248930

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

248930

รหัสโครงการ SUT7-710-52-24-76

รายงานการวิจัย

การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก

[The Preliminary Study of the Preparation of Polylactic acid from Lactic acid]

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

b0085334

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248930

รหัสโครงการ SUT7-710-52-24-76

รายงานการวิจัย

การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก

[The Preliminary Study of the Preparation of Polylactic acid from Lactic acid]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-710-52-24-76

รายงานการวิจัย

การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก

[The Preliminary Study of the Preparation of Polylactic acid from Lactic acid]

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราณี ชุมสำโรง

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ ศุภกาญจน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ดีประเสริฐกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก [The Preliminary Study of the Preparation of Polylactic acid from Lactic acid] นี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความร่วมมือและสนับสนุนจากผู้ช่วยวิจัย คือ นายสุริยัน รักแม่ และนายศึก ทรงประทีปกุล นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปราณี ชุมสำโรง

ธันวาคม 2554

บทคัดย่อ

248930

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึง การเตรียมพอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก โดยเริ่มจากการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดน้ำออกจากกรดแลคติก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมบิวทอกไซด์ (titanium (IV) butoxide, TNBT) ระยะเวลาในการดำเนินไปของปฏิกิริยา และขั้นตอนการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วใช้เฮกซาเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (1,6-hexamethylene diisocynate, HMDI) เป็นสารเชื่อมต่อโมเลกุลของทั้งพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล

จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งแสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดเท่ากับ 17,048 กรัมต่อโมล และเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ที่ได้โดยเฉลี่ย (%yield) เท่ากับ 47.93 เปอร์เซ็นต์ คือ การสังเคราะห์แบบที่ใช้ระยะเวลาในการกำจัดน้ำออกจากกรดแลคติกเท่ากับ 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดยรวมเท่ากับ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แบ่งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 2 ขั้น และระยะเวลาในการสังเคราะห์โดยรวมเท่ากับ 42 ชั่วโมง ค่ากรดโดยเฉลี่ยของพอลิเมอร์ที่ได้เท่ากับ 10.72 การตรวจสอบทรานสิชันทางความร้อนพบว่า พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) เท่ากับ 47.22 องศาเซลเซียส และ มีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) 139.36 องศาเซลเซียส

ส่วนพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลสังเคราะห์ขึ้นโดยเติมไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol, DEG) ลงไปในกรดแลคติกที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน และใช้สภาวะปฏิกิริยาควบแน่นที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด จากการทดลองพบว่า DEG เท่ากับ 1.5 mol % เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 10,790 กรัมต่อโมล %yield เท่ากับ 28.66 เปอร์เซ็นต์ ค่ากรดของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล เท่ากับ 5.35

พอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงสุดเท่ากับ 32,566 กรัมต่อโมล ที่อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่ไอโซไซยาเนต (NCO) เท่ากับ 1:2 ด้วยเวลาการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1 ชั่วโมง ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมจากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อพอลิ-แลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นไฮดรอกซิลด้วย HMDI แสดงการแยกขนาดโมเลกุลอย่างชัดเจน โดยพบว่า สภาวะที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 93,097 กรัมต่อโมล ในสัดส่วนสูงสุด เท่ากับ 33.66% คือ ที่อัตราส่วน OH/NCO เท่ากับ 1:2 และ

248930

ระยะเวลาในการเชื่อมต่อเท่ากับ 1 ชั่วโมง การตรวจสอบทรานสิชันทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI พบ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิ cold crystallization (T_{cc}) และ อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ซึ่งมี T_{m1} และ T_{m2} โดยพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI แสดง T_g, T_{cc} T_{m1} และ T_{m2} ที่อุณหภูมิ 46.60, 96.00, 130.00 และ 141.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นไฮดรอกซิลด้วย HMDI แสดง T_g, T_{cc} T_{m1} และ T_{m2} ที่อุณหภูมิ 47.28, 96.25, 123.67 และ 133.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Abstract

248930

In this research, the preparation of poly(lactic acid), PLA, from lactic acid was studied. The study started with a preparation of low molecular weight poly(lactic acid), LMPLA and hydroxyl-terminated low molecular weight poly(lactic acid), HO-LMPLA via condensation polymerization. Lactic acid dehydration time, amount of titanium (IV) butoxide, TNBT catalyst, condensation reaction time and catalyst addition step were varied. Hexamethylene diisocyanate, HMDI was then used as chain linking for both LMPLA and HO-LMPLA.

