

การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลาย
โซเดียมแลคเตตด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลาย
โซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEPARATION OF LACTIC ACID AND SODIUM HYDROXIDE FROM
SODIUM LACTATE SOLUTION USING CATION - EXCHANGE
MEMBRANE ELECTROLYTIC CELL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลาย
โซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก
โดย นางสาวภัทราพร สมัยแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก
โดย	นางสาวภัทราพร สมัยแก้ว
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกจัดสร้างขึ้นโดยมีขนาดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 144 ตารางเซนติเมตร สารละลายโซเดียมแลคเตทจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์ทางด้านแอโนด เมื่อจ่ายไฟฟ้าแก่เซลล์จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแอโนดและแคโทด ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำกลายเป็นโปรตอน ซึ่งจะรวมตัวกับไอออนแลคเตทเกิดเป็นกรดแลคติก ในขณะที่ขั้วแอโนดโซเดียมจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยแรงขับทางไฟฟ้าจากสารละลายด้านแอโนดไปยังด้านแคโทดซึ่งบรรจุด้วยน้ำ และจะเกิดเป็นด่างโดยการรวมตัวกับไอออนไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงทำการทดลองหาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตท สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น 0.75, 1.20 และ 1.50 โมลาร์ และศักย์ไฟฟ้า 4, 6 และ 8 โวลต์ งานวิจัยนี้ประเมินความสามารถในการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยผลของการถ่ายเทไอออนโซเดียมที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมขึ้นกับศักย์ไฟฟ้า แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้า ในทางกลับกันการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทั้งสองปัจจัยเพิ่มขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น 0.75 โมลาร์ และศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ มีปริมาณกรดแลคติกที่นำกลับมาได้สูงสุดเท่ากับ 55.5 เปอร์เซ็นต์

Report title Separation of lactic acid and sodium hydroxide from sodium lactate solution using cation - exchange membrane electrolytic cell

By Miss Pattrapon Samaikaew

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2017

Advisor Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

Abstract

This research proposes the study of the separation of lactic acid and sodium hydroxide from synthetic sodium lactate solution using electrolysis technique combined with cation exchange membrane (CEM). The electrolytic cell has effective membrane area of 144 cm². Experiments were carried out by feeding sodium lactate solution through the anolyte. When the electrical energy was applied to cell, electrochemical reactions took place at the anode and cathode electrodes where proton formation at the anode was combined with lactate ion (La⁻) to form lactic acid at the anolyte. Sodium ion (Na⁺) was transferred from the anolyte to the catholyte through the cation exchange membrane under an applied voltage and was alkalified by the formation of hydroxide ion at the cathode to produce sodium hydroxide at the catholyte. The effects of the initial concentration of sodium lactate (i.e. 0.75, 1.20 and 1.50 M) and the voltage (i.e. 4, 6 and 8 volt) on the separation of lactic acid and sodium hydroxide were studied. The transport of sodium ions through the cation exchange membrane, current efficiency, energy consumption and lactic acid recovery were investigated for the efficiency of separation. The results suggested that the transport of sodium ions through the membrane was proportional to the voltage but no significant variation when different sodium lactate concentrations were used as feed. The current efficiency increased as the voltage increased. Conversely, the energy consumption with respect to sodium hydroxide production increased with both factors. It was found that the highest lactic acid recovery was 55.5 % at 4 volts and lactate concentration of 0.75 M.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ ประสบการณ์ และมุมมองในการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมทั้งคำชี้แนะในรายละเอียด จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ และ ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์ กรรมสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ คุณรินลดา สิริแสงสว่าง คุณธีรพันธ์ ตั้งกิตติมศักดิ์ และ คุณชนน ตระกูลนำ เลื่อมใส สำหรับการจัดหาและสอนใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือทุกด้าน ทำให้งานวิจัยดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจ ให้ตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขอภัยไว้ ณ ที่นี้

ภัทรภาพร สมัยแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กรดแลคติก (Lactic acid)	3
2.2 การผลิตกรดแลคติก	4
2.2.1 กระบวนการทางชีวภาพ	4
2.2.2 การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี	4
2.3 กระบวนการแยกกรดแลคติก	5
2.3.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	6
2.3.2 การกลั่น	6
2.3.3 การแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า	6
2.4 กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)	8
2.5 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential)	10
2.6 กฎฟาราเดย์ (Faraday's law)	11
2.7 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้	12
2.7.1 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (Current efficiency)	12
2.7.2 การใช้พลังงาน (Energy consumption)	12
2.7.3 ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ (Lactic acid recovery)	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การใช้ประโยชน์จากกรดแลคติก	13
2.8.1 อุตสาหกรรมอาหาร	13
2.8.2 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง	13
2.8.3 อุตสาหกรรมเคมี	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครส	16
3.2 การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง	17
3.3 การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	18
3.4 การกรองแยกตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต	19
3.5 การสร้างเซลล์อิเล็กโทรไลต์	20
3.6 การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า	22
3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกด้วยเครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC)	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	26
4.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง	26
4.2 การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	27
4.3 การแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า	28
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น	30
4.3.2 ผลของศักย์ไฟฟ้า	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก การคำนวณ	41
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	43
ภาคผนวก ค โครมาโทแกรม HPLC	48



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก	3
2.2	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการแยกกรดแลคติกต่างๆ	7
ข.1	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) และลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าสารละลายจากการพ่นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	43
ข.2	ลักษณะของสารละลายที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ หลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	45
ข.3	พื้นที่ได้ฟักโครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างจากการศึกษาการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า	46
ข.4	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า	46
ข.5	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้จากการศึกษาการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างอิแนนซีโอเมอร์ของกรดแลคติก	3
2.2	กลไกในเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตท	9
2.3	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์	11
3.1	การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง	17
3.2	การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	18
3.3	การกรองแยกตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต	19
3.4	แผ่นปะเก็น	20
3.5	ขั้วไฟฟ้าสแตนเลส	20
3.6	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก	20
3.7	ลำดับขั้นของการประกอบเซลล์	21
3.8	เซลล์อิเล็กโทรไลต์	21
3.9	การจัดอุปกรณ์ทดลองการแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า	24
4.1	สารละลายโซเดียมแลคเตท	27
4.2	ตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต	28
4.3	ลักษณะฟองก๊าซที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้า	29
4.4	อัตราการเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ	30
4.5	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ	31
4.6	ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ	32
4.7	อัตราการเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	33
4.8	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	33
4.9	ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	34
ก.1	กราฟมาตรฐานกรดแลคติก	41
ค.1	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกที่ความเข้มข้น 1,000 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ	48
ค.2	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของสารละลายน้ำตาลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ค.3 โครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างด้านแอนไอออนหลังจากการทำปฏิกิริยา
ไฟฟ้าเคมี ที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ 49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากปัญหาขยะมูลฝอยซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นขยะพลาสติก ได้สะท้อนถึงปริมาณการใช้พลาสติกจำนวนมาก เนื่องจากพลาสติกสามารถปรับให้มีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ ได้ตามต้องการ และนำไปขึ้นรูปเป็นรูปทรงได้หลากหลายรูปแบบ ทำให้นิยมนำมาใช้แทนวัสดุธรรมชาติ พลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะย่อยสลายยาก หากถูกกำจัดโดยการเผาหรือฝังกลบที่ไม่มีประสิทธิภาพจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ถือเป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่นี้มีข้อจำกัดในด้านสิ่งเจือปนและมีคุณสมบัติต่ำลง ด้วยปัญหาเหล่านี้จึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้สามารถสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [1]

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล มีสูตรโมเลกุลดังนี้ $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ กรดแลคติกผลิตได้จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์โบไฮเดรต พบได้ในพืชทั่วไป เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) การเปลี่ยนวัตถุดิบคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรดแลคติกสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการทางชีวภาพที่อาศัยเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าผลได้กรดแลคติกมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ [2] แต่กรดแลคติกที่ผลิตได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้ค่าผลได้กรดแลคติกไม่สูงมากนัก ทำให้การสังเคราะห์ทางเคมียังไม่เป็นที่ยอมรับในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม จึงนับเป็นเรื่องท้าทายสำหรับนักวิจัยในการพัฒนาประสิทธิภาพการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อทดแทนกระบวนการทางชีวภาพที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน ในการผลิตกรดแลคติกเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ขึ้นอยู่กับกระบวนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งคิดเป็นราคาต้นทุนการผลิตประมาณ 50 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ [3] ดังนั้นกระบวนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์จึงมีความสำคัญมาก

งานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการแยกของกรดแลคติกจากการสังเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกพร้อมด้วย (Membrane electrolysis) เพราะเป็นวิธีการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ไม่ก่อให้เกิดของเสีย ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด นอกจากนี้ยังสามารถนำกลีเซอแลคโกลมาใช้ในการผลิตได้ใหม่ ทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ กรดไฮดรอกซีอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์หลัก คือ กรดแลคติก สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นการแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งเซลล์ไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกที่คั่นกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยสารละลายโซเดียมแลคเตทจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าด้านแอโนด (Anode) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสารละลายด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำกลายเป็นก๊าซออกซิเจน โปรตอน และอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากด้านแอโนดเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันไอออนโซเดียมจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อด้วยแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าไปยังสารละลายด้านแคโทด (Cathode) ซึ่งคือน้ำ น้ำจะรับอิเล็กตรอนแล้วแตกตัวเป็นไอออนไฮดรอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นไอออนแลคเตทจะรวมตัวกับโปรตอน ส่วนไอออนโซเดียมจะรวมตัวกับไอออนไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทางด้านแอโนดและแคโทด ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 จัดสร้างเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

1.3.2 ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น 0.75, 1.20 และ 1.50 โมลาร์ และศักย์ไฟฟ้า 4, 6 และ 8 โวลต์ ต่อประสิทธิภาพการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตท

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

1.4.2 เป็นกระบวนการทางเลือกใหม่ที่จะช่วยลดต้นทุน การใช้พลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตกรดแลคติก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะบรรยายสมบัติ การผลิต การแยกและทำให้บริสุทธิ์ของกรดแลคติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ตลอดจนกล่าวถึงพื้นฐานไฟฟ้าเคมี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กรดแลคติก (Lactic acid) [3]

กรดแลคติก มีสูตรโมเลกุล คือ $C_3H_6O_3$ มีชื่อเคมีทั่วไปว่า Lactic acid และมีชื่อเคมี IUPAC คือ 2 - Hydroxypropanoic acid หรือ 2 - Hydroxypropionic acid กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่เมทิล และไฮโดรเจน ต่อกับคาร์บอนที่เป็นไครัลเซนเตอร์ จึงเกิดเป็นอแนนซีโอเมอร์ (Enantiomer) ของกรดแลคติก ชนิด L (+) lactic acid และ D (-) lactic acid กรดแลคติกที่มีความบริสุทธิ์สูงจะอยู่ในรูปผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น กรดแลคติกสามารถละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังละลายได้ในแอลกอฮอล์ อะซิโตน และอีเทอร์ แต่ไม่ละลายในคลอโรฟอร์มและคาร์บอนไดซัลไฟด์



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

รูปที่ 2.1 โครงสร้างอแนนซีโอเมอร์ของกรดแลคติก [3]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก [3]

