

การสังเคราะห์และวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสารประกอบโลหะดีบุก (II) ที่มี Schiff's Base Ligand
เป็นองค์ประกอบ เพื่อใช้เร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง
ของแอล-แลคไทด์และแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน

Synthesis and Characterization of Tin (II) Complex Containing Schiff's Base Ligand
for the Ring-Opening Polymerization of L-Lactide and ϵ -Caprolactone

ปวีณัฐ พรหมอ่อน (Paweenuch Prom-on)* ดร.กัมภีร์ พรหมพราญ (Dr.Khamphree Phomphrai)**

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้พลาสติกหรือพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามขยะพลาสติกก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมทั่วโลก พอลิแลคไทด์และพอลิแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน จัดเป็นพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายเองได้ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารประกอบโลหะดีบุก(II) ชนิดใหม่ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน ซึ่งสารประกอบโลหะดีบุก(II) ที่มี Schiff's Base Ligand เป็นองค์ประกอบสามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์ได้เร็วกว่าและแอปซิลอน-คาโปรแลคโตนได้ โดยที่พอลิแลคไทด์ที่ได้ให้ค่าดัชนีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในช่วงแคบ

ABSTRACT

Nowadays, polymeric materials known as plastics play important roles in our lives. However, plastic wastes can cause environmental pollutions around the world. Polylactide (PLA) and poly(ϵ -caprolactone) (PCL) are some of the well-known biodegradable polyesters. Herein, a new tin(II) complex has been developed for the ring-opening polymerization (ROP) rate of L-lactide that is more rapid than that of ϵ -caprolactone. The new tin(II) complexes is designed to have a side arm that is self-containing initiator in the initiation step. The tin(II) complex containing Schiff's base ligand **1** polymerized L-lactide and ϵ -caprolactone giving polymers with narrow polydispersity index (PDI).

คำสำคัญ: พอลิแลคไทด์ พอลิแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน สารประกอบโลหะดีบุก(II)

Key Words: Polylactide, poly(ϵ -caprolactone), Tin(II) complex

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีวิเคราะห์และเคมีอินทรีย์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

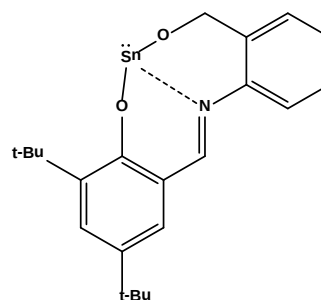
บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกหรือพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เครื่องอำนวยความสะดวกไม่ว่าจะเป็นโทรทัศน์ ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง พลาสติก ภาชนะใส่ของต่างๆ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ หรือแม้แต่อุปกรณ์ทางการแพทย์ก็ล้วนมีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาขยะมูลฝอยและมลพิษทางสิ่งแวดล้อม พอลิเอสเทอร์จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในปัจจุบัน โดยเฉพาะพอลิแอลแลคไทด์ (PLA) และพอลิแอปซิลอน-คาโพรแลกโตน (PCL) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ มีความสามารถเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต และมีความเป็นพิษต่ำ พอลิเอสเทอร์เหล่านี้สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง ซึ่งในขั้นตอนการสังเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเป็นตัวริเริ่มในปฏิกิริยาและควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพอลิเอสเทอร์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

โดยปกติแล้วพอลิเอสเทอร์จะมีรูปร่างหลายแบบ เช่น เส้น คาว กิ่ง เป็นต้น โดยแต่ละรูปร่างจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพอลิเอสเทอร์แบบวงเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากพอลิเอสเทอร์แบบวงมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างจากแบบเส้น เช่น อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนืด ความยืดหยุ่น เป็นต้น จากรายงานของ Nasongkla และคณะ (2009) ได้กล่าวว่า โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นตัวนำส่งยา เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ระยะเวลาการเดินทางของตัวนำส่งยาในกระแสเลือดไปยังอวัยวะเป้าหมายได้นานขึ้น โดยที่พอลิเมอร์แบบวงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สามารถอยู่ในกระแสเลือดได้นานกว่าแบบเส้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาโรค¹ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบวงกันอย่างแพร่หลาย Culkin และคณะ (2007) Jeong (2009) และ

