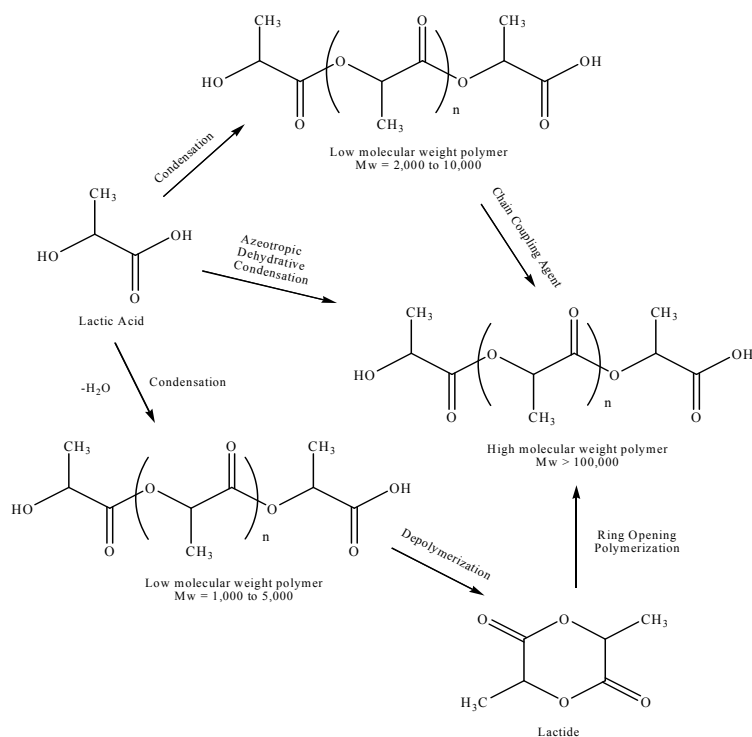


บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

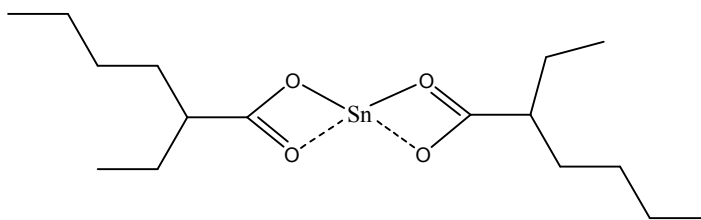
2.1 สมบัติและการสังเคราะห์พอลิแลคติกไคด์

พอลิแลคติกไคด์ หรือพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ดั่งนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักเช่นข้าวโพดมันสำปะหลังข้าวสาลี หรืออ้อยจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่องพอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่นการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เป็นต้น (Bhatia. 2007 : 125-131) การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดอาจกระทำโดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic dehydrative condensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) และ/หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไคด์ (Lactide formation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



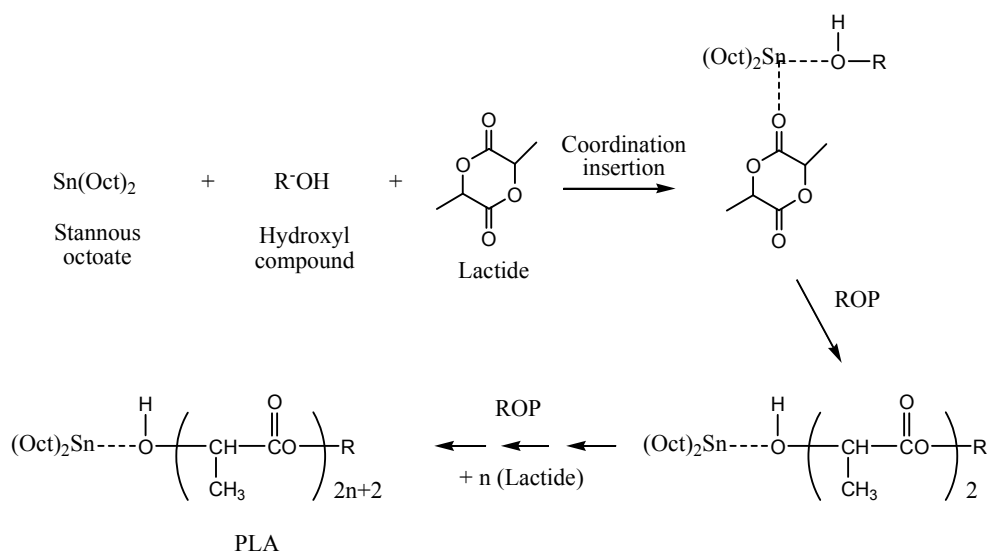
รูปที่ 2.1 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด ด้วยกระบวนการต่างๆ (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. 2554)

