การสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ภวภัทร์ ศาสตร์ศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ภวภัทร์ ศาสตร์ศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

LACTIC ACID SYNTHESIS FROM CANE SUGAR USING SODIUM HYDROXIDE

PAWAPHAT SARTSRI

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
โดย นางสาวภวภัทร์ ศาสตร์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา)

....กรรมการ
(ดร. นริศรา ทองบุญชู)

....กรรมการ
(ผศ. ดร. สันติ วัฒนานุสรณ์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
โดย นางสาวภวภัทร์ ศาสตร์ศรี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายในสารละลายด่างภายใต้ความดันบรรยากาศในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีถือเป็นวิธีที่ง่ายกว่ากระบวนการหมักที่ใช้ในปัจจุบัน จึงได้ทำการศึกษาถึงขั้นตอนและตัวแปรต่างๆในสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์กรดแลคติก ขั้นตอนแรกทำการไฮโดรไลซิสน้ำตาลทรายให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ กลูโคสและฟรุกโตส จากนั้นจึงเปลี่ยนกลูโคสและฟรุกโตสที่ได้เป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจนเพื่อเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกแทนการเติมกรดที่ค่อนข้างอันตรายขณะทำปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กรดแลคติกให้ได้ค่าผลได้สูง ต้องควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและฟรุกโตสในระบบให้ต่ำ ในขั้นตอนการปรับสภาพสารละลายให้เป็นกลางด้วยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนได้ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 12 โดยโซเดียมไอออนจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือโซเดียมคาร์บอเนตตกตะกอนลงมา ส่วนโซเดียมไอออนที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายจะถูกกำจัดออกโดยการผ่านเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจนด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้ได้กรดแลคติกที่ปราศจากโซเดียมไอออน

Report Title	Lactic Acid Synthesis from Cane Sugar Using Sodium Hydroxide
By	Miss Pawaphat Sartsri
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Assoc. Dr. Prakob Kitchaiya

ABSTRACT

This research has studied the synthesis of lactic acid from sugar in alkaline solution under atmospheric condition in a semi-pilot scale. Chemical synthesis of lactic acid is much simpler than fermentation method. The steps and parameters in optimal condition affecting the synthesis of lactic acid have been also studied. First step, cane sugar was hydrolyzed to monosaccharides such as glucose and fructose, by using sulfuric acid. Then glucose and fructose mixture was converted to lactic acid and other organic acids by sodium hydroxide solution and neutralized by carbon dioxide gas. Finally, Sodium lactate was converted to lactic acid by H-form cation exchange resin. The optimal operating condition for synthesizing lactic acid at highest yield is to control feed flow rate and concentration of glucose and fructose. The neutralized process was carried out ion by using carbon dioxide gas until it reached pH of 12 which most of sodium ions were precipitated as sodium carbonate. The remaining sodium ions were eliminated from the solution by passing through the H-form cation exchange resin at the flow rate of 3 mL/min.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่ให้ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ ให้คำชี้แนะ คำปรึกษาในงานวิจัยและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. นริศรา ทองบุญชู และ ผศ.ดร. สันติ วัฒนานุสรณ์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษา เพื่อเป็นพื้นฐานและคำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ รัตนเจียรกุล และคุณอำนาจ สุนทรชัชเวช ที่คอยให้คำแนะนำคำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ได้ทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักกำลังใจที่ดีและคอยสนับสนุนมาโดยตลอดจนทำให้มีวันนี้ได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ภวภัทร์ ศาสตร์ศรี

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มของการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยจึงทำให้มีผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบที่สามารถผลิตได้ตามความต้องการซึ่งได้มาจากกระบวนการทางปิโตรเคมี แต่เนื่องด้วยปัญหาในการการกำจัด ไม่ย่อยสลาย ตกค้างในธรรมชาติ และต้องเผาเพื่อทำลาย สิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ภาวะโลกร้อน เป็นต้น ปัจจุบันนี้จึงมีแนวคิดใหม่ในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้และใช้วัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เพื่อนำมาทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมี ซึ่งแหล่งวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น มีทั้งจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและวัตถุดิบมวลชีวภาพ ในส่วนของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-based biodegradable plastics) นั้นกำลังเป็นที่สนใจของภาคอุตสาหกรรมในหลายๆประเทศ

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid : PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น นำมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้เป็นกรดแลคติก (Lactic acid) แล้วนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีได้เป็นแลคไตด์ (Lactide) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) กลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์ [1] จะเห็นได้ว่า กรดแลคติกนั้นมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการผลิตพอลิแลคติกแอซิด แต่เนื่องด้วยกรดแลคติกสามารถสังเคราะห์ได้โดยผ่านกระบวนการหมักและกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี จึงเป็นเหตุให้นักวิจัยต่างค้นคว้าและทำการวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์กรดแลคติกเพื่อให้ได้ค่าผลได้สูง [2] ในหลายทศวรรษที่ผ่านมา ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ได้จากกระบวนการหมักที่ใช้จุลินทรีย์และอาศัยเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพวกคาร์โบไฮเดรตนั้นมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากกรรมวิธีการหมักนี้จะให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่สูง [3] ซึ่งเป็นผลมาถึงปัจจุบันการสังเคราะห์กรดแลคติกในภาคอุตสาหกรรมนั้นล้วนแล้วแต่มาจากกระบวนการหมักทั้งสิ้น

งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญที่จะศึกษาการสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายในสารละลายด่างในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) ภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อทดแทนการผลิตกรดแลคติกจากกรรมวิธีการหมักในปัจจุบันที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลานาน อีกทั้งยังเปิดโอกาส

ที่ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแข่งขันเชิงอุตสาหกรรมเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพ ซึ่งถือว่าการสังเคราะห์กรดแลคติกด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีนั้นมีความท้าทายอย่างมากในระดับอุตสาหกรรม โดยที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิผลและศักยภาพของกระบวนการผลิตและสังเคราะห์ตลอดจนการนำไปใช้ประโยชน์ เริ่มจากการนำน้ำตาลทรายมาไฮโดรไลซ์ให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จากนั้นก็ทำปฏิริยากับสารละลายด่างเพื่อให้กลายเป็นกรดแลคติก แล้วผ่านกระบวนการปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผ่านเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน เพื่อให้ได้เป็นกรดแลคติกที่ปราศจากโซเดียมไอออนพร้อมทั้งมีค่าผลได้ของกรดแลคติกสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายโดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale)

1.2.2 ศึกษาขั้นตอนและตัวแปรต่างๆในสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์กรดแลคติกเพื่อทดแทนการเติมกรดที่ค่อนข้างอันตรายขณะทำปฏิกิริยา

1.2.3 ศึกษาวิธีกำจัดโซเดียมไอออนที่เหลืออยู่สารละลายเพื่อให้ได้กรดแลคติกที่ปราศจากโซเดียมไอออน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) โดยมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะที่ไม่รุนแรง

1.3.2 ทำการกำจัดโซเดียมไอออนออกจากสารละลายโดยใช้วิธีปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผ่านเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน (H-form cation exchange resin)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์กรดแลคติกที่มีค่าผลได้สูงในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) ได้ในสภาวะที่ไม่รุนแรง ภายใต้ความดันบรรยากาศผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี

1.4.2 สามารถนำกระบวนการพื้นฐานทางเคมีมาประยุกต์ใช้ เพื่อทดแทนการเติมกรดที่ค่อนข้างอันตรายและสิ้นเปลือง ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างมากในระดับอุตสาหกรรมที่จะสังเคราะห์กรดแลคติกโดยใช้สารเคมี

1.4.3 ช่วยลดความยุ่งยากซับซ้อนและต้นทุนในการออกแบบเครื่องจักรและกระบวนการผลิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนการผลิตกรดแลคติกจากกรรมวิธีการหมักในปัจจุบัน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) [4]

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือ มอนอแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของน้ำตาลโมเลกุลคู่ หรือไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) เช่น ซูโครส(Sucrose) และพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เช่น เซลลูโลสและแป้ง น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นสารที่มีรสหวาน ละลายในน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว ถือเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ให้เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เล็กลงได้อีก มีสูตรโครงสร้างพื้นฐานคือ $(CH_2O)_n$ ซึ่ง n เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 3 ถึง 7 คาร์บอนจะต่อกันเป็นสายตรงไม่แตกแขนง มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จับกับคาร์บอนทุกตัว ยกเว้นคาร์บอน 1 ตัว ที่จะมีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) มาจับ หมู่ฟังก์ชันของคาร์โบไฮเดรตจะมี 2 หมู่ คือ หมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) หรือ หมู่คีโตน (-C=O) น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลดีไฮด์เรียกว่า น้ำตาลอัลโดส (Aldose sugar) ส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคีโตนจะเรียกว่า น้ำตาลคีโตส (Ketose sugar) น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสามารถจำแนกได้ตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 3 ถึง 7 ตามลำดับ ดังนี้ ไตรโอส (Triose) เทโทรส (Tetrose) เพนโทส (Pentose) เฮกโซส (Hexose) และเฮปโทส (Heptose) น้ำตาลอัลโดสที่เล็กที่สุด คือ กลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceraldehyde) และน้ำตาลคีโตสที่เล็กที่สุด คือ ไดไฮดรอกซิลอะซีโตน (Dihydroxyacetone) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.1

(ก) กลีเซอรอลดีไฮด์ (ข) ไดไฮดรอกซิลอะซีโตน

รูปที่ 2.1 น้ำตาลอัลโดสและน้ำตาลคีโตสที่เล็กที่สุด

2.1.1 การเรียกชื่อของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเรียกชื่อตามหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ถ้าเป็นหมู่แอลดีไฮด์เรียกว่า อัลโด (aldo-) แต่ถ้าเป็นหมู่คีโตนเรียกว่า คีโต (keto-) ไว้ด้านหน้าจำนวนคาร์บอนดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.1

สารประกอบแอลดีไฮด์และคีโตนจัดเป็นโมเลกุลมีขั้วปานกลาง จุดเดือด จุดหลอมเหลว และการละลายในน้ำต่ำกว่าแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่ของ

แอลดีไฮด์และคีโตนเหมือนกันมาก แต่เนื่องจากแอลดีไฮด์มีอะตอมไฮโดรเจนต่ออยู่กับหมู่คาร์บอนิลทำให้มีผลต่อสมบัติทางเคมี 2 ประการ คือ แอลดีไฮด์จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายในขณะที่คีโตนจะถูกออกซิไดซ์ได้ยากและแอลดีไฮด์จะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์(Nucleophilic addition) มากกว่าคีโตน โดยที่ R และ R’ อาจเป็นอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) แสดงดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การเรียกชื่อของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวตามหมู่ฟังก์ชันและจำนวนคาร์บอน [5]

จำนวนคาร์บอน	การเรียกชื่อ		ตัวอย่างน้ำตาล	
	อัลโดส	คีโตส	น้ำตาลอัลโดส	น้ำตาลคีโตส
3	aldotriose	ketotriose	glyceraldehyde	dihydroxyacetone
4	aldotetrose	ketotetrose	erythrose	erythulose
5	aldopentose	ketopentose	ribose	ribulose
6	aldohexose	ketohextose	glucose, galactose	fructose
7	aldoheptose	ketoheptose	-	sedoheptulose

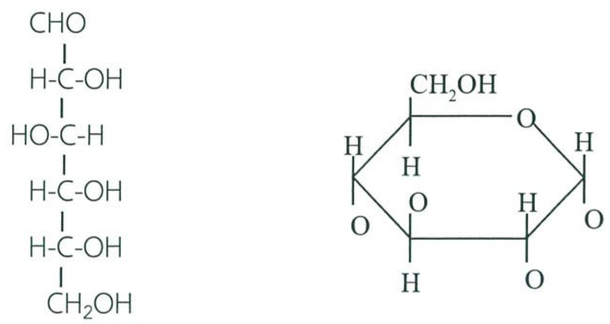
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแอลดีไฮด์และคีโตน

