



การออกแบบและพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับ การสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก

Design and Development of Reactor for Polylactic Acid Synthesis

บุปผชาติ ยศคันโท* และ คมกฤต เล็กสกุล

Buppachart Yoskantho* and Komgrit Leksakul

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, 50200 Thailand

E-mail: y.buppachart@gmail.com*, Tel. +66837605242

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปริมาณพลาสติกที่ใช้อยู่แปรผันตรงกับปริมาณประชากรโลก และการกำจัดขยะพลาสติกก็ยังคงเป็นปัญหาอยู่จนถึงทุกวันนี้ จึงได้มีการคิดค้นวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชีวภาพเกิดขึ้น เพื่อช่วยแก้ปัญหาในการกำจัดพลาสติกเนื่องจากพลาสติกที่สังเคราะห์จากชีวภาพมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยตัวเอง จึงได้ทำการศึกษาระบวนการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก (Polylactic Acid: PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนการใช้พลาสติก งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากกรดพอลิแลคติก โดยใช้แอลแทคไทด์เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก ซึ่ง PLA ส่วนที่ติดกันถึงปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนามีค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชัน โครมาโทกราฟีเท่ากับ 9.5×10^3 กรัมต่อโมล และส่วนที่ติดขอบถังปฏิกรณ์มีค่า และ 9.6×10^3 กรัมต่อโมล และทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่ง PLA ที่ติดกันถึงปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนามีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ 55.92 องศาเซลเซียส จุดหลอม (T_m) ที่ 170.3 องศาเซลเซียส และส่วนที่ติดขอบถังปฏิกรณ์ไม่ปรากฏค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) แต่มีค่าจุดหลอม (T_m) ที่ 175.5 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: ถังปฏิกรณ์, พอลิเมอร์, กรดพอลิแลคติก, เจลเพอร์มิเอชัน โครมาโทกราฟี, เทคนิค DSC

ABSTRACT

Nowadays, the amount of used plastic is directly proportional to the population of the world and the plastic refuse disposition is still a main environmental aspect. Synthesized biopolymer is a method to solve the waste plastic disposition because it can be degradable by itself. In this study the synthesis of Polylactic acid (PLA), a bioplastic was used to replace the normal plastic. This paper was to design and develop a reactor for Polylactic acid synthesis by monomer L-lactide. The result of number average molecular weight with analyzed by Gel Permeation Chromatography of PLA from the reactor developed at the edge of the reactor that was 9.5×10^3 g/mol, the thermal transition of PLA with analyzed by Differential Scanning Calorimetry T_g at the edge of the reactor was 55.92°C and T_m was 170.3°C. Number average molecular weight the bottom of the reactor was also 9.6×10^3 g/mol, T_g was not appeared but T_m was 175.5°C.

Keyword: Reactor, Polymer, Polylactic acid (PLA), Gel Permeation Chromatography (GPC), Differential Scanning Calorimetry (DSC)

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์ได้คิดค้นพัฒนาสิ่งที่น่าสนใจมาแทนทรัพยากรธรรมชาติที่ได้ใช้ไป แต่เนื่องจากพลาสติกที่คิดค้นขึ้นมาได้มีคุณสมบัติที่ทนทาน และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการกำจัดพลาสติกที่ใช้แล้วเหล่านั้น การกำจัดขยะพลาสติกด้วยการเผาก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำลายธรรมชาติและสุขภาพร่างกายของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นทางผู้วิจัยได้ตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการกำจัดขยะพลาสติก จึงได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ใช้แหล่งวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable Resource) เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเมอร์ เรียกพลาสติกที่สังเคราะห์พอลิเมอร์จากวัสดุธรรมชาติว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพได้มีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) แป้ง (Starch) เป็นต้น แต่วัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาพลาสติกชีวภาพคือ แป้ง เพราะสามารถผลิตได้จากพืชหลายชนิด พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง [1] เริ่มจากกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการย่อยแป้งให้กลายเป็นน้ำตาล และใช้กระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียได้เป็น กรดแลคติก และนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างให้กลายเป็น พอลิเมอร์ ที่ต่อกันเป็น สายยาว เรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด ซึ่ง PLA ที่ได้นี้จัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วย

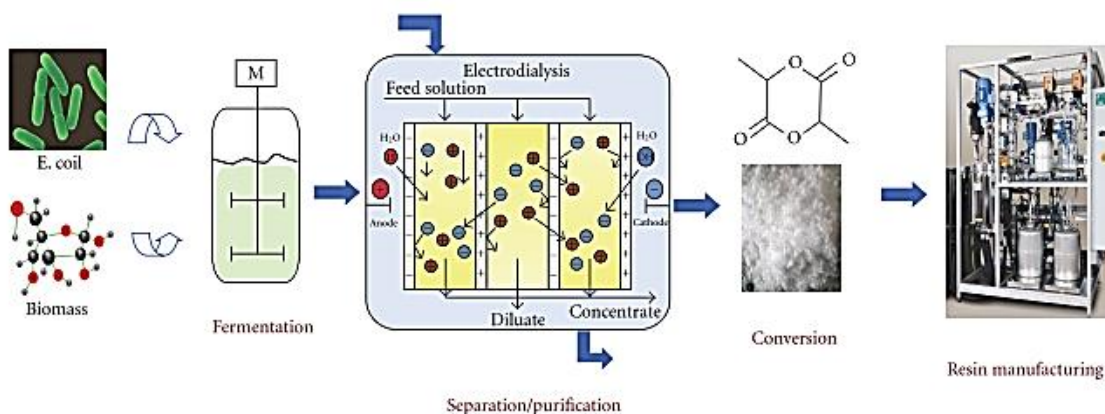
กระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) การอัดรีด (Extrusion) การเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เป็นต้น และมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความใสไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน [1]

วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากแลคไทด์ โดย Jacobson et al. [2] กล่าวว่า วิธีการที่จะทำให้ได้พอลิแลคไทด์ มีอยู่ 2 ทางด้วยกันคือ วิธีแรกเรียกว่า กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Polycondensation) โดยเริ่มจากกรดแลคติก (Lactic acid) กระบวนการนี้ต้องการอุณหภูมิสูง ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และต้องนำน้ำออกจากกระบวนการอย่างต่อเนื่อง จะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ โดย Nampoothiri et al. [3] ได้รวบรวมข้อมูลว่า ต้องใส่ตัวเร่งที่มีความเป็นกรด เช่น กรดบอริก หรือ กรดซัลฟูริก เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ (Esterification) และใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 120 องศาเซลเซียส อีกวิธีหนึ่งคือ กระบวนการพอลิเมอร์แบบเปิดวง (Ring-opening Polymerization) เริ่มจากการนำวงแหวนแลคไทด์ (Lactide) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาการรวมตัวของกรดแลคติก 2 โมเลกุลแล้วเกิดเป็นสารประกอบวงแหวนที่ชื่อว่า แลคไทด์ วิธีนี้ง่ายต่อการควบคุมและพอลิเมอร์ที่ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง Nampoothiri et al. กล่าวว่าขั้นแรกของกระบวนการควบแน่นด้วยการระเหยน้ำออก จะได้กรดพอลิแลคติก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ขั้นต่อไปคือการเปลี่ยนกรดพอลิแลคติกที่ได้จากขั้นแรก ทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาการเปิดวง ทั่วไปแล้วจะใช้สแตนนัสออกโทเอต (Stannous Octoate หรือ Tin(II) 2-ethylhexanoate) แต่ในห้องปฏิบัติการวิจัยจะใช้ Tin(II) chloride มากกว่า เป็นตัวริเริ่มมาทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ และ Hong et al. [4] ได้กล่าวว่า

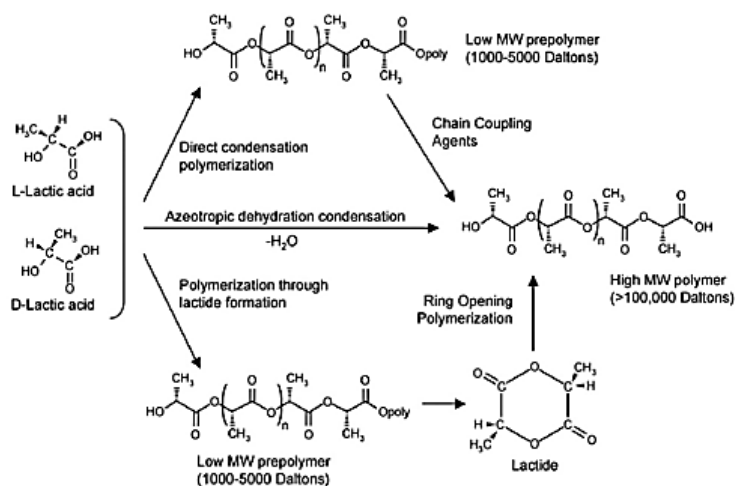
กระบวนการเปิดวงของแลคไทด์นั้นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด เช่น โลหะฮาโลเจน และออกไซด์ โดยตัวแทนหลักของตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้เป็น Tin(II) bis (2-ethylhexanoate) จะเริ่มจากสารประกอบที่มีไฮโดรเจนชนิดที่มีความเป็นกรด เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ โดยทำการทดลองนำร่องที่ขนาด 50 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 1 พร้อมด้วยระบบกวน ป้อนสุญญากาศ และระบบหล่อเย็น ซึ่งพบว่า ส่วนใหญ่แล้วน้ำถูกกำจัดออกมากที่สุดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมตัวเร่งและตัวริเริ่มปฏิกิริยาเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ในระบบสุญญากาศ และดำเนินปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 1.5

ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของ PLA สามารถควบคุมได้ โดยการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวริเริ่ม ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าให้น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากถึง 150,000 แต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 250 ppm เป็น 500 ppm ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงจาก 120,000 เป็น 75,000

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติกในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการออกแบบและพัฒนาถังปฏิกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์กรดดังกล่าว เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก



รูปที่ 1 กระบวนการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก [4]



รูปที่ 2 วิธีในการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก [1]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก

การผลิตกรดพอลิแลคติกสามารถทำได้โดยวิธีการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นอะซิโตรีปิก (Azeotropic dehydrative condensation) ปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) กรดพอลิแลคติกน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์สังเคราะห์ได้โดยผ่านการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวง (Ring-opening polymerization) เนื่องจากกรดแลคติกมีสองไอโซเมอร์สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอลไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (กรดพอลิแอล-แลคติก (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (กรดพอลิดีแอล-แลคติก (PDLLA)) [1]

2.2 ถังปฏิกรณ์

โครงสร้างและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สามารถแยกประเภทเครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์เป็นตามรูปแบบและตามลักษณะการทำงาน ถ้าแยกเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธุ์ตามรูปแบบ แบ่งออกเป็น [5]

(1) แบบถังกวน

(2) แบบท่อไหล

และแยกตามลักษณะการทำงาน แบ่งเป็น [5]

(1) แบบกะ (Batch Operation)

(2) แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Operation)

