

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

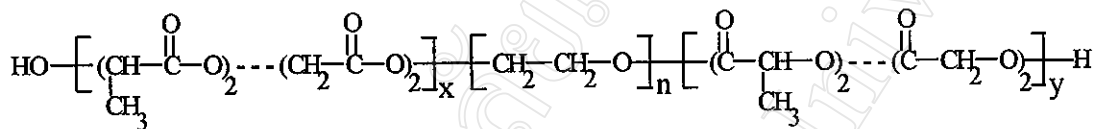
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างโมเลกุล สังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของเทอร์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของวัสดุ สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ ข้อสรุปที่ได้สามารถแบ่งได้ตามหัวข้อหลักๆ ดังนี้

5.1 การออกแบบโครงสร้างโมเลกุล

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวทางชีวภาพมี แอล-แลคไทด์ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยพิจารณาถึงสมบัติของ PLL โพลิเมอร์ ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) $\sim 65^\circ\text{C}$ ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งกระด้าง ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ บางประเภท เช่น ไหมละลาย นอกจากนี้ PLL ยังมีอัตราการสลายตัวในร่างกายมนุษย์นาน (1-2 ปี) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นโดยเลือกใช้วิธี “โคพอลิเมอไรเซชัน” ที่เป็นการนำมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดมาพอลิเมอไรซ์เข้าด้วยกัน โดยวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติที่แปรผันตามสัดส่วนของมอนอเมอร์เหล่านั้น และโครงสร้างทางจุลภาคของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ให้ทางเลือกที่หลากหลายยิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับมอนอเมอร์ 3 ชนิด ดังนั้นจึงเรียกได้ว่าเป็น “เทอร์พอลิเมอไรเซชัน” โดยเลือกใช้ไกลคอลไคลด์ และพอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG) ในการโคพอลิเมอไรซ์ร่วมกับ แอล-แลคไทด์ ทั้งนี้เนื่องจาก PG โพลิเมอร์ที่ได้จากไกลคอลไคลด์ มีสมบัติความชอบน้ำสูงและสามารถสลายตัวทางชีวภาพได้เร็วกว่า PLL ส่วน PEG นั้นสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพและไม่มีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ PEG ยังมีค่า T_g ต่ำ เมื่อพอลิเมอไรซ์ร่วมกับแอล-แลคไทด์ จะสามารถช่วยลด T_g และเพิ่มคุณสมบัติหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ เมื่อนำไกลคอลไคลด์ และ PEG มาพอลิเมอไรซ์ร่วมกับแอล-แลคไทด์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักและเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่พอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีผลึก จะทำให้สายโซ่ของ PLL มีความไม่สม่ำเสมอเพิ่มขึ้นและทำให้ความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แอล-แลคไทด์ ในปริมาณต่ำสุด 74 โมล % เพื่อให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ยังคงมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง และใช้ไกลคอลไคลด์และ PEG ในปริมาณที่รวมกันไม่เกิน 26 โมล % โดยใช้

PEG ในปริมาณไม่เกิน 1 โมล % เนื่องจากในระบบนี้ PEG ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา หากใช้ในปริมาณสูง จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากเกินไป และทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ต่ำ

โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้รับการออกแบบ ในงานวิจัยนี้ อยู่ในรูปของ ABA ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยบล็อกข้างทั้งสองที่เป็นโคพอลิเมอร์แบบคู่ของแอลแลคไทด์และไกลคอลลิด์ โดยมีสมบัติเป็น “hard” บล็อก ที่ให้ความแข็งแรงแก่พอลิเมอร์ และมีบล็อกกลางเป็นพอลิเอธิลีนไกลคอลลิด์ ($\bar{M}_n = 900$ 4000 และ 5600) ที่มีสมบัติเป็น “soft” บล็อก โดยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับสายโซ่พอลิเมอร์ ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นดังนี้



poly (L-lactide-co-glycolide-b-poly (ethylene glycol)-b-L-lactide-co-glycolide)

P(LL-co-G)-b-PEG-b-(LL-co-G), PLG-b-PEG-b-PLG

วัตถุประสงค์ของการออกแบบโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ในรูปแบบของ ABA ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ชนิดนี้ คือเป็นการนำเอาสมบัติต่างๆ ที่มีอยู่ในไฮโมพอลิเมอร์แต่ละชนิดรวมเข้าด้วยกัน โดยมีความพยายามที่จะทำให้เกิดสมดุลระหว่างสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล และการสลายตัวทางชีวภาพที่เหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ ดังนั้นในขั้นตอนของการสังเคราะห์ จำเป็นต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างตามที่ต้องการแบบไว้หรือมีสมบัติตามที่ต้องการ แม้ว่าในทางปฏิบัติจะทำได้ค่อนข้างยาก

5.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสังเคราะห์ ABA ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ของแอล-แลคไทด์ โกลคอลลิด และพอลิเอทีลีนไกลคอล (PEG) โดยพอลิเมอร์เช่ันแบบเปิดวงของไซคลิกเอสเตอร์มอนอเมอร์ ที่มีสแตนนัสออกโทเอท ($\text{Sn}(\text{OCOC}_7\text{H}_{15})_2$) เป็นตัวเร่ง และมี PEG เป็นตัวริเริ่ม โดยใช้หมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายทั้งสองทำปฏิกิริยากับแอล-แลคไทด์และโกลคอลลิด โดยกลไกของปฏิกิริยาเป็นแบบ coordination-insertion [9, 52] แสดงดังแผนผัง 5.1 โดยมีขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอน คือ

1. การริเริ่มปฏิกิริยา (Initiation) ขั้นตอนนี้เริ่มต้นจาก Sn ในสแตนนัสออกโทเอท ใช้ทั้ง p- และ d-ออร์บิทัล ไปโคออร์ดิเนตกับออกซิเจนอะตอมของหมู่คาร์บอนิลของแอล-แลคไทด์ หรือไกล-โคลไคด์ (1) ทำให้คาร์บอนิลคาร์บอนมีความเป็นบวกมากขึ้น (2) และมีความไวในการเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PEG เพิ่มขึ้น (3) หลังจากนั้นเกิดการย้ายโปรตอน (proton transfer) และเกิดการเปิดวงของมอนอเมอร์โดยการแตกออกของพันธะ acyl-oxygen (4) ทำให้เกิดโมเลกุลเส้นตรงที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (5)

2. การแผ่ขยายสายโซ่ (Propagation) หมู่เอสเทอร์ของโมเลกุลเส้นตรงที่เกิดจากการเปิดวงของไซคลิกมอนอเมอร์ ยังคงโคออร์ดิเนตกับ Sn อะตอม เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนกับโมเลกุลของมอนอเมอร์ตัวอื่น จะเป็นการเริ่มต้นกระบวนการใหม่ที่ (1) ปฏิริยาการเปิดวงจะดำเนินต่อไปจนได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวขึ้น

