ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
208900

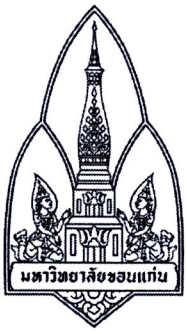
การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแอล-แลกติก
SYNTHESIS OF POLYLACTIC ACID FROM L-LACTIC ACID

นางสาวพรชนก เผ่าสาย

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

b00257473

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
208900



การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแอล-แลกติก

SYNTHESIS OF POLYLACTIC ACID FROM L-LACTIC ACID

นางสาวพรรชนก เมฆฉาย

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแอล-แลกติก

นางสาวพรรชนก เมฆฉาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

SYNTHESIS OF POLYLACTIC ACID FROM L-LACTIC ACID

MISS PANCHANOK MAKCHAY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN CHEMICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY
2011

ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
หลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ชื่อวิทยานิพนธ์: การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแอล-แลกติก

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นางสาวพรรชนก เมฆฉาย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วรรณา กาญจนมยูร	ประธานกรรมการ
	รศ.ดร. สมใจ ชจรชีพพันธุ์งาม	กรรมการ
	ดร. ทินกร คำแสนา	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมใจ ชจรชีพพันธุ์งาม)

.....	.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แม่นมาตย์)	(รองศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ธีระกุลพิศุทธิ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

พรรชนก เมฆฉาย. 2554. การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแอล-แลกติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ.ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม

บทคัดย่อ

208900

ในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยใช้กรดแลกติกความเข้มข้นที่ 85 % และ 90% ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆคือ 140 150 160 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 24 36 และ 48 ชั่วโมง คุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR ^{13}C-NMR ^{1}H-NMR และ DSC วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิดที่ได้ด้วยเทคนิค GPC โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงสุด (Mw=34,397) การสังเคราะห์ที่ใช้กรดแลกติกเข้มข้น 90% และสแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง และค่า T_g และ T_m เท่ากับ 57.3°C และ 165°C ตามลำดับ

Panchanok Makchay. 2011. **Synthesis of Polylactic Acid from L-lactic Acid.** Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Somjai Kajorncheppunngam

ABSTRACT

208900

This research work is a study of the synthesis of polylactic acid (PLA) from lactic acid via condensation polymerization. Lactic acid with concentration of 85% and 90% were used as reactant in this study. Stannous chloride and stannous chloride mixed with p-toluene sulphonic acid were used as catalyst for condensation polymerization reaction. This reaction was performed at three different level of temperature namely 140, 150 and 160°C with reaction time of 24, 36 and 48 hrs. The polymerization product was then analysed by FT-IR, ^{13}C-NMR, ^{1}H-NMR and DSC. Average molecular weight of PLA was determined by GPC technique. The results were indicated that the optimal condition to synthesize PLA with highest average molecular weight (Mw=34,397) was occurred at temperature of 140°C, reaction time of 36 hrs, using stannous chloride as catalyst and 90% lactic acid as reactant. PLA which was produced at this particular condition possessed T_g and T_m of 57.3°C and 165°C respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ ให้คำแนะนำในทุกขั้นตอนที่ได้ทำการศึกษาวิทยานิพนธ์ การออกแบบการทดลอง กระบวนการศึกษาทดลองเพื่อให้ได้ประสบความสำเร็จ ตลอดจนการเขียนรายงานทางวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัย การตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานทุกชิ้น รวมทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ด้วยความเอาใจใส่ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งข้อคิดและแนวทางต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยและการดำเนินชีวิต

ขอบพระคุณ รศ.ดร.วรรณา กาญจนมยูร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทินกร คำแสน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตรวจ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณมาด้วย ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนางสาวนุศวดี พจนานุกิจและนายภัทรพล นามทอง ที่ช่วยประกอบอุปกรณ์ในการวิจัยครั้งนี้ และแก้ปัญหา อุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองมาโดยตลอด รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่คอยให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ รวมทั้งความห่วงใยและกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงิน ตลอดจนสมาชิกทุกคนในครอบครัว ญาติมิตรทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และหากมีข้อบกพร่องประการใด ๆ ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความขอบคุณยิ่ง

พรรชนก เมฆฉาย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญภาพ		ช
บทที่ 1 บทนำ		1
1.1	ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4	ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5	วิธีดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		4
2.1	พอลิเมอร์	4
2.2	พอลิเมอร์ชีวภาพ หรือ พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biopolymer or Biodegradation polymer)	4
2.3	ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น	5
2.4	เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization)	5
2.5	กรดแลกติก (Lactic acid)	5
2.6	พอลิแลกติกแอซิดหรือพอลิแลกไทด์ (Polylactic acid or Polylactide)	7
2.7	การผลิตพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกที่ได้จากกระบวนการหมัก	8
2.8	การผลิตพอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง	12
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง		24
3.1	อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้	24
3.2	วิธีการทดลอง	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง		33
4.1	ลักษณะผลิตภัณฑ์พอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละขั้นตอน	33
4.2	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์พอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้	35
4.3	การวิเคราะห์คุณลักษณะของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้	45
4.4	ผลการวิเคราะห์ด้วยดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)	58
4.5	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเจลเพอมิเอชันโครมาโทกราฟฟี (Gel permeation chromatography, GPC)	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกรดแลกติก อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	71
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	72
บรรณานุกรม	73
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 1H-NMR	77
ภาคผนวก ข แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 13C-NMR	89
ภาคผนวก ค แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	101
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC	113
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC	125
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	147