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว [6]

แอลดีไฮด์และคีโตนเป็นสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นหมู่ฟังก์ชันหลัก มีสูตรโครงสร้างดังนี้

2.1.2.1 โครงสร้าง (Structure)

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ โครงสร้างที่เป็นเส้นตรง (Fischer projection) และโครงสร้างที่เป็นวงแหวน (Harworth projection) แสดงดังรูปที่ 2.3



(ก) แบบ Fischer projection (ข) แบบ Harworth projection

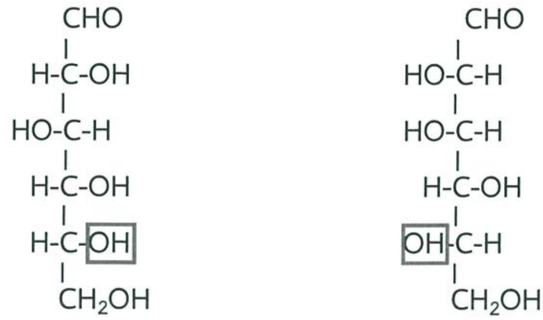
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกลูโคส

โดยทั่วไปโครงสร้างของกลูโคสจะอยู่ในรูปของวงแหวนหกเหลี่ยมเพราะมีความเสถียรมากกว่า แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถวัดความเสถียรได้จากค่าคงที่สมดุล (K_{eq}) ซึ่ง $K_{eq} = \frac{K_{forward}}{K_{reverse}}$

รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบวงเปิดและโครงสร้างแบบวงแหวนของกลูโคส [6]

2.1.2.2 ไอโซเมอริซึม (Isomerism)

ไอโซเมอริซึมเป็นปรากฏการณ์ทางเคมีที่สารประกอบมีสูตรโครงสร้างเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในทิศทางสามมิติแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารนั้นแตกต่างกันไปด้วย เรียกสารที่มีปรากฏการณ์แบบนี้ว่าเป็นไอโซเมอร์ซึ่งกันและกัน สารแต่ละชนิดสามารถเกิดไอโซเมอร์ได้ 2n ซึ่ง n คือ จำนวนคาร์บอนที่ไม่สมมาตร เช่น กลูโคสจะมีโครงสร้างไอโซเมอร์อยู่ 2 รูปแบบ คือ ไอโซเมอร์แบบ D (D-isomer) และแบบ L (-isomer) โดยความแตกต่างกันเกิดจากการจัดเรียงตัวของ –H และ –OH ของคาร์บอนอะตอมที่ติดกับคาร์บอนอะตอม ตัวสุดท้ายที่ไม่สมมาตร (Asymmetric carbon atom, C*) แต่น้ำตาลในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบ D-isomer แสดงดังรูปที่ 2.5

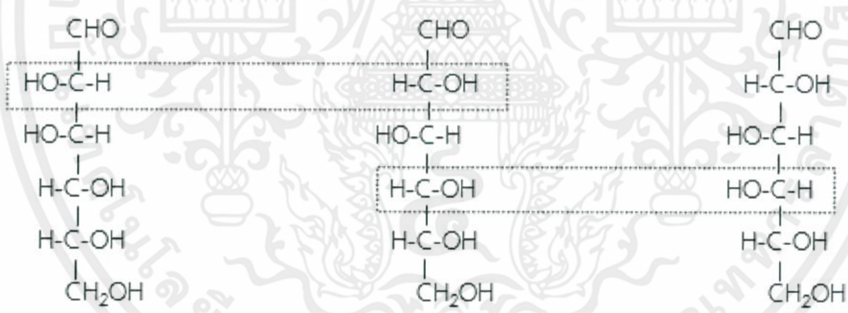


(ก) D-isomer (ข) L-isomer

รูปที่ 2.5 โครงสร้างไอโซเมอร์ของกลูโคส [6]

2.1.2.3 อิพิเมอร์ (Epimer)

อิพิเมอร์เป็นคุณสมบัติของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวของ –H และ –OH ต่างกัน 1 ตำแหน่ง เช่น กลูโคส กาแลกโทส และแมนโนส ต่างก็มีสูตรเหมือนกัน คือ $C_6H_{12}O_6$ โดยที่โครงสร้างของแมนโนสจะต่างจากกลูโคสตรงการเรียงตัวของ –H และ –OH ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า แมนโนสเป็นอิพิเมอร์กับกลูโคส และการเรียงตัวของ –H และ –OH ต่างกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ทำให้โครงสร้างของกลูโคสต่างจากกาแลกโทส เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า กลูโคสเป็นอิพิเมอร์กับกาแลกโทส



แมนโนส กลูโคส กาแลกโทส

รูปที่ 2.6 โครงสร้างอิพิเมอร์ของกลูโคส แมนโนสและกาแลกโทส [6]

2.1.3 น้ำตาลรีดิวซ์

คาร์โบไฮเดรตที่มีหมู่อัลดีไฮด์และคีโตนอิสระ มีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ เมื่อคาร์โบไฮเดรตอยู่ในสารละลายด่างจะเกิดการจัดตัวใหม่ของคาร์บอนอะตอม ทำให้วงเปิดออกเป็นสายยาวและมีหมู่อัลดีไฮด์หรือหมู่คีโตนอิสระเกิดขึ้นคาร์บอนอะตอมเกิดปฏิกิริยาการจัดตัวใหม่กลับไปมาระหว่างรูปแบบ 2 ชนิด คือ คีโตนและอีนอล คาร์โบไฮเดรตส่วนมากที่มีคุณสมบัตินี้ เช่น กลูโคส ฟรุกโตส มอลโตส และแมนโนส เป็นต้น ยกเว้นเพียงชนิดเดียว คือ ซูโครส เนื่องจากคาร์บอนอะตอมที่ 1 ไม่มีหมู่อัลดีไฮด์อิสระ คุณสมบัติของการ

เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ สามารถทดสอบได้โดยเอาสารละลายที่ต้องการทดสอบมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเบเนดิกส์ (Benedict's reagent) หรือสารละลายเฟห์ลิง (Fehling's reagent) [7]

2.2 กรดแลคติก (Lactic acid) [8]

กรดแลคติกมีชื่อทางเคมีว่า 2-hydroxypropionic acid หรือ 2-hydroxypropanoic acid กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คาร์บอนหนึ่งอะตอมที่อยู่ส่วนปลายเป็นส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ส่วนอะตอมคาร์บอนอีกปลายหนึ่งเป็นหมู่เมทิล (methyl group) หรือหมู่ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) และอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตรงกลางมีหมู่ แอลกอฮอล์ กรดแลคติกมีอยู่ 2 รูปแบบคือ L(+)-Lactic acid และ D(-)-Lactic acid ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันดังรูปที่ 2.7 และสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของกรดแลคติกแสดงได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

(ก) โครงสร้างของกรดแลคติกรูป L(+) (ข)โครงสร้างของกรดแลคติกรูป D(-)

รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของกรดแลคติก [8]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก

สูตรเคมี	$C_3H_6O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	90.08 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว D(-) หรือ L(+) DL (ในอัตราส่วนต่างๆ)	52.8 - 54 องศาเซลเซียส 16.8 - 33 องศาเซลเซียส
จุดเดือด DL	82 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.5 มิลลิเมตรปรอท 122 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 14 มิลลิเมตรปรอท
ค่าคงที่ของการแตกตัว (K_a ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	1.37×10^{-4}
ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (H_c)	1361 กิโลจูลต่อโมล
ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	190 กิโลจูลต่อ (โมลองศาเคลวิน)
ค่าความเป็นกรด (pK_a)	3.86

กรดแลคติก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย[18] ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งสามารถผลิตขึ้นได้เองหรือการเติมในกระบวนการหมักอาหารในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น นมเปรี้ยว โยเกิร์ต ขนมปัง และเบียร์ เป็นต้น ด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดร่างกาย ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวและผลิตภัณฑ์สำหรับช่องปาก นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ มีการผลิตพลาสติกที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น การผลิตพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) หรือใช้เป็นสารตั้งต้นผลิตสารอื่นๆ เช่น ผลิตกรดโพไพโนอิก กรดอะซิติก และเอทิลแลคเตท เป็นต้น [9]

2.3 การสังเคราะห์กรดแลคติก [10]

กรดแลคติก สามารถสังเคราะห์ได้จาก 2 วิธี คือ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีและกระบวนการย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดแลคติกด้วยเอนไซม์หรือจุลินทรีย์

2.3.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกทางเคมี

ในอดีตกรดแลคติกสังเคราะห์ได้จากการเติมไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) ลงในอะซิทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ทำให้เกิดแลคโตไนไตรล์ (Lactonitrile) ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดในสภาวะที่เป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศสูงซึ่งทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการกลั่น จากนั้นแลคโตไนไตรล์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดแลคติก โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) หรือ กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เข้มข้นเพื่อสร้างเป็นเกลือแอมโมเนียและกรดแลคติก กรดแลคติกจะเกิดกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลได้เมทิลแลคเตตซึ่งสามารถระเหยได้ง่ายขึ้นจึงถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดเพื่อสร้างกรดแลคติกและเมทานอลที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีจะสร้าง Racemic mixture ของกรดแลคติกที่มีการผสมกันระหว่างกรดแลคติกที่มีโครงสร้างรูป L(+) และ D(-) ที่มีสัดส่วนไม่แน่นอนทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ แต่ในปัจจุบันการผลิตกรด แลคติกส่วนใหญ่ใช้วิธีการหมัก ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่สูงแต่เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่นานและความซับซ้อนของกระบวนการเลี้ยงเชื้อและการแยกที่ยากและซับซ้อน หลายงานวิจัยจึงหันมาสนใจการผลิตกรดแลคติกด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี

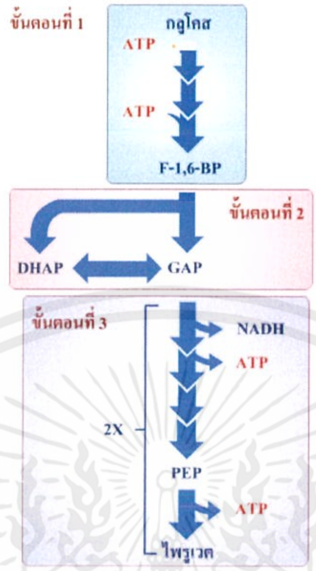
2.3.2 การย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดแลคติกโดยการหมัก [11]

กระบวนการย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดแลคติกโดยการหมักนั้นเกิดขึ้นโดยอาศัยกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) หรือกระบวนการเผาผลาญกลูโคสดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในสิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์แลคโตบาซิลลัสสามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดแลคติก โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> การเติมหมู่ฟอสเฟตพลังงานจาก ATP (Adenosine triphosphate) ให้กับน้ำตาลกลูโคส

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> เปลี่ยนน้ำตาลที่มี 6 คาร์บอน ให้เป็น น้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม หรือที่เรียกว่า ไตรโอสฟอสเฟต (Triose phosphate) จำนวน 2 ตัว (ในที่นี้คือ GAP และ DHAP)

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> การออกซิเดชันของไตรโอสฟอสเฟตให้เป็นไพรูเวทและได้พลังงาน ATP



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนหลักของกระบวนการไกลโคไลซิส [12]

ในการหมักจะมีการควบคุมค่าพีเอช โดยการเติมปูนขาว เมื่อเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยแคลเซียมแลคแตทและน้ำ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Carbohydrate)}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{(Calcium hydroxide)}}{Ca(OH)_2} \longrightarrow \underset{\text{(Calcium lactate)}}{2(CH_3CHOHCOO^-)Ca^{2+}} + H_2O$$