Shin (2012) ได้ทำการศึกษาสวิตเทอร์อีนิก พอลิเมอร์ไรเซชันของแลคไทด์และแลคโตน โดยใช้เฮทเทอโรไซคลิก คาร์บินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบวง^{2,3,4} ต่อมา Phomphrai และคณะ (2011) และ Piromjitpong (2012) ได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาระบบใหม่ที่ใช้โลหะดีบุก(II) เป็นอะตอมกลางและลิแกนด์กลุ่มอะมิโนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมอนอเมอร์อะมิโนของดีบุก (II) โดยอาศัยอิลีกตรอนคู่โดดเดี่ยวบนโลหะดีบุก (II) เป็นตัวริเริ่มการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแลคไทด์และแอปซิลอน-คาโพรแลกโตนแล้วนำไปสู่การเกิดพอลิเมอร์แบบวง^{5,6}

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาคือใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอลแลคไทด์และแอปซิลอน-คาโพรแลกโตนโดยออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โลหะดีบุก(II) เป็นอะตอมกลางและลิแกนด์กลุ่มชิฟเบส เนื่องจากง่ายต่อการสังเคราะห์และปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่าย โดยในงานวิจัยนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกออกแบบให้มีสายโซ่ที่เกาะบนชิฟเบสลิแกนด์ดังรูปที่ 1 โดยสารประกอบโลหะดีบุก (II) มีลักษณะเด่นคือสามารถเป็นตัวริเริ่มการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงด้วยตัวเองได้ โดยอาศัยหมู่แอลคอกซีของสายโซ่ที่เกาะบนลิแกนด์กลุ่มชิฟเบสในการเริ่มปฏิกิริยา



รูปที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่มีชิฟเบสลิแกนด์เป็นองค์ประกอบ

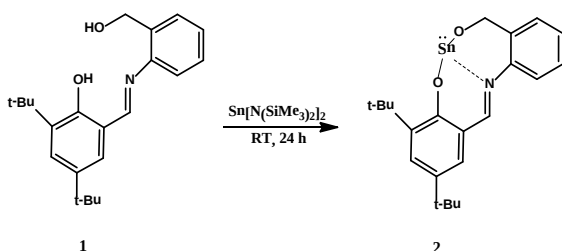
วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอลแลกไทด์และแอปซิลอน-คาโพรแลคโตน โดยใช้สารประกอบโลหะดีบุก (II) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การสังเคราะห์และวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสารประกอบโลหะดีบุก(II)ที่มีซิฟเบสลิแกนด์เป็นองค์ประกอบ 2) กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอลแลกไทด์และแอปซิลอน-คาโพรแลคโตน ซึ่งสามารถทำการศึกษาได้ดังนี้

1) สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 สามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างซิฟเบสลิแกนด์ **1** และ $\text{Sn}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_2$ ในสารละลายเบนซีน ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2

สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 สามารถสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างซิฟเบสลิแกนด์ **1** (0.6389 g, 1.88 mmol) และ $\text{Sn}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_2$ (0.8271 g, 1.88 mmol) ในตัวทำละลายเบนซีน 20 mL ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อระเหยเอาตัวทำละลายออกภายใต้สูญญากาศ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีเหลือง ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาโครงสร้างของสารประกอบดีบุก (II) 2 ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

(CHN Analyzer) เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของสารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 ที่สังเคราะห์ได้

2) การสังเคราะห์พอลิแลกไทด์และพอลิแอปซิลอน-คาโพรแลคโตน โดยใช้สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง สามารถศึกษาได้โดยนำแอลแลกไทด์มอนอเมอร์/แอปซิลอน-คาโพรแลคโตนมอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆดังตารางที่ 1 จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) เพื่อใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการเกิดพอลิแลกไทด์ (PLA) และพอลิแอปซิลอน-คาโพรแลคโตน (PCL) และเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (GPC) เพื่อหาค่ามวลโมเลกุลและดัชนีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 1 สภาวะการเร่งปฏิกิริยาที่ทดสอบ ณ เวลาต่างๆ

พอลิเมอร์	มอนอเมอร์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะสำหรับทดสอบ	
			อัตราส่วนมอนอเมอร์:ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)
PLA	แอลแลกไทด์	สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2	100:1	110
			200:1	110
PCL	แอปซิลอน-คาโพรแลคโตน	สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2	100:1	110
			200:1	110

ผลการวิจัย

1) การสังเคราะห์และวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2

สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 สามารถสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างซิฟเบสลิแกนด์ **1** และ $\text{Sn}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_2$ ในตัวทำละลายเบนซีน ที่อุณหภูมิห้อง