From the results obtained, preparation condition that gave LMPLA with the highest molecular weight of 17,048 g/mol and %yield of 47.93% was 2 h dehydration time, 0.3% w/v total amount of catalyst, 2-step catalyst addition and 42 h overall condensation reaction time. The average acid value of LMPLA was 10.72. LMPLA showed a glass transition temperature, T_g, at 47.22 ^{o}C and a melting temperature, T_m, at 139.36 ^{o}C.

HO-LMPLA was prepared by mixing diethylene glycol (DEG) with lactic acid in various mole ratios. The mixture was then polymerized using preparation condition that gave the highest molecular weight LMPLA. The preparation results showed that the suitable amount of DEG was 1.5 mol %. This ratio gave the HO-LMPLA with a molecular weight of 10,790 g/mol and % yield of 28.66%. The acid value of HO-LMPLA was 5.35. PLA obtained from chain linking of LMPLA with HMDI showed the highest single molecular weight of 32,566 g/mol when a ratio of hydroxyl group (OH) and isocyanate group (NCO) was 1:2 and linking time was 1 h at 160 ^{o}C. In contrast, PLA that obtained from chain linking of HO-LMPLA using HMDI showed clear separation in molecular size. The chain linking condition that gave 33.66% of PLA with the molecular weight of 93,097 g/mol was OH/NCO ratio of 1:2 and 1 h chain linking time at 160 ^{o}C. It was found from thermal analysis that PLA prepared from chain linking of LMPLA with HMDI showed T_g, cold crystallization temperature (T_{cc}), T_{m1} and T_{m2} at 46.60, 96.00, 130.00 and 141.00 ^{o}C respectively. PLA obtained from chain linking of HO-LMPLA showed T_g, T_{cc}, T_{m1} and T_{m2} at 47.28, 96.25, 123.67 and 133.00 ^{o}C respectively.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มีของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
บทที่ 2 ความเป็นมาและภูมิหลัง	**3**
2.1 กรดแลคติก	4
2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด	5
2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์	5
2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นกรดแลคติกโดยตรง	7
2.3 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด	9
2.3.1 สมบัติทางความร้อน	9
2.3.2 สมบัติทางกล	10
2.4 การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	**14**
3.1 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล	14
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	14
3.1.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด 15

3.3 การตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิแลคติกแอซิด 16

3.3.1 การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด 16

3.3.2 การตรวจสอบค่ากรดของพอลิแลคติกแอซิด 16

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด 16

3.3.4 การวิเคราะห์ทรานสิชันทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด 17

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 18

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ 18

4.1.1 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้ ณ สภาวะการทดลองต่าง ๆ 18

4.1.2 ผลการติดตามการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ให้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด 22

4.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดด้วย FTIR 23

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ทรานสิชันทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดด้วยเครื่อง DSC ... 24

4.1.5 ผลการตรวจสอบการผลิตได้ซ้ำ (repeatability) ของวิธีการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด 25

4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 26

4.2.1 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 27

4.2.2 ค่ากรด (acid value) ของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 28

4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยเทคนิค FTIR 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยเฮกซาเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (1,6-hexamethylene diisocyanate, HMDI) 30

4.3.1 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI..... 31

4.3.2 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 32

4.3.3 เปรียบเทียบ FTIR สเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล..... 34

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ทรานสิชันทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล..... 35

