

การผลิตกรดแลคติกจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างในเครื่องปฏิกรณ์
แบบเซมิแบตช์และอิเล็กโทรไลซิส

LACTIC ACID PRODUCTION FROM INVERT SUGAR BY ALKALINE DEGRADATION IN
A SEMI-BATCH REACTOR AND ELECTROLYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564
KMITL-2021-EN-D-228-029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LACTIC ACID PRODUCTION FROM INVERT SUGAR BY ALKALINE DEGRADATION IN A
SEMI-BATCH REACTOR AND ELECTROLYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMITL-2021-EN-D-228-029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตกรดแลคติกจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างในเครื่องปฏิกรณ์แบบเขมิแบทซ์และอิเล็กโทรไลซิส
นักศึกษา	นางสาวรินลดา สิริแสงสว่าง
รหัสประจำตัว	58601323
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ กิจไชยา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างหลังจากนั้นทำการคืนกลับกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส การย่อยด้วยต่างใช้น้ำตาลอินเวอร์ทและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงเป็นสารตั้งต้น น้ำตาลอินเวอร์ทถูกเติมอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเขมิแบทซ์ที่บรรจุด้วยสารละลายต่างเข้มข้นเพื่อให้มีความเข้มข้นของต่างสูงตลอดเวลาเพื่อให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีค่าการเปลี่ยนและผลได้ของกรดแลคติกมีค่าสูง ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างที่ถูกเลือกมาศึกษา คือ อุณหภูมิ (17.3-82.7 องศาเซลเซียส) ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น (1.9-10 โมลต่อลิตร) และระยะเวลาการป้อนน้ำตาล (0.73-7.3 ชั่วโมง) และ ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของกรดแลคติก โดยแสดงผลของผลได้ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ระยะเวลาการป้อนน้ำตาลมีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกน้อยในช่วงที่ทำการศึกษา โดยผลได้กรดแลคติกสูงสุด คือ 76% ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร ระยะเวลาการป้อนน้ำตาล 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการคืนกลับกรดแลคติกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการอิเล็กโทรไลซิส คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อทำการทดลองโดยการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น และ 2 แผ่น พบว่าการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบ 1 แผ่น ให้ร้อยละการคืนกลับกรดแลคติกที่ 50% และได้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.9 โมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์ ขณะที่ชุดทดลองการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ไม่พบการคืนกลับกรดแลคติก และได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.16 โมลาร์ เนื่องจากระบบมีค่าความต้านทานสูงกว่าชุดทดลองเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น

Thesis	Lactic acid production from invert sugar by alkaline degradation in a semi-batch reactor and electrolysis
Student	Miss Rinlada Sirisangsawang
Student ID.	58601323
Degree	Doctor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Prakob Kitchaiya

ABSTRACT

This thesis studies lactic acid production from invert sugar by alkaline degradation and lactic acid recovery by electrolysis. Concentrated invert sugar and high initial concentration of sodium hydroxide were used as raw materials. The invert sugar was continuously fed into a semi-batch reactor filled with concentrated sodium hydroxide solution. High concentration of alkaline at all reaction time in the semi-batch reactor provided high conversion and high yield of lactic acid. The factors that affect on alkaline degradation such as reaction temperature (17.3-82.7 °C), initial concentration of sodium hydroxide (1.9-10 mol/L) and feed time (0.73-7.3 hr) were studied. The response surface methodology and central composite design were used to evaluate the effect of variables on yield. From the results, the temperature and initial alkaline concentration had strong effect on the yield, while feed time was much less significant on the yield in this experimental range. The highest yield of lactic acid was 76% at 70 °C, 8.5 M of initial concentration of sodium hydroxide and 6 hr of feed time. The lactic acid was recovered by electrolysis with cation exchange membrane, using one and two cation exchange membranes. Applied voltage had large effect on electrolysis recovery. High voltage increased the reaction rate of electrolysis. At the voltage of 8 V, the one-membrane electrolytic cell could recover 50% lactic acid and 0.9 molar of sodium hydroxide solution. In two-membrane electrolytic experiment, lactic acid was not recovered, and there is only 0.16 M of sodium hydroxide solution being recovered, as it had higher resistance than the one-membrane electrolytic cell.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ นัมคนิสรณ์ รองประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร กรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และน้องๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งการทดลองทำสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และบุตร ซึ่งเป็นที่รัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

รินลดา สิริแสงสว่าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไป	3
2.1.2 ปฏิกริยาเคมีของมอโนแซ็กคาไรด์	4
2.2 ข้อมูลทั่วไปกรดแลคติก	13
2.3 การผลิตกรดแลคติก	15
2.3.1 กระบวนการหมัก	15
2.3.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี	16
2.4 การออกแบบการทดลอง	21
2.5 การคืนกลับกรดแลคติก	27
2.5.1 การเอสเทอร์ิฟิเคชันและการไฮโดรไลซิส	27
2.5.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	28
2.5.3 การอิเล็กโทรไลซิส	28
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	38
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	38
3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง	41
3.3 การศึกษาวิธีการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ	42
3.4 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง	44

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	45
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง	45
4.1.1 การศึกษาเบื้องต้นผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติก	46
4.1.2 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติกด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)	53
4.2 การศึกษาวิธีการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ	58
4.2.1 การคาร์บอนเนชันสารละลายที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง	58
4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแผ่นเดียว	60
4.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก จำนวน 2 แผ่น	65
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผล	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส	79
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์กรดแลคติก	81
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบผลการทดลอง	82
ภาคผนวก ง ภาพการทดลอง	91
ประวัติผู้เขียน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก	14
2.2 การหมักกรดแลคติกด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ	15
2.3 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2 ³ แฟคทอเรียล	21
2.4 จำนวนการทดลองเปรียบเทียบแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปและแฟคทอเรียลบางส่วน	22
2.5 การออกแบบการทดลองแบบ CCD สำหรับ 3 ปัจจัย	24
2.6 วัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ	25
2.7 ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ และการได้คืนกลับมาของกรดแลคติก	35
2.8 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการได้คืนคืนกรดแลคติก	36
3.1 คุณลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ยี่ห้อ Selemion	38
3.2 คุณลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ยี่ห้อ Neosepta	39
3.3 ระดับของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	42
4.1 ร้อยละผลที่ได้กรดแลคติกจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	54
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก	55
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก หลังตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ	56
4.4 ความสามารถในการละลายน้ำของโซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์	60
ค.1 ร้อยละผลได้และเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบเบทซ์ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส	82
ค.2 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบเบทซ์และเซมิเบทซ์ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส	82
ค.3 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบเซมิเบทซ์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ค.4 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้น น้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบเคมีแบบทซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ	83
ค.5 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้น น้ำตาลเริ่มต้น 30 45 และ 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในระบบเคมีแบบทซ์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	83
ค.6 ร้อยละผลได้คืนกลับกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อ แลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์	84
ค.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้ความเข้มข้นโซเดียมแลคเตท 0.75 และ 1.5 โมลต่อลิตร และใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่ความต่างศักย์ 8 โวลต์	84
ค.8 ค่าความเป็นกรด-ต่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ บวก 2 แผ่น	85
ค.9 ค่าความเป็นกรด-ต่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ บวก 2 แผ่น	86
ค.10 ค่าความเป็นกรด-ต่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ บวก 2 แผ่น	87
ค.11 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรด 0.01 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้า 4 8 และ 12 โวลต์ ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยน ประจุบวก 2 แผ่น	88
ค.12 ค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 และ 2 แผ่น ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้าง กลีเซอรอลดีไฮด์ (ก) และ ไดไฮดรอกซีลอะซีโตน (ข)	3
2.2 สูตรโครงสร้างของกลูโคส กาแล็คโทส และ ฟรุคโตส	4
2.3 ปฏิกริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่อัลดีไฮด์หมู่เดียว	4
2.4 ปฏิกริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่ไพรมารีแอลกอฮอล์หมู่เดียว	5
2.5 ปฏิกริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่อัลดีไฮด์และไพรมารีแอลกอฮอล์หมู่เดียว	5
2.6 ปฏิกริยาที่สารเปลี่ยนอัลโดสเป็นคีโตส	6
2.7 ปฏิกริยาอัลดอนคอนเดนเซชันระหว่างอะซีทัลดีไฮด์กับฟอร์มอลดีไฮด์	6
2.8 ปฏิกริยาอัลดอนคอนเดนเซชันและปฏิกริยารีดิวซ์อัลดอนคอนเดนเซชัน	7
2.9 ปฏิกริยาการกำจัดแบบเบต้า	7
2.10 กลไกการเกิดปฏิกริยา benzillic rearrangement	8
2.11 กลไกการเกิดกรดแลคติกจากไพริววัลดีไฮด์	8
2.12 ปฏิกริยาเคโตอินอลโทโทเมอไรเซชัน เมื่อใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกริยา	9
2.13 ปฏิกริยา cannizaro ของฟอร์มอลดีไฮด์	9
2.14 Lobry de Bruyn Transformation ในสารละลายต่าง	10
2.15 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาระหว่างน้ำตาลกลูโคสและต่าง	11
2.16 กลไกการเกิดปฏิกริยาของมอนแซ็คคาไรด์ในสารละลายต่าง 1) Enolization/ Isomerization 2) β -elimination 3) Benzilic Rearrangement 4) α -dicarbonyl cleavage 5) (retro-) aldolization 6) extended (retro-) aldolization ของสารประกอบไดคาร์บอนิล	11
2.17 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาระหว่างน้ำตาลซอร์บิทอลในต่าง	12
2.18 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาไฮโดรเทอร์มอลน้ำตาลกลูโคสในสารละลายต่าง	13
2.19 สูตรโครงสร้างของกรดแลคติก (ก) โครงสร้างของกรดแลคติกรูป L(+) (ข) โครงสร้างของกรดแลคติกรูป D (-)	14
2.20 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายมอนแซ็คคาไรด์ด้วยต่าง	17
2.21 การเติมแบบเคมีแบบทซ์	20
2.22 ความร้อนจากการเจือจางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	20
2.23 การทดลองแบบ Box-Behnken 3 ปัจจัย	22
2.24 การออกแบบส่วนประสมกลาง 3 ปัจจัย	23
2.25 กราฟพื้นผิวตอบสนอง	26
2.26 เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (ก) และเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ (ข)	30

