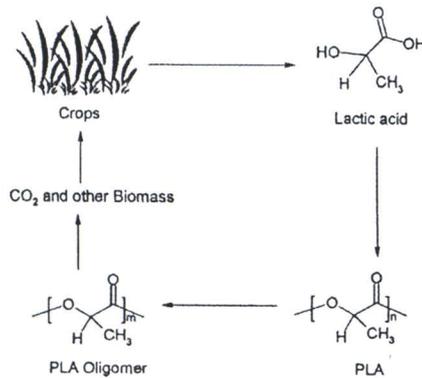


บทที่ 2

ความเป็นมาและภูมิหลัง

พอลิแลคติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลดี ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และผลผลิตที่เกิดจากการย่อยสลายไม่เป็นพิษ ทำให้มีการนำไปใช้งานหลากหลาย ทั้งทางด้านการแพทย์ เช่น ใช้เป็นองค์ประกอบในวัสดุควบคุมการปล่อยตัวยา (drug delivery system) [3] ไฮโดรเจล [4] สกรูสำหรับเชื่อมต่อกระดูก [5] นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยังมีสมบัติเทียบเท่ากับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ เช่น พอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต จึงมีแนวโน้มในการใช้พอลิแลคติกแอซิดทดแทนวัสดุดังกล่าว เช่น ใช้ผลิตเส้นใย [6] พิล์มที่ใช้ในการเกษตร รวมทั้งถ้วยจานประเภทใช้ครั้งเดียว

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด เริ่มจากกรดแลคติกซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่มาจากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นวงจรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิดจึงเริ่มที่การใช้วัสดุที่ปลูกทดแทนได้เป็นวัตถุดิบ เมื่อเสร็จสิ้นการใช้งานแล้วสามารถกำจัดได้โดยใช้สภาวะการหมักทางชีวภาพ (compost) ที่เหมาะสม [1] ได้เป็นมวลชีวภาพ (biomass) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด [7]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการนำพอลิแลคติกแอซิดมาใช้งานต่าง ๆ ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

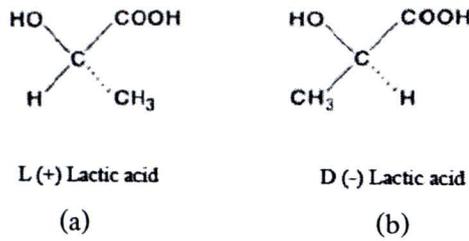
จากที่กล่าวไป กรดแลคติกซึ่งเป็นมอนอเมอร์เริ่มต้นในการผลิตพอลิแลคติกแอซิดนั้นมาจากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาล โดยแป้งและน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์จากผลิตผลทางการเกษตร อาทิ เช่น อ้อย ข้าวโพด หรือมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีมากในประเทศไทยเรา ดังนั้นถ้าเราสามารถ

วิจัยพัฒนาแนวทางการผลิตพอลิแลคติกแอซิดได้เป็นเทคโนโลยีของเราเองก็จะเป็นการผลิตพลาสติกที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม สร้างมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตร อีกทั้งเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกรดแลคติก กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด และสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

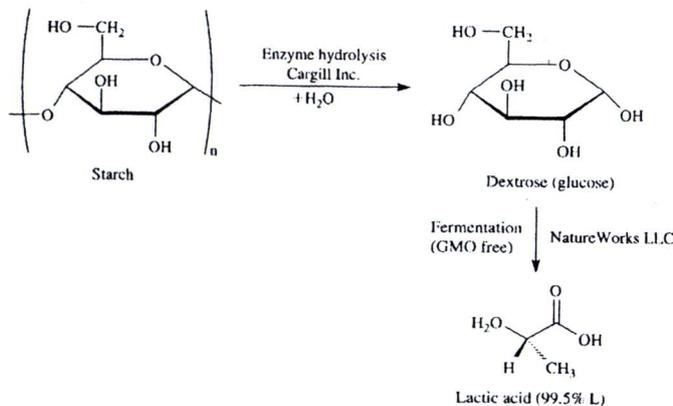
2.1 กรดแลคติก (lactic acid)

