPE มีความเป็นระเบียบสูงกว่า LDPE เมื่อความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นจะเพิ่มความแข็งดึง ความทนแรงดึง ความแข็ง ความทนความร้อนและ สารเคมี ความชุ่ม และสมบัติการสกัดกั้น (Barrier Properties) แต่จะลดความทนแรงกระแทกและ ความใส LDPE มีความสามารถในการยืดตัวประมาณ 100-700% MDPE ประมาณ 50-650% และ HDPE ประมาณ 10-650% สภาพยืดหยุ่นของพันธะ C-C ทำให้ PE มีค่า T_g ค่อนข้างต่ำ ขึ้นกับ ปริมาณของผลึกโดยมีค่า T_g ตั้งแต่ $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นพอลิเอทิลีนจึงมีทั้งสภาพยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ

พอลิเอทิลีนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม (Excellent) เพราะเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว สมบัติต่างๆ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power-Factor) จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ (แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น) ในทางเคมีอาจจัดพอลิเอทิลีนว่าเป็นพาราฟิน (Paraffin) ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อย เพราะไม่มีแรงดึงดูดพิเศษ เช่น พันธะไฮโดรเจนกับตัวทำ ละลาย และเนื่องจากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึก จึงทำให้พอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลาย ใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ พอลิเอทิลีนจะเริ่มบวมพองและละลายในตัวทำ ละลายไฮโดรคาร์บอน หรือฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไชลีน และไดคลอโรเอทิลีน เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ละลาย PE จะสูงขึ้นเมื่อความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง $60\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของเหลวบางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ และกลีโกลอาจทำให้พอลิเอ ทิลีนเกิดความเค้นขณะที่แช่อยู่ในของเหลวนั้นทำให้เกิดการแตกหักได้ที่ความเค้นต่ำกว่าเมื่อไม่มี

ของเหลว พอลิเอทิลีนจะทนกรด ต่างได้ดี ใช้ทำภาชนะบรรจุกรดและด่าง หรือสารออกซิไดซ์แรงๆ ได้ ผิวของพอลิเอทิลีนจะค่อนข้างมันคล้ายเทียนไขจึงเป็นอุปสรรคต่อการพิมพ์ และตกแต่งจึงจำเป็นต้องเตรียมผิวด้วยการลนด้วยเปลวไฟออกซิอะเซทิลีนหรือเปลวไฟแก๊สหุงต้ม เพื่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวอีกชั้นหนึ่งก่อน หรืออาจกัดพื้นผิวด้วยสารเคมี [11]

2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

การขึ้นรูปโดยเทคนิคแม่พิมพ์หมุน (Rotational Molding, Rotomolding หรือ Rotoforming) เป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง (Hollow Articles) โดยเฉพาะการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะทำการผลิตโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ ได้ ขนาดและรูปทรงของชิ้นงานที่ผลิต โดยชิ้นงานที่ผลิตโดยเทคนิคแม่พิมพ์หมุนจะแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ตั้งแต่ขนาดเล็กเช่น หลอดฉีดยา จนถึงที่มีขนาดใหญ่

โดยทั่วไปเทคนิคการขึ้นรูปแบบหมุนจะนิยมใช้ขึ้นรูปพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก แต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปเทอร์โมเซตบางชนิดด้วย ซึ่งลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้ คือ ในกระบวนการผลิตจะไม่มีการใช้ความดันที่สูง (High Pressure) และอัตราเฉือนที่สูง (High Shear Rate) ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคการขึ้นรูปอื่น เช่น การฉีดพลาสติก เข้าแม่พิมพ์ และการอัดรีด ทำให้ต้นทุนการทำแม่พิมพ์และอุปกรณ์อื่นๆ ของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนนี้มีราคาถูกและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังสามารถผลิตชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ เมื่อใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน

2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน

ขั้นตอนการขึ้นรูปโดยเทคนิคแม่พิมพ์หมุน แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เติมพลาสติกผงลงในแม่พิมพ์

เติมผงพลาสติกซึ่งได้คำนวณไว้แล้วลงในแม่พิมพ์หลังจากนั้นปิดฝาแม่พิมพ์แล้วนำแม่พิมพ์ไปวางบนตัวจับเพื่อล็อกแม่พิมพ์ให้ที่แน่นแล้วเคลื่อนแม่พิมพ์เข้าในห้อง (Chamber) ของเตาอบเพื่อให้ความร้อน

ขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

ให้ความร้อนแก่ด้านนอกของแม่พิมพ์โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจะอยู่ในช่วง 220 °C ถึง 400 °C ในขณะเดียวกันหมุนแม่พิมพ์ในแนวสองแกนในเวลาเดียวกัน กล่าวคือ ทั้งในแกนราบและแกนตั้ง เพื่อให้เกิดการกลิ้งไปมา (Fumbling Action) ของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ทำให้ความร้อนจากผิวภายนอกของแม่พิมพ์ส่งผ่านเข้าด้านในแม่พิมพ์และถึงผงพลาสติก

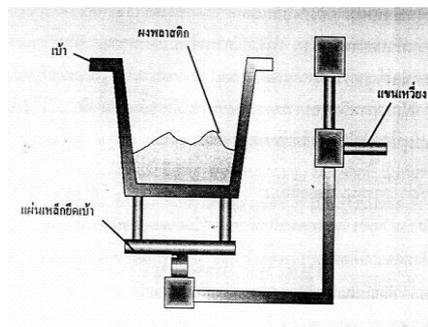
ทำให้พลาสติกเกิดการหลอม พลาสติกหลอมเหลวเหล่านี้มีความสามารถในการเหนียวติด (Tackiness) ซึ่งทำให้พลาสติกบางส่วนถูกเคลือบติดกับผิวด้านในของแม่พิมพ์เป็นชั้นบางๆ พลาสติกส่วนอื่นๆ จะถูกเหวี่ยงออกไปเนื่องจากอิทธิพลจากการหมุนกลับไปมา เมื่อให้ความร้อนต่อไปความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังพลาสติกชั้นแรกที่เคลือบติดกับแม่พิมพ์ทำให้มีความร้อนมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลือบชั้นของพลาสติกชั้นถัดลงไปลงบนพลาสติกชั้นแรก อิทธิพลของการหมุนเหวี่ยงและการส่งผ่านความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเคลือบของพลาสติกเป็นชั้นๆ จนหมด แต่เนื่องจากการนำความร้อน (Heat Conductivity) ของเทอร์โมพลาสติกมีค่าต่ำมากจึงทำให้การเพิ่มของความหนาขึ้นงานทีละชั้นเป็นไปอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้เวลาของการขึ้นรูป (Cycle Time) โดยเทคนิคนี้ค่อนข้างนาน จึงสรุปได้ว่าการหมุนแบบกลับไปมา (Tumbling Action) มีส่วนช่วยให้พลาสติกหลอมเข้าสัมผัสกับแม่พิมพ์หรือชั้นของพลาสติกที่ฉาบติดกับผิวของแม่พิมพ์อยู่ก่อนหน้าแล้ว หลังจากพลาสติกหลอมทั้งหมดฉาบติดตามรูปร่างของแม่พิมพ์แล้วให้ความร้อนต่ออีกระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้พลาสติกที่เชื่อมตัวติดกันในแต่ละชั้นหลอมรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้มีผิวเรียบมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การหล่อเย็น

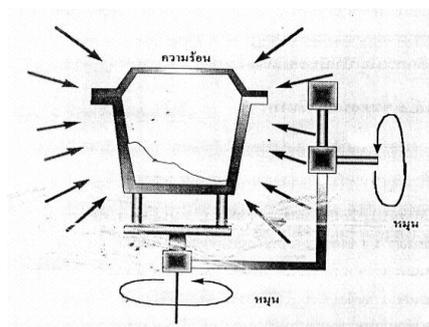
ทำการหมุนแม่พิมพ์ต่อจากขั้นตอนที่แล้ว แต่เลื่อนออกมาจากเตาให้ความร้อนแล้วนำเข้าสู่ตู้หล่อเย็นเพื่อทำการหล่อเย็น โดยใช้ลมเย็นพ่นที่ด้านนอกแม่พิมพ์ แต่บางเทคนิคใช้การฉีดน้ำเย็นหลังจากที่พลาสติกภายในแม่พิมพ์เป็นของแข็งแล้วเลื่อนแม่พิมพ์ออกจากตู้หล่อเย็น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการถอดชิ้นงาน

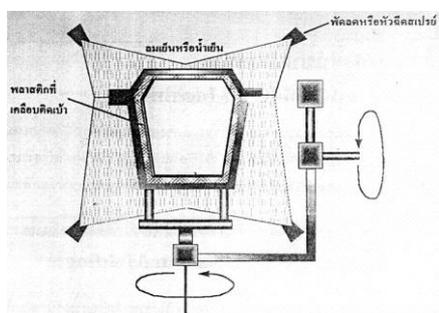
ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วเริ่มวัฏจักรใหม่ของการผลิต ซึ่งขั้นตอนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยเทคนิคแม่พิมพ์หมุนแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงรายละเอียดของการผลิตทั้ง 4 ขั้นตอน จากขั้นตอนการผลิตจะเห็นว่าการผลิตชิ้นงานโดยเทคนิคนี้ไม่ได้ใช้ความดันและแรงจากการเซนตริฟิวส์ที่รุนแรง จึงทำให้ชิ้นงานพลาสติกที่ได้ไม่มีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดี สำหรับความยาวของวัฏจักรการผลิต (Cycle Length) จะขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติกที่ใช้ ความหนาของผนังของชิ้นงานต้องการผลิต และความหนาของผนังแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปมักจะอยู่ในช่วง 5 นาที จนถึง 1 ชั่วโมง