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.27 หลักการทำงานของเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ	31
2.28 ไปโพลาร์เมมเบรน	31
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดโพลาริเซชัน	32
2.30 การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น	33
2.31 แผนภาพการใช้ไฟฟ้าเคมีในการเปลี่ยนแอมโมเนียมแลคเตทเป็นกรดแลคติก	33
2.32 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์	37
3.1 แผนภาพการทดลองการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง (ก) ถึงปฏิกรณ์ขนาด 300 มิลลิลิตร (ข)	39
3.2 ชุดทดลองอิเล็กโทรไลซิส สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 1 แผ่น (ก) สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น (ข)	40
3.3 เซลล์อิเล็กโทรไลต์เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น	43
4.1 อุณหภูมิของสารละลายเมื่อเจือจางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำ	46
4.2 ร้อยละผลได้กรดแลคติกและเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของน้ำตาลอินเวอร์ทที่เวลาต่างๆ สำหรับการเติมแบบแบทช์	47
4.3 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง สำหรับการเติมแบบแบทช์ และเซมิแบทช์ ที่เวลาต่างๆ	49
4.4 ปริมาณการเกิดกรดคาร์บอกซิลิกที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไอออนต่างๆ	49
4.5 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.5 5.5 8.5 และ 10.2 โมลต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ	51
4.6 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ	52
4.7 ร้อยละผลได้กรดแลคติกเมื่อใช้น้ำตาลความเข้มข้นสูงที่เวลาต่างๆ	53
4.8 กราฟพื้นผิวตอบสนอง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ก) อุณหภูมิกับเวลาการเติม (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาการเติม (ค) ต่อผลได้กรดแลคติก	57
4.9 การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมแลคเตท	59
4.10 สัดส่วนของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3), ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่พีเอชต่างๆ	59
4.11 ลักษณะตะกอนที่ได้จากการคาร์บอเนชันสารละลายโซเดียมแลคเตท	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.12 แผนภาพการอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น โดยที่ CSO คือเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก	61
4.13 ค่าพีเอชสารละลายด้านแอโนด การอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่เวลาต่างๆ ที่ค่าความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์	62
4.14 ค่ากระแสไฟฟ้า การอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่นที่เวลาต่างๆ ที่ค่าความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์	63
4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การได้คืนกลับกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์	64
4.16 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลาย 0.75 และ 1.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์	65
4.17 ชุดทดลองไฟฟ้าเคมี ที่มีเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก จำนวน 2 แผ่น (CSE)	66
4.18 ค่าพีเอชเมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 8 และ 12 โวลต์	67
4.19 ค่ากระแสเมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 8 และ 12 โวลต์	68
4.20 โครมาโตรแกรมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอิเล็กทรอนิกส์ที่เวลา 480 นาที ที่ศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์	68
4.21 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทด เมื่อทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 4 8 และ 12 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น	69
4.22 ค่ากระแสการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 และ 2 แผ่น ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์	70
ก.1 กราฟมาตรฐานน้ำตาลรีดิวซ์	80
ง.1 การเกิดปฏิกิริยาย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างแบบเคมีแบทช์ ของสารละลายน้ำตาลเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบแบบเคมีแบทช์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา (ก) 2 ชั่วโมง และ (ข) 8 ชั่วโมง	91
ง.2 การเกิดฟองแก๊สระหว่างการอิเล็กทรอนิกส์ สารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
ง.3	92

ง.3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยต่าง ระหว่างน้ำตาลอินเวอร์ท กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบแบทช์ ที่ เวลา 10, 60, 120, 240 และ 480 นาที



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

กรดแลคติก เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมอาหาร กรดชนิดนี้สามารถนำมาใช้ในกระบวนการหมัก เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง กรดแลคติกสามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวหนัง นอกจากนี้กรดแลคติกยังถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตพอลิเมอร์ที่กำลังมีบทบาทในอุตสาหกรรมมากในปัจจุบัน คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดี สามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียมที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ยากที่ก่อให้เกิดการสะสมของขยะในปริมาณมาก แนวโน้มการใช้พลาสติกชีวภาพนี้จึงได้รับความสนใจทำให้การผลิตกรดแลคติกกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งหนึ่ง จากประโยชน์ที่มากมายของกรดแลคติก ทำให้มีความต้องการผลิตกรดแลคติก โดยปริมาณการผลิตคิดเป็นมูลค่าในสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นทุกปีคาดการณ์แนวโน้มในปี 2014 มีมูลค่าสูงถึง 540.6 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [1]

กรดแลคติกสามารถผลิตได้ทั้งจากกระบวนการหมัก และกระบวนการทางเคมี ในปัจจุบันวิธีการหมักเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ [1, 2] แต่ขั้นตอนกระบวนการหมักต้องใช้เวลาอันยาวนาน ในขณะที่การผลิตโดยวิธีทางเคมีใช้เวลาสั้นกว่ามาก แต่ได้ผลได้ยังไม่สูงมากนัก นอกจากนี้กระบวนการผลิตทางเคมีจะใช้อุณหภูมิสูง ความดันสูง หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตกรดแลคติกมีค่าเพิ่มมากขึ้น เช่น การย่อยน้ำตาลด้วยต่างเพื่อผลิตกรดแลคติกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 250 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที จะได้ผลได้กรดแลคติก 39 และ 71 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำตาลฟรุกโตส 33 และ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ตามลำดับ [3]

การไฮโดรเทอร์มอลเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น เซลลูโลส สตาร์ช หรือใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตกรดแลคติก แต่อุณหภูมิและความดันที่ใช้สูง ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ราคาแพง นอกจากนี้ยังอาจมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย และผลได้ร้อยละยังไม่สูงมากนัก [4-6]

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยด้วยต่างมากที่สุด คือ มอโนแซ็กคาไรด์ เช่น กลูโคส ฟรุกโตส เป็นต้น น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสบริสุทธิ์มีราคาค่อนข้างแพง ในขณะที่น้ำตาลทรายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาไม่สูงนักและหาได้ง่ายในประเทศไทย น้ำตาลทรายสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิส

การผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยสลายในต่างนั้หลังจากการผลิตจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปเกลือแลคเตทซึ่งจะต้องนำมาเปลี่ยนเป็นสารละลายกรดแลคติก ซึ่งการเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกมีหลายวิธีการ เช่น ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [7] การสกัดด้วยตัวทำละลาย [8] ซึ่งต้องมีการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยา และต้องมีขั้นตอนในการแยกสารละลายออก ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังมีของเหลือ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการนำมากำจัด วิธีการที่น่าสนใจ คือ การอิเล็กโทรไลซิสร่วมกับเมมเบรน เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเกลือของกรดไฮดรอกซีต่างๆ เป็นกรด วิธีการนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เกิดของเสียน้อยมาก นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้ในการผลิตได้อีก

จากข้อมูลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงใช้น้ำตาลทรายเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาการผลิตกรดแลคติกเพื่อที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดแลคติกโดยใช้น้ำตาลทรายเป็นสารตั้งต้น ด้วยกระบวนการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างที่ไม่ยุ่งยาก สภาวะไม่รุนแรง จากนั้นจึงทำการศึกษาเพื่อเปลี่ยนสารละลายเกลือแลคเตทที่ได้เป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดแลคติกจากน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยการย่อยน้ำตาลด้วยต่าง
- 1.2.2 ศึกษาการเปลี่ยนเกลือแลคเตทเป็นกรดแลคติกและต่างด้วยการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 การไฮโดรไลซิสน้ำตาลทรายเพื่อผลิตน้ำตาลอินเวอร์ท
- 1.3.2 การผลิตกรดแลคติกโดยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเขมือแบทซ์
- 1.3.3 แยกและเปลี่ยนเกลือแลคเตทเป็นกรดแลคติกและต่างโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.4.1 การไฮโดรไลซิสน้ำตาลทรายเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อผลิตน้ำตาลอินเวอร์ทที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
- 1.4.2 การผลิตกรดแลคติกโดยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างในเครื่องปฏิกรณ์แบบเขมือแบทซ์ และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาการเติม เป็นต้น
- 1.4.3 กำจัดต่างส่วนเกินในผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเกิดเป็นตะกอนคาร์บอเนต และกรองสารละลาย
- 1.4.4 เปลี่ยนเกลือแลคเตทเป็นกรดแลคติก โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยแปรค่าศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะบรรยายถึงการผลิตรกรดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลด้วยต่าง โดยน้ำตาลที่นิยมใช้ คือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ดังนั้นในส่วนแรกจะได้กล่าวถึงน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในส่วนของคุณลักษณะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพื่อให้เข้าใจในพื้นฐานในการย่อยน้ำตาลด้วยต่าง ตลอดจนอธิบายถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

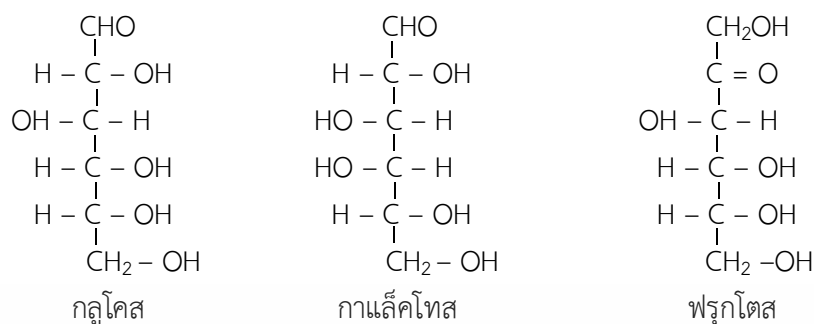
2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือ มอโนแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์โบไฮเดรต เป็นโครงสร้างพื้นฐานของไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) หรือน้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น ซูโครส (Common sugar) และ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เช่น เซลลูโลสและแป้ง มอโนแซ็กคาไรด์เป็นสารที่มีรสหวาน ละลายในน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว มีสูตรทั่วไปคือ $(\text{CH}_2\text{O})_n$ ซึ่ง n เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 3 ถึง 7 คาร์บอนจะต่อกันเป็นสายตรงไม่แตกแขนง มีหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) จับกับคาร์บอนทุกตัว ยกเว้นคาร์บอน 1 ตัว ที่จะมีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) มาจับโดยหมู่ฟังก์ชันของคาร์โบไฮเดรตจะมี 2 หมู่ คือ หมู่แอลดีไฮด์ ($-\text{CHO}$, aldehyde group) หรือ หมู่คีโตน ($\text{C}=\text{O}$, ketone group) มอโนแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลดีไฮด์จะเรียกว่า น้ำตาลอัลโดส (Aldose sugar) และ มอโนแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคีโตนจะเรียกว่า น้ำตาลคีโตส (Ketose sugar) น้ำตาลอัลโดสที่เล็กที่สุดได้แก่ กลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceraldehyde) และน้ำตาลคีโตสที่เล็กที่สุด คือ ไดไฮดรอกซีอะซิโตน (Dihydroxyacetone) มีคาร์บอน 3 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.1 น้ำตาลที่พบบ่อย คือ น้ำตาลเฮกโซส (น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม) เช่น กลูโคส กาแล็คโทส ฟรุคโตส แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยปฏิกิริยาของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวยังมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้าง กลีเซอรอลดีไฮด์ (ก) และ ไดไฮดรอกซีอะซิโตน (ข)