กรดแลคติก หรือชื่อตามหลักสากล (IUPAC name) 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-hydroxy propionic acid) เป็นกรดที่ผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์และกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ โดยมี 2 สเตอริโอไอโซเมอร์ (stereoisomer) ซึ่งเป็นอิมเมอร์ (enantiomer) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเตอริโอไอโซเมอร์ของกรดแลคติก (a) แอลไอโซเมอร์ (b) ดีไอโซเมอร์

กรดแลคติกที่ได้จากกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาลได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากวัตถุดิบเริ่มต้นของกระบวนการหมักมาจากพืชซึ่งปลูกทดแทนได้ กรดแลคติกโดยส่วนใหญ่ที่ได้จากกระบวนการหมักจะอยู่ในรูปแอลไอโซเมอร์ ดังตัวอย่างการหมักของบริษัทคาร์กิลล์ดาว (Cargill Dow) [8] ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ปริมาณแอลไอโซเมอร์นั้นประมาณ 99.5 %



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตกรดแลคติกของบริษัทคาร์กิลล์ดาว

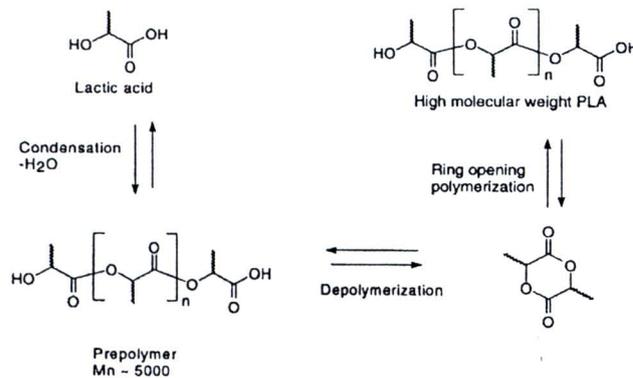
ดังนั้น กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่นักวิจัยและนักอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ศึกษาจะใช้กรดแลคติกชนิดแอลเป็นมอนอเมอร์เริ่มต้น

2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

โดยทั่วไปแล้ว การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดแบ่งออกเป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ (ring opening polymerization of lactide) และ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นกรดแลคติกโดยตรง (direct condensation polymerization of lactic acid) อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ขั้นตอนเพิ่มเติมของการสังเคราะห์แต่ละแบบก็จะแตกต่างกันออกไป

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ (ring opening polymerization of lactide)

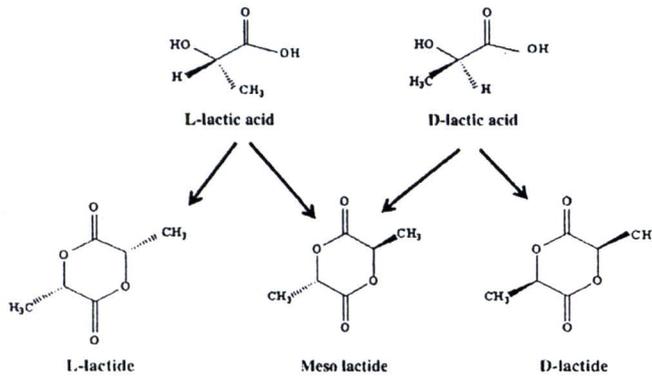
ปัจจุบัน พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ผลิตขึ้นในเชิงพาณิชย์นั้น โดยส่วนใหญ่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ โดยขั้นตอนการสังเคราะห์แบบคร่าว ๆ เริ่มจากปฏิกิริยาการควบแน่นกรดแลคติกเป็นพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (prepolymer) (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ)



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตพอลิแลคติกแอซิดผ่านพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และแลคไทด์ [9]