จากนั้นละลายตะกอนของแคลเซียมแลคเตตด้วยกรด เช่น กรดซัลฟิวริก หรือกรดไฮโดร-คลอริก เพื่อให้ได้กรดแลคติกและแคลเซียมซัลเฟต ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Calcium lactate)}}{2(CH_3CHOHCOO^-)Ca^{2+}} + \underset{\text{(Sulfuric acid)}}{H_2SO_4} \longrightarrow \underset{\text{(Lactic acid)}}{2CH_3CHOHCOOH} + \underset{\text{(Calcium sulphate)}}{CaSO_4}$$

2.3.3 การทำให้กรดแลคติกบริสุทธิ์

2.3.3.1 การแยกโดยการกลั่น

กรดแลคติกถูกทำให้บริสุทธิ์ขึ้นโดยฟอกสีออกด้วยผงถ่านกัมมันต์ จากนั้นกรองเพื่อนำเซลล์ของแบคทีเรียและตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตออกไปส่วนของกรดแลคติกจะทำปฏิกิริยาเอสเทอ-ริฟิเคชัน (Esterification) ของกรดแลคติกและเมทานอลได้เป็นเมทิลแลคแตท ระเหยออกมาจากของผสมและได้น้ำ ดังสมการ

$$CH_3CHOHCOOH + CH_3OH \longrightarrow CH_3CHOHCOOCH_3 + H_2O$$

(Lactic acid) (Methanol) (Methyl lactate)

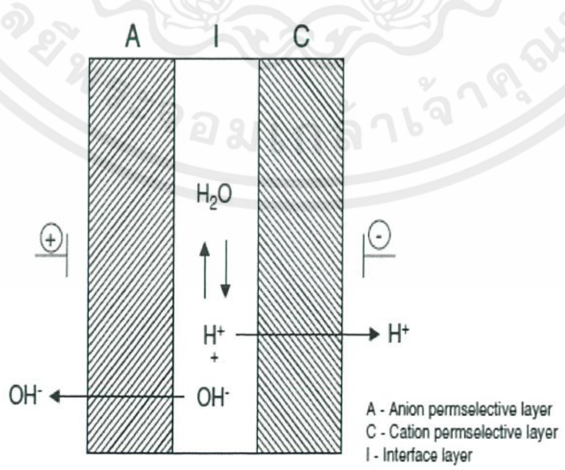
หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสโดยน้ำเพื่อให้ได้กรดแลคติกบริสุทธิ์ ดังสมการ

$$CH_3CHOHCOOCH_3 + H_2O \longrightarrow CH_3CHOHCOOH + CH_3OH$$

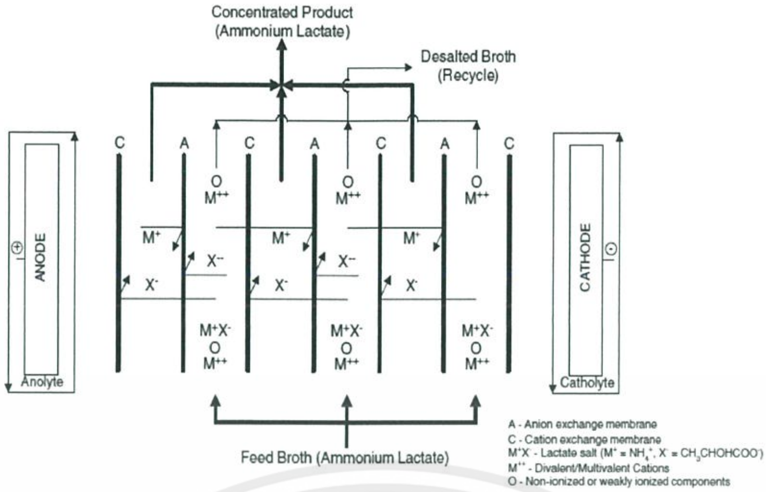
(Methyl lactate) (Lactic acid) (Methanol)

2.3.3.2 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrodialysis : ED) [13]

ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีเมมเบรนในการแยกและการทำให้บริสุทธิ์โดยการใช้การกรองระดับไมโคร (Microfiltration) การกรองระดับนาโน (Ultrafiltration) และการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งนำไปสู่กระบวนการใหม่สำหรับผลิตภัณฑ์กรดแลคติกโดยไม่มีการสร้างเกลือที่เป็นของเสีย เมมเบรนสามารถแยกน้ำที่แตกตัวเป็นโปรตอนและไฮดรอกซิลไอออนแสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นระบบการแยกด้วยไฟฟ้าเคมีแบบทวีคูณ (Double ED) ซึ่งถูกพัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพมิชิแกน ใช้ระบบการแยกไฟฟ้าเคมีด้วยน้ำ (Water-splitting ED) ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีนี้สามารถทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ไปหากรดที่มีประจุลบกลายเป็นกรดอิสระ (Free acid) ส่วนไฮดรอกซิลไอออนเคลื่อนที่ไปหาประจุบวกกลายเป็นด่างอิสระ (Free base) ทำให้แยกเกลือของกรดแลคติกออกจากสารละลายด่างได้ แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการแยกสารที่เมื่อมีประจุบวกมากกว่าหนึ่งปนเปื้อน เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม จะทำให้เกิดสารประกอบในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำที่บริเวณรอยต่อระหว่างเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า โดยทั่วไปเมมเบรนมีข้อจำกัดในการทนไอออนประจุสองบวกได้ประมาณ 1 ppm แต่ในอุตสาหกรรมการหมักมีความเข้มข้นของไอออนประจุสองบวกอยู่ในช่วง 1000 ppm ดังนั้นจึงมีกระบวนการเพื่อแก้ไขปัญหานี้คือ ซึ่งกระบวนการนี้ใช้หน่วยระบบการกำจัดเกลือด้วยไฟฟ้าเคมี (Desalting ED) ในการกำจัดไอออนหลายประจุ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานเมมเบรน 2 ขั้วไฟฟ้า (Bipolar electro dialysis membrane) [13]



รูปที่ 2.10 ระบบการกำจัดเกลือของ (Desalting electro dialysis) [13]

2.4 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.3 เป็นก๊าซที่เมื่อละลายในน้ำสามารถแตกตัวเป็นกรดอ่อนซึ่งก็คือ กรดคาร์บอนิก สารนี้ทำปฏิกิริยาทันทีกับด่าง เช่น โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต และปูนขาวละลาย เปลี่ยนเป็นเกลือคาร์บอเนตและเกลือไบคาร์บอเนตในสภาพเป็นกลาง ดังสมการต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Carbon dioxide)}}{CO_2} + H_2O \longrightarrow \underset{\text{(Carbonic acid)}}{H_2CO_3}$$

$$\underset{\text{(Carbonic acid)}}{H_2CO_3} + \underset{\text{(Sodium hydroxide)}}{2NaOH} \longrightarrow \underset{\text{(Sodium carbonate)}}{Na_2CO_3} + 2H_2O$$

กรดคาร์บอนิก เป็นกรดอ่อนที่ละลายในน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออน H^+ และ $HCO3^-$ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงแล้วทำปฏิกิริยาทันทีกับสารละลายด่าง [14]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [15]

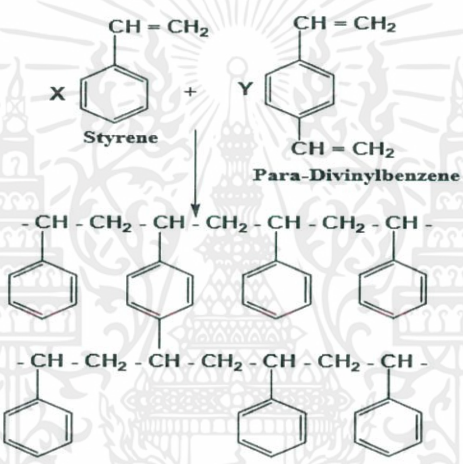
สูตรเคมี	CO_2
น้ำหนักโมเลกุล	44.00
ลักษณะทางกายภาพ	ก๊าซไม่มีสี
จุดหลอมเหลว	-78.5 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	-56.6 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 5.185 บาร์
ค่าความเป็นกรด (pK_a)	6.35 และ 10.33
ความสามารถละลายได้ในน้ำ	1.45 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 100 กิโลปาสคาล
ความหนืด	0.07 cP ที่อุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส

2.5 เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) [16]

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) คือ สารพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการทำพอลิเมอร์ไรซ์สารอินทรีย์ต่อไปนี้

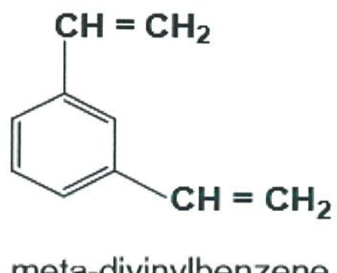
- Styrene + Divinylbenzene
- Polymethacrylate
- Methacrylic acid + Divinylbenzene
- Acrylic acid + Divinylbenzene

การพอลิเมอร์ไรซ์สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์เชื่อมโยงกันได้หลายแบบ (Cross-linking) ทำให้ได้เรซินที่มีคุณสมบัติต่างๆกัน เรซินที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ เรซินที่เตรียมจากการพอลิเมอร์ไรซ์สไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน



รูปที่ 2.11 การเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน **[16]**

การเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของสารดังแสดงในรูปที่ 2.11 สามารถเกิดได้ทั้ง 3 ทิศทาง โดยที่องศาของการเชื่อมโยงกัน (degree of cross linking) ของพอลิเมอร์สามารถควบคุมได้โดยควบคุมอัตราส่วนของไดไวนิลเบนซีนกับสไตรีน (อัตราส่วน Y / X) โดยปกติจะใช้ 1 โมลของไดไวนิลเบนซีนต่อ 11 โมลของสไตรีน นอกจากพาราไดไวนิลเบนซีนแล้วอาจใช้เมตาไดไวนิลเบนซีนก็ได้ ซึ่งโครงสร้างของเมตาไดไวนิลเบนซีน แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเมตาไดไวนิลเบนซีน [16]

เรซินที่เตรียมได้จะแสดงคุณสมบัติต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่เข้าไปในอะโรมาติกนิวเคลียส ซึ่งสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่ใส่เข้าไปได้ 2 ชนิด คือ

2.5.1 ชนิดแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion exchangers)

เรซินชนิดนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสอยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียส เตรียมได้โดยทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ของเบสกับพอลิเมอร์ของโพลีสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีนที่ถูกทำคลอโรเมทิลเลต (Chloro methylate) แล้ว ถ้ากลุ่มของเบส คือ Quaternary amine group เรซินที่เตรียมได้จะมีฤทธิ์เป็นเบสแก่ เรียกว่า เรซินแลกเปลี่ยนแอนไอออนชนิดแก่ (Strong anion exchangers) จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแอนไอออนได้ดี ถ้ากลุ่มของเบสเป็น Tertiary และ Secondary amine จัดเป็นเรซินที่มีความแรงขนาดกลาง (Moderately basic anion exchangers) แต่ถ้ากลุ่มของเบส คือ เอมีน ($-NH_2$) จะมีความเป็นเบสต่ำมาก จัดเป็นเรซินแลกเปลี่ยนแอนไอออนชนิดอ่อน (Weak anion exchangers) ซึ่งความแรงของเบสจะลดลงตามลำดับ

2.5.2 ชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchangers)

เรซินชนิดนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียส เตรียมได้โดยนำกรดซัลฟูริกทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ของสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน โดยที่หมู่ $-SO_3H$ จะเข้าไปอยู่ในพอลิเมอร์ ทำให้ได้เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนอื่นๆได้ดี จึงจัดเป็นเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนชนิดแก่ (Strong cation exchangers) ยังมีเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนชนิดอื่นๆอีกมากที่แตกต่างกันตรงที่หมู่ฟังก์ชันที่มีฤทธิ์เป็นกรด เตรียมได้โดยทำปฏิกิริยาเคมีแบบแทนที่ระหว่างหมู่ฟังก์ชันกับพอลิเมอร์เช่นกัน หมู่ของกรดที่ใช้เป็นหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่

- Carboxylic acid : $-COOH$
- Phosphonic acid : $-PO_3H^-$ หรือ $-PO_3H_2$
- Phosphinic acid : $-HPO_2H^-$ หรือ $-HPO_2H_2$
- Phenolic : $-OH$
- Arsonic acid : $-AsO_3H^-$ หรือ $-AsO_3H_2$
- Selenonic acid : $-SeO_3H$

การแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ได้จากหมู่ของกรดเหล่านี้จะมีความแรงน้อยกว่าหมู่ $-SO_3H$ จึงจัดเป็นเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนชนิดอ่อน (Weak cation exchangers) ความแรงของหมู่กรดแต่ละชนิดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดนั้นๆและค่าพีเอช (pH) ของ H^+ ดังสมการต่อไปนี้

$$RCOOH + Na^+ + OH^- \longrightarrow RCOO^-Na^+ + H_2O$$

$$nRCOO^-Na^+ + M^{n+} \longrightarrow (RCOO^-)_nM^{n+} + nNa^+$$

เนื่องจากเรซินที่อยู่ในรูปของเกลือโซเดียมมีลักษณะเป็นเกลือของกรดอ่อนที่สามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้ ดังนั้น ถ้าใช้น้ำกลั่นล้างเรซินจะทำให้เรซินเกิดไฮโดรไลซิสกลับมาอยู่ในรูปของกรดอ่อนที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$RCOO^{-}Na^{+} + H_2O \longrightarrow RCOOH + Na^{+} + OH^{-}$$

โดยที่ R แทน พอลิเมอร์ของเรซิน แสดงว่า ถ้าต้องการให้แคตไอออนชนิดอ่อนสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ดีควรทำในสารละลายที่เป็นเบสหรือทำเรซินให้อยู่ในรูปของเกลือโซเดียม จะเห็นได้ว่า เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออนนั้นมีได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบของ H^{+} (Hydrogen form) และ Na^{+} (Sodium form)

เรซินที่เตรียมโดยให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดหรือเบสเพียงหมู่เดียวในอะโรมาติกนิวเคลียสตามที่กล่าวมาข้างต้นเรียกว่า Monofunctional resin สามารถเตรียมเรซินให้มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 ตัวได้ เรียกว่า Polyfunctional resin ถ้าเตรียม Polyfunctional resin โดยให้มีหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันอยู่ในเรซิน กล่าวคือ มีทั้งหมู่ของกรดและหมู่ของเบสจะได้เรซินที่เรียกว่า Mixed-bed ion exchange resin เป็นเรซินที่ผสมระหว่างแคตไอออนและแอนไอออนเรซิน

เรซินชนิดต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการแบ่งตามความประพฤติของเรซินที่เกิดจากธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชัน คือ ถ้าหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดจะเป็นเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออน ถ้าหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสจะเป็นเรซินแลกเปลี่ยนแอนไอออน เรซินที่แบ่งไว้เป็นประเภทเดียวกันตามหมู่ฟังก์ชันนี้ยังมีความประพฤติแตกต่างกันออกไปได้อีก สิ่งที่มีผลทำให้เรซินมีความประพฤติต่างๆกัน ได้แก่

1) ขนาดของเรซิน มีผลต่ออัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนไอออนและการซึมผ่านของสารละลายออกจากคอลัมน์

2) Degree of cross-linking จะมีผลทำให้เรซินมีความแข็ง มีการพองตัว และขนาดรูต่างกัน

3) Strength of functional group มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของไอออนระหว่างเรซินกับสารละลาย

4) Number of functional group มีผลทำให้เรซินมีขนาดความจุต่างๆกัน

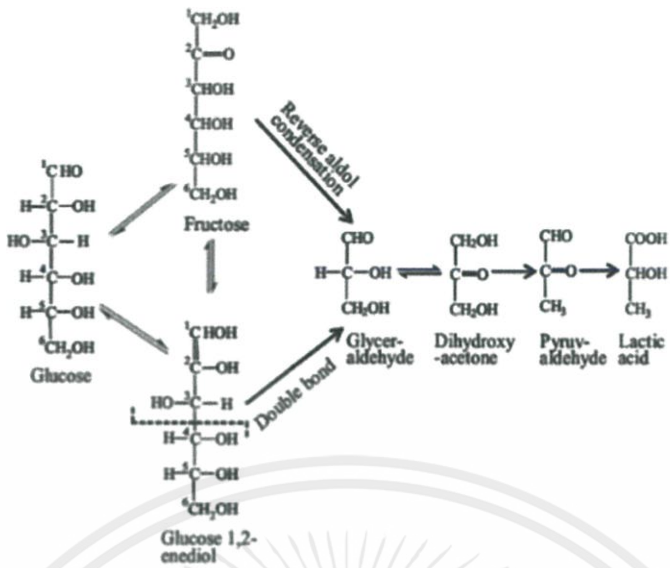
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yan และคณะ [17] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคาร์โบไฮเดรต (กลูโคส เซลลูโลส และแป้ง) เป็นกรดแลคติกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลซียมไฮดรอกไซด์ โดยปราศจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใด ๆ ที่สภาวะไฮโดรเทอร์มอล อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเริ่มจากใช้กลูโคสเริ่มต้น 0.07 กรัมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.16 ถึง 7.0 โมลต่อลิตร และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.08 ถึง 0.4 โมลต่อลิตร ค่าผลได้กรดแลคติกที่มากที่สุดคือ 27 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมลต่อลิตร และ 20 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.32 โมลต่อลิตร ส่วนหนึ่งของงานวิจัยยังได้ทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา และวิเคราะห์หาตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา ตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC และ GC/MS แสดงดังตารางที่ 2.4

Jin และคณะ [18] ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสภาวะอุณหภูมิสูง โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาด่างใดๆ พบว่ากรดแลคติกจำนวนมากสามารถผลิตได้จากคาร์โบไฮเดรต ในสภาวะอุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC GC/MS และ NMR ผลจากการศึกษาพบว่าเกิดน้ำตาลฟรุกโตส กลีเซอรัลดีไฮด์ ไดไฮดรอกซิลอะซีโตนและไพรูวอลดีไฮด์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กลูโคส เป็นสารตั้งต้น กลไกการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤติแสดงดังรูปที่ 2.13 กลไกเริ่มจากไอโซเมอร์ไรเซชันกลูโคสไปเป็นฟรุกโตส แล้วฟรุกโตสจะถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรัลดีไฮด์หรือไดไฮดรอกซิลอะซีโตน ทั้งกลีเซอรัลดีไฮด์และไดไฮดรอกซิลอะซีโตนเกิดการสูญเสียน้ำเป็นไพรูวอลดีไฮด์แล้วได้กรดแลคติก จากการทดลองพบว่าไพรูวอลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรัลดีไฮด์และไดไฮดรอกซิลอะซีโตนและกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์หลักของไพรูวอลดีไฮด์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ หมายความว่าน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤติอาจทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด่างตามทฤษฎีของเบรินสเตด-เลารี (Bronsted Base Catalyst)

ตารางที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงชีวมวลคาร์โบไฮเดรตเป็นกรดแลคติกที่ไฮโดรเทอร์มัล

สารเคมี	วิธีวิเคราะห์
ไกลคอลอัลดีไฮด์	HPLC
กลีเซอรัลดีไฮด์	HPLC
กลูโคส	HPLC
กรดฟอร์มิก	HPLC GC/MS
กรดแลคติก	HPLC GC/MS
กรดอะซิติก	HPLC GC/MS
กรดโพพาโนอิก	GC/MS
กรดอะไคลิก	HPLC
กรด 2-ไฮดรอกซีบิวทาโนอิก	GC/MS
กรดไกโคลิก	GC/MS
กรด 2,3-2-ไฮดรอกซี-2-เมทิลโพพาโนอิก	GC/MS
กรด 2,4-2-ไฮดรอกซีบิวทาโนอิก	GC/MS
กรดเมทาเซกคาลินิก	GC/MS
อะซิโตน	GC/MS
3-ไฮดรอกซี-2-บิวทาโนล	GC/MS
3-ไฮดรอกซี-2-บิวทาโนล	GC/MS
2-ไซโคเพนเทน-1-วัน	HPLC GC/MS
3-เอทิล-2-ไฮดรอกซี-2-ไซโคเพนเทน-1-วัน	HPLC GC/MS
3-เมลทิล-2-ไซโคเพนเทน-1-วัน	HPLC GC/MS
ฟอร์มาลดีไฮด์	HPLC



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเปนกรดแลคติกในน้ำภายใตอุณหภูมิวิกฤติ [18]

บทที่ 3
ขั้นตอนการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย การไฮโดรไลซิสน้ำตาลทรายด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อเกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส หลังจากนั้นนำน้ำตาลผสมทั้งสองชนิดนี้มาทำปฏิกิริยากับด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เกิดเป็นกรดแลคติก และนำกรดแลคติกที่ได้มาแยกออกเพื่อให้บริสุทธิ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทดลองปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

อุปกรณ์

1) ภาชนะใส่สาร
2) ตราชั่ง
3) เครื่องชั่งสารดิจิตอล
4) บีกเกอร์

สารเคมี

1) น้ำตาลทราย
2) น้ำ
3) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98

ขั้นตอนการทดลอง

1) ชั่งน้ำตาลทรายและเตรียมน้ำแล้วเทรวมกันใส่ในภาชนะ แล้วคนสารละลายให้เข้ากัน
2) ชั่งกรดซัลฟิริกเข้มข้นร้อยละ 98 แล้วเจือจางด้วยน้ำ
3) เทสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เจือจางแล้วในข้อ 2 ลงในสารละลายรวมในข้อ 1 เพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส จะได้สารละลายรวมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส

3.2 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสและฟรุกโตสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ

3.2.1 อุปกรณ์เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องปฏิกรณ์สามคอแบบแจ็คเก็ทขนาด 20 ลิตร
2) ใบกวน
3) เครื่องปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm pump)
4) อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน (Circulating bath)
5) ถังใส่สาร
6) ถังบรรจุสาร

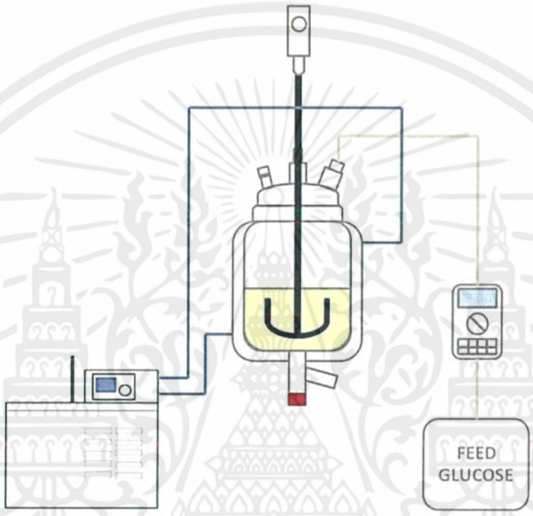
3.2.2 วิธีการประกอบเครื่องปฏิกรณ์

วิธีการประกอบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สามคอแบบแจ็คเก็ต โดยยึดกับคานเหล็กให้แน่นแล้วต่อสายยางกับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนซึ่งเป็นเครื่องให้ความร้อน