มวลโมเลกุล	90.08 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว (DL lactic acid)	16.8 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	82 องศาเซลเซียส ที่ 0.5 มิลลิเมตรปรอท 122 องศาเซลเซียส ที่ 14 มิลลิเมตรปรอท
ค่าคงที่การแตกตัว (K_a) ที่ 25 องศาเซลเซียส	1.37×10^{-4}
ค่าความร้อนการเผาไหม้ (ΔH_c)	1,361 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนจำเพาะ (C_p) ที่ 20 องศาเซลเซียส	190 จูลต่อโมลต่อองศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การผลิตกรดแลคติก [4, 5]

การผลิตกรดแลคติกสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ กระบวนการทางชีวภาพและการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี

2.2.1 กระบวนการทางชีวภาพ [4]

การผลิตกรดแลคติกโดยกระบวนการหมักทางชีวภาพจะนิยมใช้จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกรดแลคติกได้เป็นผลิตภัณฑ์หลัก เช่น *Lactobacillus* และ *Lactococcus* โดยสามารถแบ่งชนิดจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดแลคติกออกเป็น 2 ชนิด คือ โฮโมแลคติกแบคทีเรีย (Homolactic bacteria) ที่ผลิตกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเพียงชนิดเดียว และเฮเทอโรแลคติกแบคทีเรีย (Heterolactic bacteria) ที่ให้ผลผลิตมากกว่า 1 ชนิด ได้แก่ เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดแลคติก นอกจากนี้กรดแลคติกยังสามารถผลิตได้จากทั้งเชื้อราและแบคทีเรียชนิดอื่นด้วย ซึ่งขั้นตอนในการผลิตกรดแลคติกของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงดังสมการต่อไปนี้

1. การหมักกลูโคสแบบโฮโมแลคติก



2. การหมักกลูโคสแบบเฮเทอโรแลคติก



2.2.2 การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี [5]

การสังเคราะห์ทางเคมีเริ่มจากการทำปฏิกิริยาของอะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กับไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) เกิดเป็นแลคโทไนไทรล์ (Lactonitrile) ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นของเหลวที่ต้องใช้ความดันค่อนข้างสูง จากนั้นนำแลคโทไนไทรล์มากลั่นเพื่อทำให้บริสุทธิ์ แล้วนำมาแยกด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นได้กรดแลคติกและเกลือแอมโมเนียมเป็นผลพลอยได้ นำกรดแลคติกที่ได้มาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล เกิดเป็นเมทิลแลคเตท จากนั้นนำเมทิลแลคเตทมากลั่นและย่อยด้วยน้ำที่มีสภาวะกรดเพื่อให้ได้กรดแลคติกบริสุทธิ์และเมทานอล โดยกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีจะอยู่ในรูป DL lactic acid (Racemic lactic acid mixture) ซึ่งเป็นอิมเมอร์หรือรูปแบบผสมของไอโซเมอร์ L (+) และ D (-) ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ ต่างจากกระบวนการทางชีวภาพที่สามารถผลิตกรดแลคติกให้อยู่ในรูป L (+) และ D (-) ที่บริสุทธิ์ได้โดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการผลิต ทำให้การสังเคราะห์ทางเคมียังไม่เป็นที่ยอมรับในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ปัจจุบันจึงมีความพยายามในการพัฒนากระบวนการทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริสุทธิ์ของกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อนำมาทดแทนกระบวนการหมักที่มีกรรมวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก ขั้นตอนในการสังเคราะห์กรดแลคติกทางเคมีแสดงดังสมการต่อไปนี้

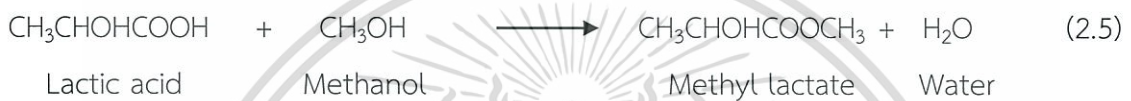
1. การเติมไฮโดรเจนไซยาไนด์



2. การไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก



3. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



4. การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำ



นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์กรดแลคติกจากกลูโคสและฟรุกโตสในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยป้อนสารละลายน้ำตาลความเข้มข้นต่ำเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนมากจะเป็นเกลือของกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกกรดแลคติกออกจากสารละลาย การผลิตกรดแลคติกเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ขึ้นอยู่กับกระบวนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งทำการศึกษากระบวนการแยกกรดแลคติกออกจากสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

2.3 กระบวนการแยกกรดแลคติก [3, 6]

สารละลายที่ได้จากการสังเคราะห์กรดแลคติกประกอบด้วยเกลือของกรดไฮดรอกซีอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์หลัก คือ เกลือของกรดแลคติก นอกจากนี้ยังมีสารตั้งต้นที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย ดังนั้นขั้นตอนในการแยกและทำให้บริสุทธิ์จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้กรดแลคติกที่บริสุทธิ์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด การแยกกรดแลคติกสามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย [6]

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการแยกที่มีสำคัญในเคมีอินทรีย์ ซึ่งตัวถูกละลายจะแยกออกจากของผสมด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยของผสมจะแยกขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย ซึ่งสารอินทรีย์จะแตกตัวเป็นไอออนแล้วอยู่ในชั้นน้ำ ในขณะที่สารอินทรีย์จะละลายอยู่ในชั้นสารอินทรีย์ โดยปกติสารหนึ่งๆ จะละลายในตัวทำละลายทั้งสองชนิด ดังนั้นตัวแปรสำคัญคือสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution coefficient) ที่หาได้จากอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดแลคติกในชั้นตัวทำละลายต่อชั้นน้ำ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของตัวทำละลายประกอบด้วยค่าการเลือก (Selectivity) ความเสถียรทางเคมี สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ความเป็นพิษต่ำ และความหนืดต่ำ ทั้งนี้ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดกรดแลคติก ได้แก่ ออกทานอล ไตรบิวทิลฟอสเฟต และโตเดซิลเอมีน

2.3.2 การกลั่น [3]

การกลั่นเพื่อแยกกรดแลคติกสามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยนกรดแลคติกให้เป็นเอสเทอร์ของกรดแลคติกก่อนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน เช่น เมทิลแลคเตต และสามารถทำให้เมทิลแลคเตตบริสุทธิ์ได้ด้วยการกลั่น แล้วเมทิลแลคเตตจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดแลคติกและเมทานอล ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน



การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำ



2.3.3 การแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า [6]

การแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นการแยกเกลือของกรดแลคติกจากสารละลายและเพิ่มความเข้มข้นของกรดแลคติกโดยอาศัยการเลือกผ่านของเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือลบ โดยที่เยื่อแลกเปลี่ยนประจุจะถูกจัดวางระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้า ไอออนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เข้าขั้วแคโทด ในขณะที่ไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าขั้วแอโนด ซึ่งเมมเบรนที่ใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ไม่มีรูพรุน และมีความหนาระหว่าง 10 ถึง 500 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการแยกกรดแลคติกต่างๆ [3, 6]

กระบวนการแยก	ข้อดี	ข้อเสีย
การสกัดด้วยตัวทำละลาย	<ul style="list-style-type: none"> - ลดความเสี่ยงการสลายตัวทางความร้อน - ไม่ก่อให้เกิดอิมพัลล์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการพื้นที่แลกเปลี่ยนมากสำหรับการแยกที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อุปกรณ์มีราคาสูง - ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม - ปัญหาการสูญเสียตัวทำละลายเนื่องจากการระเหย - สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพตัวทำละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
การกลั่น	<ul style="list-style-type: none"> - ผลผลิตที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง - ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์อื่นๆ อีก 	<ul style="list-style-type: none"> - กรดแลคติกสามารถทำปฏิกิริยากับตัวมันเองเกิดเป็นไดเมอร์และพอลิเมอร์ในระหว่างการกลั่น - กระบวนการมีความซับซ้อน - ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงมาก
การแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> - ผลผลิตที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง - สามารถนำกลับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นมาใช้ในการสังเคราะห์ได้ใหม่ - ไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม - ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - เมมเบรนมีราคาสูง - โพลาริเซชัน - มีโอกาสเกิดการอุดตันของเมมเบรน

จากการศึกษากระบวนการแยกและทำให้บริสุทธิ์ต่างๆ โดยการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับกรดแลคติกเนื่องจากเป็นวิธีการที่รวมการแยกเกลือและการทำให้เป็นกรดแลคติกในกระบวนการเดียว และยังสามารถนำกลับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นมาใช้ในการผลิตได้ใหม่ ทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งศึกษาการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) [7, 8]

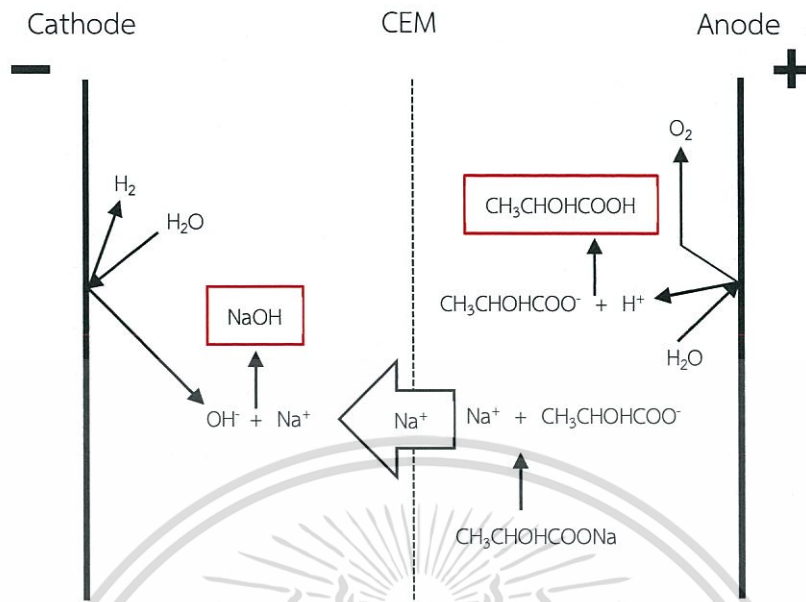
กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส คือ กระบวนการแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่เกี่ยวกับปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ ปฏิกิริยารีดักชัน - ออกซิเดชัน (Reduction oxidation reaction) โดยมีครึ่งเซลล์หนึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) และอีกครึ่งเซลล์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) โดยทั่วไปเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีองค์ประกอบ 4 ส่วน ได้แก่

1. ขั้วไฟฟ้า ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั่วไปจะมีขั้วไฟฟ้าอยู่ 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้จะต้องมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่เกิดปฏิกิริยาร่วมด้วยเป็นเพียงทางผ่านของอิเล็กตรอน ขั้วไฟฟ้าแบ่งออกเป็น ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด โดยขั้วแอโนดจะเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน ในขณะที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าได้เนื่องจากมีไอออนบวกและไอออนลบที่เคลื่อนที่ไปมาเพื่อรับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้ามาที่ขั้วไฟฟ้า

3. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง

4. ตัวแบ่งแยกเซลล์ [8] เป็นวัสดุที่ใช้แบ่งเซลล์ออกเป็นด้านแอโนดและแคโทด ใช้เมื่อต้องการแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแอโนดและแคโทดออกจากกัน ในปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ ได้แก่ ไดอะแฟรม (Diaphragm) และเยื่อแผ่น (Membrane) โดยไดอะแฟรมจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สารละลายหรือก๊าซที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ด้านมาผสมกัน แต่สำหรับเยื่อแผ่นจะคัดเลือกให้ประจุบวกหรือลบเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งผ่านไปเท่านั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อแผ่น เนื่องจากจะมีการเติมหมู่ที่มีประจุเข้ากับแกนหลักของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ทำให้เยื่อแผ่นจะผลักไอออนที่มีประจุตรงข้ามออกห่าง ตัวอย่างเช่น เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange membrane, CEM) ซึ่งมีประจุลบบนแกนหลักพอลิเมอร์จะผลักไอออนลบแต่ยอมให้ไอออนบวกผ่านเยื่อแผ่นไปได้อย่างอิสระ ในขณะที่เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange membrane, AEM) ซึ่งมีประจุบวกบนแกนหลักพอลิเมอร์จะผลักประจุบวกแต่ยอมให้ประจุลบผ่านเยื่อแผ่นไปได้อย่างอิสระ



รูปที่ 2.2 กลไกในเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตท

จากรูปที่ 2.2 เป็นกลไกที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้แยกสารละลายโซเดียมแลคเตท เมื่อป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทเข้าเซลล์ไฟฟ้าด้านแอโนด โซเดียมแลคเตทจะแตกตัวเป็นไอออนโซเดียม (Na^+) และไอออนแลคเตท ($\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^-$) แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะผลักอิเล็กตรอนออกทางด้านขั้วลบ ทำให้ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากลายเป็นขั้วลบไปด้วย และอีกขั้วหนึ่งจะกลายเป็นขั้วบวก จึงทำให้ไอออนแลคเตทที่เป็นไอออนลบจะวิ่งเข้าขั้วแอโนดซึ่งเป็นขั้วบวก ในขณะที่ไอออนโซเดียมในสารละลายที่เป็นไอออนบวกวิ่งผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกเข้าหาขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วลบ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแอโนดที่เกิดขึ้น ดังนี้



น้ำที่อยู่ด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเท่ากับ + 1.776 และ + 1.229 โวลต์ ตามลำดับ สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเป็นบวกน้อยกว่าจะมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า ดังนั้นปฏิกิริยาที่พบเป็นลำดับแรกที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำคือปฏิกิริยาสมการที่ 2.8 ซึ่งเป็นการแตกตัวของน้ำ มีก๊าซออกซิเจน โปรตอน และอิเล็กตรอนเป็นผลิตภัณฑ์

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทด

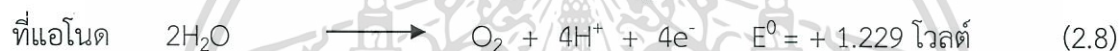


น้ำที่อยู่ด้านแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ดังสมการที่ 2.9 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเท่ากับ -0.828 โวลต์ ซึ่งน้ำจะรับอิเล็กตรอน แล้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์

ดังนั้นไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับโปรตอนเกิดกรดแลคติก ในขณะที่ไฮดรอกไซด์ที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกเข้ามายังเซลล์ด้านแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับไฮดรอกไซด์เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.5 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential) [9]

เมื่อพิจารณากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสำหรับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปจำนวนหนึ่งจะเกิดก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา

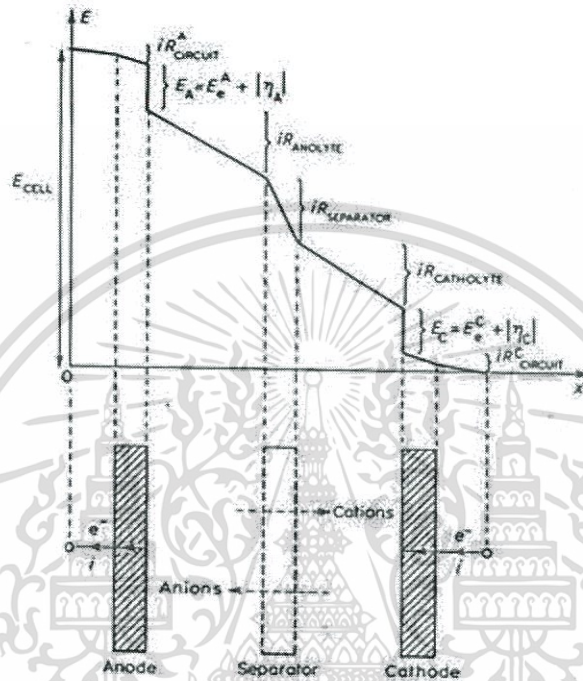


เมื่อพิจารณาปฏิกิริยารวมทั้งเซลล์ไฟฟ้าแล้วพบว่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทเท่ากับ -2.057 โวลต์ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง จะต้องผ่านไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในเซลล์ จึงจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่ามากกว่าในทางทฤษฎีเสมอ ดังนั้นจึงไม่สามารถดำเนินการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดได้ และเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น เรียกศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overvoltage) เป็นผลมาจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนและมวลสารภายในเซลล์ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ดังนั้นในการจัดสร้างเซลล์ไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้เซลล์มีความต้านทานน้อยๆ เพื่อลดการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถลดความต้านทานภายในเซลล์ได้โดยการลดช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการนำไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ตัวแบ่งแยกเซลล์และวงจรไฟฟ้าเองก็เป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดความต้านทานภายในเซลล์ โดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั่วไปสามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ดังนี้

$$E_{\text{cell}} = E_C^0 - E_A^0 - |\eta_c| - |\eta_A| - IR_{\text{Catholyte}} - IR_{\text{Separator}} - IR_{\text{Anolyte}} - IR_{\text{Circuit}}^C - IR_{\text{Circuit}}^A \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ E_{cell} คือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)
 E^0 คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ (โวลต์)
 η คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (โวลต์)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 R คือ ความต้านทาน (โอห์ม)



รูปที่ 2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ [9]

2.6 กฎฟาราเดย์ (Faraday's law) [10]

ไมเคิล ฟาราเดย์ ค้นพบว่าปริมาณสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น



เพื่อให้ได้โลหะเงิน 1 โมล ต้องใช้อิเล็กตรอน 1 โมล ในการรีดิวซ์ Ag^+ 1 โมล เนื่องจากอิเล็กตรอน 1 ตัว มีประจุเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูโลมบ์ ดังนั้นอิเล็กตรอน 1 โมล จึงมีประจุเท่ากับ $(1.602 \times 10^{-19} \frac{\text{คูโลมบ์}}{\text{อิเล็กตรอน}}) \times (6.023 \times 10^{23} \frac{\text{อิเล็กตรอน}}{\text{โมล}}) = 96,485$ คูโลมบ์ต่อโมล ซึ่งเรียกค่าคงที่นี้ว่า ค่าคงที่ฟาราเดย์ (Faraday constant)

ปริมาณไฟฟ้าสามารถวัดได้จากกระแสไฟฟ้าและเวลา ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าคงที่ ปริมาณไฟฟ้าจะเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับเวลา เนื่องจากกระแสไฟฟ้าหนึ่งแอมแปร์ หมายถึง การส่งปริมาณไฟฟ้าหนึ่งคูโลมบ์ในเวลาหนึ่งวินาที ซึ่งเทียบเท่ากับการส่งอิเล็กตรอน $1/96,485$ โมลต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้คำนวณปริมาณสารที่เกิดจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสได้ ดังนี้

$$N = \frac{It}{96,485m} \quad (2.13)$$

เมื่อ N คือ จำนวนโมลของไอออน (โมล)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t คือ เวลา (วินาที)

m คือ จำนวนประจุของไอออนที่พิจารณา เช่น ไอออนโซเดียม $m = 1$

2.7 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ [13]

งานวิจัยนี้ได้ประเมินความสามารถในการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยการพิจารณาจากการคำนวณประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

2.7.1 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (Current efficiency)

ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร ปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจะเท่ากับปริมาณอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ภายในวงจรตามกฎของฟาราเดย์ ดังนั้นประสิทธิภาพของการใช้กระแสไฟฟ้า จึงพิจารณาจากอัตราส่วนโมลของไอออนโซเดียมที่ผ่านเมมเบรนต่ออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในวงจรจากพลังงานที่จ่ายเข้ามาในระบบ ดังสมการ

$$CE (\%) = \frac{96,485N_{NaOH}}{Q} \times 100 \quad (2.14)$$

เมื่อ N_{NaOH} คือ จำนวนโมลโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงด้านแคโทด (โมล)

Q คือ ปริมาณไฟฟ้า (คูลอมบ์)

2.7.2 การใช้พลังงาน (Energy consumption)

การใช้พลังงาน หมายถึง พลังงานที่ใช้ในการแยกโซเดียมแลคเตทหนึ่งโมล ซึ่งการแยกโซเดียมแลคเตทหนึ่งโมลนี้เทียบเท่ากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นหนึ่งโมล ดังนั้น การใช้พลังงานสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$W (kWh/kg) = \int_0^t \frac{VI}{N_{NaOH}} dt \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V คือ ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

N_{NaOH} คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทด (กิโลกรัม)

2.7.3 ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ (Lactic acid recovery)

$$Recovery (\%) = \frac{C_{LA}}{C_{NaL}} \times 100 \quad (2.16)$$

เมื่อ C_{LA} คือ ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (โมลาร์)

C_{NaL} คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น (โมลาร์)

2.8 การใช้ประโยชน์จากกรดแลคติก [3]

กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น

2.8.1 อุตสาหกรรมอาหาร

กรดแลคติกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด ซึ่งกรดแลคติกจะถูกใช้เป็นส่วนปรุงแต่ง โดยใช้เป็นส่วนปรับสภาพความเป็นกรดในอาหาร สารเพิ่มรสชาติ เนื่องจากกรดแลคติกเป็นกรดอ่อนจึงถูกใช้เป็นส่วนเพิ่มความเปรี้ยวในน้ำสลัด ผลิตภัณฑ์ขนมอบ เครื่องดื่ม และผัก นอกจากนี้ยังสามารถนำกรดแลคติกมาใช้เป็นส่วนกันบูดเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียในอาหารที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

2.8.2 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

กรดแลคติกใช้ทำให้เกิดความชุ่มชื้น ช่วยควบคุมพีเอชเพื่อยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรีย ทำให้ผิวขาวขึ้น โดยส่วนประกอบของกรดแลคติกและเกลือของกรดแลคติกเป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องสำอางที่มีความปลอดภัยสูงใช้ในการป้องกันผิว

2.8.3 อุตสาหกรรมเคมี

เนื่องจากโครงสร้างกรดแลคติกประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล ทำให้สามารถนำกรดแลคติกมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้หลากหลาย และได้เป็นสารเคมีที่มีประโยชน์ เช่น เอทิลแลคเตท ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ และเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green solvent) อีกประการหนึ่ง ในปัจจุบันนิยมใช้กรดแลคติกเป็นมอนอเมอร์ในการผลิตพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ สามารถนำไปประยุกต์ใช้

ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ทำเลื่อเกราะ ผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร และถุงขยะ ด้วยคุณสมบัติพิเศษและความสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานของกรดแลคติก ทำให้ปริมาณความต้องการกรดแลคติกในอนาคตเพิ่มขึ้นมาก