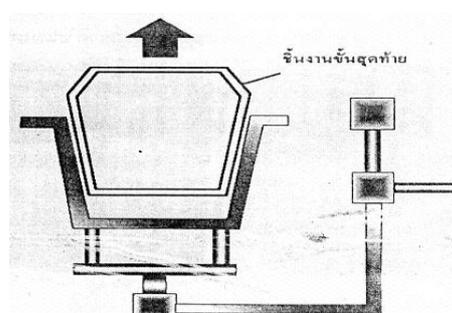
(a)



(b)



(c)



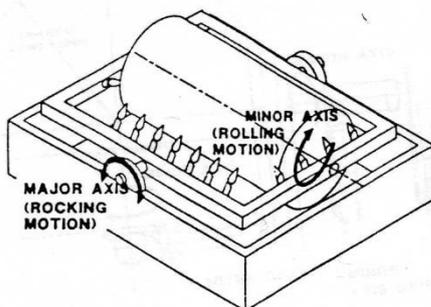
(d)

รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน [13]

(a) เติมพลาสติกผงลงในแม่พิมพ์, (b) ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์, (c) หล่อเย็น, (d) ถอดชิ้นงาน

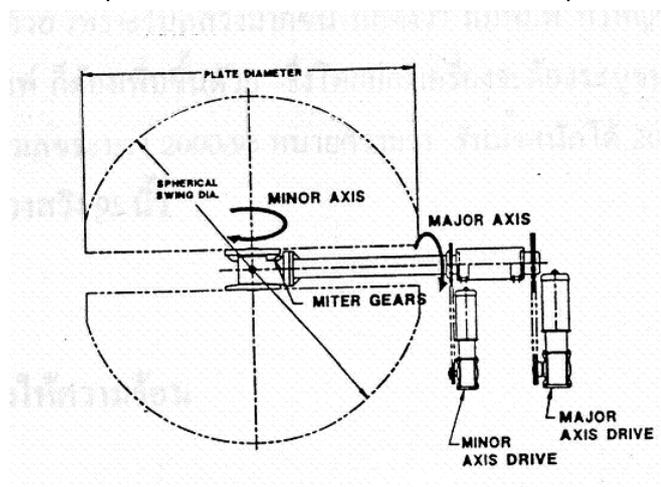
2.3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน (Rotational Molding Machines) [14]

ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการนี้จะมีปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการที่มีความสำคัญต่อการขึ้นรูป คือ เวลา อุณหภูมิ และการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงกระบวนการหมุน ซึ่งกระบวนการหมุนนั้นจะต้องทำการหมุนใน 2 แกน ได้แก่ แกนตั้งฉาก และแกนแนวราบ ตัวอย่างง่ายๆ ดังรูปที่ 2.5 เป็นเครื่องแบบร็อกแอนด์โรล (Rock and Roll) ตัวแม่พิมพ์จะถูกวางลงในแนวราบ และจะมีการหมุนทั้ง 2 แกน คือ จะหมุนในแกนรอง (Minor Axis) และขยับขึ้นลง 45 องศา ทั้งทางด้านซ้าย และขวาในแกนหลัก (Major Axis) แล้วให้ความร้อนด้วยเปลวไฟพร้อมกับการหมุน



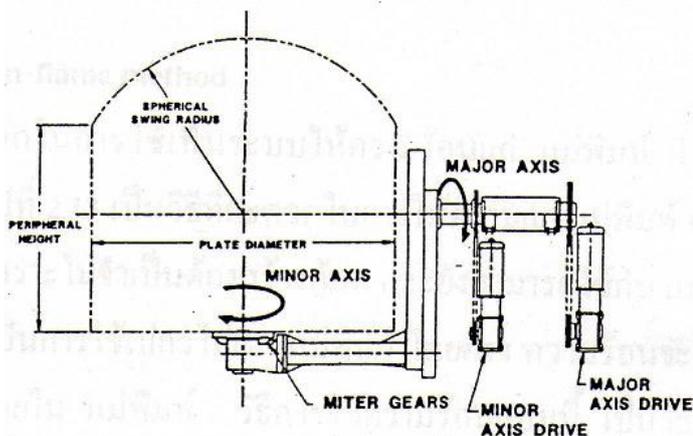
รูปที่ 2.5 Open Flame Rock and Roll Machines [14]

ลักษณะการหมุนที่ใช้ในเครื่อง Rotational Molding นั้นเรียกว่า “ไบแอกเซียลโรเตชัน” (Biaxial Rotation) ซึ่งเป็นการหมุน 2 แกน ดังรูปที่ 2.6 เป็นลักษณะของแขนจับยึดแม่พิมพ์แบบ Straight Arm จะเป็นแขนยื่นตรงในแนวราบจากตัวเครื่อง แม่พิมพ์จะวางไว้ทั้งด้านบนและด้านล่าง แกนหลักจะหมุนโดยตรงจากมอเตอร์ แต่แกนรองจะหมุนโดยการขับผ่านด้วยเฟลา



รูปที่ 2.6 แขนแบบ Straight Arm [14]

ในรูปที่ 2.7 แขนแบบ Offset Arm เป็นแบบที่ใช้กับแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับ Straight Arm ที่มักใช้กับแม่พิมพ์ของชิ้นงานขนาดเล็กจำนวนแม่พิมพ์หลายตัว [14]



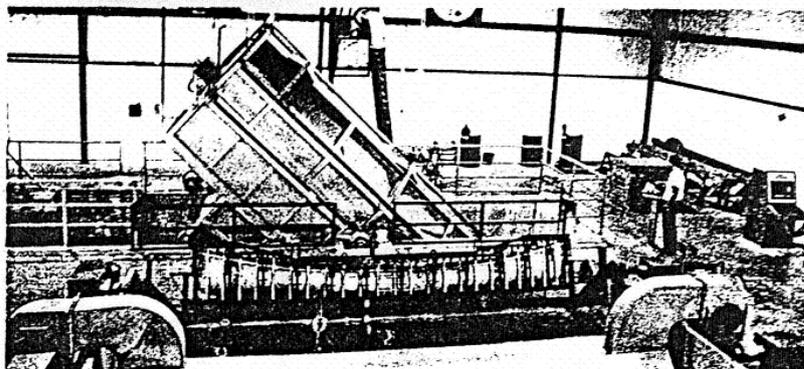
รูปที่ 2.7 แขนแบบ Offset Arm [14]

ปริมาตรที่เกิดจากการหมุนของแม่พิมพ์นั้นเราเรียกว่า “โมลสวิง” (Mold Swing) ซึ่งจะหมุนทั้งแนวแกนราบ และแนวแกนตั้งจากภายในตู้อบ (Oven) หรือตู้ลดอุณหภูมิ ซึ่งจะมีปริมาตรเปลี่ยนไปตามขนาดของแม่พิมพ์ ถ้าโมลสวิงมากขึ้นแขนก็ต้องใหญ่ขึ้นด้วย เพราะโมลสวิงมากขึ้น แสดงว่าแม่พิมพ์ก็ใหญ่ขึ้น และน้ำหนักวัตถุดิบในแม่พิมพ์ก็ต้องเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งโดยปกติเครื่องจะต้องระบุขนาดที่เหมาะสมเอาไว้ด้วย เช่น มีตัวเลขระบุว่า 2000/95 หมายความว่ารับน้ำหนักได้ 2000 lb และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงสวิงเท่ากับ 95 inch ซึ่งโดยทั่วไปนั้นในทางอุตสาหกรรมสามารถแบ่งชนิดเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนออกได้เป็น 7 ชนิด ดังนี้

ก. Rock and Roll Machines

ในรูปที่ 2.8 เป็น Rock and Roll แบบ Rocking Oven Machines มีหลักการทำงานคล้ายกันกับ Open Flame Rock and Roll Machines ต่างกันที่แม่พิมพ์จะหมุนอยู่ในตู้อบทำให้ลดการสูญเสียพลังงานความร้อนลง เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีความยาวเร็ว เช่น Canoes, Kayaks และเสาไฟฟ้า เป็นต้น

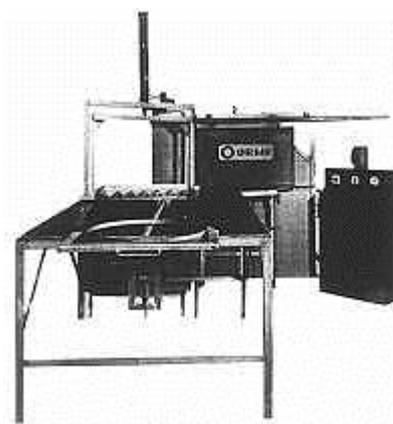
Rock and Roll Machines มีข้อดี คือ ต้นทุนต่ำในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสีย คือ ผลิตได้ช้า และค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากยังต้องอาศัยแรงงานในการเปิดปิดแม่พิมพ์ และอื่นๆ ยังไม่เป็นอัตโนมัติ



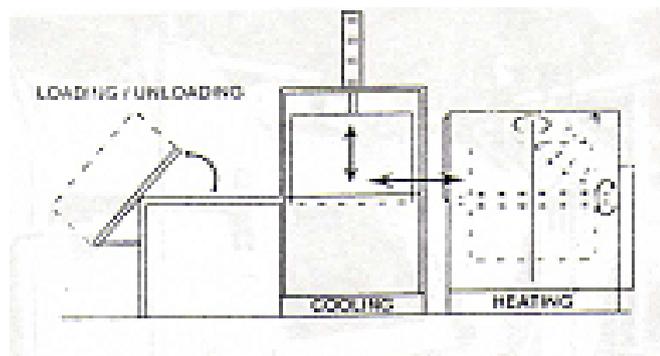
รูปที่ 2.8 Rocking Oven Machines [14]