(3) แบบเฟดแบทช์ (Fed-batch Operation or Semi-batch Operation)

รูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่ [5]

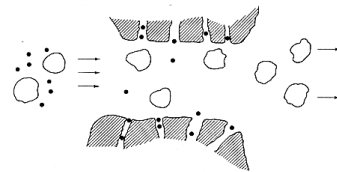
1. เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยา ให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด การถ่ายเทความร้อนทำโดยการติดตั้งแจ็กเกต บริเวณรอบถังหรือใช้คอยล์ติดตั้งภายในถัง แล้วทำการส่งไอน้ำหรือน้ำหล่อเย็นเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนเข้าไปในแจ็กเกตหรือคอยล์ ใบกวนมีหน้าที่นอกจากทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อ

เดียวกันแล้ว ยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน และในกรณีที่สารทำปฏิกิริยามีความหนืดสูง เช่น ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ต้องระวังเรื่องลักษณะของใบกวน เพราะถ้าใช้ใบกวนไม่เหมาะสม การกวนจะไม่ได้ผลเต็มที่

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล ความเข้มข้นจากสารทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ยากแก่การควบคุมอุณหภูมิภายในท่อให้เท่ากันตลอดแนวยาว จึงมักเกิดการกระจายอุณหภูมิตามแนวยาว การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล ใช้ตัวกลางความร้อนส่งผ่านเข้าไปในแจ็กเกตที่ทำให้รอบท่อ

2.3 เจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography)

เทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยการแยกพอลิเมอร์ตามขนาด โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่า พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลต่างกันเมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดการพองตัวของ random coil ที่ให้ขนาดต่างกัน เมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านคอลัมน์ที่อยู่ในบรรจุสารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (ดังรูปที่ 3) โดยพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะออกได้เร็วกว่า เนื่องจากไม่สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้ช้า เนื่องจากโมเลกุลที่มีขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในรูพรุนสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ จึงเสียเวลาในการเดินทางนานขึ้น [6]



รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีขนาดต่าง ๆ ผ่านคอลัมน์ที่มีรูพรุน [6]

2.4 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry: DSC)

เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์นั้น ตัวอย่างจะถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่าเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน [7]

3. วัสดุและขั้นตอนในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติกโดยใช้มอนอเมอร์คือ แลคไทด์ และใช้ตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา คือ Stannous octanoate ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) ความเข้มข้น 92.5–100% จากบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสิงคโปร์

3.1 การสังเคราะห์กรดพอลิแลคติกในห้องปฏิบัติการเคมี

ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการติดตั้งจำลองถึงปฏิกรณ์ โดยใช้ขวดชมพูขนาด 500 มิลลิลิตร ในการสังเคราะห์ ใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar) เป็นใบพัดในการกวนสารภายในถึงปฏิกรณ์ แหล่งให้ความร้อนแก่ถึงปฏิกรณ์คือ เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) ที่อยู่ในเครื่องเดียวกับเครื่องกวนสาร โดยมีอ่างน้ำมันซิลิโคนพร้อมติดเครื่องวัดอุณหภูมิและมีแท่งแม่เหล็กกวนสารอยู่ในอ่างน้ำมัน เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ทำการติดตั้งระบบถึงปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการติดตั้ง (ดังรูปที่ 4) มีดังนี้

1. ใส่แลคไทด์ (Lactide) น้ำหนัก 200 กรัม เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์ลงถึงปฏิกรณ์ จากนั้นนำไปดูดอากาศออกด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ

2. นำถึงปฏิกรณ์ที่ดูดอากาศออกแล้ว ใส่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาปริมาตร 4.08 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะสุญญากาศในตู้สุญญากาศ

3. เมื่อใส่ตัวริเริ่มแล้ว ทำการดูดอากาศออกอีกครั้ง และปิดจุกพร้อมทาจาระบี (high vacuum grease) เพื่อป้องกันอากาศเข้าภายในถึงปฏิกรณ์

4. ทำการเตรียมอ่างน้ำมัน เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ถึงปฏิกรณ์ ใช้น้ำมันซิลิโคน ให้ความร้อนแก่อ่างน้ำมันจนอุณหภูมิถึงที่ 120 องศาเซลเซียส

5. จุ่มถึงปฏิกรณ์ลงในอ่างน้ำมัน จับเวลาเริ่มต้น

6. จับเวลาเริ่มต้นเมื่อแลคไทด์ละลายจนหมด จากนั้นปล่อยให้วางไว้ในอ่างให้ความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้ความร้อนแก่อ่างน้ำมันถึงที่ 120 องศาเซลเซียส จับเวลาเมื่อแลคไทด์แข็งตัว โดยสังเกตจากแท่งแม่เหล็กกวนสารหยุดหมุน

เมื่อทำการออกแบบและสร้างถึงปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาจากถึงปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการทดลองสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก เริ่มต้นโดยการใส่มอนอเมอร์และตัวริเริ่มทำปฏิกิริยาถึงปฏิกรณ์ นำถึงปฏิกรณ์ใส่เข้าไปในตู้สุญญากาศ ตั้งค่าเครื่องปฏิกรณ์ให้ภายในตู้เป็นความดันสุญญากาศด้วยการปั๊มอากาศภายในตู้ออกไป และทำการไหลแก๊สอาร์กอนเข้าไปแทนที่ จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำมันซิลิโคน เมื่อได้อุณหภูมิต้องการแล้ว ทำการจับเวลา