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yan และคณะ [11] ทำการทดลองศึกษาการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเป็นกรดแลคติกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ สารตั้งต้นที่ใช้คือ กลูโคส เซลลูโลส และแป้ง ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดแลคติกได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายต่าง อุณหภูมิ และเวลา และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง HPLC และ GC/MS ผลการวิเคราะห์พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 60 วินาที จะให้ค่าผลได้กรดแลคติกสูงสุด คือ 27 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมลต่อลิตร และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.32 โมลต่อลิตร

ณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล [12] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง ภายใต้ความดันบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบกึ่งกะ สารตั้งต้นที่ใช้คือ สารละลายน้ำตาลกลูโคสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 16.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กรดแลคติกให้ได้ค่าผลได้สูง 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะและป้อนสารละลายน้ำตาลกลูโคสด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

Saxena และคณะ [13] ศึกษาการแยกและแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อนำกลับกรดแลคติกจากเกลือของกรดแลคติกด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบเกลือของกรดแลคติกที่ใช้ในการทดลอง คือ โซเดียมแลคเตทและแอมโมเนียมแลคเตท ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในด้านแคโทดและแอโนดจะทำให้น้ำแตกตัวเป็นไอออนไฮดรอกไซด์และโปรตอน ตามลำดับ ดังนั้นจะเกิดเป็นสารละลายต่างและกรดแลคติก ปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแลคเตทและศักย์ไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม จากผลการทดลองพบว่าสามารถแยกแอมโมเนียมแลคเตทได้เร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าการแยกโซเดียมแลคเตท โดยมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดสำหรับแอมโมเนียมแลคเตทและโซเดียมแลคเตทเท่ากับ 4.28 และ 6.23 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมกรดแลคติก ตามลำดับ

Simon และคณะ [14] ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนตด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของเกลือโซเดียม และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าความแตกต่างของประเภทสารละลายไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและอัตราการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่ประสิทธิภาพการแยกเกลือออกจากน้ำและการใช้พลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกสำหรับการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีของปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์หลัก คือ เกลือโซเดียมของกรดแลคติกหรือโซเดียมแลคเตท การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า และผลของตัวแปรต่างๆ เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครส

3.1.1 สารเคมี

1. น้ำตาลทราย
2. น้ำกลั่น
3. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก

3.1.2 อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 2 ลิตร
2. กระจกตวง ขนาด 1 ลิตร
3. ไบกวาน
4. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยมห้าตำแหน่ง
5. เครื่องปฏิกรณ์สามคอ (Jacket - typed) ขนาด 20 ลิตร
6. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน (Circulating bath)

3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งไบกวานให้อยู่กึ่งกลางเครื่องปฏิกรณ์สามคอและต่อสายจากอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

2. ชั่งน้ำตาลทราย 1,650 กรัม ถ่ายใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วเติมน้ำกลั่น 3,850 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

3. ปั่นกวานด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที รอจนได้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จึงเติมกรดซัลฟิวริกลงไปร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และเริ่มจับเวลาทันที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้สารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส แล้วนำสารละลายบรรจุใส่ถังพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง

3.2.1 สารเคมี

1. สารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
3. น้ำกลั่น

3.2.2 อุปกรณ์

1. กระจกบอขวด ขนาด 1 ลิตร
2. ไบอแกน
3. ปั๊มสุบจ่ายสารเคมี (Metering pump)
4. เครื่องปฏิกรณ์สามคอ ขนาด 20 ลิตร
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งไบอแกนให้อยู่กึ่งกลางเครื่องปฏิกรณ์สามคอและต่อสายยางจากอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์
2. ติดตั้งปั๊มไดอะแฟรม โดยนำสายป้อนสารใส่รูด้านข้างของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อป้อนสารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสเข้ามาในระบบ
3. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 3,760 มิลลิลิตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นตวงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก 1,740 มิลลิลิตร ด้วยกระจกบอขวด แล้วถ่ายใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 โมลาร์
4. ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที รอจนได้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จึงเริ่มป้อนสารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส 5,500 มิลลิลิตร ด้วยปั๊มที่อัตราการไหล 11 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปในระบบและเริ่มจับเวลาทันที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.1 สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมแลคเตท
2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.2 อุปกรณ์

1. ครอบพลาสติก
2. ชุดหัวฟ่น
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. บรรจุสารละลายโซเดียมแลคเตทในครอบพลาสติก
2. ฟ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยอัตราการไหลคงที่ ที่อุณหภูมิห้อง
3. เก็บสารละลายตัวอย่างปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้ววัดค่าพีเอช ทุกๆ 30 นาที พร้อมทั้งสังเกตฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนผิวของสารละลาย จนกระทั่งสารละลายมีค่าพีเอชประมาณ 8 ถึง 9 จึงปิดวาล์วฟ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้สารละลายโซเดียมแลคเตทที่มีตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่



รูปที่ 3.2 การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การกรองแยกตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต

3.4.1 สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมแลคเตทที่มีตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่
2. น้ำกลั่น

3.4.2 อุปกรณ์

1. กระดาษกรอง
2. ยางรอง
3. กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
4. ขวดลดความดัน (Suction flask)
5. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบชุดเครื่องกรอง โดยวางกรวยบุชเนอร์ที่สวมยางรองบนขวดลดความดัน เพื่อป้องกันอากาศผ่านเข้าออก แล้วต่อขวดลดความดันเข้ากับปั๊มสุญญากาศ
2. เปิดปั๊มสุญญากาศ แล้วพรมกระดาษกรองในกรวยบุชเนอร์ด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้กระดาษกรองแนบสนิทกับก้นกรวยบุชเนอร์
3. เทสารละลายโซเดียมแลคเตทที่มีตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่ลงในกรวยบุชเนอร์
4. รอจนกระทั่งตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตเริ่มแห้งและไม่มีสารละลายไหลผ่านกระดาษกรอง จึงหยุดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ
5. นำตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตไปอบแห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก



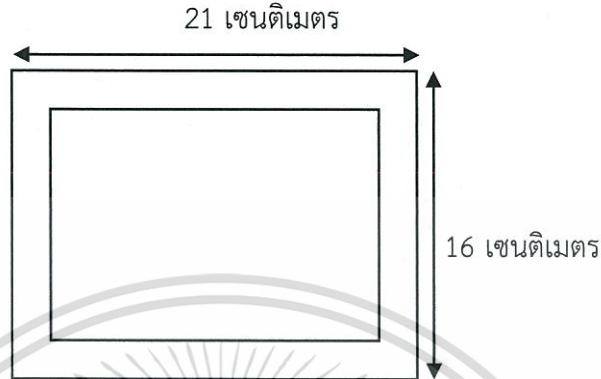
รูปที่ 3.3 การกรองแยกตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสร้างเซลล์อิเล็กโทรไลต์

3.5.1 อุปกรณ์

1. เซลล์ไฟฟ้าเคมีทำจากวัสดุสแตนเลส 304 (Stainless steel 304)
2. แผ่นปะเก็นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Gasket)



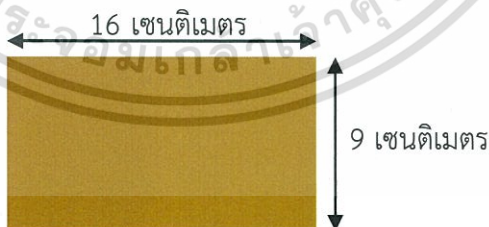
รูปที่ 3.4 แผ่นปะเก็น

3. ขั้วไฟฟ้าสแตนเลส เป็นตาข่ายสแตนเลส ขนาดความหนา 0.20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 ขั้วไฟฟ้าสแตนเลส

4. เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก รุ่น CSO Selemion™, Japan



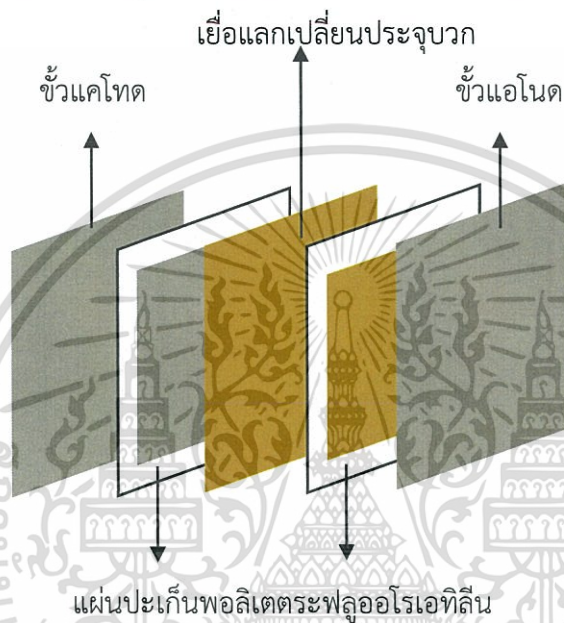
รูปที่ 3.6 เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

5. สกรูและน็อตพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ขั้นตอนการประกอบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากวัสดุสแตนเลสแบ่งออกเป็นด้านแอโนดและแคโทดสองส่วนเท่ากัน แต่ละส่วนมีขนาด $18 \times 13 \times 3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ยึดขั้วไฟฟ้าสแตนเลสกับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ด้วยสกรูและน็อต
3. ประกอบเซลล์ทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันโดยมีเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกคั่นกลาง และใช้ปะเก็นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนกั้นระหว่างหน้าสัมผัสของเซลล์และเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารละลายที่บรรจุภายในเซลล์ แล้วยึดทั้งสองส่วนให้แน่นด้วยสกรูและน็อต



รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนของการประกอบเซลล์



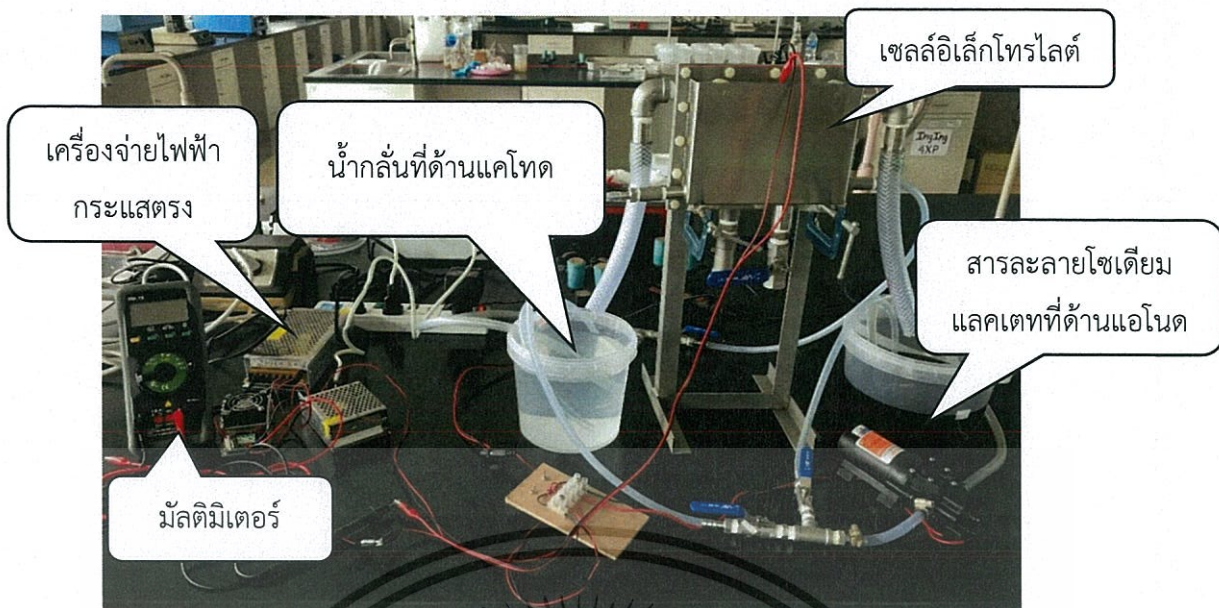
รูปที่ 3.8 เซลล์อิเล็กโทรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในการทดลองจะบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทดที่เวลาทุกๆ 1 ชั่วโมง และเก็บสารละลายตัวอย่างทั้งสองด้าน ด้านละ 5 มิลลิลิตร ที่เวลาทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายด้านแอโนดมีค่าพีเอชประมาณ 2 ถึง 2.5 จึงหยุดทำการทดลอง
6. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ด้านแคโทดด้วยการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์
7. วิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกที่เกิดขึ้นด้านแอโนดด้วยเครื่อง HPLC
8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นในสารละลายด้านแอโนดเป็น 1.20 และ 1.50 โมลาร์