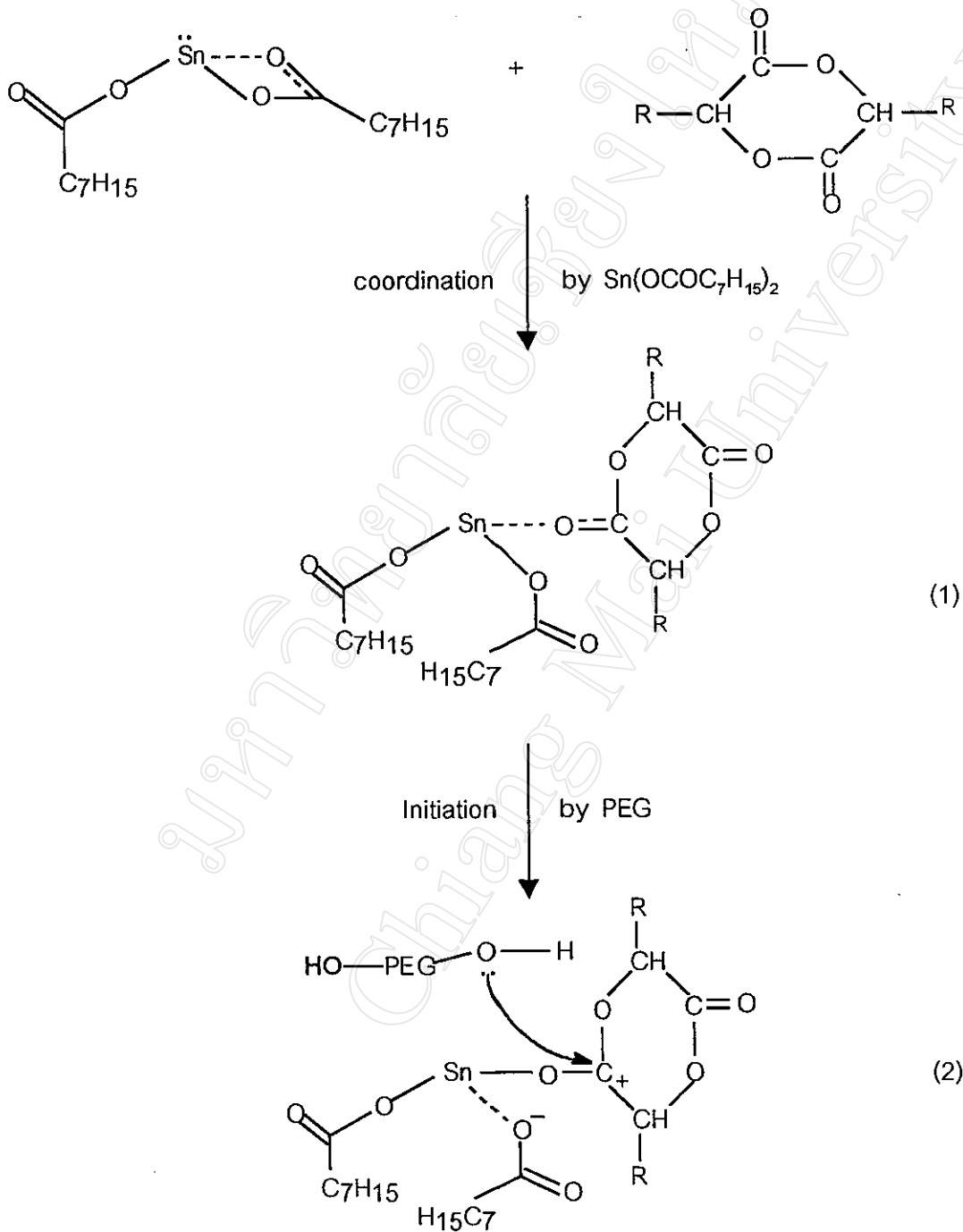
นอกจากปฏิกิริยาการเปิดวงของไซคลิกมอนอเมอร์แล้ว อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นๆ เกิดขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยา intra-หรือ inter-transesterification ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้ เรียกได้ว่าเป็น “degradative side reactions” ที่เกิดแข่งกับปฏิกิริยาการแผ่ขยายของการเปิดวงไซคลิกมอนอเมอร์ที่เปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ โดยมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ไค่ลดลง สาเหตุเนื่องมาจากสแตนนัสออกโทเอทไม่เพียงแต่จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับหมู่คาร์บอนิลของมอนอเมอร์เท่านั้น ยังสามารถโคออร์ดิเนตกับหมู่คาร์บอนิลในสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นด้วย เมื่อมอนอเมอร์เกิดพอลิเมไรซ์ไปเป็นพอลิเมอร์ไค่ จะสมบูรณ์ จึงทำให้ระบบมีสแตนนัสออกโทเอท ที่จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ดังกล่าวได้ง่ายขึ้น และเป็นที่ทราบกันดีว่า สแตนนัสออกโทเอท เป็นตัวเร่งของปฏิกิริยาดีพอลิเมไรเซชันได้ดีพอๆ กับที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชัน[53] กลไกของปฏิกิริยาข้างเคียงเหล่านี้[32] แสดงดังแผนผัง 5.2

ในงานวิจัยนี้ นอกจากสังเคราะห์เทอร์พอลิเมอร์ที่สนใจของ PLG-b-PEG-b-PLG แล้ว ยังได้ทำการสังเคราะห์ ABA ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ของ PLL-b-PEG-b-PLL ขึ้นเพื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างไตรบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ กรณีที่ใช้และไม่ใช้ไกลคอไลด์เป็นโคมอนอเมอร์

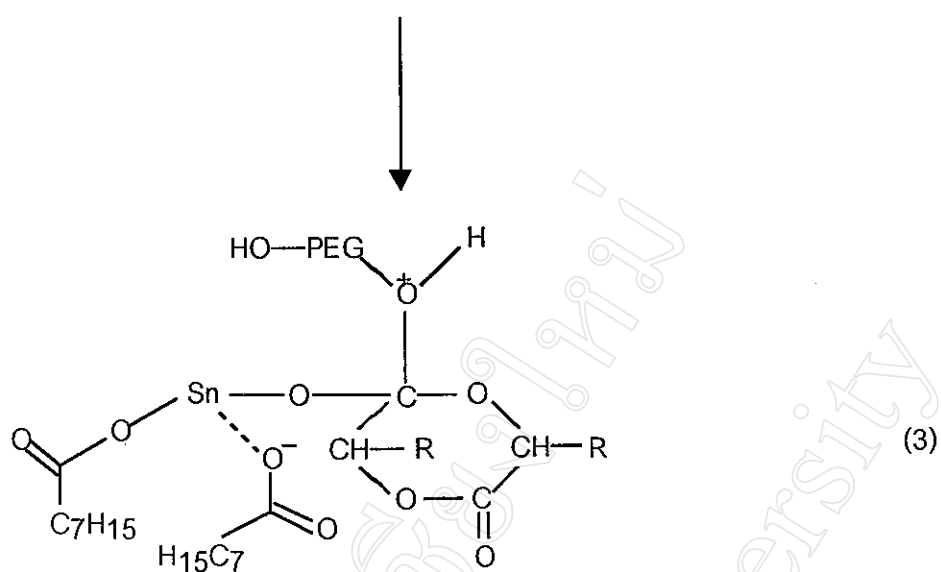
แผนผัง 5.1

กลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของไซคลิกเอสเตอร์มอนอเมอร์

1. การริเริ่มปฏิกิริยา (Initiation)

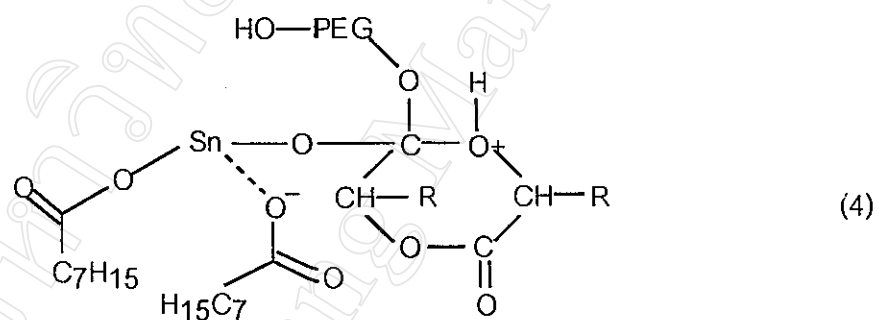


R = H or CH₃ ; SO = Sn(OCOC₇H₁₅)₂ ; PEG = $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$