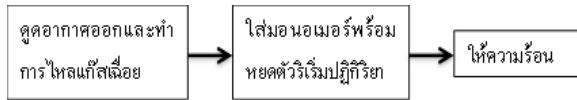


รูปที่ 4 ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

3.2 การพัฒนาและออกแบบถึงปฏิกรณ์แบบใหม่

เมื่อ ทำการ สังเคราะห์ กรด พอลิ แลคติก ในห้องปฏิบัติการ ทำการเก็บข้อมูลและสังเกตข้อบกพร่องจุดที่มีปัญหาและส่วนที่สามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้ ทำการ

ออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์และทำการทดลอง ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากถังปฏิกรณ์แบบใหม่ ดังรูปที่ 5 มีดังนี้



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากถังปฏิกรณ์แบบใหม่

1. ชุดสุญญากาศ และชุดแก๊สเฉื่อย

ชุดสุญญากาศประกอบด้วยกำลังอัดอากาศขนาด 90 ลิตรต่อนาที ซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศภายในตู้ดูดและชุดแก๊สเฉื่อยประกอบด้วยถังแก๊สบรรจุอาร์กอนขนาด 5 กิโลกรัม พร้อมด้วยอุปกรณ์วัดปริมาณแก๊สที่ไหลออก เมื่อทำการสูบล้างอากาศภายในตู้ดูดแล้ว จะทำการไหลแก๊สเฉื่อยอาร์กอนเข้าไปแทนที่

2. ชุดถังปฏิกรณ์

ชุดถังปฏิกรณ์ประกอบไปด้วย ระบบต้นกำลัง ระบบส่งกำลัง ถังปฏิกรณ์

ระบบต้นกำลัง เลือกมอเตอร์เกียร์แรงดัน 220 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ต กำลังขับ 90 วัตต์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1300 รอบต่อนาที ทำงานร่วมกันกับเกียร์ทดรอบที่มีอัตราทดรอบ 1:10 (Motor) เนื่องจากว่าลักษณะงานมีโหลดจำนวนมาก (Heavy load) เพราะต้องการให้ใบกวนทำงานจนไม่สามารถที่จะกวนสารพอลิเมอร์ข้างในต่อไปได้ ทำให้ระบบการกวนหยุดโดยอัตโนมัติ

ระบบส่งกำลัง ทำจากเหล็กหล่อเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป ในหนึ่งชุดประกอบด้วย คลังปลี (Coupling) 2 ตัว และยางกันกระชาก 1 ตัว ซึ่งคลังปลีนั้นจะเป็นแท่งต้นต้องการเจาะรูและทำลิ้มตลอดความยาวให้มีขนาดตามที่ต้องการ จึงทำการเจาะรูขนาด 15 มิลลิเมตร ตามขนาดของแกนเกียร์ทดด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านเจาะรูขนาด 1 นิ้ว ตามขนาดของแกนใบกวนสารด้านข้างของคลังปลีเจาะรูและทำเกลียวติดด้วยเกลียวหนอน

ถังปฏิกรณ์ขึ้นรูปโดยทำจากสเตนเลสสตีลชนิด 304 เกรด L หนา 1.2 มิลลิเมตรให้มีขนาดด้านในที่ใช้บรรจุสาร มีขนาด $\varnothing 120 \times 120$ มิลลิเมตร ภายนอกที่ใช้ไหลเวียนซิลิโคนออยล์ มีขนาด $\varnothing 160 \times 160$ มิลลิเมตร เมื่อได้รับความร้อนที่ส่งมาจากตัวให้ความร้อนจะทำให้ซิลิโคนออยล์ร้อน ความร้อนดังกล่าวจะส่งไปยังแลกเปลี่ยนด้านใน และยังแผ่ความร้อนออกมาด้านนอกด้วยจึงหุ้มผนังชั้นนอกด้วยสเตนเลสเบอร์เดียวกัน ขนาด $\varnothing 200 \times 145$ มิลลิเมตรและบรรจุไมโครไฟเบอร์กันความร้อนไว้ด้านใน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้งาน

3. ชุดทำความร้อน

ชุดให้ความร้อนเป็นตัวให้ความร้อนชนิดรัดท่อ (Band Heater) จะมีลักษณะเป็นส่วนโค้งครึ่งวงกลมสองชิ้น ด้านหนึ่งจะเป็นบุทที่มีจุดหมุน เพื่อเปิดตัวให้ความร้อนให้กว้างพอที่จะโอบท่อได้แล้วบีบรัดกับท่อให้แน่นด้วยสกรูด้านตรงข้าม การติดตัวให้ความร้อนจะทำการติดด้านนอกของส่วนที่เป็นถังซิลิโคนออยล์ ด้วยเหตุผลที่ว่าในความร้อนส่งผ่านชั้นที่เป็นน้ำมันก่อน ให้น้ำมันค่อยๆ ร้อนแล้วส่งผ่านความร้อนนั้นเข้าไปในถังปฏิกรณ์อย่างช้าๆ เพราะการที่จะติดตัวให้ความร้อนในส่วนที่บรรจุสารที่จะทำการสังเคราะห์โดยตรงอาจจะทำให้น้ำมันไหม้ เกิดการเปลี่ยนสี หรืออาจทำให้สูญเสียคุณสมบัติบางประการไปได้ จากนั้นจะหุ้มด้วยฉนวนไมโครไฟเบอร์อีกหนึ่งชั้นและมีห้องเสื้อที่ทำด้วยสเตนเลสแบบสามารถถอดได้อีกชั้นที่ช่วยป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมาด้านนอกจะมีเพียงขั้วของสายไฟฟ้าเท่านั้นที่จะโผล่ออกมาจากถังปฏิกรณ์เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวให้ความร้อน