2) ติดตั้งใบกวนให้อยู่กึ่งกลางเครื่องปฏิกรณ์สามคอแบบแจ็คเก็ต ส่วนอีกคอที่เหลือปิดด้วยจุกแก้วป้องกันอากาศจากภายนอกให้เข้าน้อยที่สุด

3) ติดตั้งปั๊มไดอะแฟรม โดยนำสายที่ทำหน้าที่ป้อนสารใส่ลงในรูด้านริมของเครื่องปฏิกรณ์สามคอ เพื่อเป็นตัวป้อนสารเข้ามาในระบบ



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยา

3.2.3 วิธีการทดลอง

สารเคมี

1) สารละลายน้ำตาลกลูโคสผสมฟรุกโตส

2) สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3) น้ำ

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา

1) นำสารละลายกลูโคสใส่ในถังใส่สาร แล้วจึงนำสายปั๊มไดอะแฟรมจุ่มลงในสารละลาย จากนั้นล้างสายปั๊มไดอะแฟรมด้วยสารละลายกลูโคส เพื่อให้สายยางเต็มไปด้วยสารละลายกลูโคสและพร้อมสำหรับป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์

2) เจือจางสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปเทใส่เครื่องปฏิกรณ์

3) ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนประมาณ T องศาเซลเซียส รอจนได้อุณหภูมิที่ต้องการพร้อมกับการปั่นกวนด้วยใบกวน

4) เมื่ออุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ เปิดปั๊มไดอะแฟรมเพื่อป้อนสารละลายน้ำตาลลงในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยา รอจนกระทั่งสารละลายน้ำตาลหมด แล้วจึงปิดปั๊มไดอะแฟรม

5) บรรจุสารละลายลงในถัง พร้อมกับปิดฝาให้สนิท

3.3 การปรับค่าพีเอช (pH) สารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นให้มีค่าพีเอช (pH) ประมาณ 12 ด้วยวิธีปรับสภาพให้เป็นกลาง (Neutralization) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุปกรณ์

1) คอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 93 เซนติเมตร
2) หัวพ่น
3) สายยางพลาสติกใส
4) วาล์วเปิด-ปิด
5) ข้อต่อ
6) ถังบรรจุสาร
7) เครื่องวัดค่าพีเอชดิจิตอล

สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้น
2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ขั้นตอนการทดลอง

ในส่วนของขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

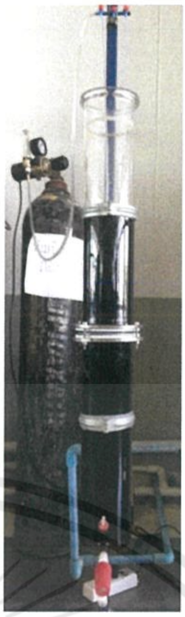
1) บรรจุสารละลายโซเดียมแลคเตทปริมาตร 6 ลิตรลงในคอลัมน์

2) เปิดวาล์วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านในสารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นด้วยอัตราการไหลคงที่ต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

3) เก็บสารตัวอย่างครั้งละ 10 มิลลิลิตร และตรวจวัดค่าพีเอช (pH) ของสารละลายที่เวลา 60, 90, 120, 150, 180 และ 210 นาที ตามลำดับ พร้อมทั้งสังเกตฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าของสารละลาย แล้วบันทึกผล

4) เมื่อเวลาผ่านไป 3.5 ชั่วโมง ทำการวัดค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย หากพบว่าค่าพีเอช (pH) อยู่ที่ประมาณ 12 ให้ทำการปิดวาล์วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วบรรจุสารละลายที่มีตะกอนเกลือโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่ลงในถังบรรจุสาร พร้อมกับปิดฝาให้สนิท

<u>หมายเหตุ</u> : ขณะทำการทดลองสารละลายจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากมี heat of reaction เกิดขึ้นในปฏิกิริยาคายความร้อน



(ก) ก่อนบรรจุสารละลาย (ข) หลังบรรจุสารละลาย

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาก่อนและหลังบรรจุสารละลายโซเดียมแลคเตท

3.4 การแยกตะกอนเกลือโซเดียมคาร์บอเนตออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง

อุปกรณ์

1) Büchner funnel
2) Büchner flask
3) ปั๊มสุญญากาศ
4) ยางรอง (rubber bung)
5) กระดาษกรองเบอร์ 93
6) กระป๋องพลาสติก
7) ขวดบรรจุสาร

สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นที่มีตะกอนเกลือโซเดียมคาร์บอเนตปน

ขั้นตอนการทดลอง

1) ติดตั้ง Büchner funnel เข้ากับ Büchner flask โดยมียางรองอุดเพื่อไม่ให้อากาศเข้าแล้วต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ

2) วางแผ่นกระดาษกรองเบอร์ 93 ใน Büchner funnel แล้วพรมด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยแล้วเปิดปั๊มสุญญากาศ ความดันประมาณ 76 เซนติเมตรปรอท

3) เริ่มการทดลองโดยค่อยๆเทสารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นที่มีตะกอนเกลือโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่ลงใน Büchner funnel ส่วนของเกลือโซเดียมคาร์บอเนตจะถูกกรองอยู่ด้านบน

กระดาษกรอง โดยมีแค่สารละลายโซเดียมแลคเตทเท่านั้นที่ไหลผ่านกระดาษกรองลงไปใน Büchner flask

4) หลังจากนั้นเมื่อสังเกตว่า เกลือโซเดียมคาร์บอเนตนั้นเริ่มแห้งออกเป็นสีขาวๆและไม่มีสารละลายไหลผ่านกระดาษกรองลงมาก็ทำการปิดปั๊มสุญญากาศ แล้วเทแยกตะกอนเกลือที่กรองได้ออกมาเก็บใส่ในกระป๋องพลาสติก และในส่วนของสารละลายโซเดียมแลคเตทให้แยกเก็บในขวดบรรจุสาร

3.5 การระเหยเอาน้ำออกจากสารละลายโซเดียมแลคเตท

อุปกรณ์

1) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator)
2) คอนเดนเซอร์
3) อ่างน้ำร้อน
4) เครื่องให้ความร้อน
5) ปั๊มสุญญากาศ
6) ขวดก้นกลม ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมแลคเตท

ขั้นตอนการทดลอง

1) บรรจุสารละลายโซเดียมแลคเตทปริมาตร 500 มิลลิลิตรลงในขวดก้นกลม แล้วต่อเข้ากับเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน

2) ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างน้ำร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเปิดปั๊มสุญญากาศความดันประมาณ 60-66 เซนติเมตรปรอท แล้วเริ่มการทดลอง พร้อมทั้งสังเกตสารละลายที่อยู่ในขวดก้นกลม

3) ขณะทำการทดลอง เมื่อสังเกตจะพบว่าเริ่มมีเกลือโซเดียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นรอจนกระทั่งสารละลายเริ่มหนืดแล้วจึงหยุด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

4) นำสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ระเหยน้ำออกแล้วกับตะกอนเกลือที่เหลืออยู่มากรองแยกโดยทำตามขั้นตอน 3.4 ตามลำดับ

3.6 การเปลี่ยนสารละลายโซเดียมแลคเตทให้เป็นกรดแลคติก

อุปกรณ์

1) คอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 57.5 เซนติเมตร
2) เรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน (H-form cation exchange resin)
3) แผ่นสำลีบาง
4) ตัวหนีบล็อค

5) กรวยแยกขนาด (Separatory funnel)

6) กระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร

7) เครื่องวัดค่าพีเอชดิจิตอล

สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้น

2) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

ขั้นตอนการเตรียมเรซิน

1) ติดตั้งคอลัมน์ ตัวหนีบล็อคและกรวยแยก โดยให้มีระยะห่างระหว่างปลายกรวยแยกกับคอลัมน์ประมาณ 5 เซนติเมตร

2) บรรจุเรซินปริมาตร 300 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่มีแผ่นสำลีบางรองอยู่ด้านล่างสุดเพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดเรซินไหลปนไปกับของเหลว

3) เทน้ำปราศจากไอออนใส่ในกรวยแยกแล้วเปิดวาล์วให้น้ำปราศจากไอออนไหลลงสู่คอลัมน์ โดยที่ระดับน้ำปราศจากไอออนภายในคอลัมน์อยู่สูงกว่าเรซินประมาณ 5 เซนติเมตร

4) คลายตัวหนีบล็อคเพื่อให้ของเหลวไหลออกมา โดยปรับจนให้มีอัตราการไหลอยู่ที่ 3 มิลลิลิตรต่อนาที

5) ล้างจนกระทั่งของเหลวที่ไหลออกมามีค่าพีเอช (pH) ประมาณค่าพีเอช (pH) ของน้ำปราศจากไอออนแล้วจึงหยุด โดยทำการปิดวาล์วน้ำปราศจากไอออนและหมุนบิดตัวหนีบล็อคให้แน่นสนิท

ขั้นตอนการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.3

1) เจือจางสารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นปริมาตร 163.64 มิลลิลิตร โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนให้มีปริมาตรเท่ากับ 540 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมแลคเตทที่มีปริมาณกรดรวม 10 %w/v (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) แล้วบรรจุลงในกรวยแยกขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2) คลายตัวหนีบล็อคจนระดับน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์เท่ากับระดับเรซินแล้วจึงปิดวาล์วให้สารละลายโซเดียมแลคเตทไหลลงสู่คอลัมน์ โดยที่ระดับน้ำปราศจากไอออนภายในคอลัมน์อยู่สูงกว่าเรซินประมาณ 5 เซนติเมตร

3) คลายตัวหนีบล็อคเพื่อให้ของเหลวไหลออกมา โดยปรับจนให้มีอัตราการไหลอยู่ที่ 3 มิลลิลิตรต่อนาที

4) เก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีใส่ในกระป๋องพลาสติก พร้อมทั้งตรวจวัดค่าพีเอช (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าพีเอชดิจิตอล แล้วบันทึกผล ซึ่งกรดแลคติกนั้นจะมีค่าพีเอช (pH) ในช่วง 1-3

5) หยดสารละลายโซเดียมแลคเตทจนหมด แล้วตามด้วยน้ำปราศจากไอออนล้างจนกระทั่งค่าพีเอช (pH) ของของเหลวที่ไหลออกมาจากคอลัมน์มีค่าประมาณค่าพีเอช (pH) ของน้ำปราศจากไอออนแล้วจึงหยุด โดยทำการปิดวาล์วน้ำปราศจากไอออนและหมุนบิดตัวหนีบล็อคให้แน่นสนิท

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารละลายกับเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน

3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในกรดแลคติก

Karl Fisher Titration เป็นหลักการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากระบบการทำงานต้องไตเตรทน้ำในตัวทำละลายให้หมดไปก่อน (pretitration) จากนั้นหาอัตราการแพร่ของน้ำในอากาศว่าเข้าสู่ระบบปริมาณเท่าไหร่ (Drift หรือ Blank ของระบบ) จึงหาความเข้มข้นของ KF reagent และสุดท้ายจึงทำการฉีดสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์จึงเป็นที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากได้ทำการหาความเข้มข้นที่แท้จริงของ KF reagent ได้ทำการหาค่า Drift หรือ Blank ของระบบก่อนทำการวิเคราะห์

อุปกรณ์

1) เครื่อง Karl Fischer รุ่น C10
2) เข็มฉีด
3) ขวดวัดปริมาตร
4) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

สารเคมี

1) กรดแลคติก
2) เมทานอล

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเครื่อง Karl Fischer โดยที่เครื่องจะทำการ Pretitration อัตโนมัติ จากนั้นเครื่องจะอยู่ในโหมด Standby

2) เจือจางกรดแลคติกปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร โดยปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3) ฉีดสารตัวอย่างลงไปประมาณ 0.5 กรัม จากนั้นเครื่องจะทำการ Titration ให้อัตโนมัติ แล้ววิเคราะห์ผลออกมา