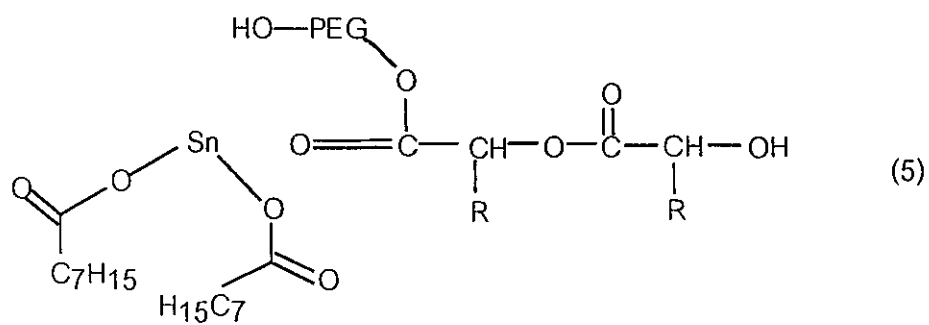
proton transfer

↓

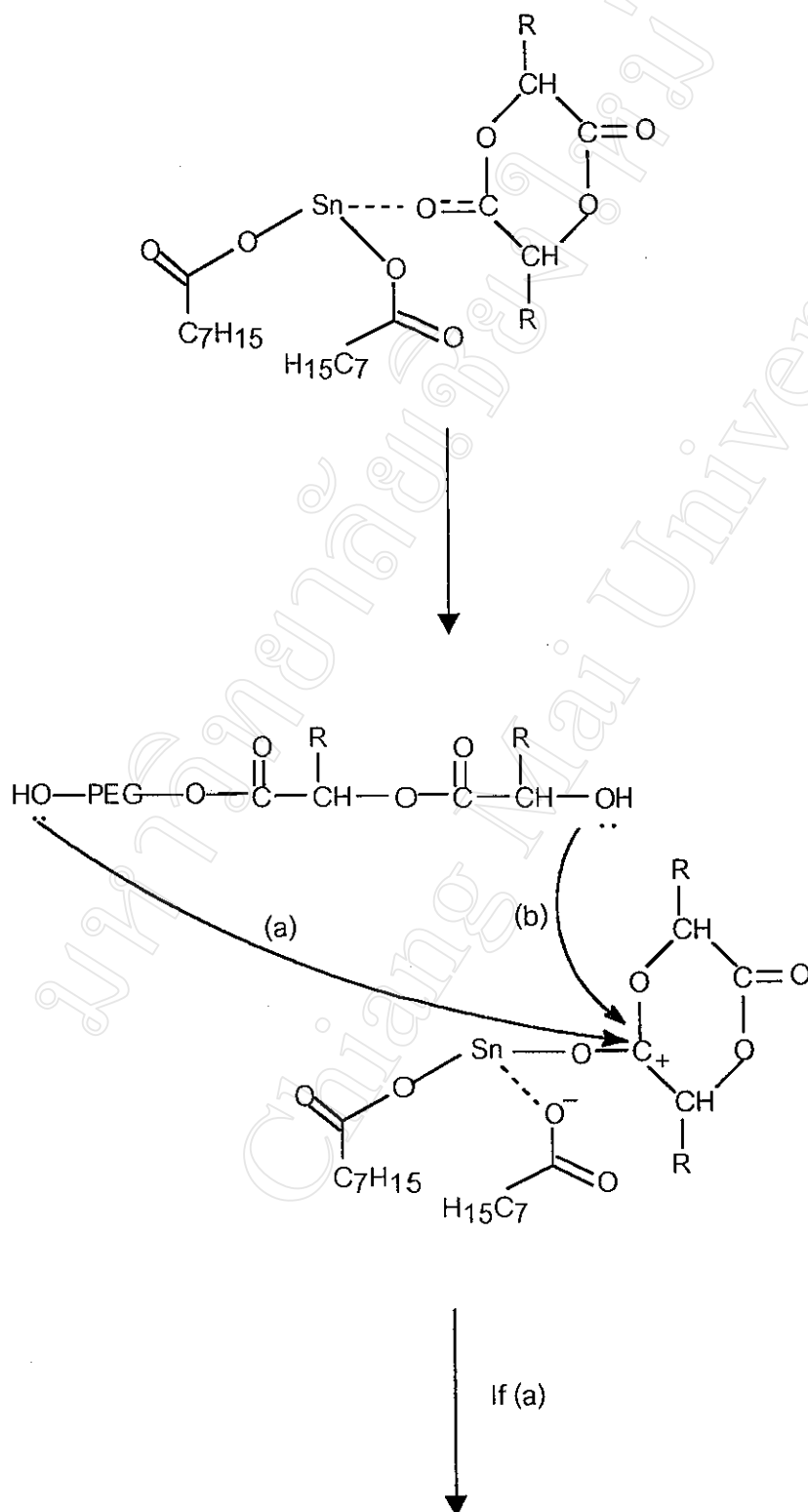


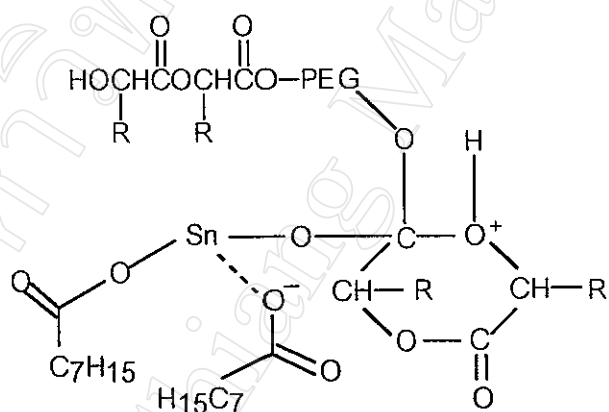
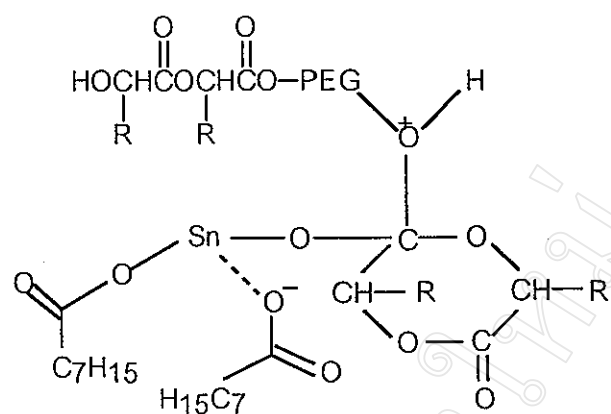
ring-opening

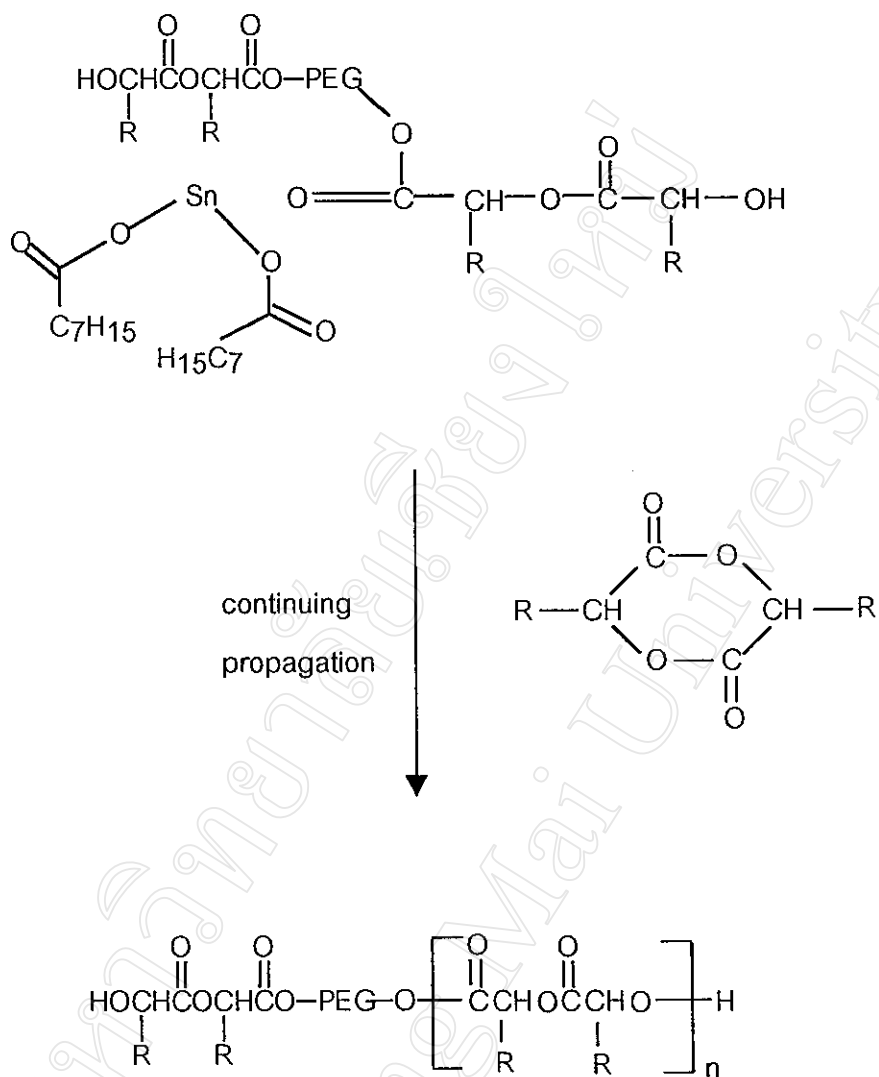
↓



2. การแผ่ขยายสายโซ่ (Propagation)