4. ชุดระบบลำเลียงน้ำมัน

ชุดระบบลำเลียงน้ำมันซิลิโคนจะประกอบด้วยถังบรรจุขนาด 8 ลิตร ติดตั้งอยู่ด้านล่างของโครงสร้างหลัก ด้านบนของถังน้ำมันติดตั้งปั้มน้ำเพื่อปั้มน้ำมันซิลิโคนออยล์เข้าสู่ห้องน้ำมันข้างถังปฏิกรณ์ โดยทำการกดปุ่มที่ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำไว้ ระบบจะเปิดการทำงานของซิลิโคนออยล์น้ำมันจะไหลจากถังเก็บเข้าไปในห้องน้ำมันจนเต็ม

ถึง แต่ถึงปฏิกรณ์ดังกล่าวเป็นถึงปิดไม่สามารถมองเห็น ภายในได้ จึงจำเป็นต้องปัมน้ำมันให้ล้นออกมามากขึ้น โดยทางออกของสายน้ำมันจะมีท่อขนาดความโต 2 นิ้ว เชื่อมต่อกับสามทางเมื่อทำการปัมน้ำมันเข้าถึงสามทางตัว นี้จะถูกปิดไว้ เมื่อมีน้ำมันล้นออกมาจากถึงปฏิกรณ์เราจะ สามารถเห็นน้ำมันที่ล้นออกมาได้จากท่อข้างสี่ใส เมื่อเห็น ระดับน้ำมันบริเวณที่นี้ก็จะทำการปล่อยมือออกจากปั๊ม เมื่อทำงานแล้วเสร็จและต้องการให้น้ำมันกลับสู่ถึงก็ทำการปล่อยกลับโดยบิดวาล์วเพื่อเปิดสามทางน้ำมันซิลิโคน ก็จะไหลคืนสู่ถังบรรจุอีกครั้ง

6. ชุดโครงสร้าง

โครงสร้างเหล็กกล่องขนาด $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2}$ "หนา 2 มิลลิเมตร ตู้อะคริลิกหนา 10 มิลลิเมตร พร้อมกรอบ อะลูมิเนียม

7. ชุดควบคุมและหน้าจอแสดงผล

ชุดควบคุมตั้งเวลาการดูดแก๊สอาร์กอน ชุดควบคุมตั้ง อุณหภูมิ

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ติดตั้งถึงปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ

การติดตั้งถึงปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ (ดังรูปที่ 6) จับเวลาในการทำงานตั้งแต่เริ่มเตรียมอุปกรณ์และทำการติดตั้งจำลองถึงปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเสร็จสิ้นกระบวนการได้ผลดังตารางที่ 1 ซึ่งการสังเคราะห์ PLA ในระดับห้องปฏิบัติการนั้น เครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ เช่น ตู้สุญญากาศ อุปกรณ์ในการดูดอากาศออก แหล่งให้ความร้อนแก่ถึงปฏิกรณ์ ไม่ได้อยู่ในสถานที่เดียวกัน ต้องใช้เวลาในการเดินทางเพื่อดำเนินขั้นตอนต่างๆ ซึ่งเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อถึงปฏิกรณ์ เพราะต้องถือไปมา



รูปที่ 6 ติดตั้งถึงปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ

4.2 พัฒนาและออกแบบถึงปฏิกรณ์

เมื่อออกแบบและได้ทำการสร้างถึงปฏิกรณ์ที่ได้ ออกแบบไว้ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 และทำการ พัฒนาขึ้นมาได้ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเรียงจากด้านบน ซ้ายไปยังขวา เป็นรูปที่มองจากด้านหน้าของเครื่อง ปฏิกรณ์และรูปที่มองจากด้านข้าง ตามลำดับ ส่วนด้านล่าง เรียงจากซ้ายไปยังขวาเป็นรูปที่มองจากด้านบนและรูป 3 มิติ ตามลำดับ โดยแสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งในแต่ละส่วนของ เครื่องปฏิกรณ์ที่ได้พัฒนา

โดยถึงปฏิกรณ์จะอยู่ในตู้อะคริลิกสี่ที่เป็นระบบ ปิด เนื่องจากว่าการสังเคราะห์พอลิเมอร์นั้นต้องอยู่ภายใต้ บรรยากาศแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันสารริเริ่มปฏิกิริยาเสื่อม ประสิทธิภาพเพราะว่าสารริเริ่มปฏิกิริยานี้มีความไวต่อ ออกซิเจน ไบกวานซีดติดอยู่กับด้านบนของตู้อะคริลิกสี่ และเมื่อทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ตัวถึงปฏิกรณ์จะถูก ยกขึ้นครอบไบกวานและมีหูเกี่ยวถึงปฏิกรณ์ไว้ ทำการดูด อากาศภายในตู้อะคริลิกสี่ด้วยปั๊มสุญญากาศที่ติดตั้งอยู่ ด้านล่างโครงสร้างหลัก จากนั้นทำการไหลแก๊สอาร์กอน เข้าภายในตู้อะคริลิกสี่ ด้านล่างของโครงสร้างหลักจะมี ถึงพักน้ำมันเพื่อพักน้ำมันที่ถูกดูดเข้าถึงปฏิกรณ์ชั้นที่สอง และให้ความร้อนด้วยตัวให้ความร้อนรัศที่ติดอยู่ด้าน

นอกของถังปฏิกรณ์ชั้นที่สองและมีฉนวนป้องกันความร้อนหุ้มถังจากตัวให้ความร้อนระดับที่อื่นหนึ่ง