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้า

1. ติดตั้งบีมเข้ากับเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทด้านแอโนดและน้ำกลั่นด้านแคโทด
2. ติดตั้งเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับขั้วไฟฟ้า และต่อมัลติมิเตอร์แบบอนุกรมกับวงจรเพื่อวัดกระแสไฟฟ้า
3. ป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทและน้ำกลั่นปริมาตร 1.5 ลิตร เข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยสารละลายโซเดียมแลคเตทด้านแอโนดมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.75 โมลต่อลิตร
4. จ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 4 โวลต์ ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
5. ในการทดลองจะบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทดที่เวลาทุกๆ 1 ชั่วโมง และเก็บสารละลายตัวอย่างทั้งสองด้าน ด้านละ 5 มิลลิลิตร ที่เวลาทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายด้านแอโนดมีค่าพีเอชประมาณ 2 ถึง 2.5 จึงหยุดทำการทดลอง
6. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ด้านแคโทดด้วยการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์
7. วิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกที่เกิดขึ้นด้านแอโนดด้วยเครื่อง HPLC
8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็น 6 และ 8 โวลต์



รูปที่ 3.9 การจัดอุปกรณ์ทดลองการแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า

3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกด้วยเครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC)

3.7.1 สารเคมี

1. เมทานอลเกรด HPLC
2. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก
3. กรดแลคติกความเข้มข้นร้อยละ 88 โดยน้ำหนัก
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.7.2 อุปกรณ์

1. เข็มฉีดยา ขนาด 100 ไมโครลิตร
2. ไมโครปิเปต
3. ขวดวัดปริมาตร

ขนาด 10 มิลลิลิตร
ขนาด 1 ลิตร
4. ขวดแก้ว

ขนาด 10 มิลลิลิตร
ขนาด 1 ลิตร
5. เครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC)
6. เครื่อง Ultrasonic bath

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเคลื่อนที่ (Mobile phase)

1. ปิเปตกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก 0.272 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ แล้วบรรจุสารละลายในขวดแก้วขนาด 1 ลิตร
2. นำตัวอย่างเคลื่อนที่ไปไล่อากาศออกให้หมดด้วยเครื่อง Ultrasonic bath

ตอนที่ 2 การตั้งค่าสภาวะการวิเคราะห์ของเครื่อง HPLC

คอลัมน์ Phenomenex Spherclone 5u ODS(2) ขนาด 250 × 4.6 มิลลิเมตร
 อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส
 ตัวอย่างเคลื่อนที่ สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์
 เครื่องวัดสัญญาณ UV ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร

ตอนที่ 3 การสร้างกราฟมาตรฐานกรดแลคติก

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกความเข้มข้น 1,000 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 ppm
2. นำสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกที่ผ่านการกรองมาฉีดเข้าเครื่อง HPLC ตามลำดับ แล้วบันทึกโครมาโทแกรม
3. สร้างกราฟมาตรฐานกรดแลคติก โดยวาดกราฟระหว่างพื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของกรดแลคติก

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติก

1. ปิเปตสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการสังเคราะห์ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร และปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 4.25 โมลาร์ จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายอยู่ในช่วง 2 ถึง 2.5
2. ปิเปตสารละลายตัวอย่างหลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร
3. นำสารละลายที่ผ่านการกรองมาฉีดเข้าเครื่อง HPLC แล้วบันทึกโครมาโทแกรม
4. เทียบพื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรมของสารละลายกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความเข้มข้นของกรดแลคติก

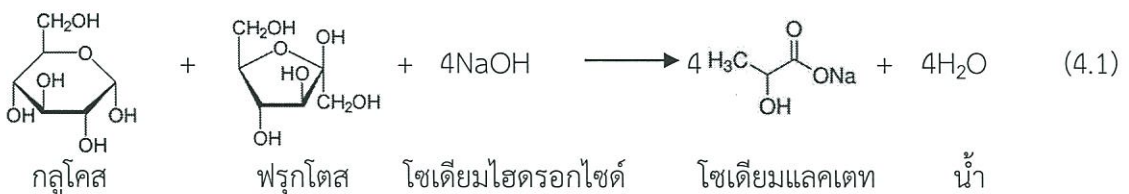
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดลองและสภาวะที่เหมาะสมในการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น และศักย์ไฟฟ้า สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น 0.75, 1.20 และ 1.50 โมลาร์ และศักย์ไฟฟ้า 4, 6 และ 8 โวลต์ โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งแล้วนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยของการทดลองที่สภาวะต่างๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประเมินความสามารถในการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า โดยคำนวณประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายต่าง

จากงานวิจัยก่อนหน้า [15] พบว่าการเปลี่ยนแปลงสารละลายผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครสไปเป็นกรดแลคติกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยการค่อยๆ บ้อนสารละลายน้ำตาลผสมเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งการค่อยๆ บ้อนสารละลายน้ำตาลผสมนี้เป็นการควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสและฟรุกโตสให้ต่ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นๆ จากสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลัก คือ เกลือโซเดียมของกรดแลคติกหรือโซเดียมแลคเตท และมีผลได้ของกรดแลคติกเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สารละลายโซเดียมแลคเตท

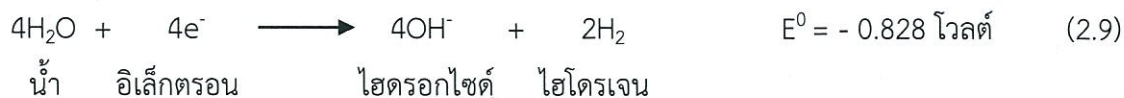
4.2 การทำให้สารละลายโซเดียมแลคเตทเป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เนื่องจากสารละลายที่ได้จากการสังเคราะห์ยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปเหลืออยู่ ทำให้ผลิตภัณฑ์โซเดียมแลคเตทที่ได้มีค่าพีเอชมากกว่า 14 ดังนั้นจึงต้องปรับค่าพีเอชสารละลายเบื้องต้นด้วยการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ข้อดีของการปรับค่าพีเอชสารละลายด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ หลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงจากการปรับค่าพีเอชด้วยกรดแก่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้น้อย ซึ่งจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก และจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย แล้วเกิดเป็นตะกอนโซเดียมคาร์บอเนต ในระหว่างการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อสังเกตลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของสารละลาย พบว่าในช่วงแรกมีฟองก๊าซที่ผิวหน้าของสารละลายน้อย เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อเวลาผ่านไปเกิดฟองก๊าซที่ผิวหน้าของสารละลายมากขึ้น เพราะว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนใหญ่ที่เหลือจากการสังเคราะห์ได้ตกตะกอนไปเป็นโซเดียมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

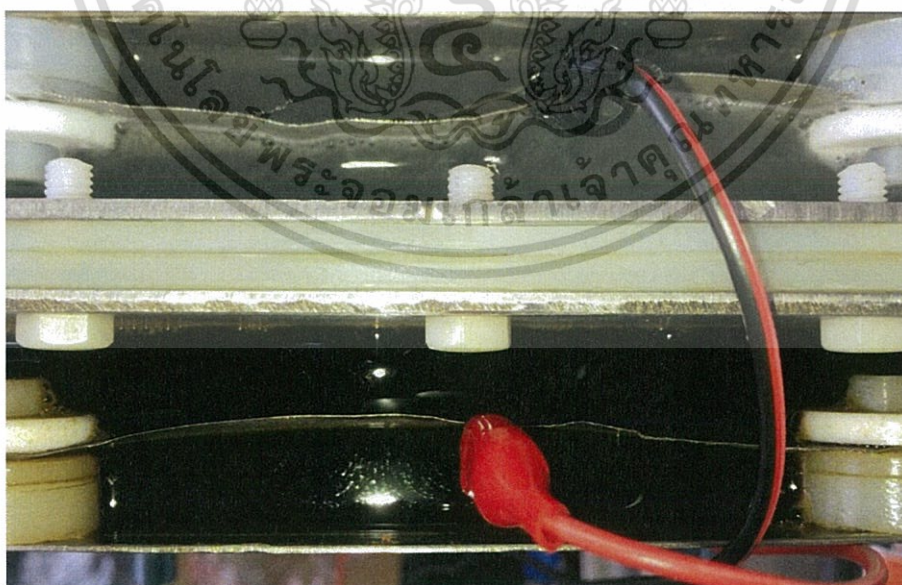
ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม



จากการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นในสารละลายด้านแอโนดและศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ พบว่าในช่วงเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากสารละลายด้านแคโทดไม่มีสารอิเล็กโทรไลต์หรือสารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนอิสระละลายน้ำอยู่แล้ว สารละลายจึงมีความต้านทานไฟฟ้าและนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่ากระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้น เนื่องจากมีการถ่ายเทไอออนโซเดียมผ่านเมมเบรนไปยังสารละลายด้านแคโทด ทำให้ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์นี้แปรผกผันกับความต้านทานของสารละลาย ดังนั้นสารละลายด้านแคโทดจึงนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นจากการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรน และเมื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 1 แอมแปร์ ขึ้นไป สังเกตพบว่ามีฟองก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด ซึ่งฟองก๊าซที่เกิดขึ้นคือก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ และแสดงดังรูปที่ 4.3