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของกรดแลกติก	6
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่เป็นพลาสติกเขียว	11
ตารางที่ 2.3	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของพอลิแลกติกแอซิดในน้ำ	12
ตารางที่ 2.4	การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีในการผลิตพอลิแลกติกแอซิด	14
ตารางที่ 3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	24
ตารางที่ 3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
ตารางที่ 3.3	สภาวะต่าง ๆในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดในงานวิจัยนี้	30
ตารางที่ 4.1	ร้อยละผลได้ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะต่าง ๆ	35
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบค่าเคมิคัลชิพท์ที่ปรากฏในสัญญาณสเปกตรัมพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์	48
ตารางที่ 4.3	ค่าเคมิคัลชิพท์ที่ปรากฏในสัญญาณสเปกตรัมพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์	51
ตารางที่ 4.4	สัญญาณ FTIR ของกรดแลกติก	53
ตารางที่ 4.5	สัญญาณ IR ของพอลิแลกติกแอซิด	53
ตารางที่ 4.6	สัญญาณ FTIR ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ (อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 140oC ระยะเวลา 36 ชั่วโมง ใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้สารตั้งต้นเป็นกรดแลกติกเข้มข้น 90%)	54
ตารางที่ 4.7	สัญญาณ FTIR ของพอลิแลกติกแอซิดมาตรฐาน	55
ตารางที่ 4.8	อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพอลิแลกติกแอซิด และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	60