4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติก

จากการทดลองสังเคราะห์ PLA จากถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากถังปฏิกรณ์ที่ได้พัฒนาเร็วกว่าถังปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ คิดเป็น 39 นาที ดังตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งถือว่าต่างกันไม่มากเท่าไร แต่ขั้นตอนในการสังเคราะห์นั้นลดลงและความยุ่งยากในการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากถังปฏิกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการได้ลดลง โดยไม่ต้องเดินทางไปในแต่ละจุดของอุปกรณ์เพื่อปฏิบัติขั้นตอนต่างๆ อีกทั้งยังสะดวกสบายในการเตรียมวัสดุ สารเคมี ซึ่งสามารถทำได้ทุกขั้นตอนในที่เดียวภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่พัฒนาแล้ว

ตารางที่ 1 แสดงเวลาในการใช้สังเคราะห์กรดพอลิแลคติกในระดับห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอน	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)
ติดตั้งอุปกรณ์	15
เวลาที่ใช้ในการเดินทางไปและกลับจากห้องปฏิบัติการที่ตั้งเครื่องอุตสาหกรรม	10
สูดอากาศออกจากถังปฏิกรณ์ก่อน – หลังการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	5
ให้ความร้อนจนถึงปฏิกรณ์มีอุณหภูมิตามต้องการ	8
แลคโพลีแลคติกจนหมด	35
การทำงานของแท่งแม่เหล็กกวนสารเมื่อแลคโพลีแลคติกจนกระทั่งทิ้งไว้ให้แข็งตัว	26
ปล่อยให้พอลิเมอร์ทำการพอลิเมอไรเซชันจนครบตามเวลา	2,880
รวม	2,979

ตารางที่ 2 แสดงเวลาในการใช้สังเคราะห์กรดพอลิแลคติกในถังปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนา

ขั้นตอน	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)
เตรียมอุปกรณ์	20
เติมสารตั้งต้น	5
ให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ในถังปฏิกรณ์ (ไม่หมุนใบพัด)	10
หมุนใบพัด	25
ปล่อยให้พอลิเมอร์ทำการพอลิเมอไรเซชันจนครบตามเวลา	2,880
รวม	2,940

4.4 ผลการทดลองการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของกรดพอลิแลคติกที่สังเคราะห์ได้จากถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (GPC)

การทดสอบด้วยเทคนิค GPC ด้วยเครื่องมือ Waters e2695 separations modules และสภาวะที่ใช้ทดสอบดังนี้

- ตัวทำละลาย (Eluent): Tetrahydrofuran (THF)
- อัตราการไหล (Flow rate): 1.0 ml/min
- ปริมาณฉีดสาร (Injection Volume) : 100 μ l
- อุณหภูมิ (Temperature): 35°C
- Column set: PL gel 10 μ m mixed B 2 columns
- Polymer standard : Polystyrene
- Calibration Method : Polystyrene standard calibration (2,930 - 1,390,000 g/mol)
- Detector : Model 3580 Refractive Index (RI) Detector

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 ที่ได้ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลตามน้ำหนัก (\bar{M}_w) เป็นค่าที่สำคัญกับความสำคัญกับน้ำหนักของกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเท่ากัน ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์กรดพอลิแลคติกที่อยู่กันของถังปฏิกรณ์และขอบบนของถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,500 และ 9,600 ตามลำดับ วิธีการที่ใช้

สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้คือการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง ซึ่งวิธีการนี้จะให้น้ำหนักโมเลกุลที่สูง ($\bar{M}_w > 100,000 \text{ g/mol}$) [1] ก่อนการสังเคราะห์พอลิเมอร์สารตั้งต้นได้แก่แลคไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 1,000 – 5,000 g/mol [1] เมื่อเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ถือว่า น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าต่ำมาก จากค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลชี้ให้เห็นว่า ถึงที่ได้ออกแบบพัฒนามาจากถึงปฏิกิริยาในระดับห้องปฏิบัติการยังมีการทำงานที่ไม่สมบูรณ์ มีข้อบกพร่อง ทำให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลมีค่าที่ต่ำ

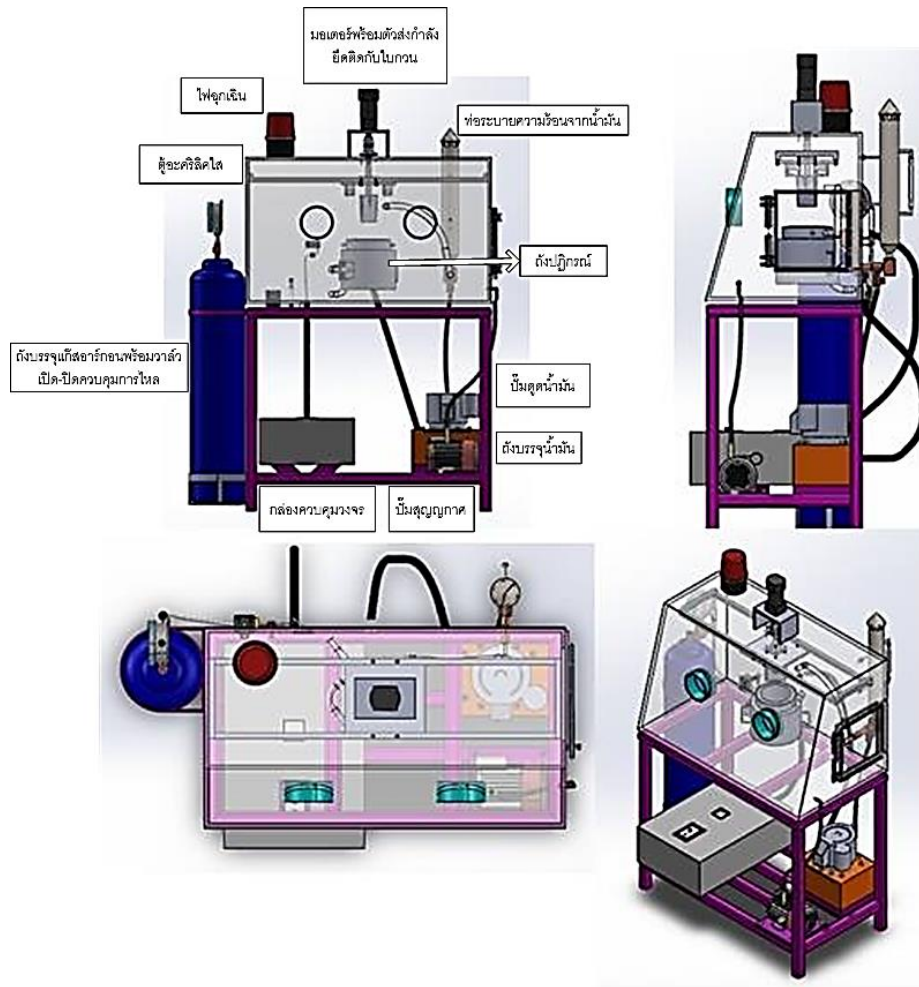
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของ PLA ด้วยเทคนิค GPC