สำหรับการสังเคราะห์ PLA แบบปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรงนั้นจะมีโมเลกุลน้ำเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำของพอลิเมอร์ขึ้น ส่งผลให้ PLA ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำ อันจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลต่ำด้วย แต่ในขณะที่วิธีการสังเคราะห์โดยผ่านแล็คไทด์จะทำให้ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงกว่า ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆของ PLA ที่สังเคราะห์ได้ เช่นสมบัติเชิงกล ความเหนียว ความแข็งแรงขณะหลอมสมบัติด้านการไหลและอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะโดยการสังเคราะห์แบบนี้เกิดปฏิกิริยาขึ้นด้วยการเปิดวงของแล็คไทด์ จึงเรียกว่า กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring opening polymerization; ROP) ซึ่งมีกลไกการสังเคราะห์ได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ PLA มากที่สุดในปัจจุบันคือ การเปิดวงแบบสอดแทรกโคออร์ดิเนชัน โดยทั่วไปใช้ระบบเริ่มปฏิกิริยา (initiating system) ที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮดรอกซิล (hydroxyl compound) และเร่งปฏิกิริยาด้วยสารประกอบโลหะอินทรีย์ ที่มีการใช้มากที่สุดคือ สแตนนัสออกโทเอต (stannous octoate; $\text{Sn}(\text{Oct})_2$) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากเป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ที่ได้รับการอนุญาตจากองค์การอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Food and Drug Administration, FDA) สำหรับใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารและยาได้ (Garlotta. 2001 : 63-84)



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างสแตนนัสออกโทเอต (ยอดธง ไบมาก. 2554)

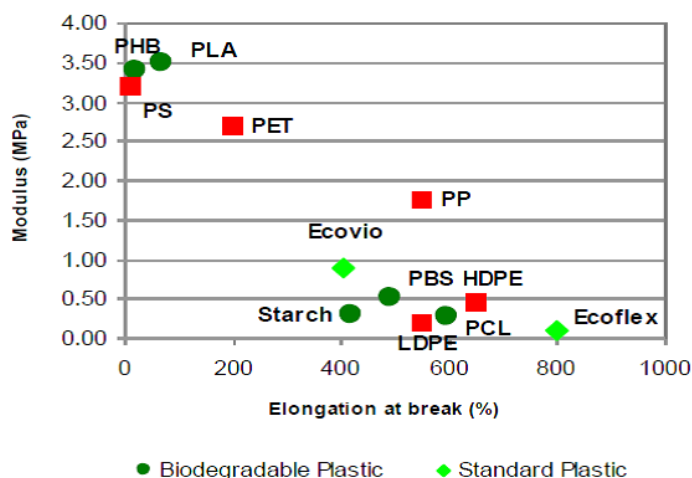
กลไกที่เป็นไปได้ของกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงประเภทสอดแทรกโคออร์ดิเนชัน แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยมีการเกิดโคออร์ดิเนชันของสแตนนัสออกโทเอต สารประกอบไฮดรอกซิล และแล็คไทด์ก่อนขั้นตอนการเปิดวงแล็คไทด์