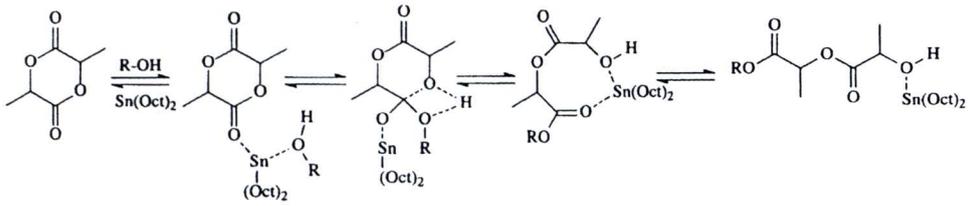
ต่อจากนั้น ใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นวงแหวนไดเมอร์ของกรดแลคติก หรือเรียกว่า แลคไทด์ (lactide) เนื่องจากกรดแลคติกมี 2 ไอโซเมอร์ คือ แอลและดี แลคไทด์ที่เกิดขึ้นอาจเป็น แอลแลคไทด์ (L-lactide) ดีแลคไทด์ (D-Lactide) และเมโซแลคไทด์หรือดี

แอลแลคไทด์ (meso-lactide or D,L-lactide) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อนอื่น ๆ อยู่ด้วย อาทิเช่น น้ำ กรดแลคติก โอลิโกเมอร์ของกรดแลคติก เพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลและไอโซเมอร์ตามที่ต้องการ จะต้องกลั่นแลคไทด์ให้บริสุทธิ์ก่อน แล้วใช้ปฏิกิริยาเปิดวงแหวนแลคไทด์โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมต่อเป็นพอลิแลคติกแอซิด จากนั้นตอนการสังเคราะห์ที่ผ่านการเกิดแลคไทด์ ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวนี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “พอลิแลคไทด์ (polylactide)”



รูปที่ 2.5 สเตอริโอไอโซเมอร์ของแลคไทด์ [10]

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์สามารถทำได้ทั้งในสภาวะหลอม สภาวะบัลค์ สภาวะสารละลายและอิมัลชัน รูปแบบของปฏิกิริยาเปิดวงแหวนขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดปฏิกิริยาและประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ปฏิกิริยาแบบไอออนประจุลบ (anionic polymerization) ปฏิกิริยาแบบไอออนประจุบวก (cationic polymerization) และปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน (coordination-insertion mechanism) อย่างไรก็ตาม กลไกปฏิกิริยาที่มีการศึกษากันมากในการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ ปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน และมีประสิทธิภาพการเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง ละลายในแลคไทด์หลอม ได้แก่ tin(II) 2-ethylhexanoate [tin (II) octoate, Sn(Oct)₂] ซึ่งใช้ร่วมกับสารประเภทแอลกอฮอล์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Sn(Oct)₂ แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนจากแลคไทด์ไปเป็นพอลิแลคไทด์ > 90% (conversion of lactide > 90%) และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอเนนทิโอเมอร์ (racemization) น้อยกว่า 1% [9]



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนแลคไทด์ด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน [9]

จากที่กล่าวไปข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ให้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและสามารถควบคุมการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นไปตามต้องการได้ แต่กระบวนการนี้มีข้อด้อยในเรื่องขั้นตอนการทำให้แลคไทด์บริสุทธิ์ รวมทั้งการปนเปื้อนของแลคไทด์กับพอลิแลคไทด์ที่ได้

2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นกรดแลคติกโดยตรง (direct condensation polymerization of lactic acid)

ปฏิกิริยาควบแน่นกรดแลคติกโดยตรงทำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและลดความดัน ผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่น คือ พอลิแลคติกแอซิดและน้ำ เพื่อให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงตามต้องการจะต้องกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นนั้นออกอย่างสมบูรณ์ แต่เนื่องจากระบบมีความหนืดสูงทำให้การกำจัดน้ำทำได้ยาก พอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากปฏิกิริยานี้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากปฏิกิริยาการควบแน่นกรดแลคติกสามารถทำได้โดยวิธีต่าง ๆ ต่อไปนี้