ข. Box Oven Machines

ใช้ในการผลิตลูกบอล ตุ๊กตาเด็กเล่น และชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องแบบนี้จะใช้การหมุนทั้ง 2 แกน ในตู้อบ (Oven) ที่ใช้แก๊ส หรือน้ำมันในการเผาให้ความร้อน มีส่วนการหล่อเย็นอย่างง่าย ๆ โดยชิ้นงานจะเคลื่อนตัวออกมาจากตู้อบ แล้วถูกลดอุณหภูมิลงโดยใช้น้ำ หรืออากาศ จากนั้นจะถูกยกตัววางลงบนลูกกลิ้งและเคลื่อนออกมาจนถึงบริเวณเติมวัสดุ (Loading) การนำชิ้นงานออก (Unloading) ก็จะถูกเปิด แม่พิมพ์เอาชิ้นงานออก แล้วเติมวัสดุดิบลงไปใหม่ เนื่องจากยังต้องอาศัยแรงงานในหลายขั้นตอนตั้งแต่การเปิด-ปิดแม่พิมพ์ การนำแม่พิมพ์ ออกจากตู้อบ การนำแม่พิมพ์มาหล่อเย็นทำให้เครื่องแบบนี้ล้าสมัย และถูกแทนที่ด้วยเครื่องแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 Box Oven Machines [15]



รูปที่ 2.10 Box Oven Operation Principles [14]

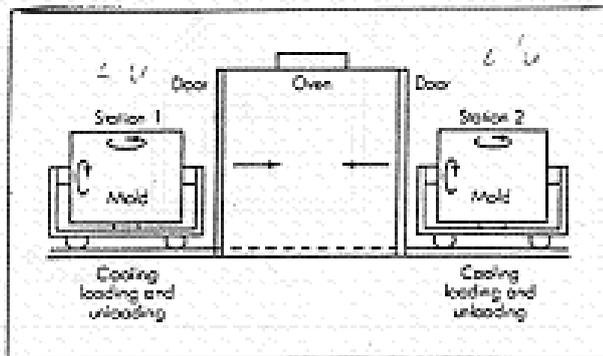
ค. Shuttle-Style Machines

เป็นเครื่องที่ใช้งานได้ง่าย ราคาเครื่องก็ไม่สูงมากนัก มักใช้ในการผลิตชิ้นงานจำพวกถังหรือภาชนะบรรจุขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 และ 2.12 เครื่องแบบนี้มีหลักการทำงาน ดังนี้ Shuttle A จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้อบ เมื่อปิดตู้อบแม่พิมพ์ก็จะถูกหมุนพร้อมทั้งให้ความร้อนจนถึงเวลาที่ตั้งไว้ แล้วจึงเคลื่อนที่ออกจากตู้อบเข้าสู่ส่วนหล่อเย็น ในขณะที่เดียวกัน Shuttle B ที่ได้รับการบรรจุวัตถุดิบแล้วก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้อบ

เครื่องแบบนี้มีข้อดี คือ ให้ความประหยัดในการผลิตทั้งชิ้นงานใหญ่และชิ้นงานเล็ก บำรุงรักษาง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก และง่ายต่อการออกแบบ การจัดวางพื้นที่ติดตั้งเครื่องไม่มาก ซึ่งสามารถออกแบบโดยใช้เพียง 1 Mold Shuttle หรืออาจใช้ 2 Mold Shuttle กับ 1 ตู้อบเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตให้เพิ่มมากขึ้นก็ได้



รูปที่ 2.11 Shuttle-Style Machines [16]



รูปที่ 2.12 Shuttle-Style Machines Concept [14]

ง. Clamshell Rotational Molding Machines

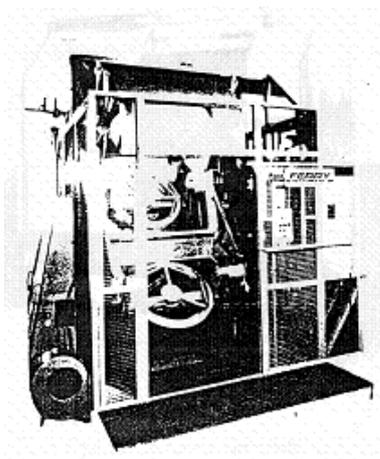
เป็นแบบเครื่องพิมพ์ที่ถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1980 ด้วยความต้องการเครื่องที่มีราคาต่ำใช้พื้นที่ติดตั้งเครื่องน้อย รวมไปถึงต้องการแรงงานมนุษย์น้อย และได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง ลักษณะการทำงานของเครื่องคือ แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนในตู้อบจนได้เวลาที่ตั้งไว้ (เวลาที่เหมาะสม) จึงทำให้พอลิเมอร์แม่พิมพ์เพื่อการหล่อเย็น หรืออาจใช้น้ำก็ได้ โดยที่แม่พิมพ์ก็ยังคงอยู่ในตู้อบสามารถใช้แขนได้ทั้ง 2 แบบ จึงทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ทั้งขนาดใหญ่ และเล็กขึ้นอยู่กับขนาดของตู้อบ ข้อดีก็คือ ส่วนให้ความร้อน และส่วนการหล่อเย็นจะใช้ตู้เดียวกัน จึงทำให้เครื่องนี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย ส่วนข้อเสียคือ ค่อนข้างใช้พลังงานมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในตู้อบให้สูง จากนั้นก็จะลดต่ำลงเมื่อทำการหล่อเย็น แล้วยังต้องเพิ่มอุณหภูมิเมื่อต้องให้ความร้อนแก่งานชิ้นใหม่ ซึ่งเครื่องชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



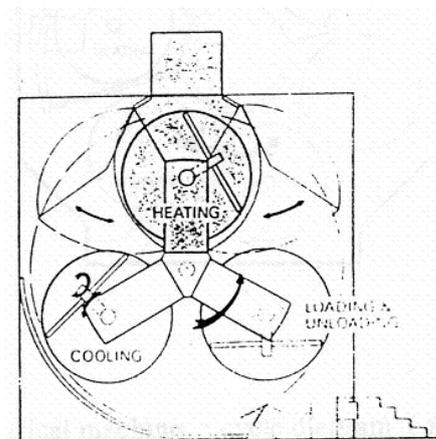
รูปที่ 2.13 Clamshell Rotational Molding Machines [17]

จ. Vertical Style Machines

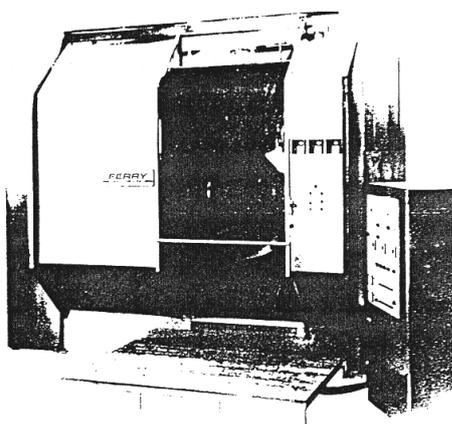
แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบ 3 แขน และแบบ 6 แขน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.14-2.15 ตามลำดับ ทั้ง 2 แบบมักถูกใช้ในการผลิตตุ๊กตา ของเล่น ลูกบอล ชิ้นส่วนรถยนต์ รวมถึงโคมไฟฟ้า ซึ่งแบบ 6 แขนเหมาะสำหรับใช้กับไวนิลพลาสติกซอล เพราะเป็นกระบวนการที่ต้องการอุณหภูมิไม่สูงมากนักในตอนเริ่มแรก ซึ่งวัตถุจะไหลไปมาสัมผัสกับผิวของแม่พิมพ์ จากนั้นจึงเริ่มเป็นเจล (Gel) และคงอุณหภูมิเพื่อทำการ Curing ไว้ จึงต้องมีหลายสถานี (Station) มีข้อดีคล้ายกับ Clamshell คือ ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องน้อย แต่ที่ต่างออกไป คือ Vertical จะแยกส่วนเติมวัสดุและส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Loading/Unloading) ตู้อบ และการหล่อเย็น ออกจากกัน การหมุนของแต่ละแขนจะใช้ระบบที่เรียกว่า เฟริส วีล (Ferris Wheel) ในแบบ 3 แขน แต่ละแขนจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนต่อไปอย่างพร้อมกัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 เมื่อแม่พิมพ์แรกเคลื่อนจากส่วนเติมวัสดุ และส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ไปยังตู้อบ แม่พิมพ์ที่ 3 ก็จะเคลื่อนจากส่วนหล่อเย็นมายังส่วนเติมวัสดุ และส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แต่ในแบบ 6 แขน จะมีการทำงานเป็น 3 จังหวะ (ดูในรูปที่ 2.17) เนื่องจากมีตู้อบ 3 ห้อง และแต่ละห้องก็ใช้เวลาไม่เท่ากัน ตามที่กล่าวมาในข้างต้น ข้อจำกัดของเครื่องแบบ Vertical นี้คือ โมลสวิงจำกัดไว้แค่ 900 mm ถึง 1200 mm โดยที่เครื่องทั้ง 2 แบบต่างก็จะหมุนแม่พิมพ์ทั้ง 2 แขนเหมือนกัน และให้ความร้อนด้วยการเผาแก๊สให้อากาศร้อนในตู้อบ ส่วนการหล่อเย็นสามารถใช้ได้ทั้งแรงลมและน้ำ