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของกลูโคส กาแล็คโทส และ ฟรุคโตส

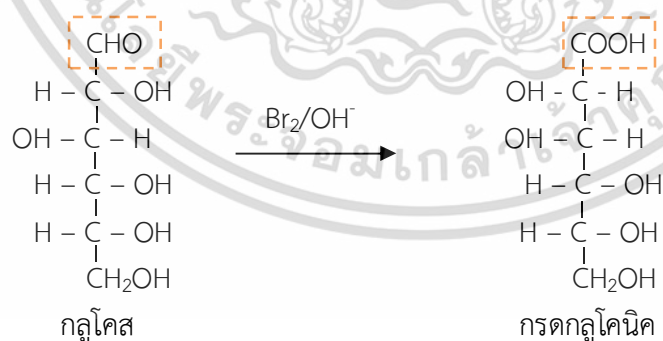
2.1.2 ปฏิกิริยาเคมีของมอนแซ็กคาไรด์

ปฏิกิริยาเคมีของน้ำตาลเกิดที่หมู่ฟังก์ชัน แอลดีไฮด์ คีโตน และ ไฮดรอกซิลของน้ำตาลนั้นๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

ในโมเลกุลของน้ำตาลมีทั้งหมู่ไฮดรอกซิลและแอลดีไฮด์ เมื่อแอลกอฮอล์ถูกออกซิไดซ์จะเป็นแอลดีไฮด์ และถ้าแอลดีไฮด์ถูกออกซิไดซ์จะได้กรดคาร์บอกซิลิก ดังนั้นทั้งสองหมู่นี้จึงสามารถถูกออกซิไดซ์ให้เกิดเป็นกรดได้ แอลดีไฮด์สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าคีโตน การออกซิไดซ์โมเลกุลของน้ำตาลดังกล่าวจึงมีได้ 3 แบบดังนี้

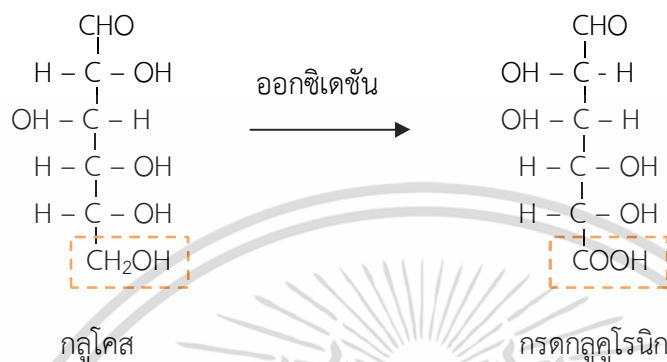
1. ออกซิไดซ์หมู่แอลดีไฮด์เพียงหมู่เดียว จะได้กรดที่มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า Aldonic acid การออกซิไดซ์โดยวิธีนี้จะต้องใช้สารละลายโบรมีนในด่าง เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ตัวอย่างปฏิกิริยานี้ คือการออกซิไดซ์กลูโคส เป็นกรดกลูโคนิก ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่แอลดีไฮด์หมู่เดียว

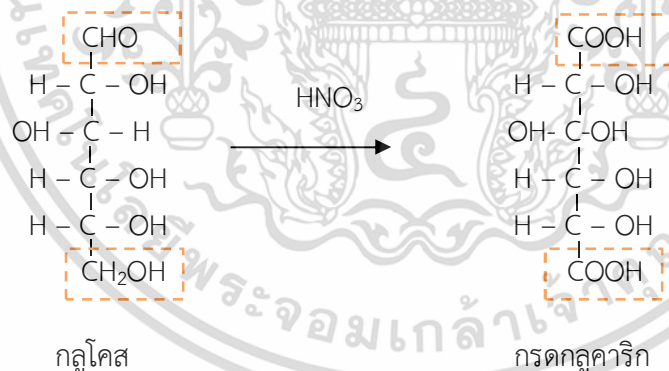
2. การออกซิไดซ์หมู่ไพรมารีแอลกอฮอล์เพียงหมู่เดียว จะได้กรดที่มีชื่อเรียกว่า Alduronic acid หรือ Uronic acid โดยทั่วไปปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่หมู่แอลดีไฮด์เป็นลำดับแรก ดังนั้นในการ

สังเคราะห์กรด Uronic จึงต้องทำการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่หมู่แอลดีไฮด์และหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อทำการเปลี่ยนไพรมารีแอลกอฮอล์เป็นกรดคาร์บอกซิลิก ตัวอย่างการออกซิเดชันนี้ คือการออกซิเดชันกลูโคส เป็นกรดกลูคูโรนิก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่ไพรมารีแอลกอฮอล์หมู่เดียว

3. การออกซิเดชันทั้งหมู่แอลดีไฮด์และไพรมารีแอลกอฮอล์เพียงหมู่เดียว จะได้กรดที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่อยู่ที่ปลายทั้งสองข้างของโมเลกุล กรดที่ได้นี้มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า Aldaric acid หรือ Glycaric acid ออกซิเดชันซึ่งเอนเจนท์ที่สามารถออกซิเดชันทั้งหมู่แอลดีไฮด์และไพรมารีแอลกอฮอล์ก็คือ กรดไนตริกเข้มข้น ตัวอย่างการออกซิเดชันนี้แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสที่หมู่แอลดีไฮด์และไพรมารีแอลกอฮอล์หมู่เดียว

2.1.2.2 ปฏิกิริยาน้ำตาลกับต่าง

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากลูโคส หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างๆ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดชนิดต่างๆ โดยใช้สารออกซิเดชันดังได้กล่าวข้างต้น ซึ่งเป็นสารออกซิเดชันที่แรง อย่างไรก็ตามน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเฮกโซสสามารถเกิดปฏิกิริยากับต่างได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ รวมทั้งกรดแลคติก (ที่มีคาร์บอน 3 ตัว) โดยไม่ต้องใช้สารออกซิเดชันที่แรงที่กล่าวมาข้างต้น

รายละเอียดการเกิดปฏิกิริยาสำหรับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกับต่างเกิดเป็นกรดแลคติกจะได้บรรยายในภายหลัง ในขั้นนี้จะอธิบายถึงพื้นฐานปฏิกิริยาต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและสารละลายต่างๆที่สำคัญในการสังเคราะห์กรดแลคติก ได้แก่

1. ปฏิกิริยา Lobry de Bruyn–van Ekenstein transformation

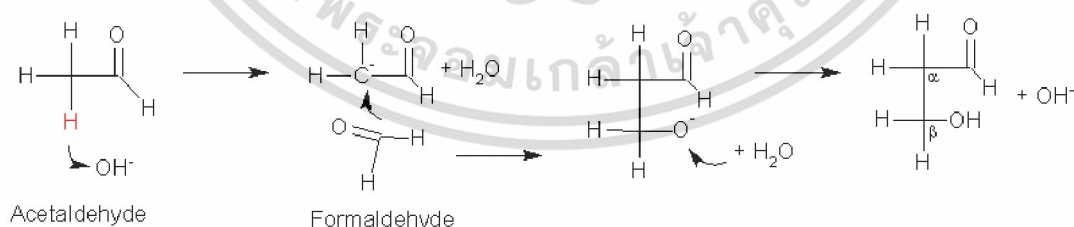
เป็นปฏิกิริยาที่สารเปลี่ยนโครงสร้างจากอัลโดสเป็นคีโตส เช่น การเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำตาลกลูโคส แมนโนส และฟรุคโตส มีกลไกแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยสารตั้งต้นต้องมีแอลฟาไฮโดรเจนอะตอม (α -hydrogen atom) ซึ่งก็คือคาร์บอนที่อยู่ติดกับหมู่คาร์บอนิล ($>C=O$) ต้องมีอะตอมไฮโดรเจน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีในสารละลายที่เป็นด่าง โดยโปรตอนที่ตำแหน่งแอลฟาจะถูกดึงออกด้วยต่างเกิดเป็นอินอลเลทไอออน (อินโดอลแอนไอออน) หลังจากนั้นจะเกิดการไอโซเมอไรเซชันระหว่างอินอลเลทไอออน และอินอลเลทไอออนที่เกิดขึ้นจะดึงโปรตอนจากน้ำได้เป็นอัลโดสหรือคีโตส



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาที่สารเปลี่ยนอัลโดสเป็นคีโตส

2. ปฏิกิริยา aldol condensation [9]

ปฏิกิริยาอัลดอนคอนเดนเซชันเป็นปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของแอลดีไฮด์หรือคีโตนโดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโมเลกุลของแอลดีไฮด์หรือคีโตนที่ทำปฏิกิริยากันอาจเป็นสารชนิดเดียวกันหรือสารต่างชนิดกันมาทำปฏิกิริยา ขั้นตอนแรกแอลฟาไฮโดรเจนอะตอมถูกดึงออกในสารละลายต่างเกิดเป็นคาร์แบนไอออนซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้เป็นอินอลเลทไอออน คาร์แบนไอออนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแอลดีไฮด์หรือคีโตนอื่น ทำให้เกิดเป็นเบต้าไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ หรือ เบต้าไฮดรอกซีคีโตนแสดงดังรูปที่ 2.7 ถ้าแอลดีไฮด์หรือคีโตนไม่มีแอลฟาไฮโดรเจนอะตอมจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้

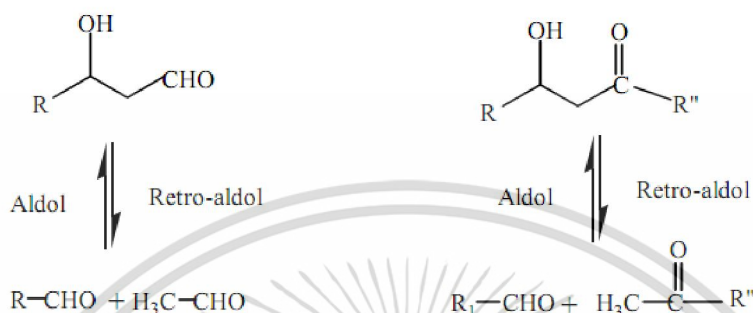


รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาอัลดอนคอนเดนเซชันระหว่างอะซีตัลดีไฮด์กับฟอร์มัลดีไฮด์