2.2.2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นด้วยสภาวะสารละลายคงจุดเดือด (azeotropic condensation polymerization)

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้จะเป็นแบบสารละลาย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวทำละลายอินทรีย์ ปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้สภาวะการกลั่นไหลกลับ (reflux condition) ที่มีการลดความดัน การลดความดันทำให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ทำได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ น้ำซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาควบแน่นกรดแลคติกนั้นจะถูกพาออกไปด้วยสภาวะสารละลายคงจุดเดือด ตัวทำละลายถูกทำให้แห้งและเวียนกลับไปใช้ใหม่ [11] ปัญหาเรื่องการจัดน้ำจึงหมดไป การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ป้องกันการเปลี่ยนนิแอนทิโอเมอร์และป้องกันการปฏิกิริยาย้อนกลับของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้อีกด้วย [7] อย่างไรก็ตามการกำจัดตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากพอลิเมอร์อย่างสมบูรณ์นั้นทำ

ได้ยาก นอกจากนี้การควบคุมกระบวนการต่าง ๆ มีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดที่ได้มีราคาสูงขึ้น

2.2.2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ณ สถานะของแข็ง (solid state polymerization)

ปฏิกริยานี้ทำโดยให้ความร้อนกับพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ณ อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ พร้อมด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาและกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นออกโดยวิธีลดความดันหรือเป่าด้วยแก๊สเฉื่อย Moon และคณะ [12] สามารถสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 500,000 Da โดยเริ่มจากการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 13,000 Da จากปฏิกริยาควบแน่นกรดแลคติก หลังจากนั้นให้ความร้อนกับพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียสเพื่อส่งเสริมให้เกิดผลึก และขึ้นคอนสตรัคชันเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดปฏิกริยาควบแน่นเป็นเวลา 10-30 ชั่วโมง

ข้อดีของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้ คือ อุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าปฏิกริยาควบแน่นที่สถานะของเหลว จึงสามารถป้องกันปฏิกริยาข้างเคียง เช่น การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากปฏิกริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ อย่างไรก็ตามข้อเสียของปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้ คือ ปริมาณผลึกในพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะต้องเหมาะสมเพื่อป้องกันการเกาะกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาคพอลิเมอร์

2.2.2.3 การเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำเข้าด้วยกัน (chain-linked low molecular weight polylactic acid)

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากปฏิกริยาการควบแน่นโดยตรง คือ การเชื่อมต่อสายโซ่ด้วยสารขยายสายโซ่ (chain extender) โดยทั่วไปสารขยายสายโซ่ คือ สารน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ ซึ่งสารขยายสายโซ่ที่เหมาะสมจะไม่ทำให้เกิดผลพลอยได้ (by-product) ที่จะปนเปื้อนพอลิเมอร์หรือต้องกำจัดออก สารขยายสายโซ่สำหรับพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ สารที่สามารถทำปฏิกริยากับหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิล สารขยายสายโซ่ที่มีการศึกษาและพบว่าเหมาะสมสำหรับพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ bis-oxazolines, di-isocyanates, bis-epoxides, bis-orthoesters [13] แต่สารที่นิยมใช้มาก คือ ไอโซไซยาเนตเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกริยาสูง [14, 15, 16]

2.2.2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ (condensation polymerization under vacuum)

Chen และคณะ [17] ศึกษาการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงโดยใช้ไททาเนียมบิวทอกไซด์ [titanium(IV) butoxide] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควบคุมระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ขึ้นตอนการลดความดันจาก 760 ทอร์ (Torr) ไปสู่ 1 ทอร์ และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นที่ความดันเท่ากับ 1 ทอร์ คณะผู้วิจัยพบว่า สภาวะที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 130,000 กรัม/โมล คือ สภาวะที่ให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดที่ความดันเท่ากับ 760 ทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เวลาในการลดความดันไปสู่ 1 ทอร์ เท่ากับ 7 ชั่วโมง และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นที่ความดัน 1 ทอร์ เท่ากับ 40 ชั่วโมง