3.8 การระเหยเอาน้ำออกจากกรดแลคติก

อุปกรณ์

1) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator)
2) คอนเดนเซอร์
3) อ่างน้ำร้อน
4) เครื่องให้ความร้อน
5) ปั๊มสุญญากาศ
6) ขวดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร

สารเคมี

1) กรดแลคติก

ขั้นตอนการทดลอง

1) บรรจุกรดแลคติกปริมาตร 200 มิลลิลิตรลงในขวดก้นกลมแล้วต่อเข้ากับเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน

2) ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างน้ำร้อนเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเปิดปั๊มสุญญากาศความดันประมาณ 60-66 เซนติเมตรปรอท แล้วเริ่มการทดลอง

3) ขณะทำการทดลอง เมื่อสังเกตจะพบว่าไม่มีเกลือโซเดียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นแล้วรอจนกระทั่งระเหยน้ำออกไปประมาณ 90% แล้วจึงหยุด นำกรดแลคติกที่ระเหยน้ำออกแล้วเก็บในภาชนะมิดชิด

3.9 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์กรดแลคติก

สารเคมี

1) เมทานอลสำหรับ HPLC (Methanol HPLC grade, ≥ 99.9%)
2) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98
3) กรดแลคติกเข้มข้นร้อยละ 80
4) สารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

5) น้ำกลั่น

อุปกรณ์

1) กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
2) ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
3) ขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
4) เข็มสำหรับฉีดสารเข้าเครื่อง HPLC ขนาด 100 ไมโครลิตร
5) เครื่องโซนิเคเตอร์ (Ultrasonic Bath)
6) เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ตอนที่ 1 การเตรียมวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase)

1) ผสมน้ำกลั่นกับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมล ให้มีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร แล้วบรรจุใส่ในขวดแก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2) บรรจุเมทานอลสำหรับ HPLC ในขวดแก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร

3) นำวัฏภาคเคลื่อนที่ทั้งสองชนิดไปไล่ฟองอากาศที่มีอยู่ในสารละลายทั้งสองออกด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 30 นาที

ตอนที่ 2 การตั้งค่าเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ก่อนการใช้งาน

สภาวะเครื่อง HPLC ที่ใช้มีดังนี้

- คอลัมน์ Phenomenex Sphereclone 5u ODS(2) ขนาด 250 x 4.6 มิลลิเมตร
- อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส
- ตัวตรวจวัดสัญญาณที่ใช้คือ UV ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร
- วัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) :
  ชนิด A คือ น้ำกลั่นผสมกรดซัลฟูริก 5 มิลลิโมลต่อลิตร
  ชนิด B คือ เมทานอลสำหรับ HPLC

ตอนที่ 3 การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วัดปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

1) เตรียมสารละลายกรดแลคติกที่ความเข้มข้น 1,000 3,000 5,000 10,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ โดยเตรียมจากสารละลายเข้มข้นของกรดแลคติก

2) นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้มาฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แล้วบันทึกพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมของกรดแลคติก เทียบกับความเข้มข้นสารละลายกรดแลคติก

3) สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติก

ตอนที่ 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

1) สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ สารละลายโซเดียมแลคเตทและเกลือโซเดียมคาร์บอเนตแห้ง

2) ปิเปตสารละลายโซเดียมแลคเตท 0.1 มิลลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริกลงไป 0.1 มิลลิลิตร โดยเติมกรดซัลฟิวริกลงในตัวอย่างอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตรและนำเกลือโซเดียมคาร์บอเนตแห้ง 1 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตรโดยที่ความเข้มข้นของกรดแลคติกไม่ควรเกินกราฟมาตรฐานที่ได้จากตอนที่ 3

3) นำสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์มาฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แล้วบันทึกพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมของกรดแลคติก

4) นำพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมที่ได้มาเทียบหาความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ได้จากตอนที่ 2

5) คำนวณค่าผลได้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติก

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

ในบทนี้จะอธิบายถึงงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งแสดงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงกลูโคสและฟรุกโตสเป็นกรดอินทรีย์อื่นๆ

จากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า ความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและค่าผลได้ของกรดแลคติก สัดส่วนโดยโมลของกลูโคสต่อด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ X:Y หรือ มากกว่า การรักษาความเข้มข้นของกลูโคสให้ต่ำอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยากันเองของกลูโคสไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงลดลงและทำให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกมากขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกอยู่ที่ T องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆและถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานพอจะได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกในปริมาณที่สูงมากกว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าเพราะอุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงน้อยกว่าอุณหภูมิสูง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Sucrose)}}{C_{12}H_{22}O_{11}} + H_2O \xrightarrow{H^+} \underset{\text{(Glucose)}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{(Fructose)}}{C_6H_{12}O_6}$$

$$\underset{\text{(Glucose)}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{(Fructose)}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{(Sodium hydroxide)}}{4NaOH} \longrightarrow \underset{\text{(Sodium lactate)}}{4C_3H_5NaO_3} + 4H_2O$$

จากสมการปฏิกิริยาข้างต้นพบว่า ในขั้นแรกน้ำเข้าไปสลายพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) ด้วยกรดเพื่อทำให้สารโมเลกุลใหญ่กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง ในที่นี้คือเปลี่ยนน้ำตาลทราย (Sucrose) ให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้แก่ กลูโคสและฟรุกโตส หลังจากนั้นขั้นต่อไปสารละลายน้ำตาลรวมกลูโคสและฟรุกโตสทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก แต่เนื่องจากมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ในระบบทำให้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ได้อยู่ในรูปของสารละลายโซเดียมแลคเตทสีน้ำตาลเข้มที่มีค่าพีเอช (pH) มากกว่า 14 (วัดค่าไม่ได้) แสดงดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 สารละลายโซเดียมแลคเตท

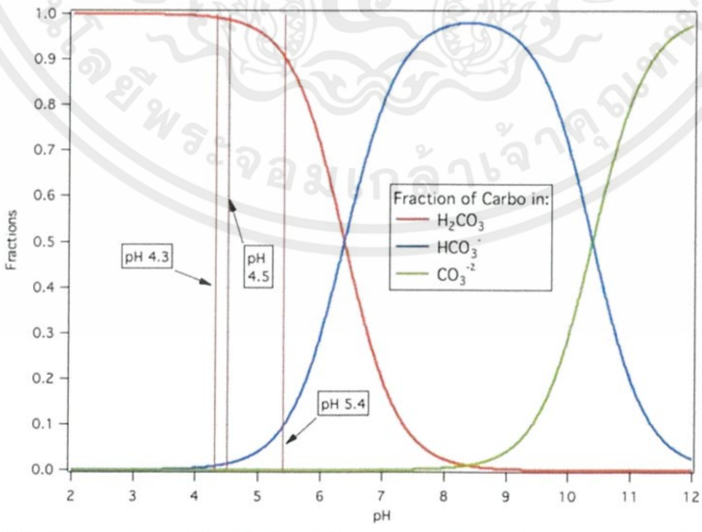
4.2 การปรับสภาพสารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้นให้มีค่าพีเอช (pH) ประมาณ 12 ด้วยวิธีปรับสภาพให้เป็นกลาง (Neutralization) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เนื่องจากต้องการปรับค่าพีเอช (pH) ของสารละลายโซเดียมแลคเตทโดยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เหลือค่าพีเอช (pH) อยู่ในช่วง 11-12 เพื่อต้องการให้เกิดเกลือคาร์บอเนต ($-CO_3^{2-}$) เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Carbon dioxide)}}{CO_2} + H_2O \longrightarrow \underset{\text{(Carbonic acid)}}{H_2CO_3}$$

$$\underset{\text{(Carbonic acid)}}{H_2CO_3} + \underset{\text{(Sodium hydroxide)}}{2NaOH} \longrightarrow \underset{\text{(Sodium carbonate)}}{Na_2CO_3} + 2H_2O$$



รูปที่ 4.2 The fractions of each of the three species relative to the total carbo. [19]

จากรูปที่ 4.2 ที่ตำแหน่งค่าพีเอช (pH) ตั้งแต่ 10.5 ขึ้นไปจะมีเกลือคาร์บอเนต ($-CO_3^{2-}$) เกิดขึ้น ในที่นี้ต้องการสารละลายอยู่ในรูปของเกลือโซเดียมคาร์บอเนต แต่ไม่ต้องการให้มีค่าพีเอช (pH) ต่ำกว่า 10 จนกลายเป็นเกลือไบคาร์บอเนต ($-HCO_3^-$) แทน

4.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เวลาต่างๆ

เมื่อทำการทดลองเพื่อปรับสภาพสารละลายโซเดียมแลคเตทให้เป็นกลางโดยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านสารละลาย แล้ววัดค่าพีเอช (pH) เทียบกับเวลาที่ใช้ในการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เวลาต่างๆ

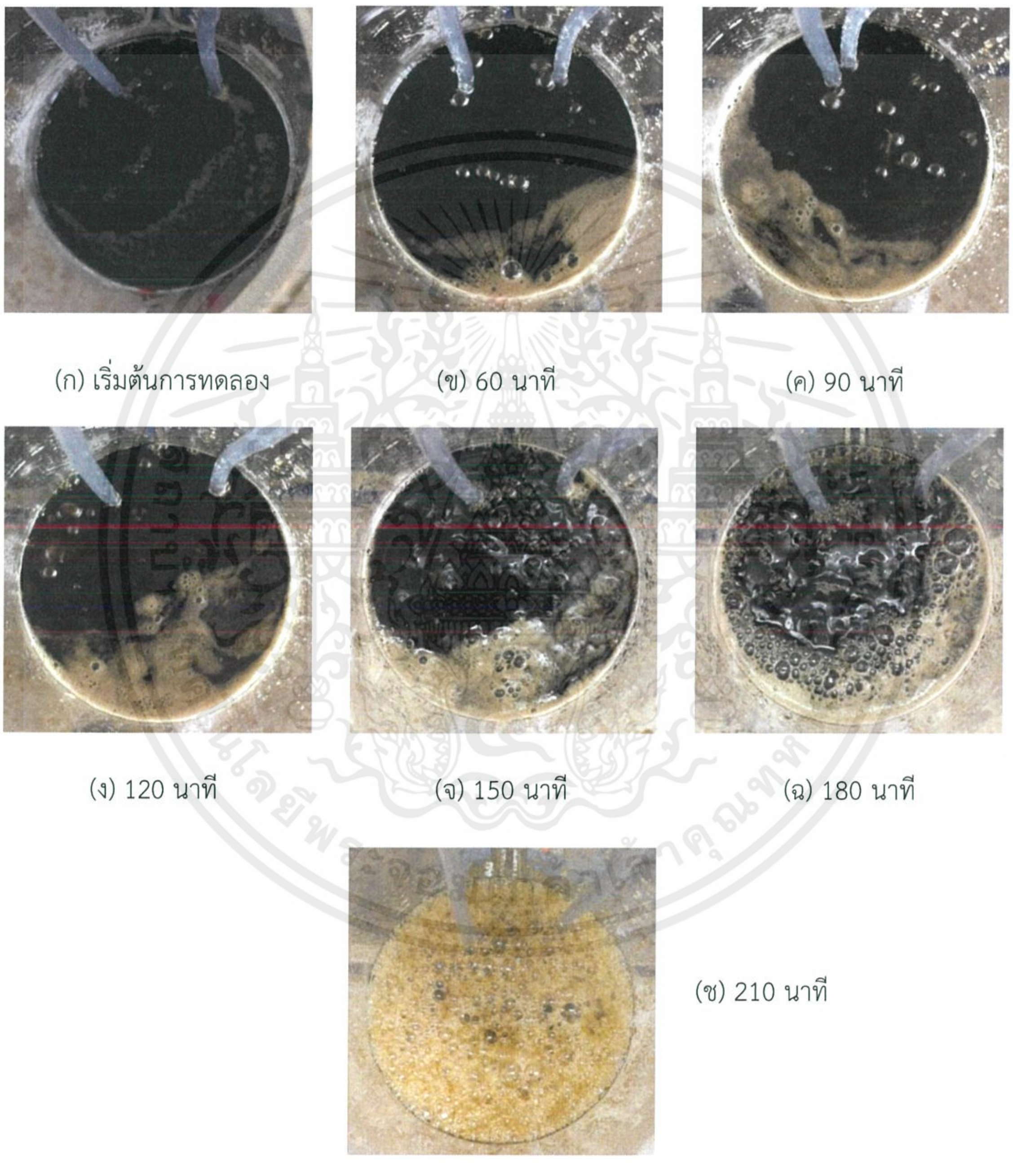
เวลา (นาที)	ค่าพีเอช (pH)
0	วัดค่าไม่ได้
60	12.0
90	11.3
120	11.5
150	11.5
180	11.5
210	11.5