ในขณะที่ปฏิกิริยาริโทรอัลดอนคอนเดนเซชัน (Retro-aldol condensation) เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาอัลดอนคอนเดนเซชัน คือ การแตกตัวของเบต้าแอลดีไฮด์หรือคีโตนได้เป็นแอลดีไฮด์หรือคีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างปฏิกิริยาอัลดอนคอนเดนเซชันและรีโทรอัลดอนคอนเดนเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.8 ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในสารละลายต่างและทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำตาลเฮกโซสได้โครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลง เช่น เกิดเป็นน้ำตาลไตรออส เพื่อนำไปสู่การเกิดเป็นไพรูวัลดีไฮด์ และ เกิดเป็นกรดแลคติกในที่สุด



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาอัลดอนคอนเดนเซชันและปฏิกิริยารีโทรอัลดอนคอนเดนเซชัน

3. ปฏิกิริยาการกำจัดแบบเบต้า (β -Elimination reaction)

ปฏิกิริยาการกำจัดแบบเบต้า เป็นปฏิกิริยาที่มีการกำจัดโมเลกุลเล็กๆ ออกจากสารตั้งต้นโดยอะตอมที่หลุดออกต้องอยู่ที่คาร์บอนที่ตำแหน่งเบต้าจากหมู่คาร์บอนิล และเกิดเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนที่ตำแหน่งเบต้าและแอลฟา ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดไพรูวัลดีไฮด์จากน้ำตาลไตรออส แสดงดังรูปที่ 2.9

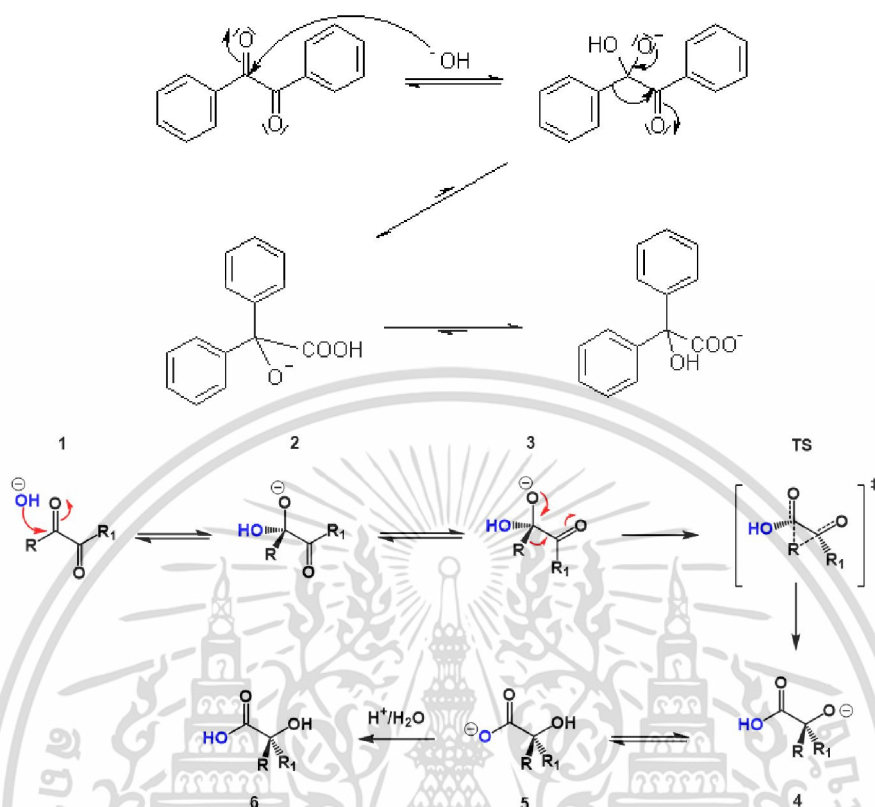


รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการกำจัดแบบเบต้า

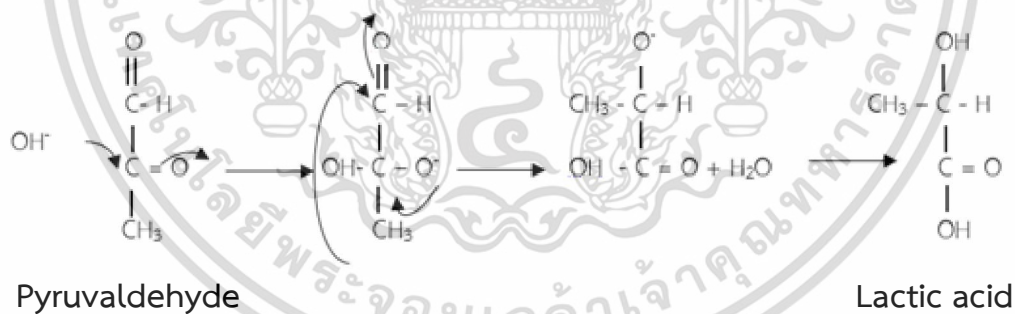
4. ปฏิกิริยา benzilic rearrangement

ปฏิกิริยา benzilic rearrangement เป็นปฏิกิริยาที่พันธะมีการเคลื่อนย้ายเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยา benzilic rearrangement เป็นการเปลี่ยนจาก benzyl ไปเป็น benzilic acid ในสถานะต่างแก่ และกลไกที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.10 ปฏิกิริยานี้เป็นขั้นตอนสำคัญในการเกิดกรดแลคติกจากไพรูวัลดีไฮด์ในสารละลายต่าง แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยา benzilic rearrangement



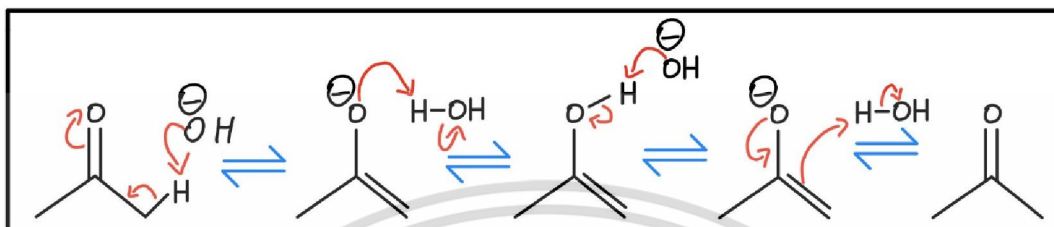
รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดกรดแลคติกจากไพรวาลดีไฮด์

5. ปฏิกิริยาทอโทเมอไรเซชัน

ปฏิกิริยาทอโทเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของโปรตอน เมื่อโปรตอนเกิดการเคลื่อนที่จะส่งผลให้โครงสร้างของสารมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่สารยังคงมีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน โครงสร้างของสารที่ต่างกันและสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างกันได้เรียกว่า ทอโทเมอร์ ปฏิกิริยาทอโทเมอไรเซชัน สามารถเกิดได้โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทอโทเมอไรเซชันสามารถถูกพบในการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลในสารละลายต่างเนื่องจากมีหมู่คีโตอินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

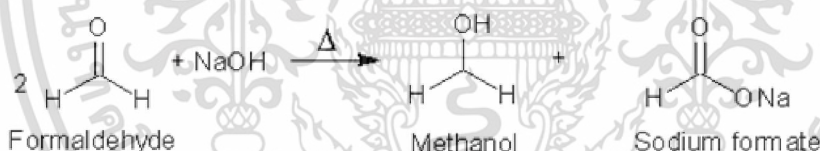
ปฏิกิริยาคีโตอินอลโทโทเมอไรเซชัน (Keto enol tautomerization) เป็นปฏิกิริยาที่คีโตนสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมา ปฏิกิริยาคีโตอินอลโทโทเมอไรเซชัน เมื่อใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งโดยทั่วไปที่สมดุลจะอยู่ในรูปแบบคีโตน



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาคีโตอินอลโทโทเมอไรเซชัน เมื่อใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

6. ปฏิกิริยา Cannizzaro reaction [16]

สำหรับแอลดีไฮด์ที่อะตอม C ที่ตำแหน่ง alpha นั้นไม่มีอะตอม H เกาะอยู่ ภายใต้สภาวะที่เป็นเบสเข้มข้นที่แรงพอ แอลดีไฮด์ดังกล่าวก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยา oxidation-reduction ระหว่างโมเลกุลแอลดีไฮด์สองโมเลกุลได้ โดยหมู่คาร์บอนิล C=O ของแอลดีไฮด์โมเลกุลหนึ่งจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดอินทรีย์ -COOH และหมู่ C=O ของอีกโมเลกุลหนึ่งจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล -OH ตัวอย่างปฏิกิริยา cannizzaro แสดงดังรูปที่ 2.13



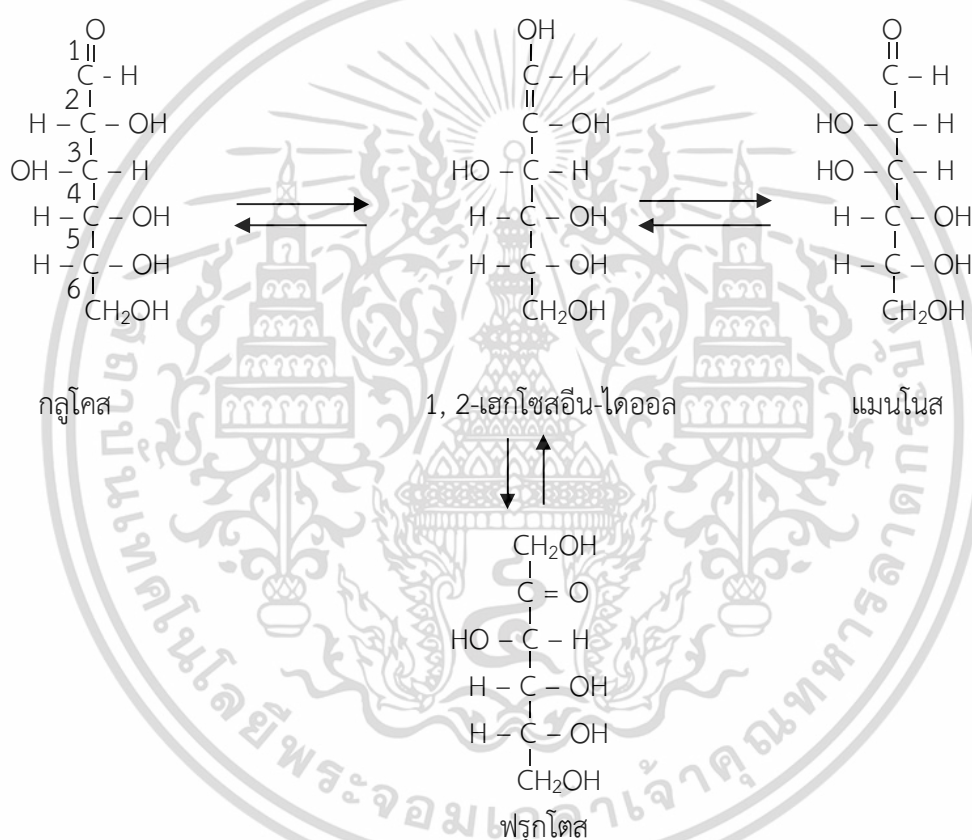
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยา cannizzaro ของฟอร์มอลดีไฮด์