บทที่ 5 บทสรุป..... **38**

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 38

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 39

บรรณานุกรม..... 41

ประวัติผู้วิจัย..... 42

เอกสารการตีพิมพ์ผลงานวิจัย..... 48

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติเชิงกลของพอลิแอลแลคติกแอซิด (PLLA) พอลิแอลแลคติกแอซิดที่ผ่านการอบอ่อน (annealing) (Ann.PLLA) และพอลิดีแอลแลคติกแอซิด (PDLLA)	11
2.2	สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต	11
3.1	ชนิด หน้าที่ และแหล่งที่มาของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	14
4.1	ผลการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการกำจัดน้ำ (dehydration time) ที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด	18
4.2	ผลการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา [TNBT (v/v %)] ที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด	19
4.3	ผลการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (condensation reaction time) ที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติก-แอซิด	20
4.4	ผลของการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยเติมเป็นขั้นที่ 2) และผลการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นหลังจากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นที่สองที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติก-แอซิด	21
4.5	ค่ากรดของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ณ เวลาต่าง ๆ หลังจากเติมตัวเร่งปฏิกิริยา TNBT	22
4.6	ผลการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดด้วยสภาวะที่ให้น้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด จำนวน 12 ครั้ง	26
4.7	ผลการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอก-ซิลด้วยสภาวะการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด และปรับเปลี่ยนโมลเปอร์เซ็นต์ของไดเอทิลีนไกลคอล (ปริมาณกรดแลคติกแอซิดที่ใช้เท่ากับ 25 มิลลิลิตร)	27
4.8	ค่ากรดของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาควบแน่นไดเอทิลีนไกลคอลร่วมกับกรดแลคติกเทียบกับค่ากรดของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาควบแน่นกรดแลคติกเพียงอย่างเดียว (ปริมาณกรดแลคติกแอซิดที่ใช้เท่ากับ 25 มิลลิลิตร)	28

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.9	ผลการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลโดยใช้ปริมาณ DEG = 1.5 mol%	29
4.10	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI	31
4.11	น้ำหนักโมเลกุลที่สูงที่สุดและสัดส่วนของพอลิแลคติกแอซิดที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลนั้น ๆ จากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วย HMDI	33
4.12	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล	37

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด	3
2.2	สเตอริโอไอโซเมอร์ของกรดแลคติก (a) แอลไอโซเมอร์ (b) ดีไอโซเมอร์	4
2.3	แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตกรดแลคติกของบริษัทคาร์กิลดาว	4
2.4	แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตพอลิแลคติกแอซิดผ่านพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและแลคไทด์	5
2.5	สเตอริโอไอโซเมอร์ของแลคไทด์	6
2.6	ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนแลคไทด์ด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน	7
2.7	อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิแลคติกแอซิดที่มีปริมาณแอลไอโซเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน	10
2.8	ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและการตัดสายโซ่ออกของพอลิแลคติกแอซิด	12
2.9	การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแลคติกแอซิด ด้วยสภาวะการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	13
3.1	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	15
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากรดกับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของกรดแลคติก	23
4.2	FTIR สเปกตรัมของ (a) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด และ (b) กรดแลคติก	24
4.3	ลักษณะกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด	25
4.4	FTIR สเปกตรัมของ (a) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด และ (b) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล	30
4.5	GPC โครมาโตรแกรมของพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI ด้วยอัตราส่วนระหว่าง OH/NCO เท่ากับ 1:2 และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อเท่ากับ 1 ชั่วโมง	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	GPC โครมาโตแกรมของพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมจากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วย HMDI ที่อัตราส่วน OH/NCO เท่ากับ (a) 1:1 (a) 1:2 และ (c) 1:2.5	32
4.7	FTIR สเปกตรัมของ (a) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (b) พอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI (c) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล และ (d) พอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมจากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วย HMDI	34
4.8	(a) ลักษณะกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วย HMDI	35
4.8	(b) ลักษณะกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมจากปฏิกิริยาการเชื่อมต่อพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ปรับเปลี่ยนหมู่ด้านปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วย HMDI	36

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

PLA	พอลิแลคติกแอซิด [poly(lactic acid)]
LA	กรดแลคติก (lactic acid)
TNBT	ไทเทเนียมบิวทอกไซด์ [titanium(IV) butoxide]
DEG	ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol)
HMDI	เฮกซาเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (1,6-hexamethylene diisocyanate)
GPC	เจลเพอมีเอเบิลโครมาโตกราฟี (gel permeable chromatography)
FTIR	ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform spectroscopy)
DSC	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอรีเมตรี (differential scanning calorimetry)
Mw	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (weight average molecular weight)
Mn	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number average molecular weight)
MWD	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution)
v/v %	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อปริมาตร
mol %	เปอร์เซ็นต์โดยโมล
OH/NCO	อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไอโซไซยาเนต
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature)
T_m	อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature)
T_{cc}	อุณหภูมิการตกผลึกขณะให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า T_g แต่ต่ำกว่า T_m (cold crystallization)