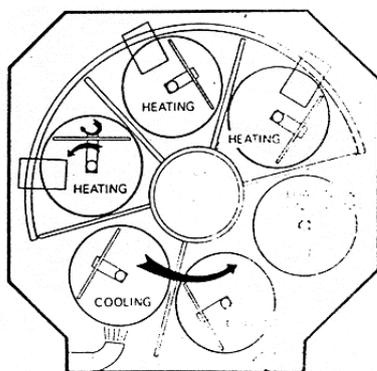
รูปที่ 2.14 3-Arm Vertical Machines [14]



รูปที่ 2.15 3-Arm Vertical Machines : Cycle Diagram (ภาพตัดด้านข้าง) [14]



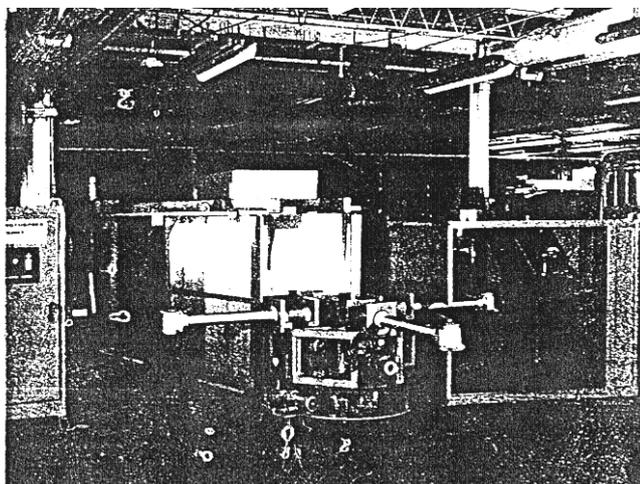
รูปที่ 2.16 6-Arm Vertical Machines [14]



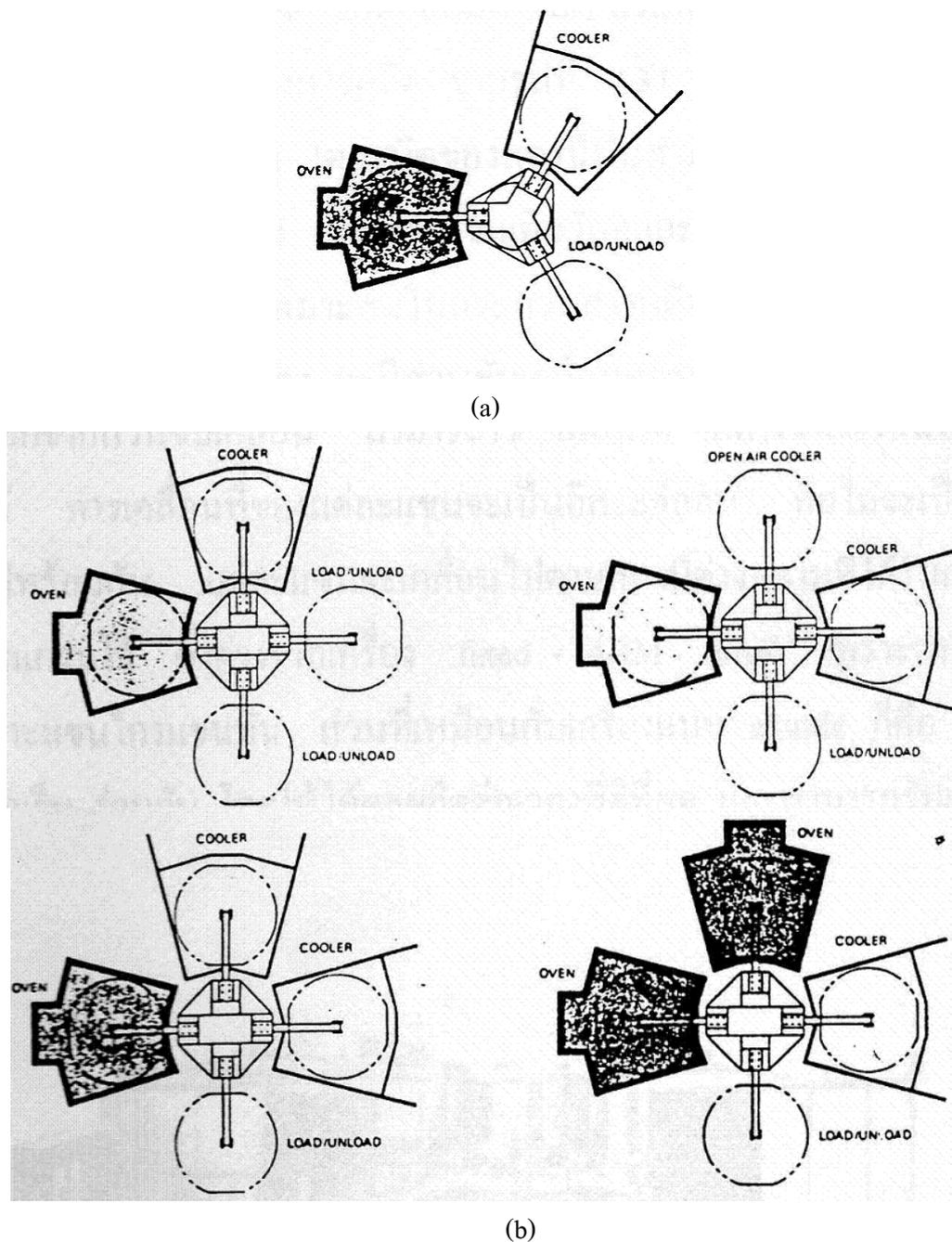
รูปที่ 2.17 6-Arm Vertical Machines : Cycle Diagram (ภาพตัดด้านข้าง) [14]

จ. Fixed –Arm Turret Machines

เป็นเครื่องที่ได้รับการคิดค้นพัฒนาในช่วงปลายของทศวรรษที่ 50 จนถึงต้นทศวรรษที่ 60 มีขนาดของเครื่องเล็กที่สุดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงสวิง 40 นิ้ว ใหญ่ที่สุดถึง 150 นิ้ว เป็นเครื่องแบบที่ได้รับความนิยมมากแบบหนึ่งในปัจจุบัน ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าได้จำนวนผลิตภัณฑ์มาก และซ่อมบำรุงรักษาสะดวก มีแบบต่างๆหลายแบบ เช่น แบบ 3 แขน 4 แขน เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจต่างกันในการวางส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.18 ในแบบ 3 แขน แต่ละแขนจะติดแน่นอยู่กับ Turret ตรงกลางโดยแต่ละแขนทำมุม 120 องศา แต่ละแขนจะเคลื่อนที่พร้อมกัน จึงอาจมีปัญหา เช่น ต้องใช้เวลา การให้ความร้อน และการหล่อเย็นไม่เท่ากัน เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยเครื่องแบบ 4 แขน ซึ่งเราสามารถเพิ่มห้องได้อีก 1 ห้อง โดยอาจเป็นส่วนการให้ความร้อน หรือการหล่อเย็นก็ได้ตามความเหมาะสม โดยแต่ละแขนจะทำมุม 90 องศาสำหรับภายในแม่พิมพ์ ก็อาจบรรจุแก๊สเฉื่อย เพื่อให้ค่าความดันต่ำๆ ป้องกันการหดตัวของชิ้นงาน หรือเติมไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากแม่พิมพ์ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิทางกายภาพของชิ้นงาน การหมุนกลับของแม่พิมพ์ ภายในคู่อบก็ สามารถช่วยให้ผงวัตถุดิบไหลได้ดีขึ้นภายในแม่พิมพ์ที่มีส่วนซับซ้อนมาก ซึ่งลักษณะการทำงานของเครื่องนี้สามารถดูได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 Fixed-Arm Turret Machines [14]



รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานของเครื่องแบบ Fixed-Arm Turret [14]

(a) แบบ 3 แขน, (b) แบบ 4 แขน

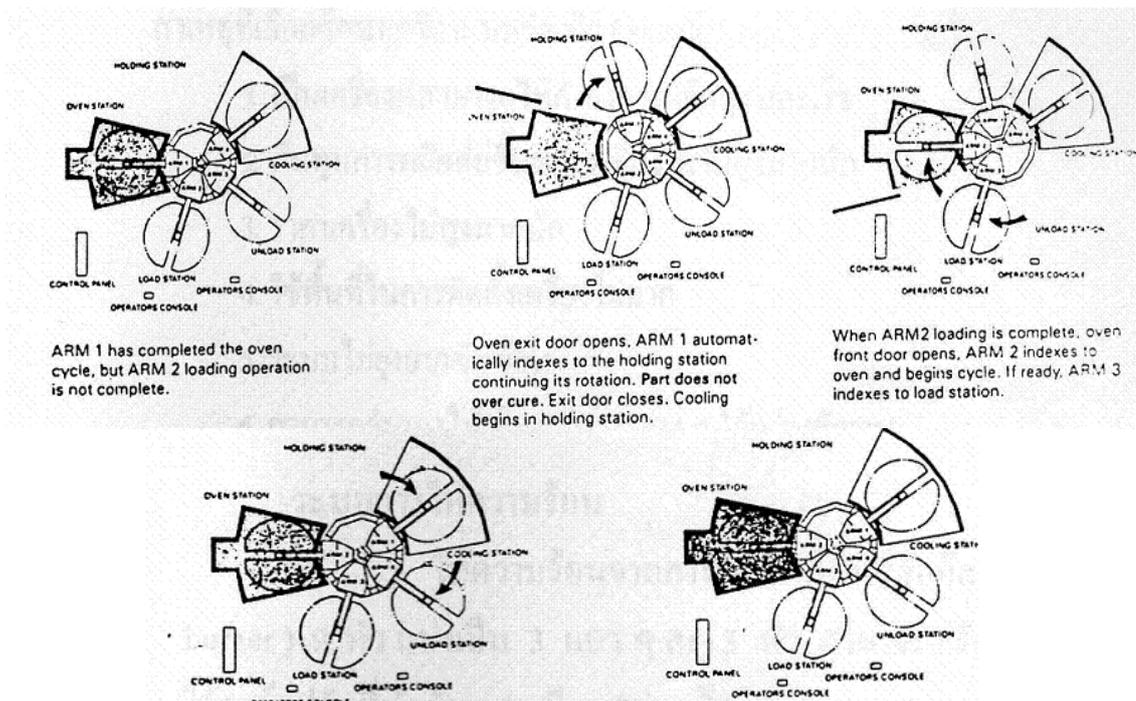
ข. The Independent-Arm Machines

เป็นเครื่องแบบที่ได้รับความนิยมมากในช่วงปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เครื่อง Independent-Arm เป็นการนำข้อดีของเครื่อง Shuttle และเครื่อง Fixed-Arm Turret มารวมกัน แต่มีความเป็นระบบอัตโนมัติมากกว่า และมีความ

สะดวกในการใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 โดยชนิดของสถานีนั้นสามารถจัดได้หลายแบบ เช่น อาจใช้ 2 ตู้อบ 2 การหล่อเย็น และ 1 ส่วนเติมวัสดุและส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยจะดูจากความเหมาะสมในกระบวนการผลิต ส่วนประกอบของเครื่องจะมี ส่วนขับเคลื่อนอยู่ตรงกลาง แต่ละแขนจะวางขนานกับพื้นยื่นออกจากส่วนขับเคลื่อน การเคลื่อนที่ของแต่ละแขนจะเป็นอิสระต่อกัน คือ ไม่จำเป็นที่จะต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน แต่ละแขนจะเคลื่อนไปตามสถานีต่างๆ ตามที่ได้รับคำสั่งเวลาหรือวางโปรแกรมไว้ ซึ่งต่างจากเครื่อง Fixed-Arm Turret เพราะว่ามีเสาค้ำรับน้ำหนักเฉพาะแขนใดแขนมัน ส่วนที่เหมือนกัน เครื่องแบบ Shuttle ก็คือ มีการใช้ตู้อบ การหล่อเย็นร่วมกัน โดยให้ได้ผลผลิตต่อเวลาที่ดีที่สุด และสามารถรับแรงได้มากกว่า Fixed-Arm จึงสามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ ซึ่งรูปที่ 2.21 เป็นการแสดงลักษณะการทำงานของเครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm ชนิด 4 แขน 5 สถานี



รูปที่ 2.20 เครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm [18]



รูปที่ 2.21 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm ชนิด 4 แขน 5 สถานี [14]

2.3.3 ระบบความร้อนและหล่อเย็น [13]

แหล่งความร้อนของการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน คือ การเผาก๊าซหุงต้มหรือน้ำมันเตาภายในเตาอบ นอกจากนี้ยังมีระบบที่ทำให้เกิดการพาความร้อน (Convection) จากหัวเผาไปยังผนังของเตาอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปอุณหภูมิในเตาอบจะอยู่ในช่วง 220-400 °C อุณหภูมิสูงสุดที่เตาอบสามารถให้ได้ คือ 480 °C ในเครื่องขึ้นรูปบางแบบมีการใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนระบบหล่อเย็นใช้พัดลมเป่า (Blower) เพื่อพัดลมเย็นหรือใช้หัวฉีดสเปรย์เพื่อฉีดพ่นน้ำเย็นให้เป็นละอองเล็กๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อเย็น ในการหล่อเย็นพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Plastics) ต้องมีการระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงได้จากอัตราการหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

2.3.4 แม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปในกระบวนการแบบแม่พิมพ์หมุนนี้โดยทั่วไปเป็นแม่พิมพ์แบบสองชั้น ซึ่งมีระบบการหล่ออยู่ในตัว คุณสมบัติของแม่พิมพ์ที่ต้องการ คือ จะต้องเกิดการส่งผ่านความร้อนได้ดี และมีน้ำหนักเบาเพื่อความสะดวกในการหมุน เนื่องจากความดันภายในแม่พิมพ์เกิดขึ้นต่ำมากทำให้การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการเสริมแรงมาก

นัก วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ถ้าเป็นแม่พิมพ์ขนาดใหญ่มักจะทำจากเหล็ก หรืออลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet Form) ความหนาของแผ่นเหล็กที่นำมาทำแม่พิมพ์อยู่ในช่วง 2-3 mm นอกจากนี้จะใช้กรอบเสริมแรงเพื่อยึดแม่พิมพ์ทั้งสองซีกเข้าด้วยกัน

แม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กมักจะทำจากอะลูมิเนียมเนื่องจากมีน้ำหนักเบา และนำความร้อนได้ดี และสามารถใช้รายละเอียดของชิ้นได้ดี นิยมใช้เทคนิคการหล่อในการผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งหล่อให้มีความหนาประมาณ 6 mm นอกจากนี้อาจใช้โลหะชนิดอื่นๆ ในการหล่อแม่พิมพ์ เช่น โลหะผสมระหว่างเบอร์รินเนียมกับทองแดง เป็นต้น [13]

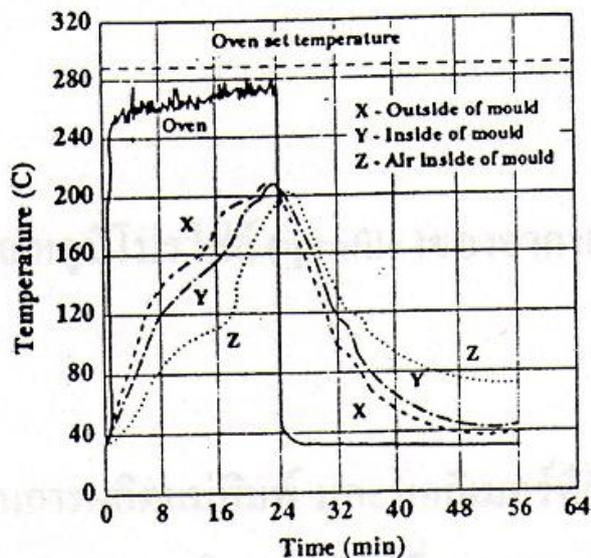
2.3.5 หลักการควบคุมการผลิต

การตั้งอุณหภูมิไว้หลายๆ ตำแหน่งในแม่พิมพ์ เช่น เครื่อง Rotational Molding แบบคารูเซล (Carousel) แล้วจะได้กราฟดังรูปที่ 2.22 ในกรณีนี้ตั้งอุณหภูมิเตาไว้ที่ 300 °C กราฟเส้นบนแสดงเส้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์เมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าสู่ในเตาแล้ว เส้นกราฟอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตาที่บอกทางหน้าตัวเครื่อง สมรรถภาพทางความร้อนและเวลาที่ใช้ในเตาอบเครื่อง Rotational Molding สมัยใหม่ใช้อุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเป็นตัวควบคุมผลกลับมา (Feedback) อย่างไรก็ดีตามเส้นอุณหภูมิเส้นนี้แสดงความสัมพันธ์โดยประมาณกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์หรืออาจแสดงให้เห็นโดยเส้น X, Y และ Z

อุณหภูมิตัวสุดท้ายจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอากาศภายในเตาหรืออุณหภูมิที่ตั้งไว้ แต่จะขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และประเภทที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของแม่พิมพ์ วัสดุ และความหนา ด้วยเหตุนี้ผลที่ได้จึงไม่เป็นจริงตามที่คาดไว้เพื่อให้ได้พื้นฐานกระบวนการผลิตที่แน่นอน

เส้น X ในรูปที่ 2.22 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกแม่พิมพ์ และเส้น Y แสดงการเพิ่มอุณหภูมิของผิวด้านใน เส้นกราฟนี้จะแปรผันตามความหนาของผนัง และส่วนอื่นๆ เส้น Z แสดงอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอื่นๆ แต่เส้นนี้มีความเกี่ยวพัน กับการไหลของผงพลาสติกขณะหลอมเหลว

เมื่อพิจารณาเฉพาะเส้น Z อาจเขียนออกมาในรูปที่ 2.23 จากรูปแสดงขั้นตอนต่างๆ เกี่ยวกับการหลอมเหลวของผงพลาสติกที่ปกคลุมผิวชั้นในแม่พิมพ์ [14]



รูปที่ 2.22 แสดงการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ และแม่พิมพ์ขณะที่ให้ความร้อน [14]

ซึ่งรูปที่ 2.23 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิโปรไฟล์ของอากาศขณะที่ให้ความร้อนกับเวลานั้นได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 เมื่อเริ่มต้นพอลิเมอร์จะยังไม่หลอมเหลวเนื่องจากอุณหภูมียังต่ำอยู่ การไหลของผงพลาสติกเป็นไปอย่างอิสระภายในแม่พิมพ์จนอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นคงที่อย่างรวดเร็วจนถึงที่จุด A ซึ่งขณะนี้อุณหภูมิจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยผงพลาสติก และอากาศ เมื่อเกิดความร้อนเพียงพอผงพลาสติกก็เริ่มหลอมตัว และเกาะติดที่ผนังแม่พิมพ์

ขั้นที่ 2 ที่จุด A พลาสติกจะหลอมเหลว และจะเกิดการเกาะติดแม่พิมพ์เป็นชั้นแรก อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะช้าลง จากนั้นผงพลาสติกก็จะก่อตัวเป็นขั้นที่ 2 และขั้นต่อไป เนื่องจากผงพลาสติกจะดึงความร้อนเพื่อใช้ในการหลอมละลายตัวมันเองทำให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ลดลง ซึ่งการที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปได้ช้าก็เพราะเนื่องจากพลาสติกมีสมบัติในการนำความร้อนต่ำ