Achmed และคณะ [18] สังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดโดยปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงภายใต้สภาวะสุญญากาศ [ความดันเท่ากับ 10 มิลลิเมตรปรอท (mmHg) หรือเท่ากับ 10 ทอร์] ซึ่งไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลายและตัวริเริ่มปฏิกิริยาใด ๆ คณะผู้วิจัยพบว่า สภาวะที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 90,000 Da คือ การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 89 ชั่วโมง

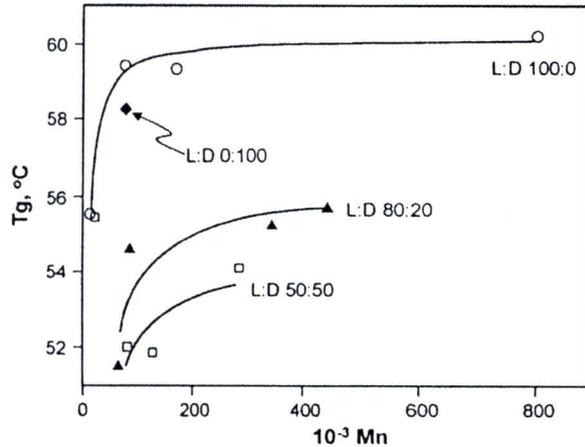
2.3 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

โดยทั่วไป สมบัติของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไอโซเมอร์ที่ปรากฏบนสายโซ่ อุณหภูมิการขึ้นรูป ระยะเวลาการอบอ่อน (annealing time) และ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด

2.3.1 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

พอลิแลคติกแอซิดที่มีเฉพาะดี [poly(D-lactic acid), PDLA] หรือแอลไอโซเมอร์ [poly(L-lactic acid), PLLA] บนสายโซ่จะเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 180 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 60 องศาเซลเซียส [19] ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่มีทั้งสองไอโซเมอร์ปรากฏบนสายโซ่ [poly(D,L-lactic acid), PDLA] ซึ่งปริมาณดีไอโซเมอร์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส [20]

อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณไอโซเมอร์ที่ปรากฏบนสายโซ่ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิแลคติกแอซิดที่มีปริมาณแอลไอโซเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน [19]

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า พอลิแลคติกแอซิดที่มีไอโซเมอร์เพียงชนิดเดียวบนสายโซ่จะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วสูงที่สุด และลดลงเมื่อปริมาณของไอโซเมอร์ที่แตกต่างนั้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ในช่วงน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 100,000 กรัม/โมล อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น

สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดนั้นพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณไอโซเมอร์ที่แตกต่างไปจากไอโซเมอร์หลักบนสายโซ่ โดยอุณหภูมิหลอมเหลวจะลดลงเมื่อไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น [21]

2.3.2 สมบัติทางกล (mechanical properties)

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมขึ้นจากวิธีต่าง ๆ กัน จากตารางแสดงให้เห็นว่า โดยทั่วไป พอลิแลคติกแอซิดที่เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีสมบัติทางกลดีกว่าพอลิแลคติกแอซิดชนิดที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน และสมบัติทางกล โดยเฉพาะค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคท (vicat softening) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Perego และคณะ [22] พบว่าค่ามอดูลัสและความแข็งแรงดึงมีค่าสูงสุดเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด (viscosity-average molecular weight, M_v) มากกว่า 55,000 กรัม/โมล

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด (PLLA) พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการอบอ่อน (annealing) (Ann. PLLA) และพอลิดีแอลแลคติกแอซิด (PDLLA) [23]