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น	5
ภาพที่ 2.2	สเตอริโอไอโซเมอร์ของกรดแลกติก	6
ภาพที่ 2.3	วิถีทางของกรดแลกติกที่ใช้ข้าวโพดเป็นสารตั้งต้นในการหมัก	6
ภาพที่ 2.4	การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากปิโตรเคมี	9
ภาพที่ 2.5	ขั้นตอนของการผลิตพอลิแลกติกแอซิดจากผลิตภัณฑ์พืชไร่	10
ภาพที่ 2.6	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ของพอลิแลกติกแอซิดด้วยน้ำโดยปราศจากแบคทีเรีย	11
ภาพที่ 2.7	ความสัมพันธ์ในวิถีทางการผลิตพอลิแลกติกแอซิดด้วยวิธีการต่าง ๆ	13
ภาพที่ 2.8	วิธีการและเทคนิคในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดด้วยวิธีต่าง ๆ	14
ภาพที่ 2.9	ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นของกรดแลกติกได้พอลิแลกติกแอซิด	16
ภาพที่ 2.10	ปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยน้ำทำให้พอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง	17
ภาพที่ 2.11	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิดด้วย HDI	17
ภาพที่ 2.12	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิดด้วย melt-solid polycondensation	19
ภาพที่ 2.13	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์วงแลกไทด์จากพอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	20
ภาพที่ 2.14	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงจากวงแลกไทด์	21
ภาพที่ 3.1	สูตรโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้	26
ภาพที่ 3.2	ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองผลิตพอลิแลกติกแอซิด จากกรดแลกติกเพื่อทำสุญญากาศให้แก่ระบบ	27
ภาพที่ 3.3	เครื่องหมุนเวียนน้ำเข้าออกระบบที่ใช้ในการทดลองผลิตพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกเพื่อรักษาอุณหภูมิของระบบให้คงที่	27
ภาพที่ 3.4	ชุดอุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการผลิตพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติก ในระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale)	27
ภาพที่ 3.5	ตู้อบที่ใช้ในการทดลองผลิตพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกเพื่ออบไล่ความชื้นออกจากสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้	28
ภาพที่ 3.6	fourier transform infrared spectrophotometer ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้	28
ภาพที่ 3.7	differential scanning calorimetry (DSC) ที่ใช้วิเคราะห์หาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (T_g) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้	28
ภาพที่ 3.8	gel permeation chromatography (GPC) ใช้วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	29
ภาพที่ 3.9	การติดตั้งอุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิด	30
ภาพที่ 3.10	โครงสร้างของกรดแลกติกและพอลิแลกติกแอซิด	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.1	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากกรดแลกติก	33
ภาพที่ 4.2	ลักษณะสารละลายจากการละลายผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยไดคลอโรมีเทน	33
ภาพที่ 4.3	ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการตกตะกอนสารละลายในภาพที่ 4.2 ด้วยเมทานอล	34
ภาพที่ 4.4	ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกรองตะกอนพอลิแลกติกแอซิดในภาพที่ 4.3	34
ภาพที่ 4.5	ลักษณะผลิตภัณฑ์พอลิแลกติกแอซิดที่ผ่านการอบ	35
ภาพที่ 4.6	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นของสารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 90% และ 85% โดยใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140oC	37
ภาพที่ 4.7	ปฏิกิริยา depolymerization ด้วยน้ำ (ปฏิกิริยา hydrolysis) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกรดแลกติก	38
ภาพที่ 4.8	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 °C	39
ภาพที่ 4.9	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C	40
ภาพที่ 4.10	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160 °C	41
ภาพที่ 4.11	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆของปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากสารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง	42
ภาพที่ 4.12	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆของปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติก เข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์ และใช้สแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง	43
ภาพที่ 4.13	กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆของปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจากสารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมง	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.14	แผนภูมิแสดงร้อยละผลได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	45
ภาพที่ 4.15	โครงสร้างของพอลิแลกติกแอซิด	46
ภาพที่ 4.16	สเปกตรัม ^{1}H-NMRของกรดแลกติก	47
ภาพที่ 4.17	สเปกตรัม ^{1}H-NMR ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ (อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 160°C ระยะเวลา 36 ชั่วโมง ใช้ $SnCl_2$+PTSA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)	47
ภาพที่ 4.18	สเปกตรัม ^{1}H-NMR ของพอลิแลกติกแอซิดในงานวิจัยของปทิตตา เปลี่ยนประเสริฐ	48
ภาพที่ 4.19	ค่าเคมิคัลชิพท์ที่ได้จากสัญญาณสเปกตรัม 1H-NMR ของ CH และ CH3 ในโมเลกุลพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้	48
ภาพที่ 4.20	สเปกตรัมของกรดแลกติกที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค^{13}C-NMR	49
ภาพที่ 4.21	ตัวอย่างสเปกตรัม 13C-NMR ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ (อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 160oC ระยะเวลา 36 ชั่วโมง ใช้ SnCl2+PTSA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)	50
ภาพที่ 4.22	สเปกตรัม ^{13}C-NMR ของพอลิแลกติกแอซิดในงานวิจัย	50
ภาพที่ 4.23	ค่าเคมิคัลชิพท์ที่ได้จากสัญญาณสเปกตรัม ^{13}C-NMR ของ C=O CH และ CH_3 ในโมเลกุลพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้	51
ภาพที่ 4.24	สเปกตรัม FTIR ของกรดแลกติก	52
ภาพที่ 4.25	ตัวอย่างสเปกตรัม FTIR ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ (อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 140°C ระยะเวลา 36 ชั่วโมง ใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้สารตั้งต้นเป็นกรดแลกติกเข็มข้น 90%)	53
ภาพที่ 4.26	สเปกตรัม FTIR ของพอลิแลกติกแอซิดมาตรฐาน	54
ภาพที่ 4.27	โครงสร้างผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ซึ่งระบุว่าเป็นพอลิแลกติกแอซิดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย NMR และ FTIR (ก) และโครงสร้างของกรดแลกติก (ข)	55
ภาพที่ 4.28	กลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอไนเซชันของพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกโดยมีพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	56
ภาพที่ 4.29	กลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอไนเซชันของพอลิแลกติกแอซิดจากกรดแลกติกมีสแตนนัสคลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	57
ภาพที่ 4.30	ผลการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิแลกติกแอซิดมาตรฐาน	59
ภาพที่ 4.31	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ (อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 160oC ระยะเวลา 36 ชั่วโมง ใช้ SnCl2+PTSA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.32	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 90% และ 85% ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่าง ๆกันโดยใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140°C	62
ภาพที่ 4.33	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแลกติกแอซิด (ก) และกลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแลกติกแอซิด (ข)	63
ภาพที่ 4.34	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่าง ๆกันเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์ และ สแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 140°C	64
ภาพที่ 4.35	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่าง ๆเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์ และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150°C	65
ภาพที่ 4.36	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่าง ๆเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์ และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 160°C	66
ภาพที่ 4.37	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆในขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0 ที่เวลา 24 ชั่วโมง	67
ภาพที่ 4.38	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆในขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลา 36 ชั่วโมง	68
ภาพที่ 4.39	กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆในขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นเมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ผสมพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลา 48 ชั่วโมง	69
ภาพที่ 4.40	แผนภูมิแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิแลกติกแอซิด ที่ระยะเวลาต่าง ๆของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น เมื่อใช้สารตั้งต้นกรดแลกติกที่มีความเข้มข้น 85% ใช้สแตนนัสคลอไรด์และสแตนนัสคลอไรด์ร่วมกับพาราโทลูอีนซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	70