จากปฏิกิริยาต่างๆของหมู่แอลดีไฮด์ คีโตน และ ไฮดรอกซิลกับต่างดังได้กล่าวมา จะได้นำมาอธิบายถึงกลไกที่น้ำตาลทำปฏิกิริยากับต่างที่สภาวะต่างๆที่มีผู้เสนอไว้ ดังต่อไปนี้

1. เมื่อให้น้ำตาลทำปฏิกิริยากับต่างอ่อน เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Ba}(\text{OH})_2$ น้ำตาลกลูโคสจะเปลี่ยนเป็น ฟรุคโตส และ แมนโนสได้ หรือ กลูโคส ฟรุคโตส และ แมนโนส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปมาระหว่างกันได้ การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นตรงคาร์บอนอะตอมที่ 1 (C1) และ 2 (C2) เท่านั้น เนื่องจากน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีโครงสร้างตั้งแต่ คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ถึง คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 เหมือนกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตรงคาร์บอนที่มีโครงสร้างตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน จึงยอมทำให้มันสามารถเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลอีกชนิดหนึ่งได้ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปมาระหว่างน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดนี้จะผ่านทาง 1,2-เฮกโซอินไดออล (Enolate form) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ของปฏิกิริยานี้ เรียกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปมาในลักษณะนี้ว่า Lobry de Bruyn-van Ekenstein transformation แสดงดังรูปที่ 2.14 กระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างไปมาแบบ Lobry de Bruyn-van Ekenstein

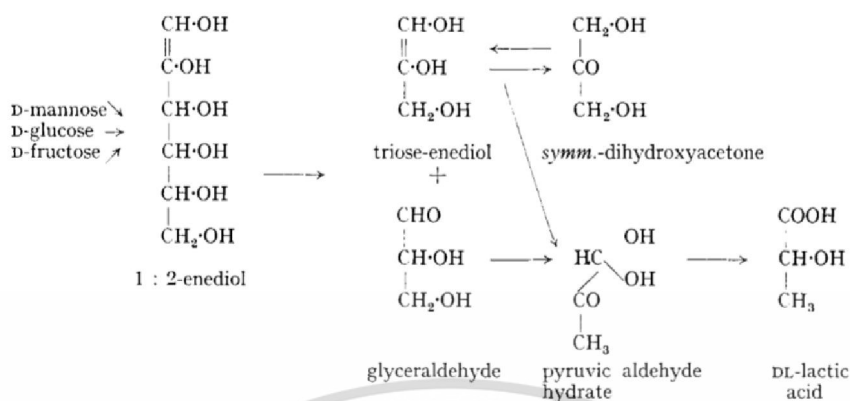
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transformation เป็นกระบวนการที่นักวิจัยหลายท่านกล่าวถึงในขั้นแรกของการผลิตกรดแลคติกจากน้ำตาลมอลโทส [5, 17, 18] หลังจากนั้น 1,2-เฮกซอสนินไดออล จะเกิดการแตกตัวโดยปฏิกิริยา Retro-Aldol Condensation เกิดเป็น กลีเซอรอลดีไฮด์ และ ไตรโอส-อินไดออล ซึ่งทั้งสองสารนี้อาจพิจารณาได้เป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.15 ไตรโอส-อินไดออล อาจเกิดปฏิกิริยา Lobry de Bruyn–van Ekenstein transformation เกิดเป็น ไดไฮดรอกซีอะซีโตน ในลักษณะเดียวกับที่ 1,2-เฮกซอสนินไดออลเกิดเป็นฟรุกโตส นอกจากนี้ไตรโอส-อินไดออลและกลีเซอรอลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาการกำจัดแบบเบต้าได้เป็นไพรูวัลดีไฮด์ ก่อนที่ไพรูวัลดีไฮด์จะเกิดปฏิกิริยา Benzillic rearrangement เกิดเป็นกรดแลคติก



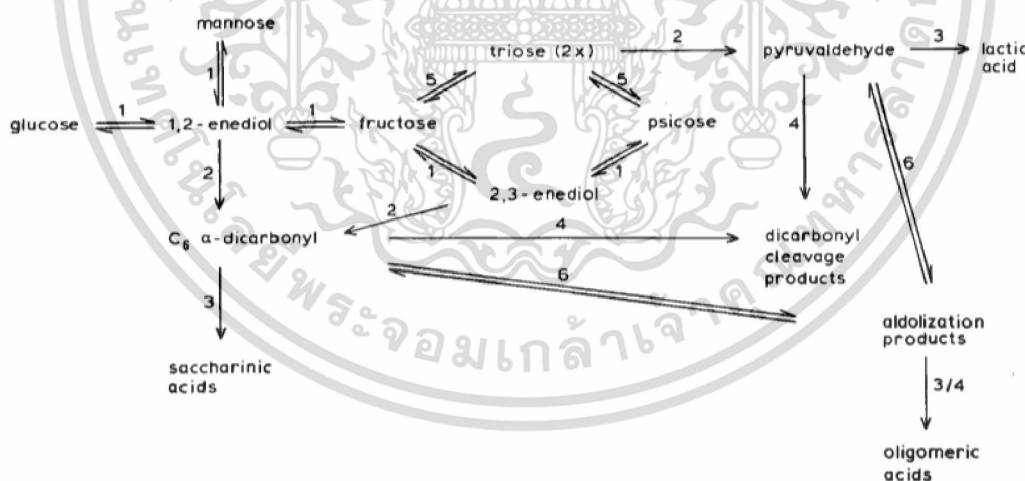
รูปที่ 2.14 Lobry de Bruyn Transformation ในสารละลายต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลกลูโคสและต่าง [17]

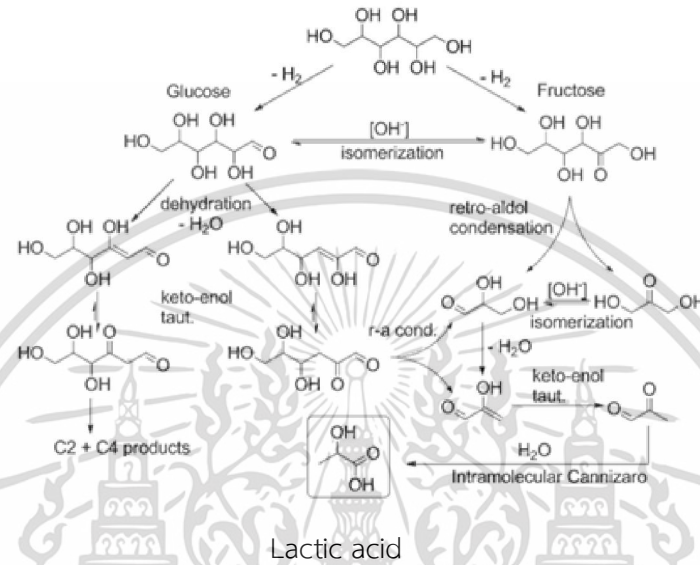
2. เมื่อให้น้ำตาลอยู่ในสารละลายต่างแก่ เช่น NaOH หรือ KOH น้ำตาลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลายอย่าง น้ำตาลมีความว่องไวต่อการปฏิกิริยากับต่างมากกว่ากรด งานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำเสนอกลไกการเกิดกรดแลคติกซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาต่างๆ เช่น Enolization หรือ Isomerization, β -elimination, Benzilic Rearrangement, aldol condensation และ (retro-) aldolization เป็นต้น ตัวอย่างกลไกแสดงดังรูปที่ 2.16-2.18 [5, 17, 18]



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของมอนแซ็กคาไรด์ในสารละลายต่าง 1) Enolization/ Isomerization 2) β -elimination 3) Benzilic Rearrangement 4) α -dicarbonyl cleavage 5) (retro-) aldolization 6) extended (retro-) aldolization ของสารประกอบไดคาร์บอนิล [18]