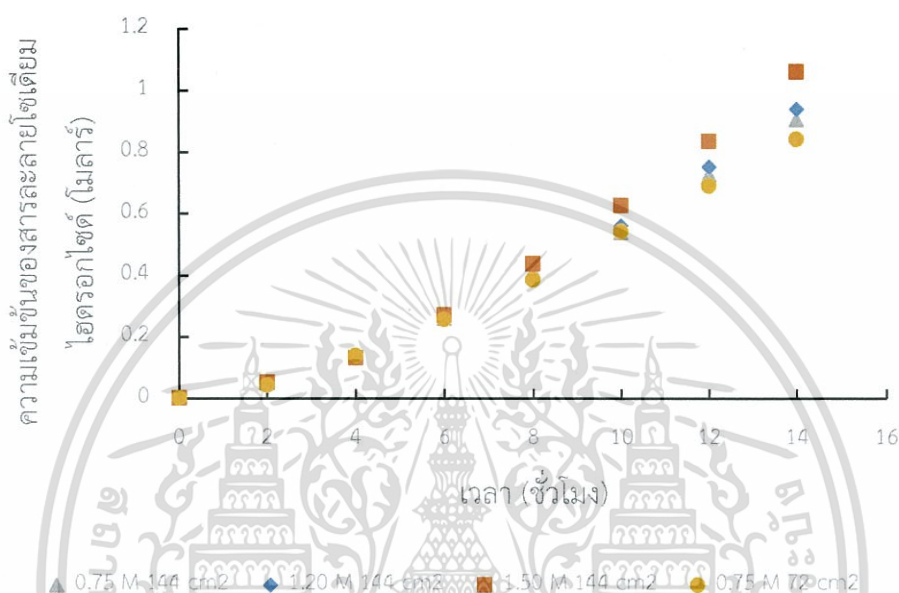


รูปที่ 4.3 ลักษณะฟองก๊าซที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

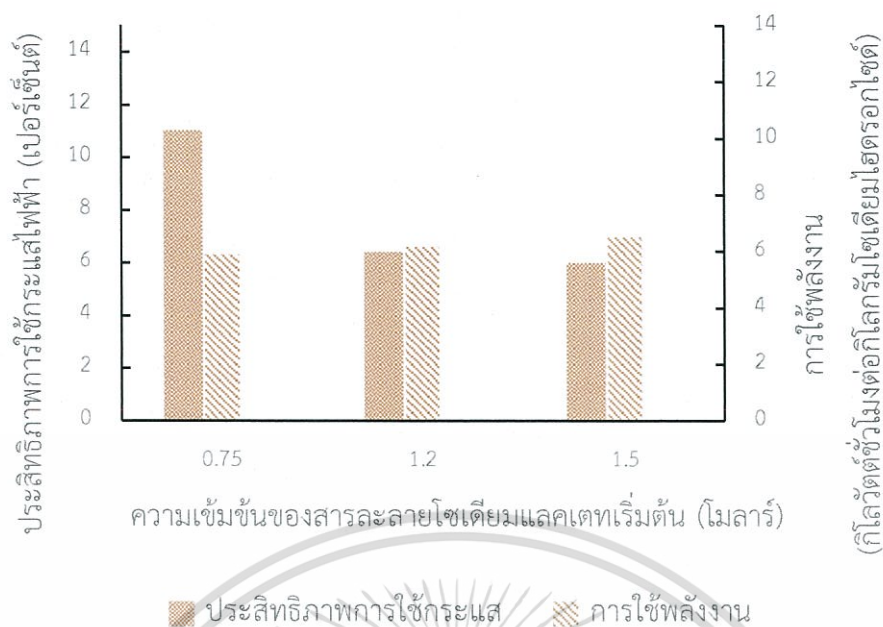
การวิเคราะห์กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์จะพิจารณาจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแอโนดและแคโทด และศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นในสารละลายด้านแอโนด และศักย์ไฟฟ้า โดยจะพิจารณาจากผลของการถ่ายเทไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังนี้

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น



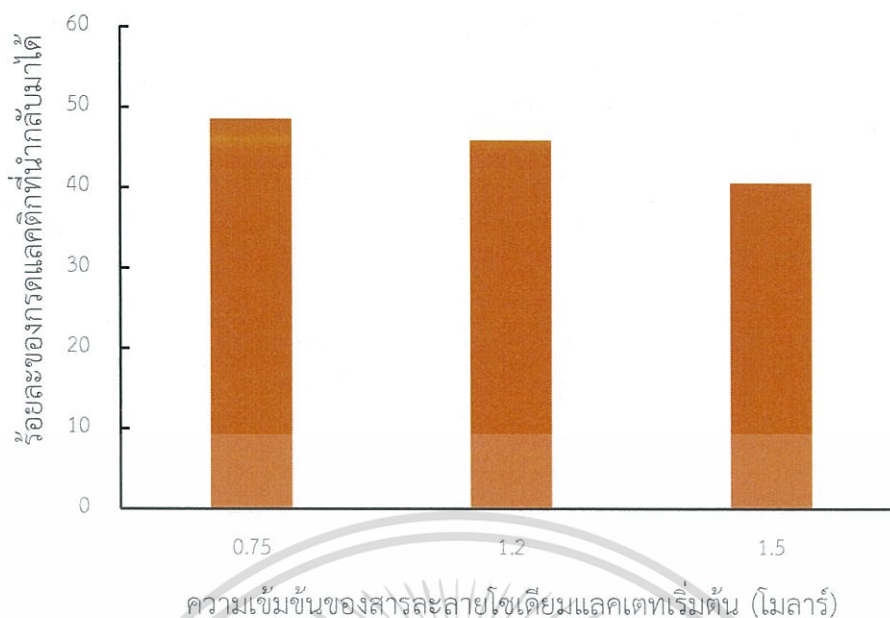
รูปที่ 4.4 อัตราการเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นในสารละลายด้านแอโนดไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่เวลาต่างๆ ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของการถ่ายเทไอออนโซเดียม ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการลดขนาดของขั้วไฟฟ้าครึ่งหนึ่งให้มีพื้นที่เท่ากับ 72 ตารางเซนติเมตร จากเดิมที่มีขนาด 144 ตารางเซนติเมตร โดยทดลองที่ความเข้มข้นของโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น 0.75 โมลาร์ พบว่ามีอัตราการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 144 ตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร ซึ่งเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนในวงจรและการถ่ายเทไอออนโซเดียมผ่านเมมเบรน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า อัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าและขนาดเมมเบรน แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์และขนาดพื้นที่ของอิเล็กโทรดในช่วงที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ

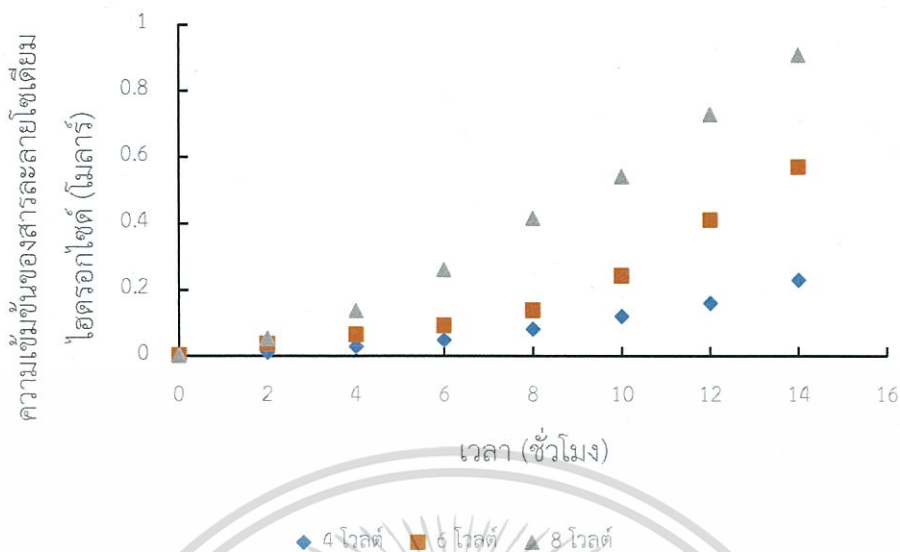
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจะพิจารณาจากอัตราส่วนร้อยละของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการถ่ายเทไอออนโซเดียมผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ซึ่งอัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมนี้ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ตั้งที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นสูงเทียบเท่ากับว่ามีปริมาณไอออนโซเดียมในสารละลายด้านแอโนดมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการแยกสารละลายนานกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าลดลง ยิ่งไปกว่านี้ยังมีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าจากความต้านทานภายในวงจร ขั้วไฟฟ้า เมมเบรน และสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทดอีกด้วย และทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นสูงมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 4.6 ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ

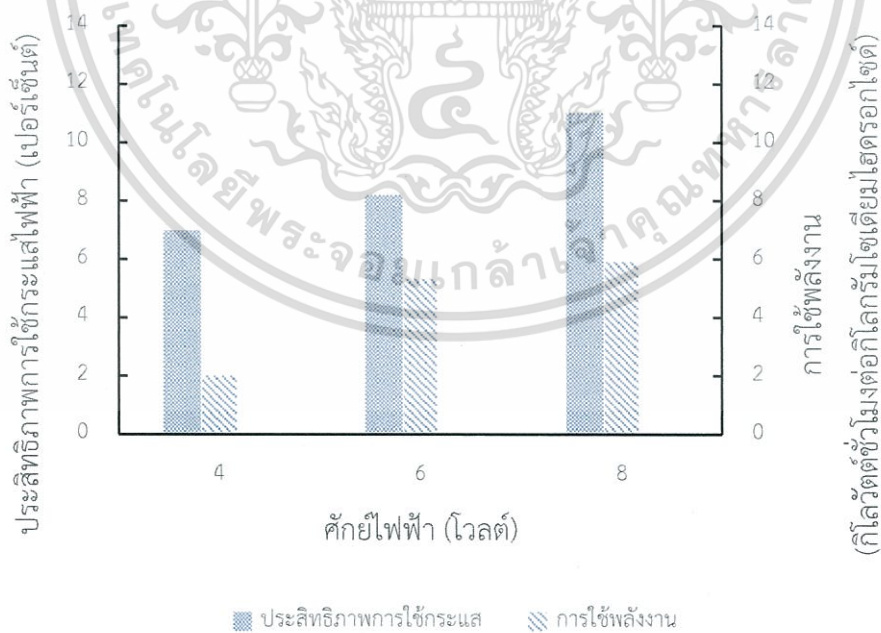
จากค่าร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละชั่วโมงจะเพิ่มตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตท ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดโปรตอนที่ถูกขับเคลื่อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีสูงขึ้น และเนื่องจากประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเพิ่มขึ้น (ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าพิจารณาจากการถ่ายเทไอออนโซเดียมต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด) แต่ในระบบมีไอออนประจุบวกที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ประกอบด้วยไอออนโซเดียมและโปรตอน ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการถ่ายเทโปรตอนให้เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังเซลล์ด้านแคโทด และโปรตอนอีกส่วนหนึ่งยังคงอยู่ในสารละลายด้านแอโนด ทำให้การรวมตัวของโปรตอนและไอออนแลคเตทเกิดเป็นกรดแลคติกลดลง

4.3.2 ผลของศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 อัตราการเกิดสารละลายไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