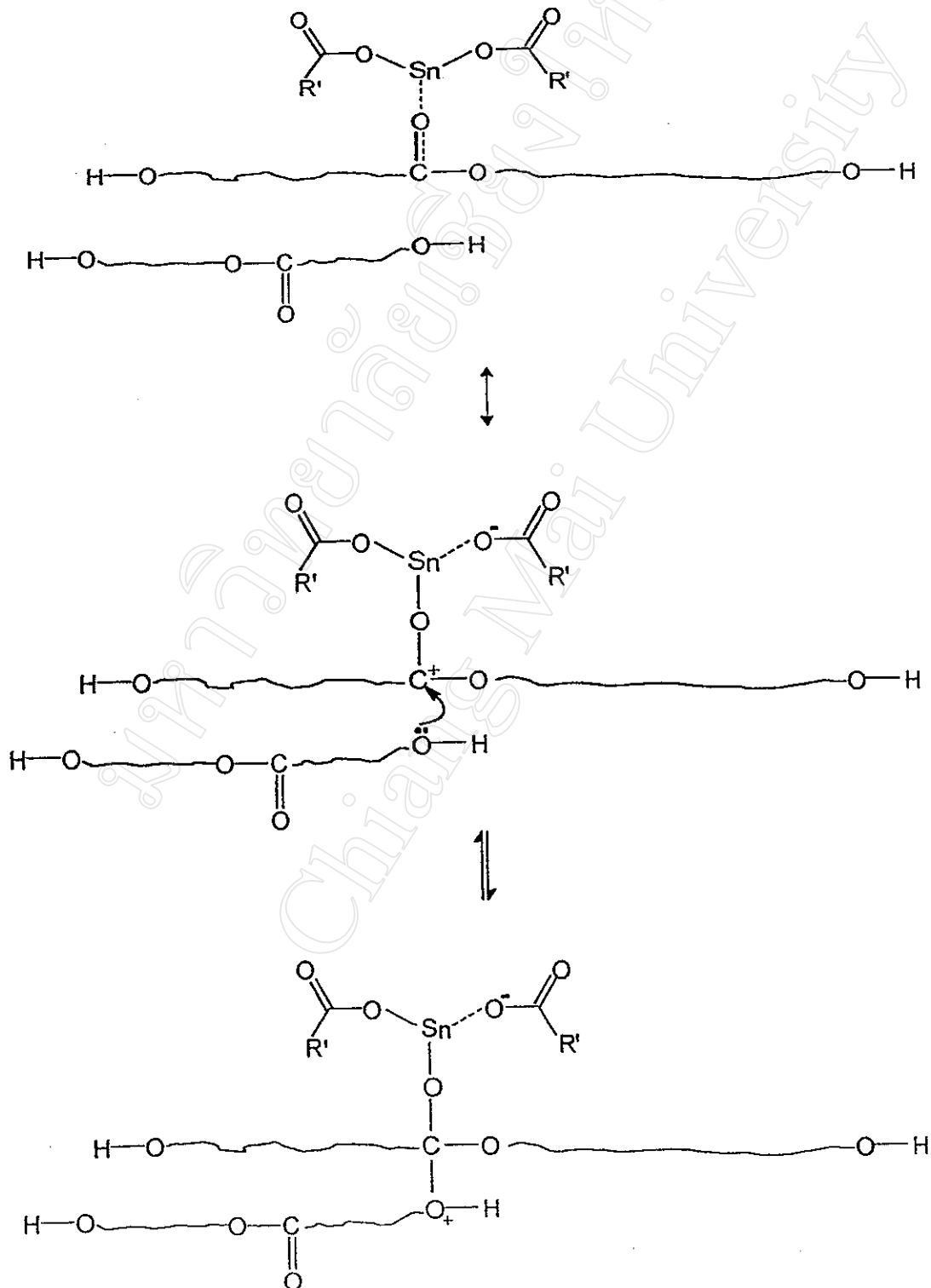


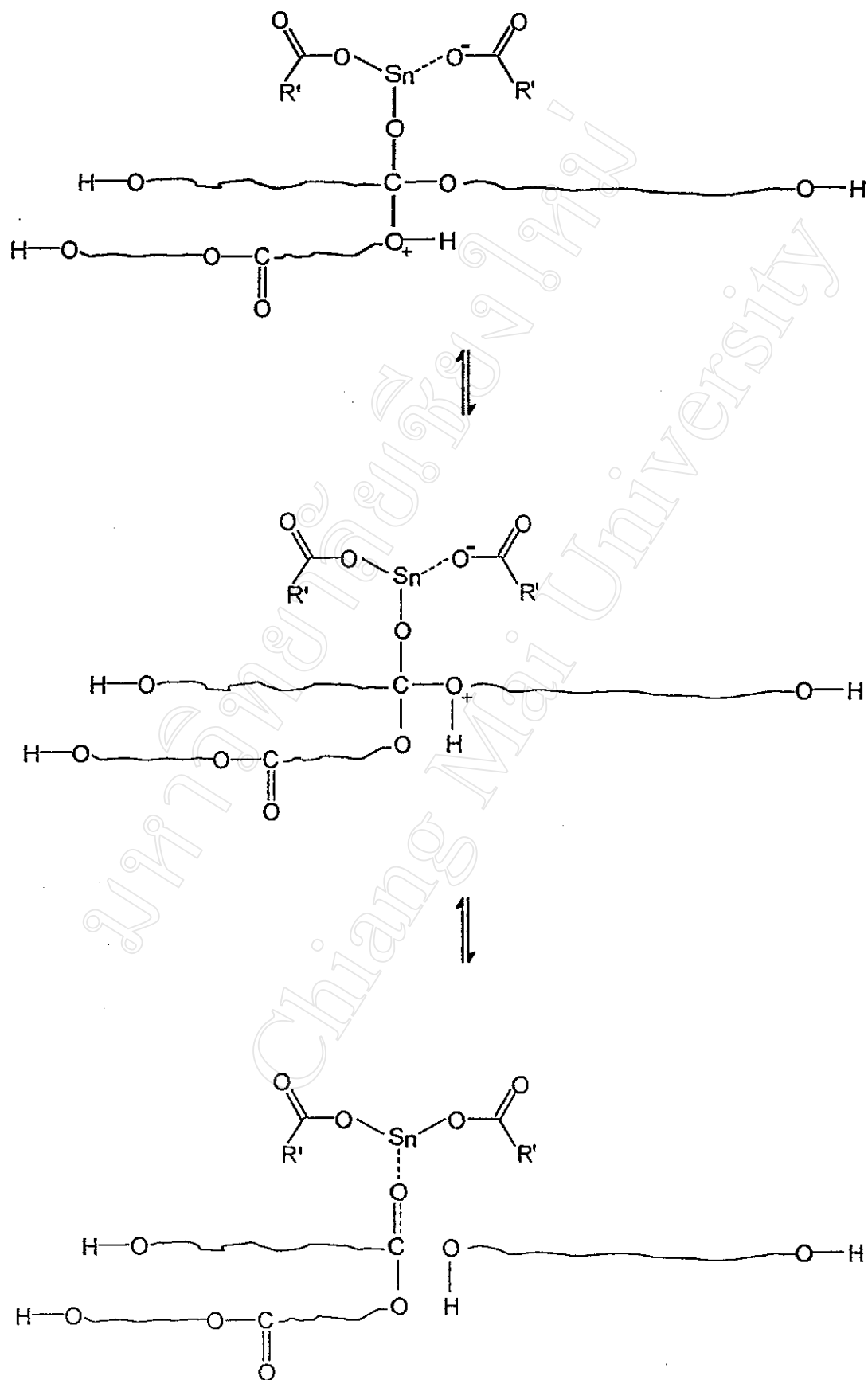
hydroxyl-terminated terpolymer

แผนผัง 5.2

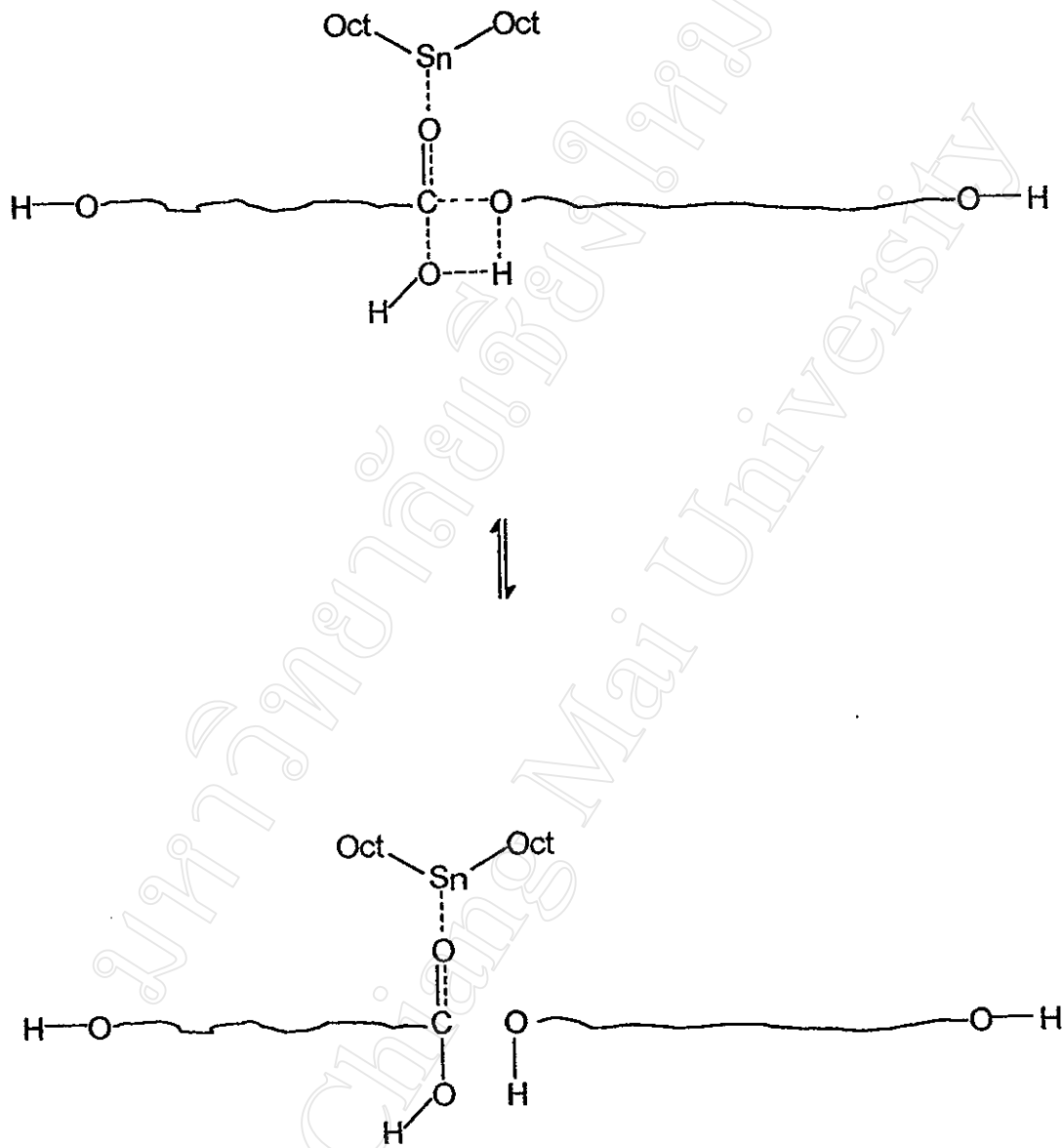
กลไกของปฏิกิริยาการตัดสายโซ่

(ก) แอลกอฮอล์ไฮซิส โดยหมู่ปลายที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Alcoholysis by Hydroxyl End groups)

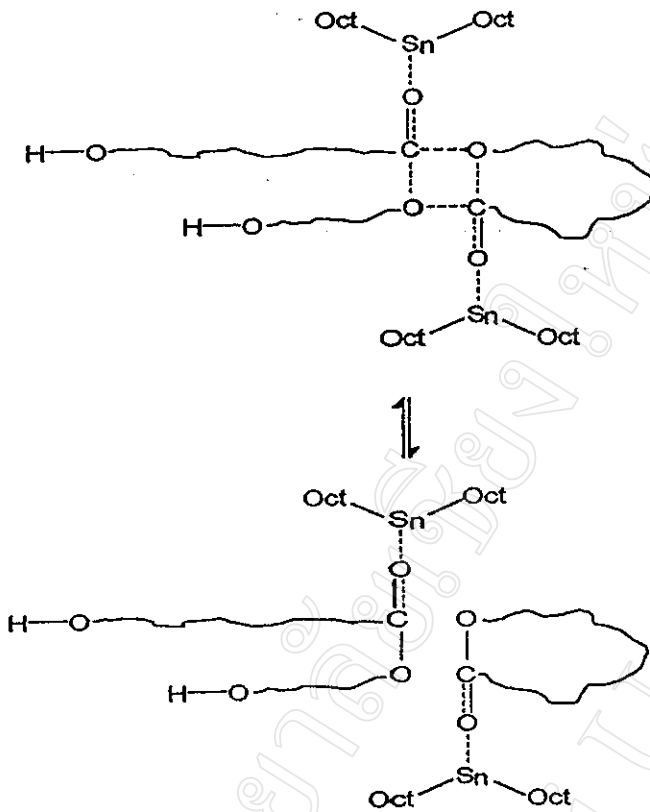




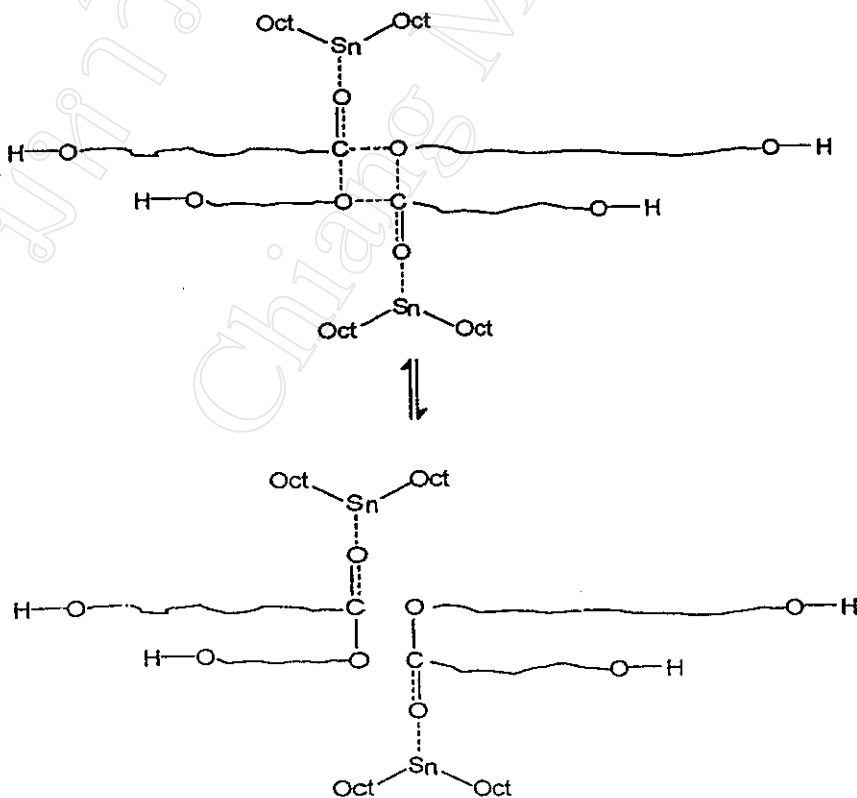
(จ) ไฮโดรไลซิสด้วยความชื้น (Hydrolysis by Moisture Impurities)



(ค) ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันภายในโมเลกุล (Intramolecular Transesterification)



(ง) ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Transesterification)



5.3 การหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้สภาวะที่เลือกใช้จำเป็นต้องได้รับการวิเคราะห์หา ลักษณะเฉพาะ เพื่อพิสูจน์ว่ามีสมบัติหรือโครงสร้างโมเลกุลเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ สำหรับ งานวิจัยนี้ ได้ใช้หลายๆ เทคนิคด้วยกัน ได้แก่ เทคนิคทางสเปกโตรสโคปี (FT-IR, $^1\text{H-NMR}$ และ $^{13}\text{C-NMR}$) เทคนิคทางความร้อน (DSC และ TG) และการหาน้ำหนักโมเลกุล (การหาค่าความหนืดของสารละลายเจือจาง และ GPC) สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

5.3.1 องค์ประกอบของพอลิเมอร์ (Polymer Composition)

เทคนิคที่มีความสำคัญ สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้ คือ $^1\text{H-NMR}$ จากผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมในหัวข้อ 4.2.2.1.4 พบว่า องค์ประกอบ สุกท้าย (โมล %) ของ PLL-b-PEG-b-PLL ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ และ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ (ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการอบไล่มอนอเมอร์) มีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบของโคมอนอเมอร์เริ่มต้น ดังแสดงในตาราง 4.22–4.23 ซึ่งแสดงว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันดำเนินไปโดยมีการเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (คอนเวอร์ชัน) ครบถ้วน ภายใต้สภาวะการทดลองที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละของผลผลิตที่สูง (% yield ≥ 90) ในกรณีของ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ ถ้าปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้มีคอนเวอร์ชันไม่สมบูรณ์ องค์ประกอบของเทอร์พอลิเมอร์ที่ได้ น่าจะมีแอล-แลคไทด์น้อยกว่าองค์ประกอบของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นมาก ทั้งนี้เนื่องจาก องค์ประกอบสุกท้ายของเทอร์พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของโคมอนอเมอร์เริ่มต้น และอัตราส่วนความว่องไวของมอนอเมอร์ (monomer reactivity ratios) โดยทั่วไปพบว่าไกลคอลไคด์ มีความว่องไวมากกว่าแอล-แลคไทด์ ในการเกิดโคพอลิเมอไรเซชันที่ริเริ่มปฏิกิริยด้วยสแตนนัสออกโทอพ[9,53] ในทางปฏิบัติสามารถควบคุมปริมาณของมอนอเมอร์เริ่มต้นได้ แต่ไม่สามารถควบคุมปริมาณอัตราส่วนความว่องไวของมอนอเมอร์ได้ เนื่องจากอัตราส่วนนี้เป็นความว่องไวสัมพัทธ์ของกลุ่มมอนอเมอร์ โดยเฉพาะในกรณีของมอนอเมอร์ที่เป็นวงของ แอล-แลคไทด์ และไกลคอลไคด์ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ธรรมชาติของอะตอมภายในวง ขนาดของวงและปริมาณความเครียดของวง ธรรมชาติและตำแหน่งของหมู่แทนที่บนวง ชนิดของตัวริเริ่ม/ตัวเร่งที่ใช้ และสภาวะของปฏิกิริยาที่ใช้ (ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวริเริ่ม/ตัวเร่ง อุณหภูมิ ความดัน และเวลา)