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เริ่มต้นสารละลายโซเดียมแลคเตทนั้นมีค่าพีเอช (pH) มากกว่า 14 (วัดค่าไม่ได้) เนื่องจากในช่วงแรกยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินเหลืออยู่จำนวนมากทำให้สารละลายมีค่าพีเอช (pH) สูง แต่หลังจากพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านในสารละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งกรดคาร์บอนิกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอนเป็นเกลือโซเดียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินที่เหลืออยู่นั้นลดลงทำให้ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายโซเดียมแลคเตทลดเหลืออยู่ในช่วง 11-12 แล้วคงที่ เวลาที่เหมาะสมเพื่อปรับสภาพสารละลายโซเดียมแลคเตทให้เป็นกลางโดยการการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านสารละลายจึงอยู่ที่ประมาณ 210 นาที หรือ 3.5 ชั่วโมง

4.2.2 ลักษณะของฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เวลาต่างๆ

ขณะทำการทดลองได้ทำการถ่ายรูปลักษณะฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เวลาต่างๆ ผลแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าในช่วงเริ่มต้นการทดลองนั้นจะสังเกตเห็นฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างน้อยที่บริเวณผิวหน้าของสารละลาย เนื่องจากก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์นั้นทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินที่เหลืออยู่ในสารละลาย พอเวลาผ่านไปจะเริ่มสังเกตเห็นฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเริ่มมีมากขึ้น เนื่องจากด่างส่วนเกินส่วนใหญ่ได้ตกตะกอนเป็นเกลือโซเดียมคาร์บอเนต จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยานั้นลอยขึ้นมาด้านบนเป็นจำนวนมากที่เวลา 210 นาที หรือ 3.5 ชั่วโมง ส่วนเกลือโซเดียมคาร์บอเนตหลังจากผ่านการกรองแล้วจะมีลักษณะเป็นเกลือแห้งสีขาวแสดงดังรูปที่ 4.4



(ก) เริ่มต้นการทดลอง (ข) 60 นาที (ค) 90 นาที

(ง) 120 นาที (จ) 150 นาที (ฉ) 180 นาที

(ช) 210 นาที

รูปที่ 4.3 ลักษณะของฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.4 เกลือโซเดียมคาร์บอเนต

4.3 การกำจัดโซเดียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกหลังจากผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจนเพื่อกำจัดโซเดียมไอออนที่ตกค้างอยู่ในสารละลาย ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้

$$\underset{\text{(Sodium lactate)}}{C_3H_5NaO_3} + \underset{\text{(Hydrogen ion)}}{H^+} \longrightarrow \underset{\text{(Lactic acid)}}{C_3H_6O_3} + \underset{\text{(Sodium ion)}}{Na^+}$$

โซเดียมไอออนที่ตกค้างอยู่ในสารละลายโซเดียมแลคเตทจะแลกเปลี่ยนไอออนกับไฮโดรเจนไอออนที่อยู่บนเรซิน ส่งผลให้ค่าพีเอช (pH) เกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าพีเอช (pH) ประมาณ 12 เหลือเพียง 2-3 ดังนั้น จะได้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ปราศจากโซเดียมไอออน แต่เนื่องจากยังมีน้ำรวมอยู่ในสารละลายกรดแลคติกที่ได้ จึงจำเป็นต้องระเหยน้ำออกก่อนตามขั้นตอนที่ 3.8 อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบอีกด้วยว่าไม่มีตะกอนของเกลือโซเดียมเกิดขึ้นแล้วจึงได้เป็นผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ต้องการที่มีค่าพีเอช (pH) ประมาณ 2-3 แสดงดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ปราศจากโซเดียมไอออน

ข้อดีในการใช้กับเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน ก็คือ ทดแทนการเติมกรดที่ค่อนข้างอันตรายขณะทำปฏิกิริยา ลดการสิ้นเปลืองในการใช้กรดเพื่อปรับค่าพีเอช (pH) ให้กลายเป็น

กรดแลคติก และค่าพีเอช (pH) ที่ได้ค่อนข้างแน่นอน ประหยัดเวลาในการทดลองเพราะจะไม่ติดสมดุลเหมือนกับการใช้กรดซัลฟูริก อีกทั้งหากเป็นการเติมกรดซัลฟูริกจะได้เกลือโซเดียมซัลเฟตออกมา ซึ่งโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดเป็นเอทิลแลคเตท (Ethyl lactate) จึงจำเป็นที่จะต้องกำจัดเกลือโซเดียมออกก่อน วิธีนี้จึงดีกว่าการเติมกรด

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายด่างที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก และกรดอินทรีย์อื่นๆที่ไม่สามารถระบุได้ปริมาณหนึ่ง และสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายที่ได้มีสีน้ำตาลเข้ม อาจเป็นผลมาจากเกิดสารมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าผลได้สูงโดยปราศจากโซเดียมไอออนตกค้าง และเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือ สามารถผลิตกรดแลคติกที่มีค่าผลได้สูงในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ถือว่าช่วยลดความยุ่งยากซับซ้อนในกระบวนการผลิตและประหยัดเวลากว่าการผลิตกรดแลคติกจากกรรมวิธีการหมักในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำเพราะใช้น้ำตาลทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่หาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก สามารถใช้น้ำตาลจากแหล่งต่างๆได้เพราะไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าผลได้ของกรดแลคติก

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงกลูโคสไปเป็นกรดแลคติกในระดับกึ่งนำร่อง (semi-pilot scale) คือ สภาวะที่มีความเข้มเข้นด่างสูง อุณหภูมิต่ำที่ T องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของกลูโคสและฟรุกโตสที่ผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะต้องอยู่ในระดับที่ต่ำตลอดเวลา

นอกจากนี้เกลือโซเดียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับสภาพสารละลายให้เป็นกลาง (Neutralization) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีปริมาณกรดแลคติกตกค้างอยู่ประมาณหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่น้อยมาก อีกทั้งยังช่วยลดความสิ้นเปลืองในการเติมกรดที่ค่อนข้างอันตรายเพื่อเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติก โดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนกับ เรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน (H-form cation exchange resin) แทน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายด่างมีข้อเสีย คือ ไฮดรอกไซด์ไอออนของด่างเคลื่อนที่ในสารละลายได้อย่างอิสระและเข้าทำปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสในตำแหน่งที่ไม่ต้องการซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ดังนั้น จึงมีข้อเสนอว่าควรทำการป้องกันหมู่ไฮดรอกซิลในตำแหน่งที่ไม่ต้องการของกลูโคสด้วยปฏิกิริยาทางเคมีโดยการทำเฮมิอะเซทัล (Hemiacetal) ก่อน จากนั้นจึงนำกลูโคสที่ได้มาทำปฏิกิริยาในสารละลายด่างอีกทีซึ่ง

อาจทำให้ไฮดรอกซิลไอออนเข้าทำปฏิกิริยาที่เราต้องการส่งผลให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน

5.2.2 การนำเกลือโซเดียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไปทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพื่อให้ได้สารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลับคืนมาใช้ในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาได้

5.2.3 เนื่องจากการสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายมีปัญหาเกี่ยวกับสีที่ปนเปื้อนอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำปฏิกิริยากับด่าง ดังนั้นก่อนนำไปใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์หรือเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอื่นๆ จึงควรมีการแยกหรือกำจัดสีนั้นออกไปโดยได้ทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในการดูดซับสี ซึ่งก็พบว่ามีแนวโน้มที่เป็นไปได้เพราะหลังจากผ่านการฟอกสี สารละลายที่ได้มีลักษณะใส ไม่มีสี แต่อาจมีตะกอนของถ่านกัมมันต์แขวนลอยปนอยู่

เอกสารอ้างอิง

[1] **“พลาสติก PLA (Polylactic acid).”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplasticsไบโอพลาสติก/พลาสติก-pla-polylactic-acid/. 2555.

[2] Patricia Delgado, Maria Teresa Sanz and Sagrario Beltran. “Kinetic study for esterification of lactic acid with ethanol and hydrolysis of ethyl lactate using an ion-exchange resin catalyst” **Chemical Engineering Journal.** 2007, *126*, 111–118.

[3] Yea, L., Zhoua, X., Sufian, M., Li, Z. and Wua, J.C. “Highly efficient production of lactic acid from xylose by newly isolated Bacillus coagulants C106” **Bioresource Technology.** 2013, *132*, 38-44.

[4] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. **“น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว.”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0833/monosaccharide%20น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว. 2559.

[5] **“การเรียกชื่อมอนอแซ็กคาไรด์.”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://science.srru.ac.th/org/sci-elearning/courseonline/4022503/chapter-mono2.htm. 19. 2557.

[6] Wade, L.G. **Organic Chemistry: 23 Carbohydrates and Nucleic Acids.** 7th ed. Upper Saddle River, NJ : Pearson Education. 2009. 1097-141.

[7] ศิริรัตน์ จันท์จารุณี. **“เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคนิคทางเคมีอินทรีย์.”** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[8] ไชยวัฒน์ นพเก้า. **“การศึกษาองค์ประกอบของอาหารและสภาวะหมักที่เหมาะสมในการผลิตกรดแลคติกจากเวย์โดยแบคทีเรียกรดแลคติก.”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Chaiyawat_Nopphakao/fulltext.pdf. 2553.

[9] **“การนำกรดแลคติกไปใช้ประโยชน์.”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.siamchemi.com/กรดแลคติก/. 2558.

[10] **“การผลิตกรดแลคติก.”** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.siamchemi.com/กรดแลคติก/. 2558.

[11] “**Glycolysis (Embden-Meyerh of pathway).**” [Online]. Available : http://classes.midlandstech.com/carterp/Courses/bio225/chap05/ss4.htm. 2016.

[12] “**Glycolysis.**” [Online]. Available : https://sites.google.com/site/alcoholicfermentation1/kar-slay-molekul-baeb-chi-xxksicen/kar-slay-kharbohidert.

[13] Rathin Datta and Michael Henry. “Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies – a review” **Chem Technol Biotechnol.** 2006, *81*, 1119-1129.

[14] “**Carbon Dioxide for pH control.**” [Online]. Available : http://www.astisensor.com/Carbon_Dioxide_Versus_Mineral_Acids.pdf. 2017.

[15] Wikipedia. “**Carbon Dioxide.**” [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide. 2016.

[16] ASTi. “**Carbon Dioxide for pH control.**” [Online]. Available : http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-5.pdf. 2017.

[17] Yan, X., Jin, F., Tohji, K., Kishita, A. and Enomoto, H. “Hydrothermal conversion of carbohydrate biomass to lactic acid.” **AIChE Journal.** 2010, *56*, 2727– 2733.