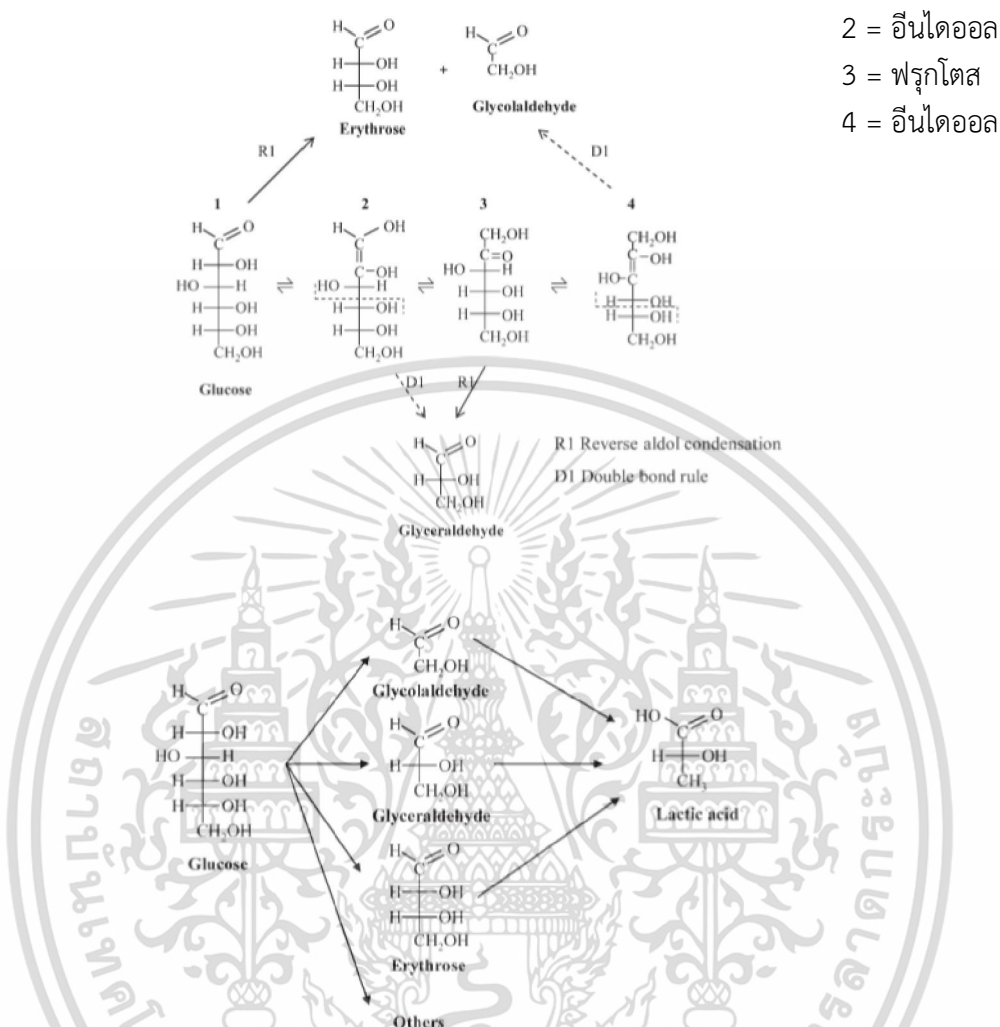
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Manas และคณะ (2014) [19] ได้เสนอกลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลซอร์บิทอลในต่างเป็น แลคเตทผ่านน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส ด้วยกระบวนการดีไฮเดรชัน รีโทรอัลดอลคอนเดนเซชัน คีโตอินอล ทอโทเมอไรเซชัน และไอโซเมอไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลซอร์บิทอลในต่าง [19]

Yan และคณะ (2010) [5] ได้เสนอกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของน้ำตาลกลูโคสใน สารละลายต่าง ก่อนเปลี่ยนไปเป็นไอโซเมอร์ของกลูโคสด้วยกระบวนการ Lobry de Bruyn Transformation จากนั้นกลูโคสจะเกิดปฏิกิริยารีเวอร์สอัลดอลคอนเดนเซชัน ได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคแอลดีไฮด์ กลีเซอรอลดีไฮด์ และเออร์โทส ซึ่งจะถูกละลายเป็นกรดแลคติกต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.18



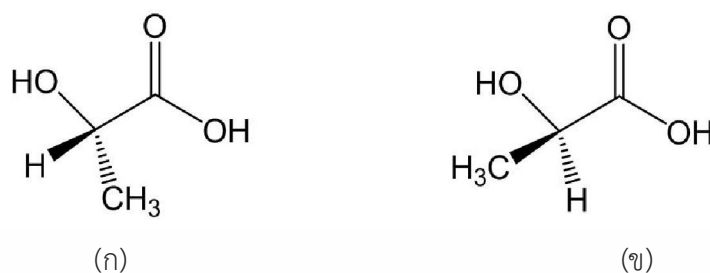
รูปที่ 2.18 กลไกที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลน้ำตาลกลูโคสในสารละลายต่าง [5]

กรดแลคติกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการที่น้ำตาลทำปฏิกิริยากับต่าง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยกรดแลคติกมีคุณลักษณะ การนำไปใช้ประโยชน์และวิธีการผลิตดังนี้

2.2 ข้อมูลทั่วไปกรดแลคติก (Lactic acid) [20]

กรดแลคติก มีสูตรโมเลกุล คือ $C_3H_6O_3$ กรดแลคติกมีชื่อทางเคมีว่า 2-hydroxypropionic acid หรือ 2-hydroxypropanoic acid กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คาร์บอนหนึ่งอะตอมที่อยู่ส่วนปลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ส่วนอะตอมคาร์บอนอีกปลายหนึ่งเป็นหมู่เมทิล (Methyl group) และอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตรงกลางมีหมู่แอลกอฮอล์ กรดแลคติกมีอยู่ 2 รูปแบบคือ L(+)-Lactic acid และ D(-)-Lactic acid ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี แตกต่างกันดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สูตรโครงสร้างของกรดแลคติก (ก) โครงสร้างของกรดแลคติกกลุ่ม L(+) (ข) โครงสร้างของกรดแลคติกกลุ่ม D (-)

กรดแลคติกที่มีความบริสุทธิ์สูงจะไม่มีสี ละลายได้ดีในน้ำ อะซิโตน อีเทอร์ แอลกอฮอล์ แต่ไม่สามารถละลายในปิโตรเลียมอีเทอร์ คลอโรฟอร์ม สมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกรดแลคติก

น้ำหนักโมเลกุล	90.08
จุดหลอมเหลว (DL lactic acid)	16.8 – 33 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	82 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.5 มิลลิเมตรปรอท
	122 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 14 มิลลิเมตรปรอท
ค่าคงที่การแตกตัว (Ka) ที่ 25 องศาเซลเซียส	1.37×10^{-4}
ค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) ที่ 20 องศาเซลเซียส	190 จูลต่อโมลต่อองศาเซลเซียส
ค่าความเป็นกรด (pKa)	3.86

ที่มา : Narayanan และคณะ (2004) [21]

กรดแลคติกโดยทั่วไปถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหาร โดยนำมาใช้ในการปรับค่าความเป็นกรดในอาหาร เพื่อให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นำมาใช้ผลิตอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ นอกจากนั้นกรดแลคติกและเอทิลแลคเตทถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในโลชั่น ในอุตสาหกรรมยา กรดแลคติกถูกนำมาใช้ผลิตเป็นแผ่นปิดแผลที่ทำจากพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนั้นยังสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมี เช่น โพรพิลีนไกลคอล โพรพิลีนออกไซด์ เป็นต้น [22]

2.3 การผลิตกรดแลคติก

การผลิตกรดแลคติก ผลิตได้ 2 วิธี คือการผลิตด้วยกระบวนการหมักและการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี [21]

2.3.1 กระบวนการหมัก (Fermentation)

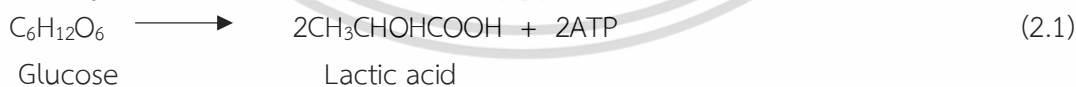
กรดแลคติกสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยมีวัตถุดิบที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตคือ อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง การหมักกรดแลคติกสามารถหมักได้ทั้งเชื้อรา และแบคทีเรีย แต่แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการผลิตกรดแลคติก ตัวอย่างแบคทีเรียที่นิยมใช้คือ *Lactobacillus* และ *Lactococcus* การหมักกรดแลคติกด้วยแบคทีเรียจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การหมักกรดแลคติกด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

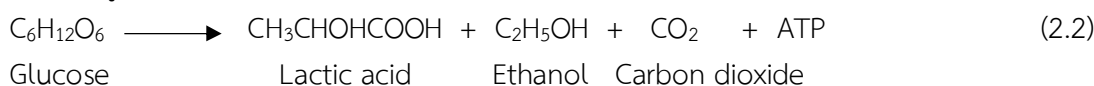
วัตถุดิบ	จุลินทรีย์	ความเข้มข้น (g/L)	อ้างอิง
ชานอ้อย	<i>Lactococcus lactis</i> IO-1	10.9	Laopaiboon และคณะ (2010) [23]
ชานอ้อย	<i>Lactobacillus casei</i>	21.3	Oonkhanond และคณะ (2017) [24]
เซลลูโลส	<i>Bacillus coagulans</i> 36D1	80	Ou และคณะ (2011) [25]
กากมันสำปะหลัง	<i>Bacillus coagulans</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	112.5	Chena และคณะ (2020) [26]

แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โฮโมแลคติกแบคทีเรีย (Homolactic Bacteria) ที่ผลิตกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเพียงชนิดเดียว และเฮเทอโรแลคติกแบคทีเรีย (Heterolactic Bacteria) ที่ให้ผลผลิตมากกว่า 1 ชนิด ได้แก่ เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดแลคติก ซึ่งขั้นตอนในการผลิตกรดแลคติกของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

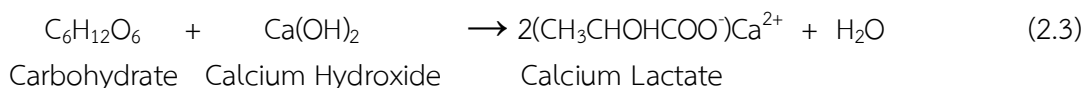
1. การหมักกลูโคสแบบโฮโมแลคติก



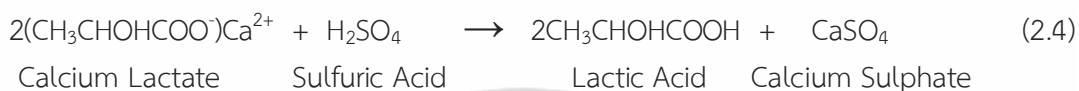
2. การหมักกลูโคสแบบเฮเทอโรแลคติก



ในกระบวนการหมักจะมีการควบคุมพีเอช โดยการเติมปูนขาวทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมแลคเตท แสดงดังสมการที่ 2.3



เนื่องจากการเติมสารประกอบแคลเซียม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จึงจำเป็นต้องละลายตะกอนของแคลเซียมแลคเตทด้วยกรด เช่น กรดซัลฟิวริก หรือกรดไฮโดรคลอริก เพื่อให้ได้กรดแลคติกและแคลเซียมซัลเฟต ดังสมการที่ 2.4



2.3.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี

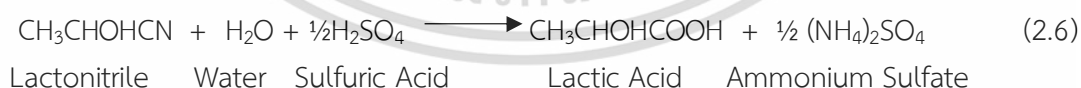
การสังเคราะห์ทางเคมี มีหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการระหว่างอะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กับไฮโดรเจนไซยาไนด์ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล การย่อยด้วยต่าง