รูปที่ 2.3 กลไกกระบวนการสังเคราะห์ PLA แบบเปิดวงประเภทสอดแทรกของโคออร์ดิเนชันของ แล็กไทด์ (ยอดธง ไบமாக. 2554)

แม้ว่า PLA จะมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการเช่น มีฐานวัตถุดิบที่มาจากผลิตผลทางการเกษตรที่มีอยู่มากมายในประเทศไทย เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) มีความสามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ (biocompatibility) และมีอุณหภูมิหลอมอยู่ในระดับสูงพอสมควร (Petchsuk. 2014 : 779-789; Yuan. 2014 : 438-445) แต่ขณะเดียวกัน PLA ก็ยังคงมีสมบัติบางประการที่เป็นข้อเสียหรือข้อจำกัดซึ่งต้องมีการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งานดังนี้ (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2560)

PLA มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะโดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่ามอดูลัสพบว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (รูปที่ 2.4) ในขณะที่การยืดตัวจะสูงกว่าพอลิสไตรีนเล็กน้อย (แต่จะยังคงต่ำกว่าพอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลต, PET) ซึ่งลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในบางด้านเช่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัวดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในส่วน PLA คอมพาวด์และหรือผสม PLA กับ พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่าเช่นพอลิคาโพรแลคโตนและ ECOFLEX



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่ามอดูลัสและค่าการยืดตัวของ PLA เทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2560)

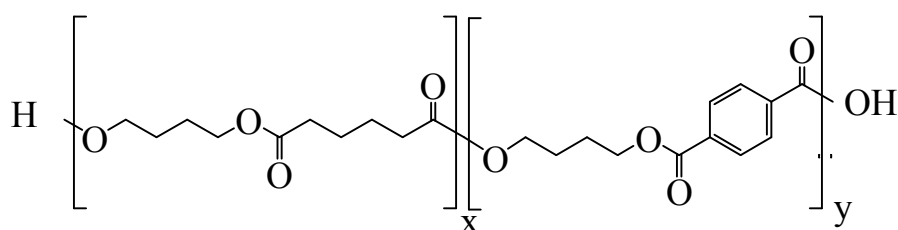
1. PLA ไม่ทนความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูป ผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ด PLA ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อนซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ใน PLA ควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้นสำหรับเวลาที่ใช้ในการอบเม็ด PLA โดยใช้ลมร้อนที่มีค่า DEW POINT -40 องศาเซลเซียสและอัตราการไหล $0.016 \text{ m}^3 / (\text{min kg})$ จะขึ้นอยู่กั อุณหภูมิที่ใช้ตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 45°C จะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงแต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 90°C จะใช้เวลาสั้นลงเหลือประมาณ 2 ชั่วโมง
2. ความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่างเช่นกระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียรดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์ม PLA จากกระบวนการดังกล่าวจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

จากข้อจำกัดของ PLA ดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จาก PLA โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติที่เป็นข้อด้อยของ PLA

2.2 สมบัติและการสังเคราะห์พอลิบิวทิเรท

Polybutylateเป็นชื่อย่อของ Polybutylateadipate terephthalate หรือ PBAT ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT เป็นโคพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งของกรดอะดิพิค (adipic acid), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และ dimethyl terephthalate

PBAT ถูกผลิตขึ้นจากผู้ผลิตที่หลากหลายและเป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้า เช่น ecoflex®, Wango, Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi เป็นต้น ในทางการตลาดทั่วไป PBAT เป็นพลาสติกทางเลือกหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติก Low density polyethylene (LDPE) โดยพลาสติกทั้งสองมีคุณสมบัติที่เหมือนกันรวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน อาทิเช่น ถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT แสดงดังรูปที่ 2.5 มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่างบล็อกโคพอลิเมอร์ 2 บล็อกเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่แท้จริงยังคงเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของหลายบล็อกมาเกิดพันธะกัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ PBAT