	PLLA ($M_v = 66,000$)	Ann.PLLA ($M_v = 66,000$)	PDLLA ($M_v = 114,000$)
Tensile strength (MPa)	59	66	44
Elongation at break (%)	7.0	4.0	5.4
Modulus of elasticity (MPa)	3750	4150	3900
Yield strength (MPa)	70	70	53
Flexural strength (MPa)	106	119	88
Unnotched Izod impact (J/m)	195	350	150
Notched Izod impact (J/m)	26	66	18
Rockwell hardness	88	88	76
Heat deflection temperature ($^{\circ}\text{C}$)	55	61	50
Vicat penetration ($^{\circ}\text{C}$)	59	165	52

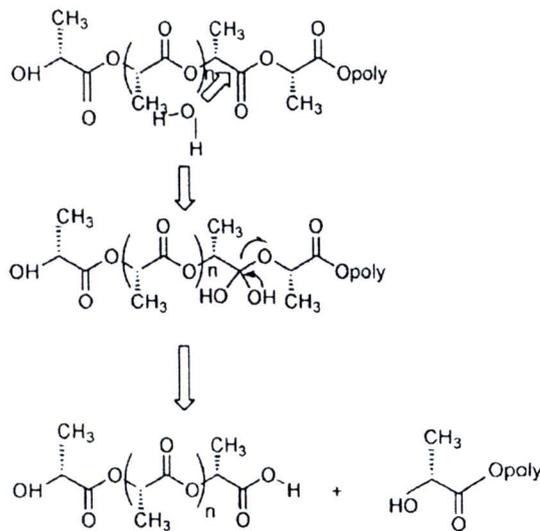
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) และ พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่า สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิดใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต [24]

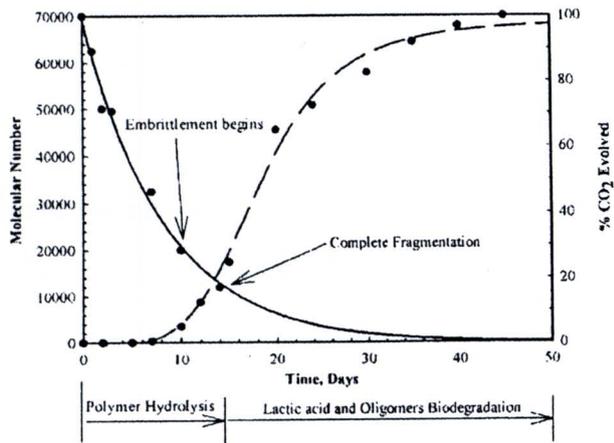
	PLA	PET	PS	LDPE
Tensile strength (MPa)	48-53	48-72	34-50	8-20
Tensile modulus (GPa)	3.5	0.2-4.1	2.3-3.3	0.3-0.5
Elongation at break (%)	30-240	30-300	1.2-2.5	100-1000

2.4 การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด (degradation of polylactic acid)

กลไกเริ่มต้นของการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด คือ ปฏิกิริยาไฮโดรลีส (ดูรูปที่ 2.8 ประกอบ) โดยขั้นตอนการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดในธรรมชาติจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นเริ่มต้น พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกตัดสายโซ่ออกเป็นพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ปฏิกิริยาการแตกพันธะออกนั้นมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดหรือด่าง รวมทั้งได้รับผลกระทบจากระดับความชื้นและอุณหภูมิ ขั้นที่สอง น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดจะลดลงไปจนได้เป็นกรดแลคติกและพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงอีก และจุลินทรีย์ในธรรมชาติจะเริ่มย่อยสลายพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำไปเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมีส รูปที่ 2.9 แสดงการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาไฮโดรลีสและการตัดสายโซ่ออกของพอลิแลคติกแอซิด [23]



รูปที่ 2.9 การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแลคติกแอซิด ด้วยสภาวะการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [23]



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดบ้านวิจัย	
วันที่.....	1.1.01.2555
เลขทะเบียน.....	248930
เลขเรียกหนังสือ.....	