[18] Jin, F., Zhou, Z., Enomoto, H., Moriya, T. and Higashijima, H. “Conversion mechanism of cellulosic biomass to lactic acid in subcritical water and acid-base catalytic effect of subcritical water.” **Chem Lett.** 2004, *33*, 126–127.

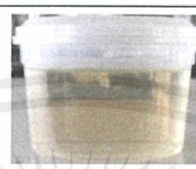
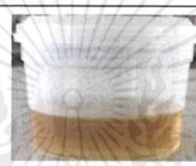
[19] “**Measuring Alkalinity**” [Online]. Available : http://www.wetnewf.org/pdfs/measuring-alkalinity.html. 2013.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) และลักษณะของสารละลายหลังผ่านเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนรูปแบบไฮโดรเจน

ตัวอย่างที่	ค่าพีเอช (pH)	ลักษณะของสารละลาย	กรดแลคติก
1	1.99		√
2	1.59		√
3	1.50		√
4	3.17		√
5	9.96		×
6	10.51		×
7	10.59		×
8	9.78		×

ภาคผนวก ข
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

ข.1 การหาความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมแลคเตท

ตัวอย่างสารละลายกรดแลคติก ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลพบว่ามีน้ำหนักเท่ากับ 67.8 กรัม

ดังนั้น สารละลายโซเดียมแลคเตทมีความหนาแน่นเท่ากับ $\frac{67.8}{50}$ = 1.348 กรัมต่อมิลลิลิตร

ข.2 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในกรดแลคติกด้วยเครื่อง Karl Fisher รุ่น C10

สารที่ต้องการวิเคราะห์ คือ กรดแลคติก (จากการทดลองขั้นตอนที่ 3.6)

ตัวทำละลายที่ใช้ คือ เมทานอล

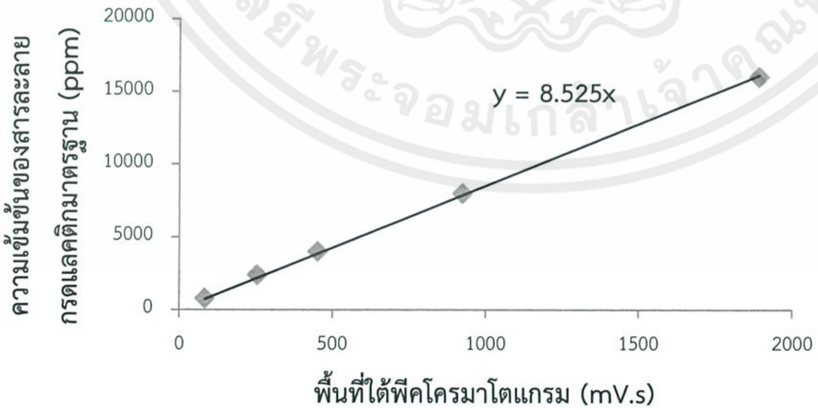
หลังจากทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำ พบว่า ในสารละลายเมทานอลมีปริมาณน้ำอยู่ 393.1 ppm และสารละลายเมทานอลกับกรดแลคติก มีปริมาณน้ำอยู่ 1,307.6 ppm

ดังนั้น ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกมีปริมาณน้ำอยู่เท่ากับ $\frac{(1,307.6 - 393.1) * 1,000}{10,000}$ = 91.45 %

ข.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์กรดแลคติคที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างที่เกิดขึ้น

ข.3.1 การคำนวณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์กรดแลคติกที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

หลังจากเตรียมสารละลายกรดแลคติกที่ความเข้มข้น 1,000 3,000 5,000 10,000 และ20,000 ppm แล้ว นำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้โครมาโตแกรมด้วยเครื่อง HPLC แล้วนำค่าพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมของกรดแลคติกที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นกรดแลคติก แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมและความเข้มข้นของสารละลายกรดแลคติก

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติกคือ $y = 8.525x$

โดย y คือ ความเข้นข้นของกรดแลคติก (ppm)

x คือ ค่าพื้นที่ใต้พีคโครมาโตรแกรม

ข.3.2 การคำนวณความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากการทดลองหาปริมาณกรดแลคติกที่ได้จากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกโดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 3.9 ตอนที่ 4 หลังจากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคโครมาโตรแกรมของสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการวิเคราะห์ที่ได้มาเทียบกับความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบถึงความเข้มข้นผลิตภัณฑ์ของกรดแลคติกที่ได้

ข.3.3 การคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์กรดแลคติกหลังจากการทำปฏิกิริยาเคมี

ค่าผลได้ของกรดแลคติกคำนวณโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริงเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ตามทฤษฎีค่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ตามทฤษฎีนั้นจะมีค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้เทียบมาจากสารตั้งต้น

สมการการคำนวณค่าผลได้ของกรดแลคติก คือ

$$\%\ \text{Yield lactic acid} = \frac{C_B}{C_{AO}} \times 100$$

โดย C_{A0} คือ ปริมาณของน้ำตาลทรายเริ่มต้น (กิโลกรัม)

C_B คือ ปริมาณของกรดแลคติกที่เกิดขึ้น (กิโลกรัม)

ข.3.4 การคำนวณหาปริมาณกรดแลคติกในตะกอนเกลือโซเดียมคาร์บอเนต

เกลือโซเดียมคาร์บอเนตที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.4 นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 3.9 ตอนที่ 4 หลังจากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคโครมาโตรแกรมของกรดแลคติกในเกลือโซเดียมคาร์บอเนตที่ได้มาเทียบกับความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบถึงปริมาณของกรดแลคติกที่ปนอยู่ในเกลือโซเดียมคาร์บอเนตที่ได้

ข.4 การคำนวณความเข้มข้นของวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) สำหรับเครื่อง HPLC

วัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) สำหรับวิเคราะห์กรดแลคติกตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.9 คือ ชนิด A คือ น้ำกลั่นผสมกรดซัลฟูริก 5 มิลลิโมลต่อลิตร และชนิด B คือ เมทานอลสำหรับ HPLC

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> 5 มิลลิโมลต่อลิตรของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 98 (MW = 98.08 กรัมต่อโมล)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเนื้อกรดซัลฟูริก 0.005 โมล คิดเป็น 0.005*98.08 = 0.4904 กรัม แต่กรดซัลฟูริกมีอยู่ร้อยละ 98 ดังนั้น ปริมาณกรดที่ใช้เท่ากับ 0.5004 กรัม

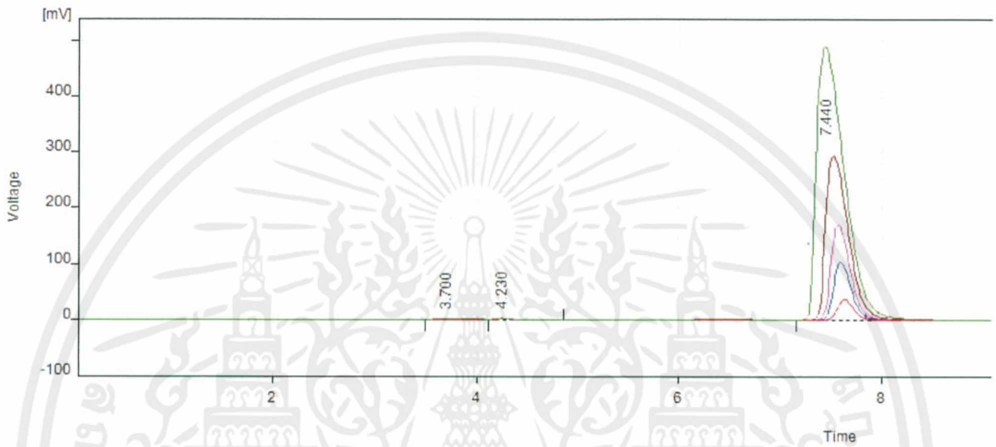
ค่าความหนาแน่นกรดซัลฟูริก เท่ากับ 1.84 กรัมต่อมิลลิลิตร

ดังนั้น ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้ เท่ากับ $\frac{0.5004}{1.84}$ = 0.272 มิลลิลิตร

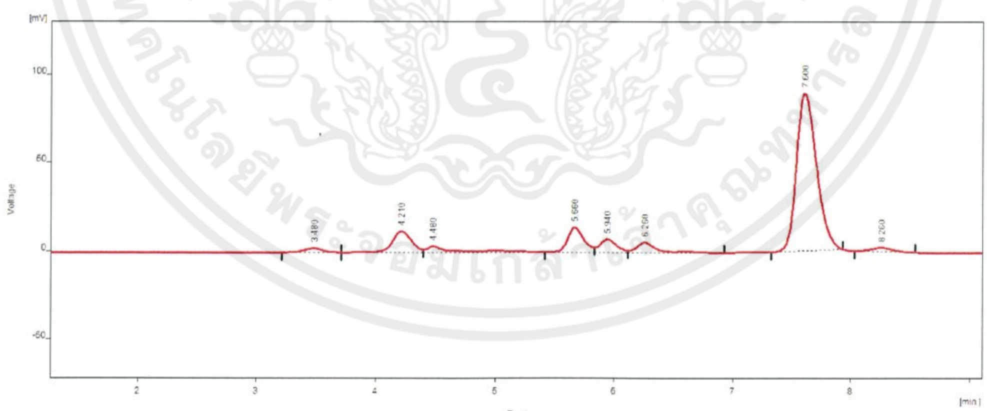
ภาคผนวก ค
โครมาโตแกรม HPLC

ค.1 โครมาโตแกรมของกรดแลคติกมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

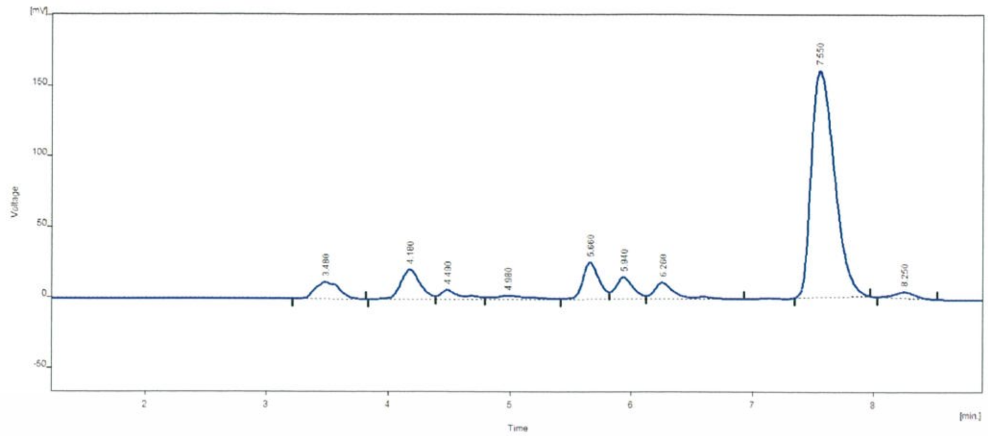
โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานกรดแลคติกแสดงดังรูปที่ ค.1 กรดแลคติกสามารถตรวจพบโดยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) สภาวะเครื่อง HPLC ที่ใช้แสดงในหัวขอ 3.9 ตอนที่ 2 ซึ่งจะตรวจพบกรดแลคติกที่ช่วงเวลา 7.440 ถึง 7.630 นาที



รูปที่ ค.1 โครมาโตแกรมของกรดแลคติกที่ความเขมขน 1,000 3,000 5,000 10,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ



รูปที่ ค.2 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของกลูโคสในเครื่องปฏิกรณ์ในระดับกึ่งทดลองใช้งาน (semi-pilot scale) ที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งตรวจพบกรดแลคติกที่เวลา 7.600 นาที



รูปที่ ค.3 โครมาโตแกรมของเกลือโซเดียมคาร์บอเนตแห้งซึ่งตรวจพบกรดแลคติกที่เวลา 7.550 นาที