ตัวอย่าง	\bar{M}_w
PLA crude กั้น	9.5×10^3
PLA crude ขอบ	9.6×10^3

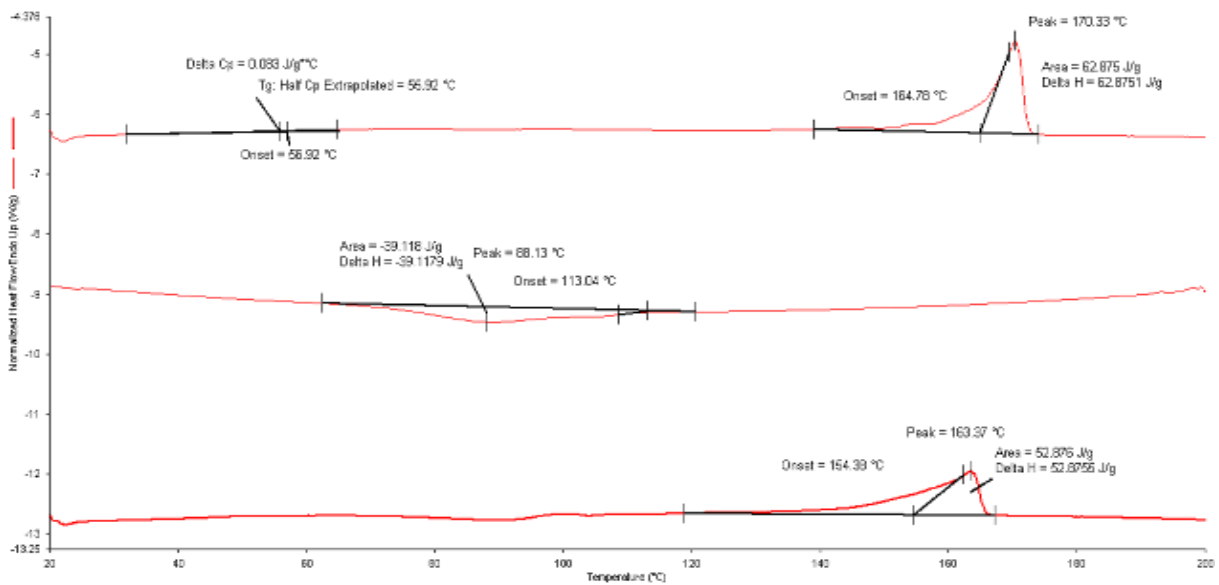
4.5 ผลการทดลองคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของกรดพอลิแลคติกที่สังเคราะห์ได้ จากรูปที่ 8 และ 9 ค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการดูดพลังงาน (Endothermic) เพื่อสลายพันธะจากสถานะของแข็งเปลี่ยนเป็นของเหลว จะพบว่า