PBAT ถูกจำแนกเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สามารถมีโครงสร้างเป็นผลึกที่แน่นอน เนื่องจากขาดความเป็นระเบียบของโครงสร้าง จึงนำไปสู่คุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น จุดหลอมเหลวมีช่วงกว้าง ค่า Modulus และค่าความแข็งต่ำ แต่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูงซึ่งทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกนำมาผสมกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความแข็งแรงและไม่ยืดหยุ่นในกระบวนการผลิตขวด

ข้อเสียของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเหมือนกับพอลิเมอร์อื่นๆคือ เมื่อมีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง ทำให้ไม่มีความแข็งแรง จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับภาชนะที่ต้องการความแข็งแรง ตัวอย่างเช่น Plexiglass(Poly(methyl methacrylate)) มีลักษณะเป็นแผ่นกั้นใส ใช้เป็นตัวแทนของกระจกใส

PBATถูกตรวจสอบแล้วว่าสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบของ butylene adiapte groups มีคุณสมบัติเชิงกลและความคงตัวสูงจากสัดส่วนของ terephthalate ซึ่ง CAS Registry Number ของ PBAT คือ 60961-73-1 ในขณะนี้ PBAT ที่ถูกขายในท้องตลาดเป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท BASF มีชื่อทางการค้าว่า ecoflex® ซึ่งในการทดลองสามารถย่อยสลายได้ 90% หลังระยะเวลาทดลอง 80 วัน การนำไปใช้ที่มีความจำเพาะนี้ถูกให้ความสำคัญจากผู้ผลิตรวมถึงการห่อหุ้มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร, ถุงเพาะชำที่ย่อยสลายได้และการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและเป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่นๆ เช่น ถ้วยกระดาษ จากการที่มีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ PBAT ในท้องตลาดจึงถูกนำไปเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพลาสติกแข็งที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น PLA เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงการนำPBATเป็นองค์ประกอบในฟิล์มต้านจุลินทรีย์ โดยฟิล์มต้านจุลินทรีย์นี้ได้ถูกพัฒนาไปสู่บรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ ช่วยเก็บรักษาอาหารให้ปลอดภัย

2.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

Kulinski และคณะ (2006 : 2128-2135) รายงานว่า PLA มีคุณสมบัติด้อยซึ่งทำให้การใช้งานได้จำกัดคือ มีมีความเปราะ ไม่ยืดหยุ่น โดยอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) ประมาณ 50-60°C ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ผสมเข้ากับ PLA ซึ่งพบว่าสารที่ทำหน้าที่เป็น plasticizer ที่มีประสิทธิภาพสูงแก่ PLA ได้แก่ poly(3-methyl-1,4-dioxan-2-one), poly(ethylene oxide), citrate esters, triacetin และ poly(ethylene glycol)s (PEGs) ซึ่งหลังจากเติมสาร plasticizer แล้วสามารถทำให้ PLA มีความยืดตัวได้มากขึ้น และอุณหภูมิ T_g มีค่าลดต่ำลงถึง 35°C PEGs เป็นสารที่นิยมใช้มากเนื่องจากไม่เป็นอันตราย แต่การใช้สาร PEGs มีข้อบกพร่องที่สำคัญคือ เมื่อใช้ในระดับที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และปริมาณสูงจะทำให้เกิดการแยกตัว (phase separation) ออกจาก PLA ได้ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการช่วยยืดต่ำลง งานวิจัยนี้จึงได้คิดค้น plasticizer ชนิดใหม่มาใช้แทน PEGs คือ poly(propylene glycol) (PPG) โดยทดลองใช้ PPG น้ำหนักโมเลกุล 425 g/mol (PPG4) และ 1,000 g/mol (PPG1) เปรียบเทียบกับการใช้ PEG น้ำหนักโมเลกุล 600 g/mol (PEG6) อุณหภูมิ T_g และค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของตัวอย่างแสดงได้ในตารางที่ 2.1