2.3.2.1 การสังเคราะห์ทางเคมีจากปฏิกิริยาของอะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กับไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen Cyanide) เกิดเป็นแลคโทไนไทรล์ (Lactonitrile) จากนั้นนำแลคโทไนไทรล์กลับเพื่อทำให้บริสุทธิ์ แล้วนำมาทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติกและเกลือแอมโมเนียมเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ นำกรดแลคติกที่ได้มาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและไฮโดรไลซิสที่มีสภาวะกรดเพื่อให้ได้เป็นกรดแลคติกที่บริสุทธิ์และเมทานอล ดังสมการที่ (2.5) – (2.6) โดยกรดแลคติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีจะอยู่ในรูป DL lactic acid (Racemic lactic acid mixture) ซึ่งเป็นรูปแบบผสมของไอโซเมอร์ L (+) และ D (-) ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ ต่างจากกระบวนการทางชีวภาพที่สามารถผลิตกรดแลคติกให้อยู่ในรูป L (+) และ D (-) ซึ่งขั้นตอนในการสังเคราะห์กรดแลคติกทางเคมีแสดงดังสมการต่อไปนี้

1. การเติมไฮโดรเจนไซยาไนด์



2. การไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก



2.3.2.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นการใช้อุณหภูมิและความดันสูงในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ สามารถใช้สารตั้งต้นหลายชนิด เช่น การไฮโดรเทอร์มอลกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าการเลือกเกิดกรดแลคติกสูง เช่น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}_{0.3}$ /แกรไฟต์ ในต่าง ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ค่าการเลือกเกิดกรดแลคติกเป็น 92.2 เปอร์เซ็นต์ และคอนเวอร์ชันของกลีเซอรอลเป็น 97.6 เปอร์เซ็นต์ [27] เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Zn-Al ในต่าง ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ให้ค่าการเลือกเกิดกรดแลคติกเป็น 96 เปอร์เซ็นต์ และ

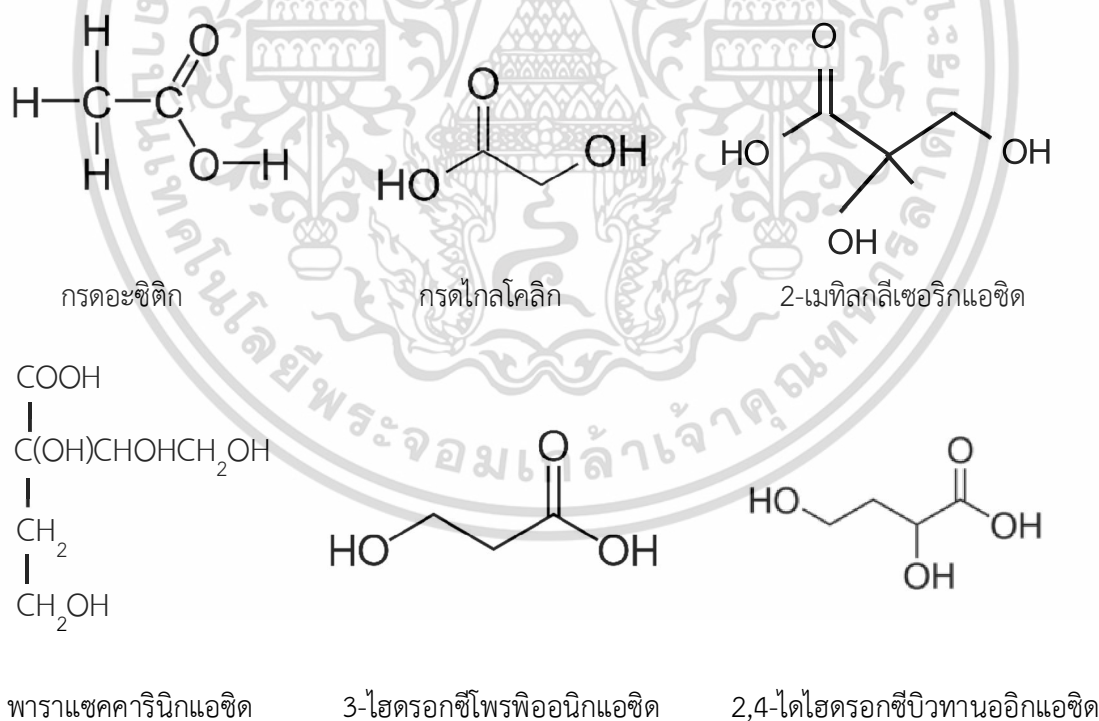
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์ชันของกลีเซอรอลเป็น 98.9 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลได้กรดแลคติก 94.9 เปอร์เซ็นต์ [28] การไฮโดรเทอร์มอลสารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น กลูโคส เซลลูโลส สตาร์ช ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ได้ผลได้ร้อยละ 20 19.2 และ 18.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 90 และ 60 วินาที ตามลำดับ [29] เป็นต้น

ข้อดีของวิธีนี้คือใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น สามารถเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวสำหรับสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ แต่ข้อเสีย คืออุปกรณ์ที่ใช้ต้องทนแรงดันสูง จึงมีค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์มีราคาแพง

2.3.2.3 การย่อยด้วยด่าง (Alkaline degradation) เป็นวิธีการที่ใช้ด่างทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น โดยสารตั้งต้นเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น สตาร์ช ไซแลน โมลาส เป็นต้น และพบว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ฟรุกโตส เป็นสารตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยด้วยด่าง ส่วนด่างที่ใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือวิธีการไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่สูง แต่ร้อยละผลได้ไม่สูงมากนัก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยด่าง จะเป็นไฮดรอกซีแอซิด ซึ่งมีจำนวนมากกว่า 50 ชนิด ที่มีคาร์บอนต่างๆ กัน โดยมีกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก และมีผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เกิดขึ้นมากมาย เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก พาราแซคคารินิกแอซิด ไฮดรอกซีของกรดชนิดต่างๆ เช่น ไฮดรอกซีกรดโพพรีโอนิก ไฮดรอกซีกรดบิวทานอิก เป็นต้น [30] ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ได้จากการย่อยด้วยด่าง เป็นดังรูปที่ 2.20 จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยด้วยด่างดังจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายมอโนแซ็กคาไรด์ด้วยด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์กรดแลคติกด้วยการย่อน้ำตาลด้วยต่าง

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์กรดแลคติกด้วยการย่อน้ำตาลด้วยต่างในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคมีแบบทซ์ โดยมีปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยที่พิจารณาจากข้อมูลต่างๆ ที่ได้มีรายงานไว้ว่าสมควรที่จะเลือกมาทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวต่อผลได้ของกรดแลคติก โดยปัจจัยทั้ง 3 ดังกล่าว คือ ความเข้มข้นต่างเริ่มต้น อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา และ เวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีเหตุผลและรายละเอียดของการเลือกปัจจัยดังกล่าว ดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นต่างเริ่มต้น พบว่าเมื่อความเข้มข้นต่างสูง มีผลให้ปริมาณกรดแลคติกเพิ่มขึ้น [18, 31, 32] เช่น เมื่อค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) สูงกว่า 0.1 M หรือพีเอชมากกว่า 13 จะเกิดผลิตภัณฑ์ร่วมกรดฟอร์มิก อะซิติก กรดไกลโคลิก 2,4-ไดไฮดรอกซีบิวทริกแอซิด ดังแสดงในรูป 2.20 มีปริมาณน้อยตั้งแต่ร้อยละ 0-5 และเกิดเป็นกรดแลคติก ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โมล- C_6 ที่เหลือจะเกิดเป็นกรดแซคคารินิก แต่ที่ความเข้มข้นต่างต่ำกว่า 0.1 M หรือที่พีเอชน้อยกว่า 13 ปริมาณการเกิดกรดแลคติกจะลดลงเหลือน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นเป็นคาร์บอน > C_6 เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา aldolization [18] และ ได้เกิดผลิตภัณฑ์ร่วมอื่น คือ กรดฟอร์มิก อะซิติก กรดไกลโคลิก 2,4-ไดไฮดรอกซีบิวทริกแอซิด ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 3-13 ดังนั้นสำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาลด้วยต่างนี้ควรใช้ความเข้มข้นต่างที่สูงตลอดเวลาเพื่อให้ได้ผลได้กรดแลคติกสูง งานวิจัยนี้เลือกให้ต่างไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นตั้งต้นที่สูงเพียงพอที่จะให้ความเข้มข้นต่างที่เหลือหลังจากทำปฏิกิริยามีค่าไม่น้อยกว่า 5 โมลาร์

2. อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา การศึกษาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการย่อน้ำตาลด้วยต่างสำหรับสารตั้งต้นที่เป็นเซลลูโลสพบว่ามีการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดกรดแลคติก การเพิ่มอุณหภูมิจาก 175 เป็น 190 องศาเซลเซียส ช่วยให้เกิดกรดแลคติกเพิ่มมากขึ้น [32] การที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงอาจเนื่องจากการย่อนั้นเป็นการย่อน้ำตาลที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่หากใช้น้ำตาลมอลโทสแซ็กคาไรด์สามารถใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการย่อน้ำตาลเซลลูโลส การย่อน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสด้วยต่างที่อุณหภูมิ 100 และ 250 องศาเซลเซียส ผลผลิตกรดแลคติกที่ได้จากน้ำตาลฟรุกโตสมากกว่าน้ำตาลกลูโคสเล็กน้อย ผลได้กรดแลคติกจากน้ำตาลฟรุกโตสเป็น 39 และ 71 เปอร์เซ็นต์โมล ที่อุณหภูมิ 100 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [4] และสำหรับการศึกษาการย่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร ด้วยโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์กรดคาร์บอกซิลิกที่ได้เป็นกรดแลคติก กรดไกลโคลิก กรดอะซิติก กรดฟอร์มิกมีค่าไม่แตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา [18] ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะในการศึกษานี้ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นต่าง 0.01M ซึ่งมีความเข้มข้นสูงและใช้ความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำสามารถเกิดการย่อน้ำตาลด้วยต่างได้กรดแลคติกแต่ใช้เวลานานมากเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ แต่ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงน้อย [33] ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ควรทำการศึกษาเพราะมีผลต่อปริมาณกรดแลคติก และยังมีผลต่อค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการผลิต

3. เวลาในการทำปฏิกิริยาแบบเคมีแบบทซ์ จากการศึกษาที่ผ่านมาค่าความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลในการเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดแลคติกควรจะมีค่าต่ำ De Bruijn (1986) พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสน้อยกว่า 0.01 โมลต่อลิตร ได้กรดแลคติกเพิ่มขึ้น และปริมาณคาร์บอนมากกว่า 6 อะตอมมีค่าลดลงขึ้น