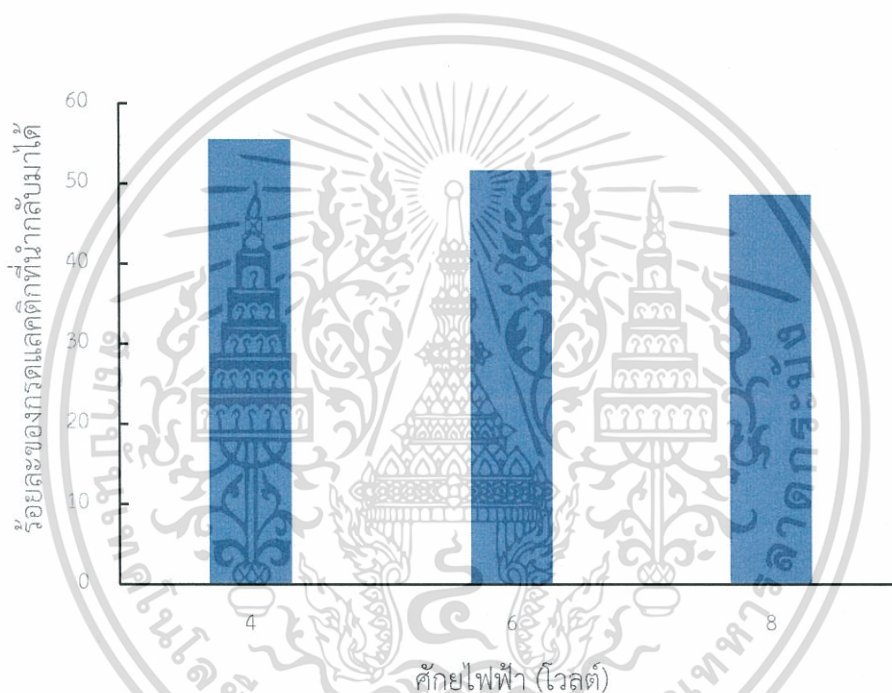
เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าอัตราการถ่ายเทไอออนไฮโดรเจนเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ และจะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดจะเพิ่มตามศักย์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

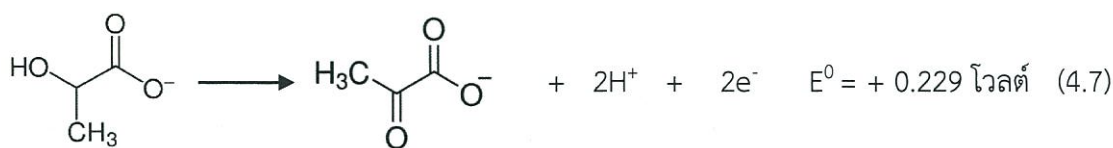
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการถ่ายเทไอออนโซเดียม ซึ่งอัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้า และถึงแม้ว่าการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าดีขึ้น แต่ก็ส่งผลให้การใช้พลังงานสูงตามไปด้วย ซึ่งจากการสังเกตในระหว่างการทดลอง อาจเป็นไปได้ว่าการใช้พลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดฟองก๊าซในเซลล์มากขึ้น ซึ่งการเกิดฟองก๊าซส่งผลให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าและพื้นที่ของเมมเบรนที่ให้ไอออนโซเดียมผ่านลดลง นอกจากนี้ฟองก๊าซยังลดการนำไฟฟ้าภายในเซลล์ อิเล็กโทรไลต์อีกด้วย [14]



รูปที่ 4.9 ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

จากค่าร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ ณ ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ค่าร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้สูงสุดซึ่งเท่ากับ 55.5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้คาดว่าที่ศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ไอออนแลคเตทถูกออกซิไดส์กลายเป็นไอออนไพรูเวทและโปรตอน [16] ดังปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีตามสมการที่ 4.7 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเท่ากับ 0.229 โวลต์



แลคเตท

ไพรูเวท

โปรตอน

อิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำด้วยไฟฟ้าเท่ากับ 2.057 โวลต์ และในการทดลองเมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าคร่อมที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองพบว่าเกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในวงจรซึ่งทำให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์ลดลงประมาณ 1.3 ถึง 1.5 โวลต์ ด้วยข้อจำกัดเรื่องการสูญเสียและศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดจึงทำให้ไม่สามารถจ่ายศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 4 โวลต์ เพราะหากจ่ายศักย์ไฟฟ้าของเซลล์น้อยกว่าที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้ไม่เกิดการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการแยกกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมแลคเตทที่สังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น และศักย์ไฟฟ้า ซึ่งพบว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยก ดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นสูงจะมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้การใช้พลังงานในการแยกเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทสูงขึ้นมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทสูง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นในสารละลายด้านแอโนดไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทไอออนโซเดียมผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น จะทำให้อัตราการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ลดลง เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก สารละลายโซเดียมแลคเตทจะถูกบ่อนเข้าสู่เซลล์ทางด้านแอโนด ซึ่งที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งนี้คาดว่าไอออนแลคเตทถูกออกซิไดส์ไปเป็นไอออนไพรูเวทและโปรตอน จึงทำให้ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้มีค่าต่ำ อาจกล่าวได้ว่าเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกเหมาะสำหรับการนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่ากรดแลคติก ดังนั้นเพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการวิจัยต่อไป ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะว่าควรทดลองใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบสำหรับการแยกกรดแลคติกจากสารละลายโซเดียมแลคเตทเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนแลคเตท

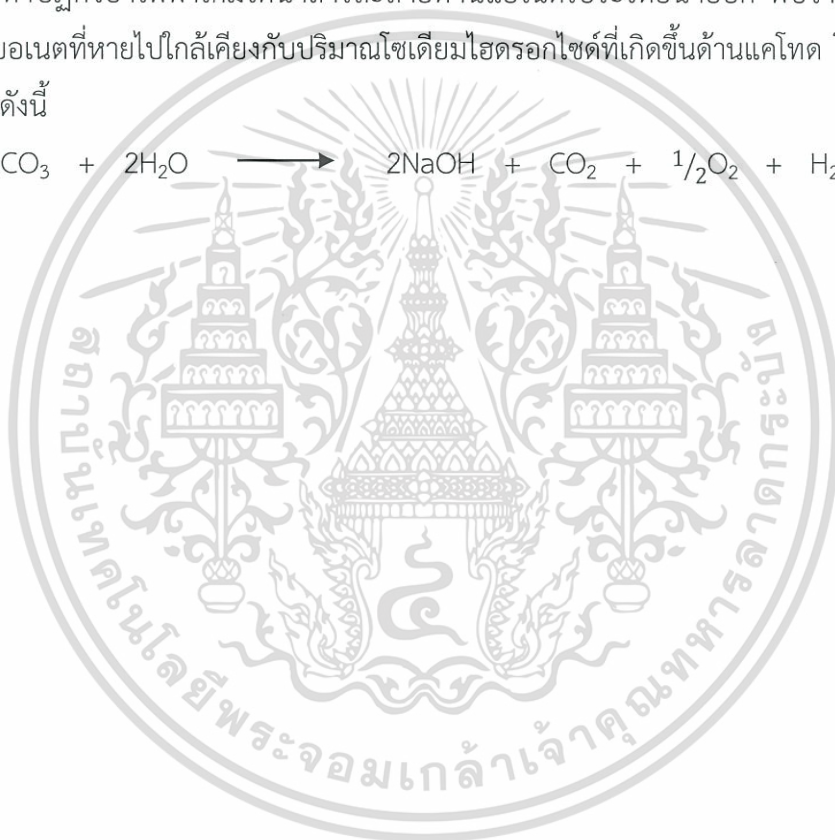
5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สารละลายด้านแคโทดควรมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า 0.001 โมลาร์ เพื่อลดระยะเวลาเริ่มต้นของปฏิกิริยา เนื่องจากสารละลายด้านแคโทดคือน้ำที่ไม่มีสารอิเล็กโทรไลต์หรือสารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนอิสระละลายน้ำอยู่แล้ว จึงทำให้สารละลายมีความต้านทานไฟฟ้าและนำไฟฟ้าได้ไม่ดี

5.2.2 การเลือกใช้วัสดุสำหรับขั้วไฟฟ้า ต้องคำนึงสมบัติการทนทานต่อสารเคมี โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนด เนื่องจากที่ด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และวัสดุโลหะที่ใช้จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดส์และเปลี่ยนเป็นไอออนละลายเข้าสู่สารละลาย ซึ่งวัสดุที่ได้รับการยอมรับในด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนคือโลหะแพลตินัมที่เคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ [7]

5.2.3 มีความเป็นไปได้ในการนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์จากตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจากการปรับสภาพสารละลายโซเดียมแลคเตทให้เป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้นำตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตมาละลายน้ำให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ แล้วนำสารละลายดังกล่าวมาแยกด้วยไฟฟ้า โดยใช้สภาวะการดำเนินการเช่นเดียวกับการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตท พบว่าอัตราการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดของสารละลายทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน หลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้นำสารละลายด้านแอโนดไประเหยน้ำออก พบว่าสัดส่วนมวลโซเดียมคาร์บอเนตที่หายไปใกล้เคียงกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทด โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เอกสารอ้างอิง

- [1] “พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www2.mtec.or.th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. 2550.
- [2] Yea, L., Zhoua, X., Sufian, M., Li, Z. and Wua, J.C.. “Highly efficient production of l-lactic acid from xylose by newly isolated *Bacillus coagulans* C106.” *Bio Resource*, vol.132, 2013. pp. 38 - 44.
- [3] สุขใจ ชูจันทร์. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.
- [4] Narayanan, N., Roychoudhury, P. and Srivastava, A. “L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization.” *Electronic Journal of Biotechnology*, vol.7, 2004. pp.167 - 179.
- [5] Komesu, A., Oliveria, J. A., Martins, L. H., Maciel, M. R. and Filho, R. M. “Lactic acid production to purification : a review.” *Bio Resource*, vol.12, 2017. pp.4364 - 4383.
- [6] Komesu, A., Maciel, M. R. and Filho, R. M. “Separation and purification technologies for lactic acid – a brief review.” *Bio Resource*, vol.12, 2017. pp.6885 - 6901.
- [7] วิทย์ สุนทรนนท์. “การศึกษาเทคนิคใหม่ในการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรไลซิส.” โครงการวิจัยเลขที่ 154-CHEM - 2541 ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [8] ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [9] Pletcher, D. and Walsh, F.C. A. *Industrial Electrochemistry*. London : Chapman & Hall. 1993.
- [10] สรวุฒิ สมนาม. เคมีวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2557.
- [11] Yan, X., Jin, F., Tohji, K., Kishita, A. and Ecomoto, H. “Hydrothermal conversion of carbohydrate biomass to lactic acid.” *AIChE Journal*, vol.56, 2010. pp.2727 - 2733.
- [12] ณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล. “การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกสารละลายต่าง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Saxena, A., Gohil, G.S. and Shahi, V.K. “Electrochemical membrane reactor : single step separation and ion substitution for the recovery of lactic acid from lactate salts.” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol.46, 2007. pp.1270 – 1276.
- [14] Simon, A., Fujioka, T., Price, W. E. and Nghiem, L. D. “Sodium hydroxide production from sodium carbonate and bicarbonate solutions using membrane electrolysis : A feasibility study.” *Separation and Purification Technology*, vol.127, 2014. pp.70 - 76.
- [15] ภาวิทร์ ศาสตรศรี. “การสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลทรายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์” ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [16] “Standard reduction potential.” [online]. Available : <https://employees.csbsju.edu/hjakubowski/classes/ch331/oxphos/standredpotentialtab.htm>.
- [17] Jorissen, J. and Simmrock, K. H. “The behavior of ion exchange membranes in electrolysis and electrodialysis of sodium sulphate.” *Journal of Applied Electrochemistry*, vol.21, 1991. pp.869 - 876.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