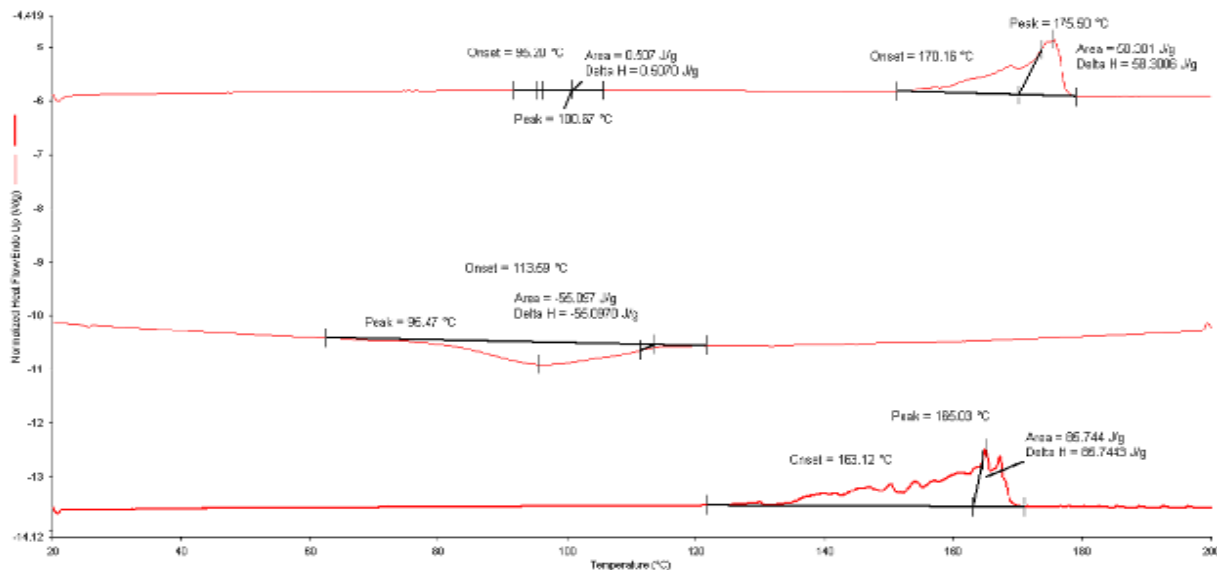
จุดที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA ที่ได้จากถึงปฏิกิริยาที่ได้รับการพัฒนาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่ติดกับกันของถึงปฏิกิริยามีค่า 55.92 องศาเซลเซียส ผลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงว่า T_g มีค่าอยู่ในช่วง 50.0 – 65.0 องศาเซลเซียส [8-10] แต่ส่วนที่อยู่ติดขอบถึงปฏิกิริยาเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วไม่พบค่าของ T_g และจุดหลอมของ PLA ที่ได้จากถึงปฏิกิริยาที่ได้รับการพัฒนาแบ่งเป็น 2 ส่วนเช่น ส่วนที่อยู่ติดกับกันของถึงปฏิกิริยา มีค่าจุดหลอมเหลวครั้งแรกและครั้งที่ 2 คือ 163.3 องศาเซลเซียส และ 170.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่อยู่ติดขอบถึงปฏิกิริยา ค่าจุดหลอมเหลวครั้งแรกและครั้งที่ 2 คือ 165.0 องศาเซลเซียส และ 175.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเทียบกับจุดหลอมเหลวอ้างอิงที่มีค่าจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 120 – 178 องศาเซลเซียส [8-10] จะพบว่าจุดหลอมเหลวครั้งแรกสอดคล้องกับค่าอ้างอิง แต่ค่าที่วัดได้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่ 2 จุดหลอมเหลวที่วัดได้มีค่าเกินกว่าค่าอ้างอิง และค่าที่วัดได้ทั้งสองค่ามีความคลาดเคลื่อนจากกันมากจากจุดนี้ชี้ให้เห็นว่าถึงที่ได้รับการพัฒนานั้นยังมีการทำงานที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากว่าคุณสมบัติทางความร้อนของ PLA ที่ได้มีค่าเกินกว่าค่าอ้างอิง



รูปที่ 7 ถังปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนามาจากห้องปฏิบัติการในมุมมองต่าง ๆ



รูปที่ 8 ผล DSC ของกรดพอลิแลคติกที่กั้นของถังปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนา



รูปที่ 9 ผล DSC ของกรดพอลิแลคติกที่ขอบของถังปฏิกรณ์ที่ได้รับการพัฒนา

5. สรุปผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติกในระดับห้องปฏิบัติการทำให้ทราบข้อบกพร่องที่ต้องทำลายถังปฏิกรณ์ที่เป็นแก้วทิ้ง จึงได้ทำการพัฒนาถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดพอลิแลคติกที่สามารถใช้ถังปฏิกรณ์ได้โดยไม่ต้องทำลายทิ้ง และจากการทดลองยังพบอีกว่า ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ลดลงคิดเป็น 39 นาที และค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของกรดพอลิแลคติกที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 9.5×10^3 กรัมต่อโมล ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนค่า T_m 55.92 องศาเซลเซียส และค่า T_g 170.3 องศาเซลเซียส ส่วนกรดพอลิแลคติกที่ติดขอบถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุล

เท่ากับ 9.6×10^3 กรัมต่อโมล และไม่ปรากฏค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) แต่มีค่าจุดหลอม (T_m) ที่ 175.5 องศาเซลเซียส

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะสำเร็จไม่ได้หากไม่ได้รับความเอื้อเฟื้อจาก Nano – Manufacturing Research Unit ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และเงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย จากโครงการนักวิจัยรุ่นกลาง ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัย เชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] อมรรัตน์ เลิศวารสิริกุล. พอลิแลคติกแอซิด: พอลิเอสเทอร์ จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. *วิศวกรรมสาร มก*, 2554; 77: 99-110.
- [2] Jacobson, S., Degee, P., Fritz, H. G., Dubois P., and Jerome, R. Polylactide (PLA) – A new way of production. *Polymer and Engineering Science*, 1999; 39(7): 1311-1319.
- [3] Nampoothiri, K. M., Nair, N. R., and John, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*, 2010; 101: 8493–8501.
- [4] Hong, C. H., Kim, S. H., Seo, J. Y. and Do S. H. Development of four unit processes for biobased PLA manufacturing. *Polymer Science*, 2012.

- [5] วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี (1). กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2554; 29 – 33.
- [6] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT-656%20%20Chapter%203%20Molecular%20weight%20analysis.pdf>
- [7] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. Differential Scanning Calorimetry (DSC). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=559
- [8] Martin, O., Avérous, L. Poly (lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 2001; 42: 6209-6219.
- [9] Södergård, A., Mikael, S. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Progress in Polymer Science*, 2002; 27: 1123-1163.
- [10] Middleton, J. C., Tipton, A. J. Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterial*, 2000: 21; 2335–2346.