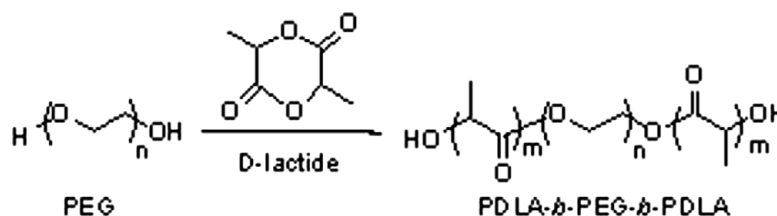
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกลของ PLA ที่ผสม PEG (Kulinski. 2006 : 2128-2135)

plasticizer type	plasticizer content [wt %]	T_g , DSC [°C]	yield stress [MPa]	stress at break [MPa]	elongation at break [m/m]
none	0	55.7	41.4 ± 1.5	25.5 ± 0.4	0.64 ± 0.42
PPG4	5.0	44.5	31.3 ± 1.2	20.7 ± 0.9	0.19 ± 0.08
	7.5	38.5	29.0 ± 2.1	17.7 ± 2.9	1.07 ± 0.50
	10.0	33.1	17.4 ± 2.0	21.0 ± 1.5	5.24 ± 0.66
	12.5	26.8	6.0 ± 0.4	21.0 ± 1.4	7.02 ± 0.31
PPG1	5.0	44.8	32.3 ± 1.8	22.2 ± 1.5	0.44 ± 0.03
	7.5	39.0	28.4 ± 1.3	22.6 ± 1.6	3.29 ± 2.0
	10.0	34.0	23.1 ± 0.9	22.8 ± 2.8	4.73 ± 1.11
	12.5	32.0	16.1 ± 1.6	21.6 ± 1.6	4.96 ± 0.70
PEG6	5.0	42.8	30.3 ± 1.8	19.3 ± 3.5	0.67 ± 0.33
	7.5	37.8	25.7 ± 0.2	17.5 ± 3.1	3.60 ± 0.25
	10.0	31.3	17.5 ± 1.7	18.5 ± 1.2	4.27 ± 0.42
	12.5	28.0	5.4 ± 0.8	19.7 ± 1.4	6.22 ± 0.75

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อใช้ PPG น้ำหนักโมเลกุล 425 g/mol ในปริมาณ 12.5 wt% จะทำให้อุณหภูมิ T_g ลดต่ำที่สุด ซึ่งมีค่า 26.8°C และค่า elongation at break สูงสุดมีค่าเป็น 7.02 mm แต่อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่อง phase separation ก็ยังพบอยู่บ้าง เห็นได้ชัดเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเป็น 1,000 g/mol และที่ปริมาณ 12.5 wt%

Lui และคณะ (2014 : 10-17) รายงานว่า PLA มีข้อด้อยต่อการใช้งานที่สำคัญ 2 ประการคือ มีอุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อน (heat distortion temperature; HDT) ที่ต่ำ และมีความเปราะ ไม่ยืดตัว การเพิ่ม HDT ทำได้โดยการทำให้ PLA เป็นสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (stereocomplex PLA) ซึ่งคือการนำสเตอริโอไอโซเมอร์ของ PLA สองชนิดได้แก่ poly(L-lactic acid) (PLLA) และ poly(D-lactic acid) (PDLA) ผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งจะทำให้โมเลกุลเกิดผลึกแบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (stereocomplex crystallite) ส่งผลให้ค่า HDT สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PLLA หรือ PDLA ส่วนการแก้ปัญหาความเปราะนั้นอาจทำได้โดยการเติม plasticizer ผสมเข้ากับ PLA ที่นิยมคือ PEG ซึ่งที่ผ่านมามีวิธีการปรับปรุงโครงสร้าง PLA แต่ละวิธีจะแก้ข้อบกพร่องของ PLA ได้เพียงประการใดประการหนึ่งเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องของ PLA ทั้งสองประการพร้อมกัน โดยการเตรียมไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ของ PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA เพื่อทำหน้าที่เป็น plasticizer แล้วนำไปละลายผสมด้วยตัวทำละลายกับ PLLA เพื่อที่จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ขึ้นด้วย

วิธีการเตรียมไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ เตรียมผ่านกระบวนการเปิดวงของแลคไทด์ที่ใช้สแตนนัส ออกโทเอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ PEG (น้ำหนักโมเลกุล 10,000g/mol) ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาในตัวเอง ปฏิกิริยาเกิดภายใต้สภาวะไนโตรเจน อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA แสดงดังรูปที่ 2.6



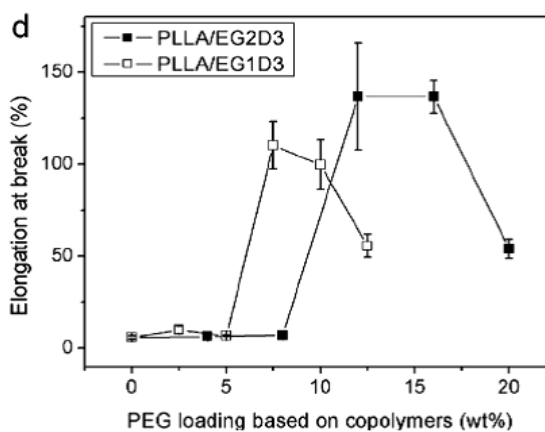
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA (Lui. 2014 : 10-17)

หลังจากทำการเตรียม PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA แล้วนำไปผสมกับ PLLA ในรูปสารละลายในอัตราส่วนต่างๆ และผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลแสดงในตารางที่ 2.2 และเตรียมตัวอย่างให้เป็นแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA (Lui. 2014 : 10-17)

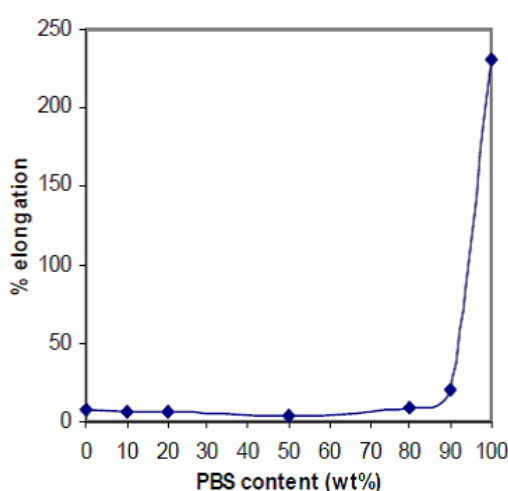
	PEG/PDLA(wt/wt)	M_n (g/mol)	M_w (g/mol)	M_w/M_n
EG2D3	2:3	1.15×10^4	1.99×10^4	1.73
EG1D3	1:3	1.79×10^4	3.20×10^4	1.79

ผลการทดสอบเชิงกลพบว่าตัวอย่าง EG1D3 มีความสามารถในการยืดสูงสุด ณ จุดขาดได้สูงกว่าอีกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสามารถในการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ PDLA-*b*-PEG-*b*-PDLA (Lui, 2014 : 10-17)