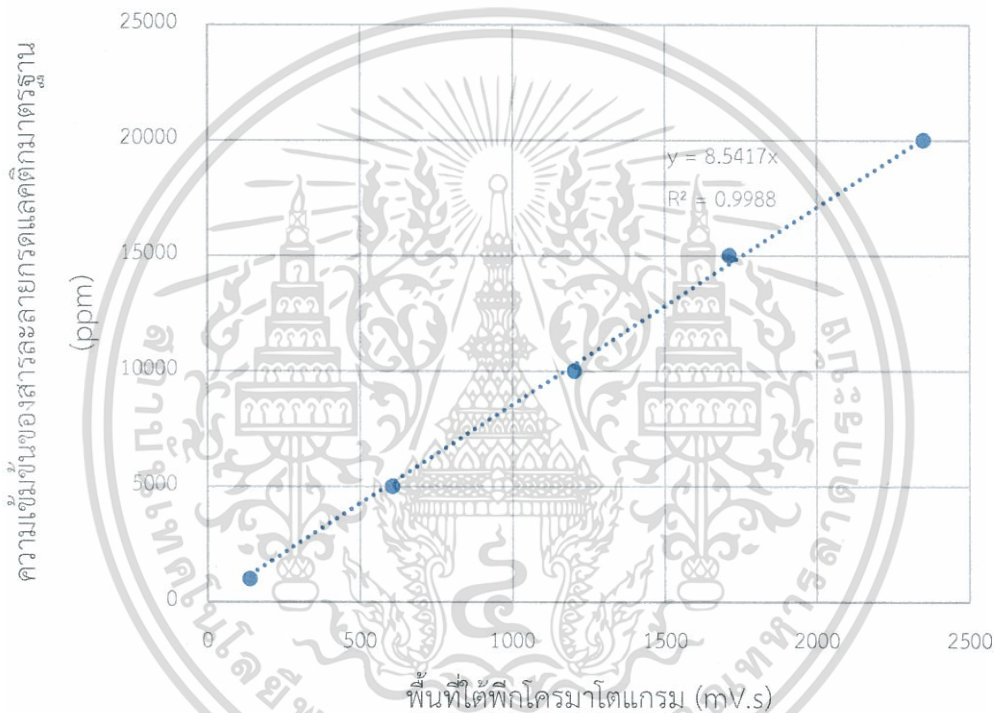
ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกในสารละลาย

ก.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานกรดแลคติก

จากการฉีดสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกความเข้มข้น 1,000 3,000 5,000 8,000 และ 10,000 ppm เข้าเครื่อง HPLC แล้วบันทึกโครมาโทแกรม สามารถสร้างกราฟมาตรฐานกรดแลคติก ได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานกรดแลคติก

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติก คือ $y = 8.5417x$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของกรดแลคติก (ppm)

x คือ พื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรม (mV.s)

ก.1.2 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

เมื่อนำสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการสังเคราะห์ 1 มิลลิกรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิกรัม แล้วปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร และปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 4.25 โมลาร์ จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายอยู่ในช่วง 2 ถึง 2.5 และนำสารละลายดังกล่าวมาผ่านการกรองแล้วฉีดเข้าเครื่อง HPLC ซึ่งได้พื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรมเท่ากับ 1755.046 mV.s

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรมกับความเข้มข้นของสารละลายกรดแลคติกคือ

$$y = 8.5417x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของกรดแลคติก (ppm)

x คือ พื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรม (mV.s)

แทนค่า $y = 8.5417(1755.046)$

$$y = 14991.076 \text{ ppm หรือ } 0.166 \text{ โมลาร์}$$

เนื่องจากก่อนที่จะนำสารละลายตัวอย่างมาฉีดเข้าเครื่อง HPLC ได้เจือจางสารละลาย 10 เท่า ดังนั้นความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีเท่ากับ 1.660 โมลาร์

ก.1.3 ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี (Yield)

$$Yield (\%) = \frac{C_B}{C_{A0}} \times 100$$



เมื่อ C_B คือ ปริมาณกรดแลคติกที่เกิดขึ้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{A0} คือ ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ภาคผนวก ข

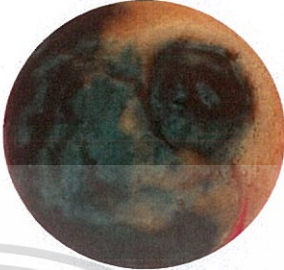



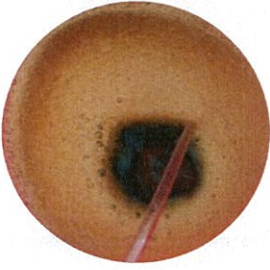
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) และลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าสารละลายจากการพ่นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช (pH)	ลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าสารละลาย
0	มากกว่า 14	
30	มากกว่า 14	
60	มากกว่า 14	
90	11.07	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) และลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าสารละลายจากการพ่นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช (pH)	ลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าสารละลาย
120	10.42	
150	9.88	
180	9.55	
210	9.16	
240	8.45	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ลักษณะของสารละลายที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ หลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ค่าพีเอช (pH)	ลักษณะของสารละลาย
8.80	
6.59	
4.02	
2.13	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างจากการศึกษาการแยกสารละลาย
โซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า

ปัจจัย		พื้นที่ใต้พีคโครมาโทแกรม (mV.s)	
		เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง
ความเข้มข้นของ สารละลาย โซเดียมแลคเตทเริ่มต้น (โมลาร์)	0.75	797.503	387.288
	1.20	1227.143	562.572
	1.50	1615.148	654.371
ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	4	777.712	431.604
	6	787.611	407.147
	8	797.503	387.288

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาการแยกสารละลายโซเดียม
แลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า

ปัจจัย		ความเข้มข้น (โมลาร์)	
		กรดแลคติก	โซเดียมไฮดรอกไซด์
ความเข้มข้นของ สารละลาย โซเดียมแลคเตทเริ่มต้น (โมลาร์)	0.75	0.367	0.907
	1.20	0.533	1.412
	1.50	0.621	1.918
ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	4	0.409	0.802
	6	0.386	0.869
	8	0.367	0.907

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้จากการศึกษาการแยกสารละลายโซเดียมแลคเตทด้วยกระแสไฟฟ้า

ปัจจัย		ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (%)	การใช้พลังงาน (kWh/kg NaOH)	ร้อยละของกรดแลคติกที่นำกลับมาได้ (%)
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น (โมลาร์)	0.75	11.005	5.880	48.562
	1.20	6.387	6.151	45.844
	1.50	5.975	6.490	40.515
ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	4	6.974	2.000	55.497
	6	8.191	5.317	51.694
	8	11.005	5.880	48.562

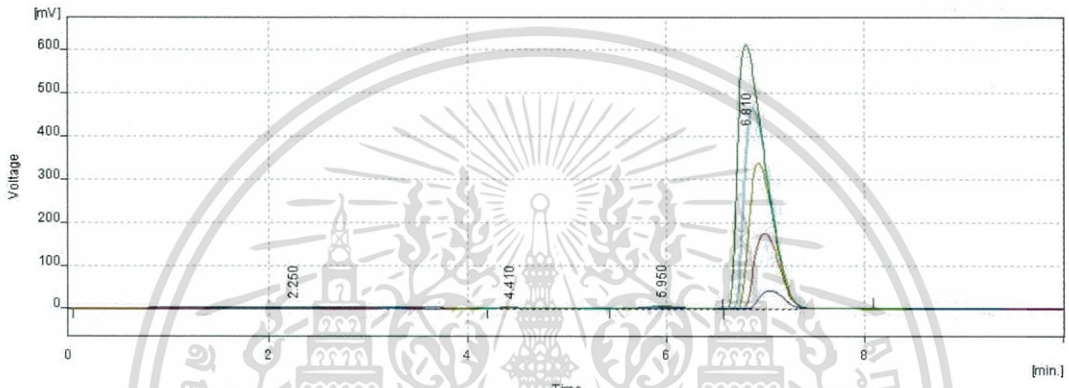
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

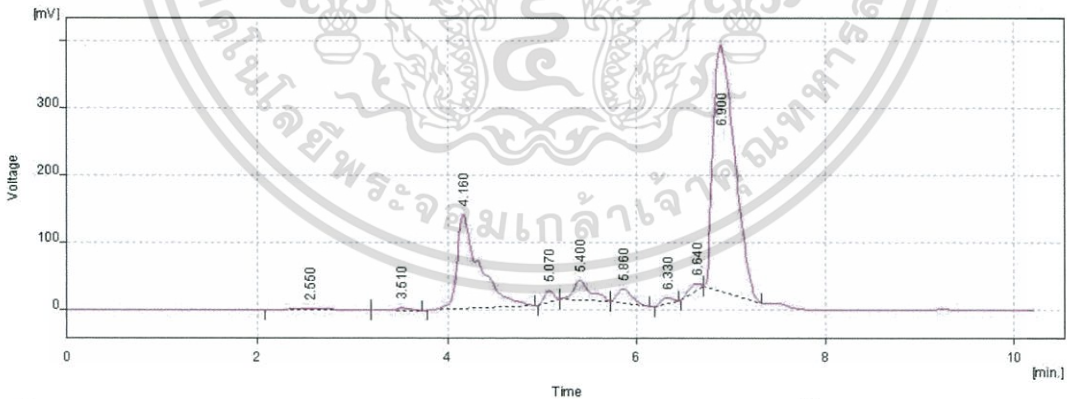
โครมาโทแกรม HPLC

ค.1 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานกรดแลคติก

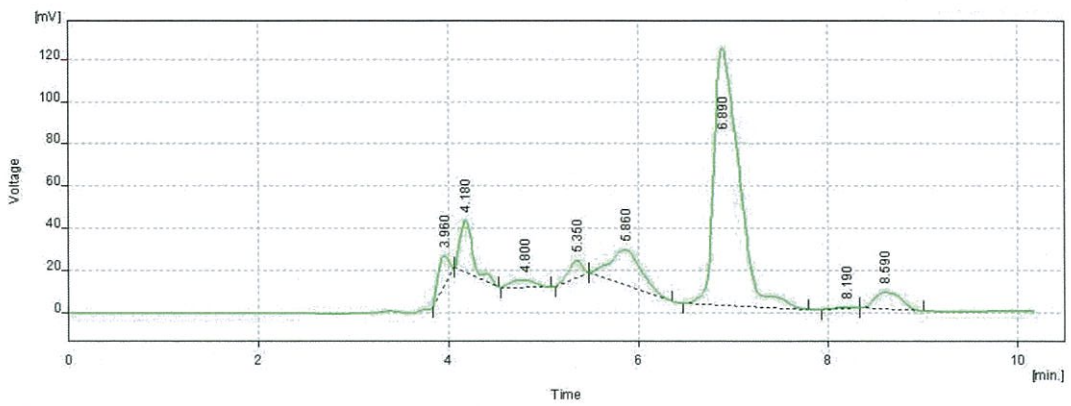
จากการบันทึกโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกที่ความเข้มข้น 1,000 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ด้วยเครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC) ที่สภาวะดังแสดงในหัวข้อ 3.7 ตอนที่ 2 พบว่า กรดแลคติกจะตรวจพบที่ช่วงเวลา 6.810 ถึง 7.050 นาที



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานกรดแลคติกที่ความเข้มข้น 1,000 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ



รูปที่ ค.2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของสารละลายน้ำตาลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.3 โครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างด้านแอนไอออนหลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ที่ ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้