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีเหลือง (0.59 g, 72%) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาโครงสร้างของสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ได้ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

^1H NMR (300 MHz, C_6D_6 , 50°C): δ 7.76 (s, 1H, $\text{N}=\text{CHAr}$), 6.64-7.56 (br s, 6H, ArH), 5.03 (br m, 2H, CH_2), 1.72 (s, 9H, CH_3), 1.42 (s, 9H, CH_3). $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ NMR (75 MHz, C_6D_6 , 50°C): δ 164.59 ($\text{N}=\text{CHAr}$), 148.83, 142.09, 137.72, 136.06, 130.50, 129.64, 129.22, 129.04, 126.5, 120.84, 120.30 (ArC), 64.13 (CH_2), 35.82, 34.13 (CMe_3), 31.71, 30.28 (CH_3). จากผลข้างต้นพบว่า เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จากโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^1H NMR) สัญญาณของโปรตรอนที่วัดได้จากสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่สังเคราะห์ เกิดการ shift หรือเลื่อนไปจากเดิมเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากซิเบสลิแกนด์ 1 และสัญญาณของโปรตรอนที่หมู่ $-\text{OH}$ ของซิเบสลิแกนด์ 1 หายไป และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จากคาร์บอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^{13}C NMR) สัญญาณของคาร์บอนแต่ละชนิด $-\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ มีจำนวนพิกตรงกับคาร์บอนแต่ละชนิดในโครงสร้างของสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 พอดี ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเป็นสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่สังเคราะห์ได้จริง

นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยัน โครงสร้างของสารประกอบดีบุก (II) 2 ($\text{C}_{22}\text{H}_{27}\text{NO}_2\text{Sn}$) ที่สังเคราะห์ได้ทางผู้วิจัยจึงนำสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่สังเคราะห์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN Analyzer) โดยพิจารณาจากปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่ได้จากทางทฤษฎีเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 พบว่าสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า

ผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 ได้จริง

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของสารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับทางทฤษฎี

$\text{C}_{22}\text{H}_{27}\text{NO}_2\text{Sn}$	ปริมาณของธาตุแต่ละชนิด		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
ทางทฤษฎี	57.93	5.97	3.07
การทดลอง	57.83	6.16	2.93

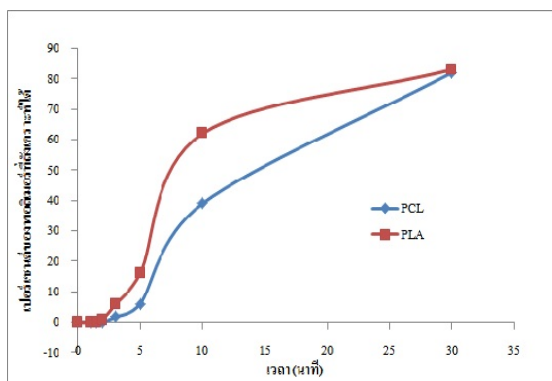
2) กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และเอปซิลอน-คาโปรแลคโตน

นำสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และเอปซิลอน-คาโปรแลคโตนในอัตราส่วนของแอล-แลคไทด์มอนอเมอร์/เอปซิลอน-คาโปรแลคโตนมอนอเมอร์ต่อสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 100:1 ที่อุณหภูมิ 110°C พบว่า สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 สามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และเอปซิลอน-คาโปรแลคโตน โดยใช้เวลาเพียง 12 นาที และ 45 นาทีตามลำดับ โดยที่เปอร์เซ็นต์ของการเกิดพอลิแลคไทด์และพอลิเอปซิลอน-คาโปรแลคโตนมีค่าเท่ากับ 86% และ 83% ตามลำดับ โดยพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\% \text{conversion} = \frac{\text{Integration of polymer}}{(\text{Integration of polymer} + \text{monomer})} \times 100$$

จากนั้นทางผู้วิจัยได้เพิ่มอัตราส่วนของแอล-แลคไทด์มอนอเมอร์/เอปซิลอน-คาโปรแลคโตนมอนอเมอร์ต่อสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 เป็น 200:1 ที่อุณหภูมิ 110

°C ที่เวลา 1.5, 2, 3, 5, 10 และ 30 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพของสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 พบว่า สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และแอปซิลอน-คาโปรแลคโตนได้โดยแสดงผลดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเกิดพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้กับเวลาที่ใช้ (นาที) ในอัตราส่วนของแอล-แลคไทด์มอนอเมอร์/แอปซิลอน-คาโปรแลคโตน มอนอเมอร์ ต่อสารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 200:1 ที่อุณหภูมิ 110°C