เมื่อองค์ประกอบของ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ ทุกๆ อัตราส่วนโดยโมลของแอล-แลคไทด์ : ไกลคอลไคด์ : พอลิเอริลีนไกลคอล ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับโคมอนอเมอร์เริ่มต้น จึงมีความเป็นไปได้ที่เทอร์พอลิเมอร์จะมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ คือ มี PEG เป็นบล็อกกลางที่อยู่ระหว่างบล็อกข้างทั้งสองที่เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของแอล-แลคไทด์และไกลคอลไคด์ อย่างไรก็ตามยังมีความไม่ชัดเจนเกี่ยวกับ การแปรผันขององค์ประกอบ หรือ “composition drift” ที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากความว่องไวของมอนอเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน มีผลทำให้องค์ประกอบตอนเริ่มต้น ต่างไปจากองค์ประกอบสุดท้าย ส่งผลให้เกิดลักษณะที่เป็นบล็อกของไกลคอลไคด์ และบล็อกของแอล-แลคไทด์แยกกัน แทนที่จะเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของมอนอเมอร์ทั้งสอง อยู่ในบล็อกข้างทั้งสองของเทอร์พอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์สุดท้ายอื่นๆ เช่น โฮโมพอลิเมอร์ ของ PLL หรือ PG เกิดขึ้นและเป็นแฟรคชันที่ปนอยู่กับเทอร์พอลิเมอร์ เพราะฉะนั้นผลจาก $^1\text{H-NMR}$ ที่เกี่ยวกับองค์ประกอบของเทอร์พอลิเมอร์ น่าจะพิจารณาได้ว่าเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นๆ ที่สามารถพิสูจน์หรือแยกความแตกต่างของแต่ละส่วนประกอบดังกล่าว ได้แก่ เทคนิค $^{13}\text{C-NMR}$ DSC และ GPC

5.3.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของเทอร์พอลิเมอร์ (Polymer Microstructure)

เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเทอร์พอลิเมอร์ ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายลำดับของมอนอเมอร์ คือ $^{13}\text{C-NMR}$ สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่า ข้อมูลที่ได้จาก $^{13}\text{C-NMR}$ สเปกตรัมของ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ ในแต่ละสัดส่วนโดยโมลของโคมอนอเมอร์ มีลักษณะคล้ายกัน แต่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของโครงสร้างในระดับจุลภาคของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ เมื่อทำการขยายพีคที่เป็นคาร์บอนิลคาร์บอน ในช่วง $\delta = 165\text{--}175\text{ ppm}$ เนื่องจากคาร์บอนิลคาร์บอนมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงลำดับของมอนอเมอร์ โดยจะพิจารณาผลที่เป็นไตรแอดแบบต่างๆ ของคาร์บอนิลคาร์บอน ที่จะปรากฏสัญญาณเป็นพีคเล็กๆ เพิ่มขึ้นระหว่างคาร์บอนิลคาร์บอนของ PG ที่ $\delta \approx 166.5\text{ ppm}$ และ คาร์บอนิลคาร์บอนของ PLL ที่ $\delta \approx 169.5\text{ ppm}$ ซึ่งแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของ lactyl unit (L) ในแอล-แลคไทด์ และ glycolyl unit (G) ในไกลคอลไคด์ ทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่าเทอร์พอลิเมอร์มีลำดับของมอนอเมอร์ที่เป็นไตรแอดแบบต่างๆ เกิดขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.37 ซึ่งเป็นหลักฐานยืนยันว่า บล็อกข้างทั้งสองของเทอร์พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของแอล-แลคไทด์และไกลคอลไคด์ คือมีการกระจายของหน่วย L และ G อยู่บนบล็อกข้างทั้งสองของสายโซ่ โดยแสดงผลที่ต่างไปจากการเกิดเป็นบล็อกที่แยกจากกันของมอนอเมอร์ทั้งสองหรือการเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ ที่จะแสดงผลเป็นไตรแอดของ LLL

หรือ GGG เท่านั้น จากการสังเกตพื้นที่ใต้พีคของคาร์บอนิลคาร์บอนของไตรแอคแบบต่างๆ และจากการเปรียบเทียบความเข้มของพีคเหล่านี้ สามารถบอกได้ว่ามีไตรแอคของ LLL และ GGG อยู่มากกว่าไตรแอคของ GLL LLG GGL และ LGG ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าบล็อกข้างทั้งสองของเทอร์พอลิเมอร์มีลักษณะที่เป็นบล็อกของแอล-แลคไทด์และไกลคอลไคด์มากกว่าลักษณะที่เป็นแบบสุ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างของความว่องไวของมอนอเมอร์ทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่าใน ^{13}C -NMR สเปกตรัม มีพีคของคาร์บอนิลคาร์บอนที่ปรากฏที่ตำแหน่ง $\delta \approx 177\text{-}178$ ppm ซึ่งคาดว่า จะเป็นพีคของคาร์บอนิลคาร์บอนในสแตนนัสออกโทเอท และการปรากฏของพีคนี้ อาจเนื่องมาจาก ในขั้นตอนของการทำให้บริสุทธิ์โดยการอบไล่มอนอเมอร์ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงนั้น ไม่สามารถกำจัดสิ่งปลอมปนนี้ออกไปได้หมด

5.3.3 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ (Polymer Morphology)

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มาจากการศึกษา พฤติกรรมการหลอมตัวของผลึกโดยใช้เทคนิค DSC ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และความร้อนของการหลอมตัวของผลึก (ΔH_m) ได้ ผลที่ได้แสดงในตาราง 4.39-4.40 พบว่า T_m และ ΔH_m ของทั้ง PLL-b-PEG-b-PLL ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ และ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ในทุกๆอัตราส่วนโดยโมลของโคมอนอเมอร์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของ PEG และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของปริมาณของ PEG (โมล%) ในโคมอนอเมอร์ที่เปลี่ยนแปลง โดยน้ำหนักโมเลกุลของ PEG คงที่ สามารถอธิบายได้ว่า ในระบบที่มี PEG เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา เมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้จำนวนสายโซ่ของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสายโซ่ลดลง ซึ่งส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลงด้วย ตัวอย่างเช่น PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 90 : 9.9 : 0.1 พบว่ามี T_m และ ΔH_m สูงกว่า PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 84 : 15 : 1 และเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่เปลี่ยนแปลง โดยปริมาณของ PEG (โมล%) ในโคมอนอเมอร์คงที่ จะมีผลต่อการเกิดผลึกของโค/เทอร์พอลิเมอร์ สามารถอธิบายได้ว่า ในสายโซ่ของไตรบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ที่มี PLL เป็นองค์ประกอบหลัก และมี PEG เป็นบล็อกกกลาง มีความเป็นไปได้ที่บล็อกของ PEG จะไปรบกวนการเกิดเป็นผลึกของ PLL โดยการขัดขวางการเข้ารวมกันของแอล-แลคไทด์มอนอเมอร์เป็น PLL สายโซ่ยาว จึงทำให้เกิดผลึกยาก (ดังที่เคยมีปรากฏในงานวิจัย[24, 49] ที่ศึกษาเกี่ยวกับไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ของแอล-แลคไทด์และพอลิเอธิลีนไกลคอล โดยมีบล็อกข้างที่เป็นทั้งสายโซ่ยาว