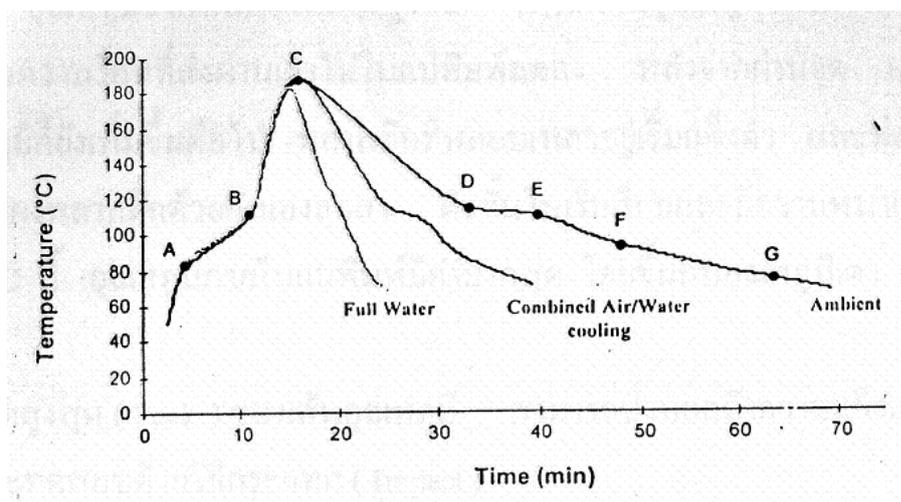
ขั้นที่ 3 ที่จุด B ผงพลาสติกทั้งหมดที่ถูกหลอมละลายจะเกาะติดผิวชั้นในของแม่พิมพ์เป็นชั้นๆ อุณหภูมิภายในสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์จะลดลง หลังจากผ่านจุด B ไปแล้วเส้นอุณหภูมิก็นิ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พลาสติกที่หลอมเหลวอยู่จะเริ่มแข็งตัว และฟองอากาศที่อยู่ระหว่างผงพลาสติกด้วยกันเองลดลง ผิวชั้นในเริ่มเรียบ และมีความ

หนาแน่นสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์จะมีค่าสูงสุดที่จุด C ซึ่งที่จุดนี้สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยอาจจะทดสอบด้วยวิธีการทดสอบการต้านแรงกระแทก

ขั้นที่ 4 แม่พิมพ์จะเคลื่อนที่เข้าไปในห้องหล่อเย็น ซึ่งอุณหภูมิอากาศภายในยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนก่อนจุด C เนื่องจากความร้อนของอากาศ และพอลิเมอร์ยังมีเหลืออยู่ ภายในห้องก็จะทำการหล่อเย็นให้เหมาะสม อากาศรอบๆ แม่พิมพ์เริ่มเย็นลง รวมทั้งการหล่อเย็นด้วยน้ำจะเร็วขึ้น ถ้าอัตราการหล่อเย็นเร็วเกินไปจะทำให้พลาสติกเกิดการบิดตัว (Warpage Problems) [14] เนื่องจากความเค้น และถ้าอัตราการหล่อเย็นช้าด้วยแล้วจะส่งผลในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์ ในขั้นนี้พลาสติกยังหลอมเหลวเป็นชั้นๆ เกาะที่ผิวชั้นในแม่พิมพ์อยู่

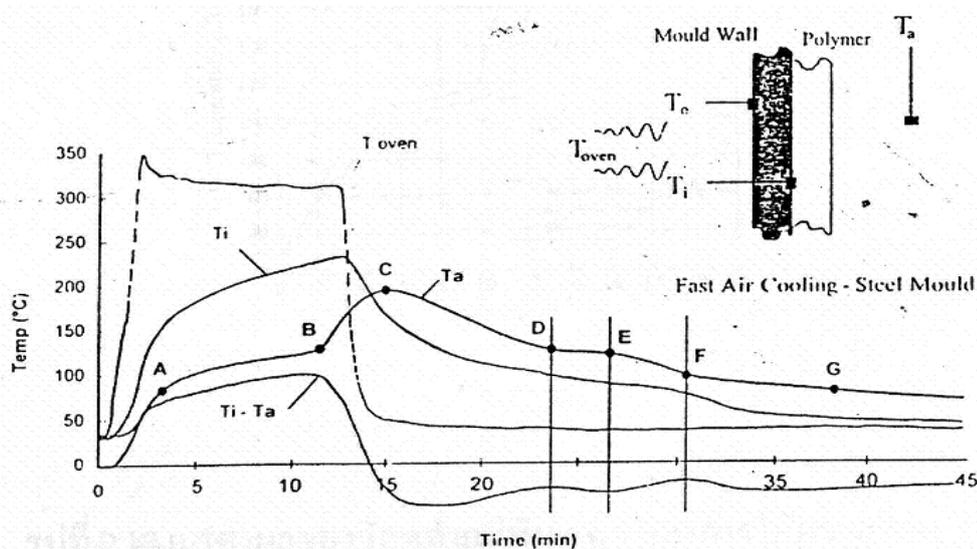
ขั้นที่ 5 วัสดุบางชนิด เช่น พอลิเอทิลีนมีจุดหักมุม (Kink) เป็นจุดที่ทำให้เกิดผลึกตรงกับจุด D ความร้อนที่ถูกดูดกลืนจะถูกถ่ายเทออก และอุณหภูมิภายในจะอยู่ในระดับคงที่ ความยาวของเส้นกราฟแนวที่ราบสูงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัสดุที่ใช้ไปพอลิเอทิลีนแสดงจุดหักมุมที่เกิดขึ้น ตำแหน่งของเส้นกราฟสัมพันธ์กับการหลอมเหลวระหว่างจุด A-B เกาะตัวกันลดลงเนื่องจากผลึกจะเกิดได้ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ

ขั้นที่ 6 ที่จุด E เส้นกราฟมีการแปรผัน พลาสติกก่อตัวกันสร้างพันธะ และเป็นกลายของแข็ง โดยความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์ออกไป พลาสติกเริ่มเย็นตัว และความชันของเส้นกราฟเปลี่ยนไป ณ ที่จุด F พันธะระหว่างพลาสติกจะจับตัวกันเอง แต่จะไม่เกาะติดกับผนังแม่พิมพ์



รูปที่ 2.23 แสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ (Profile) ของอากาศขณะให้ความร้อน [14]

การหล่อเย็นแก่แม่พิมพ์ แม่พิมพ์ก็จะหมุนพร้อมไปด้วยอัตราการหล่อเย็นมากหรือน้อยจะบ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้ายนี้ แต่ถ้าส่วนต่าง ๆ ภายในแม่พิมพ์เกิดแยกกันการหล่อเย็นเร็วก็จะเกิดได้ยาก ที่จุด G เป็นจุดนำชิ้นงานออก (De-Molding Point) ซึ่งขนาดอุณหภูมิอากาศภายใน โพรไฟล์จะไม่เปลี่ยนแปลง ขณะผ่านสถานะต่างๆ หลายแบบ ประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ขนาดแม่พิมพ์ ความหนาของแม่พิมพ์ ความหนาส่วนอื่นๆ และอุณหภูมิเตาอบ ลักษณะเด่นที่คล้ายคลึงกันก็คือตำแหน่งต่างๆ ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะ ซึ่งต้องใช้ในการควบคุมอย่างชำนาญและแน่นอน โดยอุปกรณ์ที่ใช้วัดโดยทั่วไปก็คือ โรโตล็อก (Rotolog) [14] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงอุณหภูมิอากาศภายใน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน [14]

2.3.6 การไหลของพอลิเมอร์ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นลักษณะการไหลของพอลิเมอร์นั้นสามารถเริ่มต้นอธิบายได้จากขั้นตอนที่ได้ทำการเติมผงพลาสติกลงในแม่พิมพ์ ซึ่งในขั้นตอนนี้ผงพลาสติกจะไหลเคลื่อนที่ลงไปสู่ก้นแม่พิมพ์อย่างอิสระ จากนั้นเมื่อเราทำการปิดล็อกแม่พิมพ์แล้วนำไปหมุนให้ความร้อนในสองทิศทาง คือ แกนตั้ง และแกนนอน ก็จะทำให้ความร้อนเริ่มแพร่เข้าสู่ส่วนของแม่พิมพ์ ซึ่งในขณะนี้ผงพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์จะได้รับความร้อนและเริ่มหลอมละลายไหลคล้ายของเหลวหนืดภายในแม่พิมพ์ตามการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทาง พร้อมไหลสัมผัสไปตามรูปร่างหรือรูปทรงของแม่พิมพ์ และเกิดการเกาะเคลือบผิวแม่พิมพ์ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้

สูงขึ้นผนังพลาสติกที่เหลืออยู่จะหลอมเหลวและไหลไปตามการหมุน รูปร่างของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น และเกาะติดเคลือบแม่พิมพ์จนหมดในที่สุด ซึ่งทำให้ชั้นของพลาสติกหลอมเหลวที่เคลือบแม่พิมพ์อยู่นั้นมีชั้นความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่าการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทางดังกล่าวนี้จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาของพลาสติกที่เคลือบแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นงานที่ได้ เพราะว่าการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทางนี้จะส่งผลให้พลาสติกที่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนเกิดการกระจายตัว และเกาะเคลือบผิวของแม่พิมพ์อย่างทั่วถึง จากนั้นเมื่อพลาสติกหลอมเหลวผ่านขั้นตอนการหล่อเย็นแล้ว พลาสติกหลอมเหลวนั้นจะเกิดการแข็งตัวตามชั้นที่เคลือบอยู่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างของแม่พิมพ์