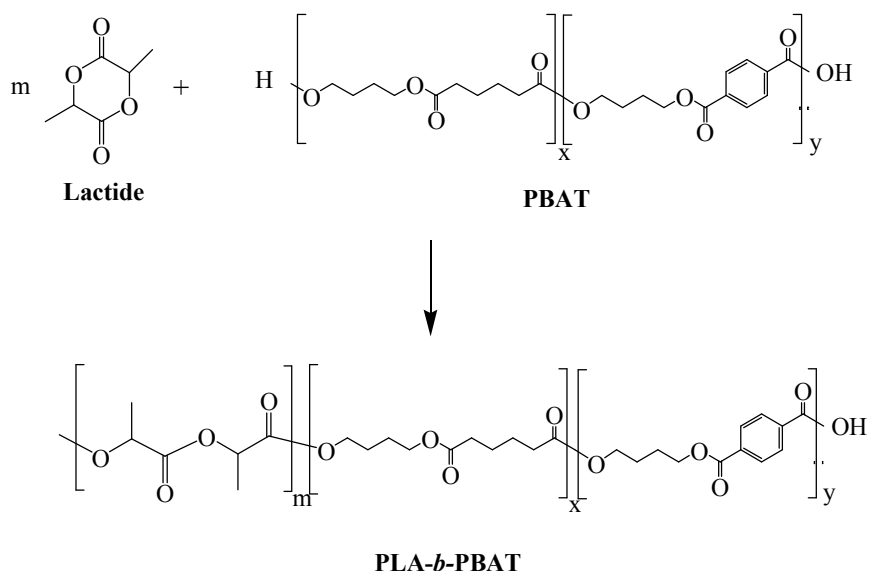
จากการทดลองของ Bhatia และคณะ (2007 : 125-131) รูปที่ 2.8 แสดงผลการยืดตัวเมื่อ PLA หลอมผสมกับ PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง twin screw extruder และขึ้นรูปด้วยวิธี compression molding พบว่า PLA มีการยืดตัวเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่าผลของ tensile strength และ Young's modulus ของ PLA มีค่าลดลงเมื่อ PBS มีปริมาณที่มาก ซึ่งเกิดจากการเข้ากันได้ไม่สมบูรณ์ระหว่าง PLA และ PBS ดังนั้นหากทำบล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBS น่าจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 2.8 ผลจากการทดสอบการดึงแสดงการยืดตัวของวัสดุผสมที่มี PBS ในอัตราส่วนต่างๆ (Bhatia, 2007 : 125-131)

2.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า PLA มีข้อด้อยคือ มีความยืดหยุ่นต่ำ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดปรับปรุงคุณสมบัติความยืดหยุ่นของ PLA ให้สูงขึ้นโดยการสังเคราะห์บล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBAT (PLA-*b*-PBAT) เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่คุณสมบัติยืดหยุ่นสูงกว่า PLA มาก จึงตั้งสมมุติฐานว่าหากสายโซ่โมเลกุลของ PLA ถูกแทรกด้วยสายโซ่โมเลกุลของ PBAT ที่ยืดหยุ่นได้ ก็จะทำให้สายโซ่ของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการเคลื่อนไหวโมเลกุลได้มากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างอื่นมาแทรกอยู่ ความเป็นผลึกอาจลดต่ำลง ส่งผลให้มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น แต่ยังคงมีสมบัติที่ดีของ PLA ปรากฏอยู่ดั้งเดิมโดยจากความรู้เรื่องกลไกการสังเคราะห์ PLA ผ่านกระบวนการเปิดวงของแล็คไทด์ (เป็นมอนอเมอร์) ในขณะที่ PBAT จะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (initiator) ให้แก่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ PLA ด้วยเนื่องจากที่ปลายข้างหนึ่งของโมเลกุล PBAT มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) อยู่ดังนั้นปฏิกิริยาของการเติบโตโมเลกุลของ PLA จะเริ่มเกิดที่ปลายโมเลกุลของ PBAT และพร้อมทั้งเกิดพันธะเชื่อมเป็นโมเลกุลเดียวกันเกิดเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ โดยจะใช้ สแตนนัส ออกโทเอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทั้งนี้อุณหภูมิ และเวลาของการเกิดปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่ต้องศึกษาต่อไปด้วย ปฏิกิริยาและโครงสร้างของ PLA-*b*-PBAT copolymer ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.9 แม้จะเคยมีวิจัยอื่น ๆ ที่มีการนำ PLA และ PBAT มาหลอมผสมกันเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ PLA แต่หากทำบล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBAT น่าจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาและโครงสร้างของ PLA-*b*-PBAT copolymer ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น