และสายโซ่สั้นของ PLL พบว่าทั้ง PLL และ PEG มีการรบกวนการเกิดผลึกซึ่งกันและกัน) และเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูงขึ้น ซึ่งก็แสดงว่าบล็อกล่างของ PEG ที่เป็น “soft” บล็อกมีความยาวมากขึ้น ทำให้เกิดผลของความยืดหยุ่น (flexibilizing effect) เพิ่มขึ้น นั่นคือสายโซ่มีการเคลื่อนไหวหรือมีความยืดหยุ่นมากขึ้น การเกิดผลึกจึงลดลง ซึ่งสังเกตได้ว่า PLL-b-PEG-b-PLL มีช่วงของการหลอมตัวของผลึกต่ำกว่า PLL โฮโมพอลิเมอร์ แต่มีช่วงของการหลอมตัวของผลึกสูงกว่า PLG-b-PEG-b-PLG กรณีที่โค/เทอร์พอลิเมอร์ทั้งสองมีปริมาณของ PEG (โมล %) ในองค์ประกอบของโคมอนอเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เท่ากัน ตัวอย่างเช่น PLL-b-PEG900-b-PLL ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : PEG900 = 99 : 1 พบว่ามี T_m และ ΔH_m สูงกว่า PLG-b-PEG900-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG900 = 84 : 15 : 1 ทั้งนี้เนื่องจาก PLG-b-PEG-b-PLG มีไกลคอลไคต์เพิ่มเข้ามาเป็นบล็อกข้างร่วมกับแอล-แลคไทด์ ซึ่งมีผลทำให้สายโซ่ PLL ที่เป็นองค์ประกอบหลัก มีความไม่สม่ำเสมอและเกิดผลึกได้ยากกว่า PLL-b-PEG-b-PLL ที่มี PLL เป็นบล็อกข้างเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณของไกลคอลไคต์ (โมล %) ในโคมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น โดยที่จำนวนโมลของ PEG และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ไม่เปลี่ยนแปลง มีผลทำให้ช่วงของการหลอมตัว (T_m และ ΔH_m) ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบล็อกข้างของเทอร์พอลิเมอร์มีไกลคอลไคต์แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของ PLL มากขึ้น ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นและมีความเป็นผลึกลดลง ตัวอย่างเช่น PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 84 : 15 : 1 มีช่วงของการหลอมตัวสูงกว่า PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 74 : 25 : 1 และยังพบว่าเทอร์พอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG5600 = 74 : 25 : 1 ไม่ปรากฏช่วงของการหลอมตัวของผลึก จึงมีความเป็นไปได้ที่เทอร์พอลิเมอร์นี้มีสัณฐานวิทยาเป็นแบบอสัณฐาน เนื่องจากมีทั้งปริมาณของไกลคอลไคต์สูงในโคมอนอเมอร์และมี PEG น้ำหนักโมเลกุลสูงรวมอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน

แม้ว่าความร้อนของการหลอมตัวของผลึก (ΔH_m) ของโค/เทอร์พอลิเมอร์ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีโดยตรง แต่ก็บ่งบอกได้ว่าการเกิดโคพอลิเมอร์เชเช่นนี้มีผลทำให้ความร้อนของการหลอมตัวของผลึกหรือ % ความเป็นผลึกลดลง โดยคาดว่าคิกรีของความไม่สม่ำเสมอจะเพิ่มขึ้น และทำให้สายโซ่มีการจัดเรียงตัวเพื่อเกิดเป็นผลึกได้ยาก

การพิจารณาเกี่ยวกับการเกิดผลึก สามารถอธิบายได้โดยการประยุกต์ใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่รู้จักกันดี คือ

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T_m \Delta S_m \quad (5.1)$$

เมื่อ m แสดงถึง การหลอมตัว (melting)

ถ้าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ΔG_m เท่ากับศูนย์ ที่อุณหภูมิของการหลอมตัว (T_m) ดังนั้นสมการ 5.1 จะลดรูปเป็น

$$T_m = \Delta H_m / \Delta S_m \quad (5.2)$$

สมการ 5.2 ใช้สำหรับประมาณค่า T_m โดยพิจารณาจากพลังงานที่เอาชนะการหมุนของพันธะในผลึก ($\propto \Delta H_m$) และการเคลื่อนที่ของสายโซ่ในผลึกที่ถูกหลอม ($\propto \Delta S_m$) โดยทั่วไปจะพิจารณาว่า การลดลงของ ΔH_m มีมากกว่า การเพิ่มขึ้นของ ΔS_m ซึ่งเป็นเหตุผลว่า ทำไมการรวมกันของแอล-แลคไทด์และไกลคอลไคด์ใน PLG-b-PEG-b-PLG จึงลดลงเมื่อเทียบกับ PLL โสโมพอลิเมอร์

5.3.4 ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal Stability of Polymer)

ข้อมูลของการศึกษาเกี่ยวกับความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้จากเทคนิค TG ดังแสดงในตาราง 4.41-4.42 พบว่า PLL PG และ PEG โสโมพอลิเมอร์มีรูปแบบของการสูญเสียน้ำหนักทั้งหมดเพียงขั้นตอนเดียว ส่วน PLL-b-PEG-b-PLL ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ และ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ ในทุกๆ อัตราส่วนโดยโมลของโคมอนอเมอร์ มีรูปแบบการสูญเสียน้ำหนัก 2 ขั้นตอนคล้ายกัน แต่ % การสูญเสียน้ำหนักในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันตามปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ซึ่งสรุปได้ว่า % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกมีแนวโน้มลดลง (หรือ % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนที่สองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น) เมื่อปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น โดยที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น PLL-b-PEG5600-b-PLL ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : PEG5600 = 99 : 1 มี % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกน้อยกว่า PLL-b-PEG5600-b-PLL ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : PEG5600 = 99.9 : 0.1 หรือในกรณีของ PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 84 : 15 : 1 มี % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกน้อยกว่า PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 90 : 9.9 : 0.1

นอกจากนี้ % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกมีแนวโน้มลดลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น PLL-b-PEG5600-b-PLL ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : PEG5600 = 99 : 1 มี % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกน้อยกว่า PLL-b-PEG4000-b-PLL ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : PEG4000 = 99 : 1 หรือในกรณีของ PLG-b-PEG4000-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG4000 = 74 : 25 : 1

มี % การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนแรกน้อยกว่า PLG-b-PEG900-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG900 = 74 : 25 : 1

เมื่อพิจารณาถึง ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของไตรบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ ในทุกๆ อัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้น พบว่า PLL-b-PEG-b-PLL และ PLG-b-PEG-b-PLG มีอุณหภูมิการสลายตัวของทั้งสองขั้นตอนอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยในขั้นตอนแรกอยู่ในช่วง 150-380 °C และขั้นตอนที่สองอยู่ในช่วง 390-450 °C ดังนั้นจึงไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับปริมาณของ ไกลคอลไคด์หรือปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่เปลี่ยนแปลงว่ามีผลอย่างไรต่อช่วงอุณหภูมิการสลายตัว นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ทุกกรณีมี % การสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ (≥ 98 %) โดยมีกากที่ไม่ระเหยเหลืออยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจมีกลไกของการสลายตัวทางความร้อนที่เป็นได้ทั้ง intra- หรือ intermolecular transesterification

แม้ว่า TG ไม่ใช่เทคนิคที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างระดับจุลภาคของบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ แต่จุดประสงค์หลักสำหรับงานวิจัยนี้ คือเพื่อตรวจหาอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์สามารถหลอมได้อย่างปลอดภัย ในกรณีที่มีการนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปเป็นวัสดุอื่นๆ โดยกระบวนการทางความร้อน

5.3.5 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Polymer Molecular weight)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อประมาณค่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ภายใต้สภาวะที่เลือกใช้ ได้แก่ PLL โฮโมพอลิเมอร์ PLL-b-PEG-b-PLL ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ และ PLG-b-PEG-b-PLG ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ และได้ทำการพิสูจน์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค GPC เมื่อแยกการพิจารณาระหว่างสองเทคนิค ได้ข้อสรุปดังนี้ จากผลการหาค่าความหนืดของสารละลายเจือจางของพอลิเมอร์ ดังแสดงในตาราง 4.55 พบว่า พอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ทุกกรณี ยกเว้น PLL มีค่าความหนืดอินทรีนสิก ($[\eta]$) ต่ำ คือมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.9 dL/g และค่า $[\eta]$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์เริ่มต้นลดลงเหมือนดังที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นทั้งโคมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา เมื่อตัวริเริ่มปฏิกิริยามีปริมาณลดลง จำนวนสายโซ่พอลิเมอร์ที่ถูกริเริ่มจะลดลง มีผลทำให้ความยาวของแต่ละสายโซ่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ใช้เป็นบล็อกกลางของไตรบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ เพิ่มขึ้น ควรจะมีค่า $[\eta]$ เพิ่มขึ้น แต่ผลที่ได้ไม่เป็นไปตามแนวโน้มดังกล่าว ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่า $[\eta]$ ของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ แรงกระทำระหว่างโค/เทอร์พอลิเมอร์ –