2.3.7 ผลกระทบของการขึ้นรูปแบบหมุน

ผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปในกระบวนการนี้เป็นชิ้นงานกลวงที่มีความหนาของผนังค่อนข้างคงที่ในช่วง 3-6 mm ที่ตำแหน่งมุมและเหลี่ยมของชิ้นงานค่อนข้างหนากว่าส่วนอื่นเล็กน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความร้อนสูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตด้วยเทคนิคนี้ ได้แก่ ถึงบรรจุขนาดใหญ่ต่างๆ ของเล่นเด็ก เป็นต้น

นอกจากนี้เทคนิคนี้เหมาะกับการผลิตชิ้นงานขนาดเล็กที่เป็นแม่พิมพ์แบบหลายช่อง (Multi-Cavity Mold) ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์จากเทคนิคการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน เช่น ถัง (Bin) รถขนของ (Tote Trucks) ท่อ (Pipes And Ducts) ถึงขนาดใหญ่ (สำหรับบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิง เก็บสารเคมี ถังส้วม เป็นต้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ผลกระทบของการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน [19]

2.3.8 ข้อดีข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน

ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้จะมีข้อดี คือ เครื่องขึ้นรูป และแม่พิมพ์มีราคาต่ำเหมาะแก่การผลิตชิ้นงานกลวงขนาดใหญ่ที่มีผนังชิ้นงานมีความหนาสม่ำเสมอ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ สามารถหลีกเลี่ยงรอยตำหนิจากรอยเชื่อม (Weld Lines) และรอยตำหนิเนื่องจากการถอดชิ้นงาน (Ejection Marks) ได้ รวมทั้งมีเศษเหลือทิ้งจากการผลิตน้อยมากสามารถควบคุมเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานได้ง่ายโดยการลดหรือเพิ่มปริมาณผงพลาสติกที่เติมลงในแม่พิมพ์ สามารถใช้ระบบอัตโนมัติในการขึ้นรูป สามารถเปลี่ยนแม่พิมพ์และวัตถุดิบได้เร็วกว่าเทคนิคอื่นๆ

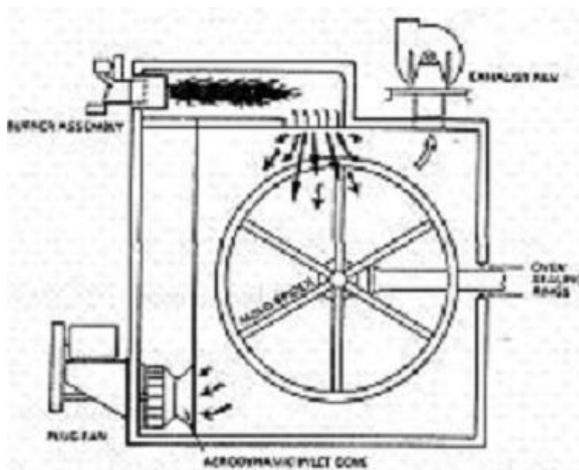
ส่วนข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ ไม่เหมาะแก่การผลิตชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า 0.75 mm หรือมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเกินไป และมีรูปร่างที่มีการหักมุม (Sharp-Cornered- Shapes) มากเกินไป เวลาในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ช้าถ้าเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเป่าและการผลิตชิ้นงานขนาดเล็กจะช้ากว่าการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มาก ไม่สามารถทำการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุนได้กับพลาสติกทุกชนิด

2.4 ระบบที่เลือกใช้ในการศึกษา

ในการดำเนินงานของโครงการนี้จะใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle-Style Machines ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีระบบต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

2.4.1 ระบบการให้ความร้อนแบบ Hot-Air Recirculating Oven

เป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ภายในตู้อบ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ และมีการกระจายความร้อนภายในตู้อบอย่างทั่วถึงซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.26 โดยใช้วิธีการให้ความร้อนจากเปลวแก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas, LPG) ด้วยหัวเผา (Burner) ยี่ห้อ Baltur รุ่น BTG 11 ของบริษัท Baltur Tecnologie Per Il Clima ประเทศอิตาลี โดยใช้ Thermocouple รุ่น RTD (Pt 100 Ω) เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในเครื่องขึ้นรูป



รูปที่ 2.26 Recirculating Hot-Air Oven Diagram [14]

2.4.2 ระบบหล่อเย็น

ในระบบหล่อเย็นของเครื่องได้ทำการหล่อเย็นโดยใช้พัดลมเป่าให้เย็น ซึ่งพบว่ามี ความเหมาะสมกว่าการหล่อเย็นด้วยการใช้น้ำ ซึ่งค่อนข้างจะควบคุมได้ยาก เนื่องจากอุณหภูมิจะ ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการใช้ลมเป่า

2.4.3 ระบบในการทำงาน

เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semiautomatic) คือ บางส่วนต้องใช้แรงงานมนุษย์ได้แก่ การเปิด-ปิด แม่พิมพ์ การเติมวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์ นอกจากนี้ต้องใช้แรงงานในการตบแต่งชิ้นงาน อีกด้วย ส่วนการควบคุมเวลาในการให้ความร้อนเวลาในการหล่อเย็น การเปิดปิดตู้อบ จะใช้ คอมพิวเตอร์ควบคุมโดยการใช้โปรแกรมภาษาเบสิก

ซึ่งเครื่องนี้ยังมีขีดจำกัดตรงที่จะไม่สามารถปรับอัตราส่วนในการหมุนทั้งสองแกน ของแกนได้ โดยจะถูกกำหนดอัตราการหมุนจากเฟืองขับซึ่งจะมีการหมุนในแกนหลัก (Major Axis) ต่อแกนรอง (Minor Axis) มีอัตราส่วนเป็น 4:1 สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะ เป็นทรงกลม แต่ถ้าต้องการที่จะขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะอื่นๆ จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาด ของเฟืองขับเพื่อให้ได้อัตราส่วนของการหมุนให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการ โดยดู ได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราส่วนของการหมุนกับรูปทรงของชิ้นงาน [14]

อัตราส่วน	รูปทรงชิ้นงาน
8:1	รูปไข่ รูปท่อตรง (ตั้งในแนวราบ)
5:1	ท่อ
4:1	รูปทรงลูกบาศก์ ทรงกลม กล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2:1	วงแหวน ทรงกลม รูปทรงเรียบ
1:2	ส่วนที่มีความบางเมื่อใช้อัตราส่วนเครื่องที่ 2:1
1:3	สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบนราบ กล่องใส่เสื้อผ้า
1:4	ท่อกลมโค้ง ท่อที่มีมุม ส่วนที่บางเมื่อใช้อัตราส่วนที่ 4:1
1:5	ทรงกระบอกในแนวตั้ง

2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

2.5.1 สมบัติด้านทานการโค้งงอ (Flexural Properties)

การทดสอบสมบัติด้านทานการโค้งงอตามมาตรฐาน ASTM D 790 เป็นการทดสอบที่บ่งบอกให้ทราบถึงความแข็งแรงและความสามารถในการทนรับแรงการหักงอของวัสดุ [20] ซึ่งในการทดสอบจะมีการเตรียมชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.27 ในการทดสอบจะทำการวางชิ้นงานไว้บน Span แล้วทำการกดด้วยหัวกด ซึ่งมีความเร็วของหัวกดตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยการทดสอบนี้มักจะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural Strength และ Flexural Modulus ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ

σ คือ ความเค้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน มีหน่วยเป็น MPa

P คือ แรงกดที่ให้กับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น N

L คือ ความยาวของ Span มีหน่วยเป็น mm

b คือ ความกว้างของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น mm

d คือ ความลึกของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น mm

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2.2)$$

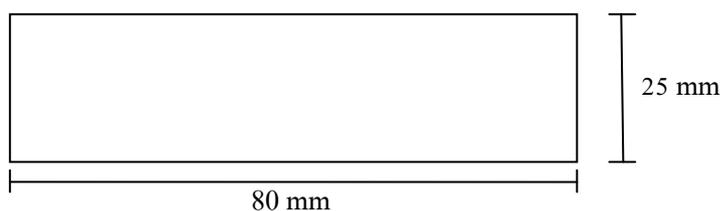
เมื่อ

ε คือ ความเครียด ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงาน

D คือ Deflection สูงสุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน มีหน่วย mm

L คือ ความยาวของ Span มีหน่วยเป็น mm

d คือ ความลึกของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น mm



รูปที่ 2.27 ลักษณะชิ้นงานทดสอบสมบัติด้านทานการโค้งงอ

2.5.2 สมบัติทนแรงกระแทก (Impact Properties)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุที่จะสามารถต้านทานการแตกหักภายใต้การรับน้ำหนักอย่างรวดเร็ว หรือสามารถที่จะต้านทานการแตกร้าภายใต้แรงเค้นที่ได้รับที่ความเร็วสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียวของวัสดุ ซึ่งค่าความเหนียวของวัสดุจะหมายถึง ความสามารถของพลาสติกที่จะดูดซับพลังงานที่ได้รับ [13] โดยทดสอบด้วยการให้แรงกระแทกกับชิ้นงานที่มีรอยบาก (Notch) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายจากการทดสอบ ซึ่งมักจะแสดงในรูปแบบของค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ดังสมการที่ 2.3 และขนาด ลักษณะของชิ้นงานทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.28

$$IS = \frac{E}{W_n} \quad (2.3)$$

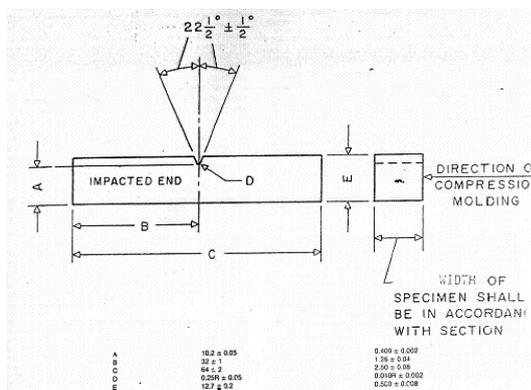
เมื่อ

IS คือ ค่าความทนแรงกระแทก มีหน่วยเป็น J/m

E คือ ค่าพลังงานดูดซับที่ชิ้นงานรับได้ มีหน่วยเป็น J

W_n คือ ความหนาของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น mm

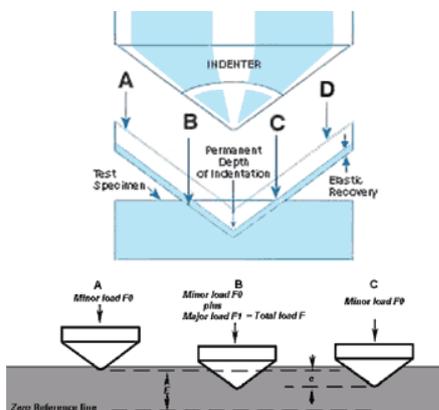
ในการทดสอบสมบัติทนแรงกระแทกของงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 แบบ Izod Impact