จากรูปที่ 3 พบว่า สารประกอบโลหะดีบุก(II) 2 สามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแลคไทด์ได้เร็วกว่าพอลิแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน โดยที่เวลา 10 นาที พอลิแลคไทด์และพอลิแอปซิลอน-คาโปรแลคโตนที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 11,200 และ 39,700 คอลดัลและมีค่าดัชนีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ (PDI) อยู่ที่ 1.14 และ 1.63 ตามลำดับ ซึ่งค่าดัชนีการกระจายตัวของพอลิเมอร์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$PDI = \frac{M_w}{M_n}$$

โดยที่ M_w คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยมวล

M_n คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

สารประกอบโลหะดีบุก (II) 2 สามารถใช้ในการเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์และแอปซิลอน-คาโปรแลคโตนได้ โดยมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแอล-แลคไทด์ได้เร็วกว่าแอปซิลอน-คาโปรแลคโตน ซึ่งพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าดัชนีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่ค่อนข้างแคบคือ 1.14 และ 1.63 ตามลำดับ นอกจากนี้ในช่วงต้นของปฏิกิริยาจะพบ induction period หรือ ช่วงเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่เริ่มทำงานอยู่ที่ประมาณ 2-3 นาที ซึ่ง induction period ที่พบนี้เป็นลักษณะเด่นโดยปกติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะดีบุก (II) เป็นองค์ประกอบซึ่งคาดว่าเกิดจากอิทธิพลของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว 1 คู่บนโลหะดีบุก (II) ทำการผลัดกันกับอิเล็กตรอนของออกซิเจนในมอนอเมอร์ ทำให้ปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดได้ช้ากว่าเมื่อเทียบกับการตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะชนิดอื่นเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นี้ยังมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาคือดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมเช่น Tin (II) Octanoate^{7,8} ซึ่งผู้วิจัยจะได้ทำการพัฒนาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Culkin, DA., Jeong, W., Csihony, S., Gomez, ED., Balsara, P., Hedrick, JL., and Waymouth, RM. 2007. Zwitterionic polymerization of lactide to cyclic poly(lactide) by using N-heterocyclic carbene organocatalysts. Angew. Chem. Int. Ed. 46: 2627-2630.

- Jeong, W., Shin, E.J., Culkin, D.A., Hedrick J.L., and Waymouth, R.M. 2009. Zwitterionic polymerization: A kinetic strategy for the controlled synthesis of cyclic polylactide. *J. Am. Chem. Soc.* 131: 4884-4891.
- Kowalski, A., Duda, A., and Penczek, S. 1998. Kinetics and mechanism of cyclic esters polymerization initiated with tin(II) octoate, 1 Polymerization of ϵ -caprolactone. *Macromol. Rapid Commun.* 19: 567-572.
- Kowalski, A., Duda, A., and Penczek, S. 2000. Kinetics and Mechanism of Cyclic Esters Polymerization Initiated with Tin(II) Octoate. 3. Polymerization of L,L-Dilactide. *Macromolecules.* 33: 7359-7370.
- Nasongkla, N., Chen, B., Macaraeg, N., Fox, M.E., Frechet, J.M., and Szoka, F.C. 2009. Dependence of pharmacokinetics and biodistribution on polymer architecture: effect of cyclic versus linear polymers. *J. Am. Chem. Soc.* 131: 3842-3843.
- Phomphrai, K., Pongchan-o, C., Thumrongpatanaraks, W., Sangtrirutnugul, P., Kongsaree, P., and Pohmakotr, M. 2011. Synthesis of high-molecular-weight poly(ϵ -caprolactone) catalyzed by highly active bis(amidinate) tin(II) complexes. *Dalton Trans.* 40: 2157-2159.
- Piromjitpong, P., Ratanapanee, P., Thumrongpatanaraks, W., Kongsaree, P., and Phomphrai, K. 2012. Synthesis of cyclic polylactide catalysed by bis(salicylaldehyde)tin(II) complexes. *Dalton Trans.* 41: 12704-12710.
- Shin, E.J., Jones, A.E., and Waymouth, R.M. 2012. Stereocomplexation in cyclic and linear polylactide blends. *Macromolecules.* 45: 595-598.