ตัวทำลายในสารละลาย และโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ เป็นต้น แม้ว่าจะมีความพยายามที่จะควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่สามารถควบคุมได้ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ และอุณหภูมิแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงไม่สามารถนำค่า $[\eta]$ ของ โค/เทอร์พอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบโดยโมลของโค-มอนอเมอร์เหมือนกันแต่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน มาเปรียบเทียบกันได้ แม้ว่าวิธีการหาค่าความหนืดของสารละลายเจือจางของพอลิเมอร์ ใช้เพื่อบ่งบอกถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ แต่วิธีการนี้ไม่ใช่ absolute method และ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่คิดจากค่าความหนืด ($\bar{M}_v$) ของโค/เทอร์พอลิเมอร์ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจาก ค่าคงที่ K และ a ในสมการของ Mark-Houwink ไม่มีปรากฏในแหล่งอ้างอิงใดๆ

จากการวิเคราะห์ผลการพิสูจน์หาน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยเทคนิค GPC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ในทุกกรณีมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ unimodal ที่มีค่า $\bar{M}_w/\bar{M}_n$ อยู่ระหว่าง 1.4-2.7 และเมื่อพิจารณาไตรบล็อกโค/เทอร์พอลิเมอร์ที่มีปริมาณของ PEG ในโคมอนอเมอร์ 1 โมล% โดยที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG มีการเปลี่ยนแปลงพบว่า PLL-b-PLL-b-PLL มีความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลระหว่างค่าที่ได้จาก GPC กับค่าทางทฤษฎี น้อยกว่า PLG-b-PEG-b-PLG ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PLG-b-PEG-b-PLG มีไกลคอลลิด์เป็นองค์ประกอบของโคมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ที่มี PLL เป็นองค์ประกอบหลัก มี PG ที่มีสมบัติความชอบน้ำมากกว่า PLL อยู่ด้วย อาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยความชื้น และส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง โดยเฉพาะในกรณีของ PLG-b-PEG-b-PLG ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ LL : G : PEG900 = 84 : 15 : 1 LL : G : PEG4000 = 84 : 15 : 1 LL : G : PEG4000 = 74 : 25 : 1 และ LL : G : PEG5600 = 74 : 25 : 1 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จาก GPC มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีมาก และน่าสังเกตว่า เทอร์พอลิเมอร์เหล่านี้มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง ($\bar{M}_w/\bar{M}_n \geq 2.0$) อย่างไรก็ตาม ไม่อาจสามารถสรุปได้อย่างชัดเจนและยากที่จะอธิบายถึงผลดังกล่าว แต่อาจมีความเป็นไปได้ที่สารตัวอย่างของเทอร์พอลิเมอร์เหล่านี้ถูกไฮโดรไลซ์โดยความชื้นระหว่างที่รอการวิเคราะห์ นอกจากนี้สิ่งปลอมปนที่เป็นกรดแอล-แลคติก และกรดไกลคอลลิด์ ซึ่งปนอยู่กับมอนอเมอร์ (ทราบจากการหา % purity ของมอนอเมอร์) สามารถริเริ่มปฏิกิริยาได้ โดยใช้หมู่ไฮดรอกซิล ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง

แม้ว่าทั้งสองเทคนิคนี้จะให้ผลการพิสูจน์หาน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สอดคล้องกับทางทฤษฎีทั้งหมด แต่ก็นับว่ามีประโยชน์มากสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากยังมีบางข้อมูลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการพิสูจน์หาน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากการหาค่าความหนืดของสารละลายเจือจางของพอลิเมอร์ และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC กับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการหาค่าความหนืดของสารละลายเจือจาง และการวิเคราะห์โดย GPC กับค่าทางทฤษฎี

พอลิเมอร์	องค์ประกอบโดยโมล ของโคมอนอเมอร์ LL : G : PEG	ค่าความหนืด อินทรีนสิก, $[\eta]$ (dl/g)	$\bar{M}_n$	
			จาก GPC	จากการ คำนวณ ^(ก)
PLL	100 : 0 : 0	1.392	26901	$\bar{M}_v^{(ข)} = 46500$
PLL-b-PEG900-b-PLL	99 : 0 : 1	0.2758	13183	15156
PLL-b-PEG4000-b-PLG	99 : 0 : 1	0.2264	12706	18256
PLL-b-PEG5600-b-PLG	99.9 : 0 : 0.1	0.7926	40103	149456
PLL-b-PEG5600-b-PLG	99 : 0 : 1	0.3258	11004	19856
PLG-b-PEG900-b-PLG	84 : 15 : 1	0.2682	5104	14736
PLG-b-PEG900-b-PLG	74 : 25 : 1	0.3852	13440	14456
PLG-b-PEG4000-b-PLG	90 : 9.9 : 0.1	0.8930	31371	145084
PLG-b-PEG4000-b-PLG	84 : 15 : 1	0.2767	8858	17836
PLG-b-PEG4000-b-PLG	74 : 25 : 1	0.2214	4591	17556
PLG-b-PEG5600-b-PLG	90 : 9.9 : 0.1	0.9900	28999	146684
PLG-b-PEG5600-b-PLG	74 : 25 : 1	0.2122	5574	19156

หมายเหตุ : (ก) และ (ข) แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

งานวิจัยนี้ ได้แสดงให้เห็นว่า ABA ไตรบล็อกเทอร์พอลิเมอร์ของ PLG-b-PEG-b-PLG สามารถสังเคราะห์ได้โดยพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของ แอล-แลคไทด์ และไกลคอลไคด์ โดยมีพอลิเอธิลีนไกลคอล ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่ม และมีสแคนนัสออกโทเทพเป็นตัวเร่ง ภายใต้สภาวะที่เลือกใช้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์หลักคุณเฉพาะของเทอร์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้หลายเทคนิคด้วยกัน ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ล้วนแต่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ แม้ว่าผลการวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเฉพาะต่างๆ ของเทอร์พอลิเมอร์ชนิดนี้ยังพบว่ามีข้อบกพร่องหลายอย่างที่ต้องแก้ไข ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลของเทอร์พอลิเมอร์ที่ได้ต่ำกว่าที่คาดไว้มาก ทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเฉพาะได้ เนื่องจากวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีควรต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง นอกจากนี้การที่มีสิ่งปลอมปนในเทอร์พอลิเมอร์ ไม่ว่าจะเป็นมอนอเมอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา ภาวของตัวเร่ง และไฮโดรพอลิเมอร์ ซึ่งล้วนแต่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ หากข้อบกพร่องเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงแก้ไข คาดว่าจะสามารถพัฒนาเทอร์พอลิเมอร์ชนิดนี้ เพื่อใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงงานต่อไป

1. ในการสังเคราะห์ ABA ไตรบลิอ็อกเทอร์พอลิเมอร์ ที่มีแอล-แลคไทด์ และไกลคอลไลด์เป็นโค-มอนอเมอร์ ควรต้องมีความพยายามที่จะปรับปรุงสภาวะของปฏิกิริยาให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ได้แก่ การเลือกใช้ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่ง/ตัวริเริ่ม อัตราส่วนโดยโมลของมอนอเมอร์ อุณหภูมิและเวลา ตลอดจนการควบคุมความชื้นหรือความบริสุทธิ์ของมอนอเมอร์ เพื่อการสังเคราะห์ให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับทางทฤษฎี
2. การออกแบบหรือการเลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลของโคมอนอเมอร์ ควรให้มีความหลากหลาย โดยอาจมีการศึกษาถึงอิทธิพลของมอนอเมอร์แต่ละชนิด ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์พอลิเมอร์ เช่น ให้อัตราส่วนโดยโมลของกลุ่มมอนอเมอร์ระหว่างแอล-แลคไทด์กับไกลคอลไลด์คงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอธิลีนไกลคอล หรือทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกลุ่มมอนอเมอร์ แต่กำหนดให้ปริมาณของพอลิเอธิลีนไกลคอลคงที่ เป็นต้น
3. วิธีการทำพอลิเมอร์ให้บริสุทธิ์ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นควรมีการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น เพื่อกำจัดสิ่งปลอมปนต่างๆ ออกไปให้มากที่สุด โดยอาจทำการอบไล่มอนอเมอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมตัวของผลึกแอล-แลคไทด์ ($T_m \sim 95-100^\circ\text{C}$) ซึ่งมีค่าสูงกว่าจุดหลอมตัวของผลึกไกลคอลไลด์ ($T_m \sim 78-85^\circ\text{C}$) เช่น ใช้อุณหภูมิ 95°C และอาจใช้เวลานานกว่า 10 ชั่วโมง เป็นต้น