รูปที่ 2.28 ลักษณะชิ้นงานทดสอบสมบัติทนแรงกระแทก [21]

2.5.3 การทดสอบวัดค่าความแข็งแบบ Rockwell (Rockwell Hardness Testing)

ในการทดสอบวัดค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 785 เป็นการทดสอบที่บ่งบอกถึงความต้านทานต่อการเป็นรอยกด (Resistance to Indentation) บนผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ทำได้รวดเร็ว เพราะสามารถอ่านค่าได้ทันที สามารถทดสอบวัสดุได้หลายชนิดทั้งโลหะ อ่อนไปจนถึงแข็ง และวัสดุอ่อนอื่นๆ เช่น พลาสติก เพราะมีสเกลความแข็งให้เลือกใช้หลายสเกล ซึ่ง ได้แก่ R, L, M, E และ K [20] ยิ่งอ่านค่าได้สูงแสดงว่าวัสดุมีความแข็งมากขึ้น ซึ่งลักษณะการทดสอบแบบ Rockwell สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell [22]

2.6 การทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

Melt Flow Index (MFI) คือ ปริมาณของพลาสติกหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัว Die ภายใต้ Specific Weight และอุณหภูมิที่กำหนดภายในเวลา 10 นาที ค่า Melt Flow Index เป็นค่าซึ่งทำให้ทราบถึง Grade ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพ และในบางครั้งจะนำไปทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกชนิดเดียวกันที่กระบวนการแตกต่างกัน ค่าดัชนีการไหลนี้ไม่ใช่สมบัติที่แท้จริงของพอลิเมอร์ [23] แต่เป็นตัวที่บ่งบอกว่ากระบวนการผลิตจะมีพลาสติกเหลวออกมาเท่าไร โดยจะมีกระบอบบาร์เรลเพื่อบรรจุพลาสติกเหลว แล้วทำการให้ความร้อนจาก Heater จากนั้น Piston จะดันพลาสติกเหลวผ่าน Die ออกมา ค่าดัชนีการไหลจะแตกต่างกันตามเกรดของพอลิเมอร์ เช่น LDPE, HDPE, PS หรือ PP ดังในกรณีของ LDPE จะมีค่า MFI ประมาณ 20 กรัม/10 นาที ซึ่งในการทดสอบโดยทั่วไปจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238

2.7 งานวิจัยที่ผ่านมา (Literature Reviews)

2.7.1 งานวิจัยทางการขึ้นรูปแบบหมุน

F.G. Torres และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงดึง การทนแรงอัด การทนแรงกระแทก การทนต่อการกด และการกลับคืนรูป รวมทั้งสมบัติด้านการต้านทานความเค้นต่อการแตกหักในสถานะแวดล้อม (ESCR) ความหนาแน่น และการหดตัวของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปของพอลิเอทิลีนที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมตัวอย่างโดยใช้เส้นใย 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยจากต้นดอกโคมพันธุ์ Cabuya และ เส้นใยจากต้นดอกโคมพันธุ์ Sisal ซึ่งมีความยาวโดยเฉลี่ย 5 mm มาทำการผสมกับพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงเพื่อเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุผสม (Composite) แล้วทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยใช้เส้นใยที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0% 2.5% 5.0% และ 7.5% พบว่าสมบัติในการต้านทานแรงดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย และอัตราส่วนที่ใช้ ซึ่งวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยจากต้นดอกโคมพันธุ์ Cabuya ที่อัตราส่วน 2.5% จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ส่วนสมบัติในการต้านทานแรงกระแทกนั้นพบว่าเมื่อมีอัตราส่วนของเส้นใยทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงกระแทกจะต่ำลง เนื่องจากการเติมเส้นใยนั้นมีส่วนทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความเปราะเพิ่มขึ้นนั่นเอง ส่วนการกลับคืนรูป พบว่าวัสดุผสมที่มีอัตราส่วนของเส้นใยจากต้นดอกโคมพันธุ์ Cabuya ที่ 7.5% นั้นจะสามารถกลับคืนรูปได้เร็วที่สุด ส่วนการหดตัว และความหนาแน่น พบว่าเมื่อมีปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นจะทำให้การหดตัว และความหนาแน่นลดลงด้วย ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนที่ได้รับการ

เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาตินั้นมีสมบัติดังกล่าวดีกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้รับการเสริมแรง ซึ่งได้จากการขึ้นรูปโดยเทคนิคแม่พิมพ์หมุน

Lin RJT และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ได้รับการผสมกับพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเรต (PET) และได้มีการเติมเส้นใยขนาดเล็กเป็นสารเสริมแรง (Microfibril Reinforced Composites, MFCs) มาทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งพบว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ได้รับการผสมกับพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเรต และได้มีการเติมเส้นใยขนาดเล็กเป็นสารเสริมแรงดังกล่าวนี้มีลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลนั้นมีความเหมาะสม ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ และนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ทำให้มีแนวโน้มว่าเส้นใยขนาดเล็กนี้มีโอกาสที่ดีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้รับการผลิตโดยกระบวนการนี้

2.7.2 งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับพอลิแลคติกแอซิด

จากการวิเคราะห์สิทธิบัตรที่เกี่ยวกับพอลิแลคติกแอซิด พบว่ามีการจดสิทธิบัตร ในด้านของกระบวนการขึ้นรูปและพัฒนาสูตรคอมพาวด์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ มีตั้งแต่ปี 1993 และเริ่มมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปี 2006-2008 เมื่อวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ในการประดิษฐ์ คิดค้นพบว่าส่วนใหญ่จะเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกล และรองลงมาคือการปรับปรุงสมบัติด้านการไหล (ความหนืด และ melt strength) และการพัฒนาฟิล์มที่มีความเป็นผลึกและคงสภาพทางความร้อนได้ดี ถัดมาคือการปรับปรุงสมบัติด้านความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยที่ยังคงสมบัติด้านกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีเอาไว้ เช่น โดยการผสมกับ โปรตีนชนิดต่างๆ [26] ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าวัตถุประสงค์ในการคิดค้นและพัฒนา PLA ตามที่ระบุไว้ในสิทธิบัตรต่างๆ จะสอดคล้องกับสมบัติ ที่เป็นข้อเสียในด้านต่างๆ ของ PLA ตามที่กล่าวถึงในข้างต้น

โดยตัวอย่างแนวทางที่สำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PLA คือการชักนำให้เกิดการเรียงตัวของฟิล์ม (oriented PLA film) และการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น

- ผสมกับโคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีน ชนิดต่างๆ ได้แก่ เอทิลีน-ไกลซิโคลเมทาคริเลต โคพอลิเมอร์ [E-GMA], เอทิลีนโพรพิลีน ไดอิน โมโนเมอร์ [EPDM], เอทิลีน-บิวทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ [E-BA], และพอลิเอทิลีน ไอโอ โนเมอร์ (Ionomer) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดในโมเลกุล [27]

- ผสมกับโคพอลิเอสเทอร์ [28, 29]
- ผสมกับพอลิคาโพรแลคโตน ร่วมกับสารช่วยผสม เช่น P(MMA-co-GMA) [30] และสารเปอร์ออกไซด์ [31]
- ผสมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ โดยมี MA-g-PB เป็นสารช่วยผสม [32]
- ผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ในทางการค้า เช่น Ecoflex และ Biomax [33]

ในขณะที่แนวทางการปรับปรุงสมบัติด้านการไหลและการผลิตขึ้นรูป PLA โดยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนืดและค่า melt strength ของ PLA ได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิบริเวณตาย (die) ในระหว่างการผลิต, การผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น, การเติมสารคงสภาพทางความร้อน (thermal stabilizer) ลงไป, การเติมสารเพิ่มความหนืด และการชักนำให้เกิดโครงสร้างแบบกิ่งบนโมเลกุล PLA ในด้านการตัดแปรรูปให้เกิดโครงสร้างแบบกิ่ง (branching) บนโมเลกุล PLA นั้น สามารถทำได้ 2 แบบโดยแบบแรก คือการผสมกับสารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการกรรพระหว่างสายโซ่ผ่านตัวกลางแบบอนุมูลอิสระ โดยที่ต้องระวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยา cross-linking หรือเกิดเจลสูงเกินไป เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างโมเลกุลของ PLA มากขึ้น และแบบที่ 2 คือการทำการผสมแบบ reactive blending กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น พอลิอะคริเลตที่มีหมู่ฟังก์ชันอีพอกซี ในโมเลกุล [18]