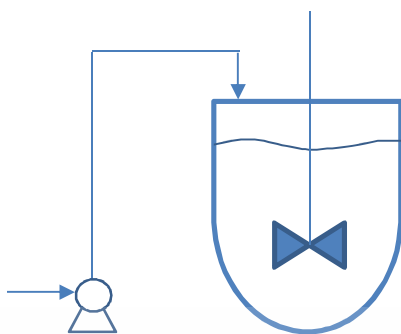
ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นกลูโคส ทำให้เกิดเป็นกรดไฮดรอกซีแอซิดที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่าหรือเท่ากับ 6 อะตอมเพิ่มขึ้น เช่น 2-C-methylpentonic, hexametasaccharinic และ isosaccharinic acids ซึ่งแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชัน [18, 30] และลดการเกิดไฮดรอกซีแอซิดที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 6 อะตอม เช่น กรด glycolic, lactic, glyceric, 2-C-methylglyceric, deoxytetric และ กรด deoxypentonic ดังนั้นจากผลการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าหากต้องการได้ปริมาณกรดแลคติกปริมาณมาก ควรมีการควบคุมให้ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลในระบบต่ำ และสำหรับค่าที่ใช้ควรใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูง การศึกษาโดยใช้ค่าต่างกันพอในการทดลองแบบแบทช์ โดยให้อัตราส่วนโดยโมลน้ำตาลกลูโคสต่อไฮเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากันแต่เพิ่มปริมาณน้ำตาลจาก 0.1:2, 0.2:4, 0.3:6 และ 0.4:8 พบว่าให้ค่าผลได้กรดแลคติกลดลง [34] ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีการใช้ค่าที่มากเกินพอและเลือกใช้ความเข้มข้นน้ำตาลไม่สูงมากนัก แต่การทำปฏิกิริยาแบบแบทช์ไม่สามารถควบคุมให้เกิดความเข้มข้นต่างให้สูงตลอดช่วงการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากหลังเติมน้ำตาลหมดความเข้มข้นต่างลดลงทันทีและในทางปฏิบัติอาจเกิด high local sugar concentration ในกรณีที่มีการผสมไม่เป็นแบบอุดมคติ ในบริเวณที่เติมน้ำตาลลงไปทำปฏิกิริยาในครั้งเดียว โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้น วิธีการที่จะทำการควบคุมทั้งสองปัจจัยนี้พร้อมกัน และทำให้พีเอชมีค่าสูงๆ ตลอดเวลา คือ การใช้ระบบเคมีแบทช์ เคมีแบทช์เป็นการเติมสารตั้งต้นชนิดหนึ่งลงในเครื่องปฏิกรณ์ และค่อยๆ เติมสารอีกชนิดหนึ่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 การเติมด้วยอัตราเร็วหรือช้า จะส่งผลต่อการความเข้มข้นต่างในปฏิกิริยา ดังนั้นปัจจัยของระยะเวลาการเติมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าจะนำมาศึกษาในการย่อยด้วยต่างแบบเคมีแบทช์

ปฏิกิริยาเคมีแบทช์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์อาจเกิดแบบขั้นตอนเดียว หรือหลายขั้นตอน ข้อดีของเคมีแบทช์ คือ

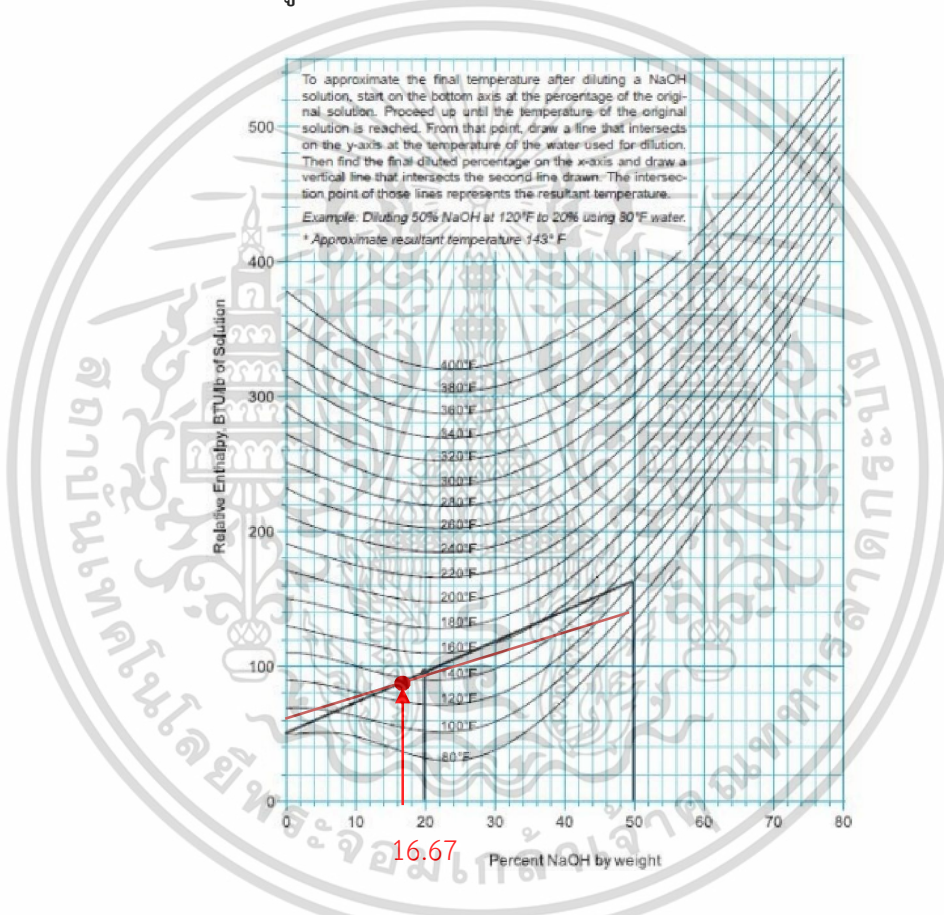
1. สำหรับปฏิกิริยาคายความร้อน เคมีแบทช์จะช่วยควบคุมอุณหภูมิของสารได้ดีกว่าแบบแบทช์ป้องกัน ไม่ให้เกิดการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด จึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากการเดือดอย่างรุนแรง ซึ่งทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย เช่น เกิดการระเบิดของถังปฏิกรณ์

ปฏิกิริยาการย่อยด้วยต่างเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ซึ่งคายความร้อนสูงกว่าการเจือจางต่างด้วยน้ำ ตัวอย่างเช่น สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิสารละลาย 30 องศาเซลเซียส (86 องศาฟาเรนไฮต์) พบว่าหลังเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส (86 องศาฟาเรนไฮต์) ได้สารละลายเจือจางที่มีความเข้มข้น 16.7 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสารละลายเพิ่มเป็น 54.4 องศาเซลเซียส (ประมาณ 130 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งคายความร้อนประมาณ 75 Btu/lb ดังรูปที่ 2.22 แต่เมื่อเปลี่ยนน้ำเป็นสารละลายน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิสารละลายเพิ่มจาก 24 เป็น 112 องศาเซลเซียส จะพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดท้ายสารละลายเพิ่มขึ้นสูงกว่าความร้อนจากการเจือจางด้วยน้ำ [35] การเลือกใช้ระบบเคมีแบทช์สำหรับปฏิกิริยาย่อยด้วยต่างจึงช่วยให้ไม่เกิดอันตรายจากการคายความร้อนของปฏิกิริยาได้

2. การทำแบบเคมีแบทช์จะช่วยควบคุมสารชนิดหนึ่งให้มีความเข้มข้นสูง ขณะที่สารอีกชนิดหนึ่งมีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง และช่วยเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ควรทำการควบคุมความเข้มข้นสารละลายต่างให้สูงและความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ จึงจะได้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกเพิ่มขึ้น เคมีแบทช์จึงเหมาะกับปฏิกิริยานี้อย่างมาก



รูปที่ 2.21 การเติมแบบเคมีแบบทซ์



รูปที่ 2.22 ความร้อนจากการเจือจางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น [36]

ในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาคือ อุณหภูมิ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการเติมของน้ำตาลในสารละลายต่างแบบเคมีแบบทซ์ แต่ละปัจจัยมีการพิจารณาอีก 5 ระดับ ดังนั้นหากทำการทดลองทุกปัจจัย จะต้องทำการปรับค่าการทดลองทีละค่า ทำให้มีการทดลองจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียทรัพยากร กำลังคน เงิน และเวลา เพื่อให้ทราบผลการตอบสนองที่ดีที่สุด จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองหรือ Design of Experiment เพื่อช่วยให้ทราบข้อมูลการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก ซึ่งจะกล่าวต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การออกแบบการทดลอง [37]

การออกแบบการทดลองเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ โดยสามารถศึกษาหลาย ๆ ปัจจัยพร้อม ๆ กัน และได้ผลการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ การออกแบบการทดลองมีหลายแบบ จึงขออธิบายการออกแบบบางวิธีพอสังเขปดังนี้

1. การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ทั้งผลกระทบหลัก (Main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction factor) ผลกระทบของปัจจัยกรณีศึกษาที่มีผลกระทบหลัก 3 ปัจจัย คือ A, B และ C แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

ผลกระทบหลัก (Main effect)	ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-way interactions)	ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (3-way interactions)
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

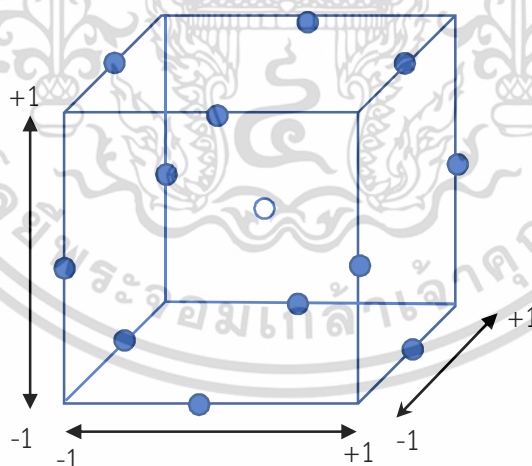
จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (ไม่รวมการทดลองซ้ำ) เท่ากับ ak โดยที่ a คือ จำนวนระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา เช่น กรณีศึกษาที่ระดับการทดลอง 2 ($a=2$) และมีปัจจัยที่สนใจศึกษา 3 ปัจจัย ($k=3$) จำนวนการทดลองมีค่าเท่ากับ $2^3 = 8$ การทดลอง ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน (No aliased structure) และศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ส่วนข้อเสีย ยิ่งปัจจัยที่ต้องการศึกษามีมาก จะทำให้ต้องทำการทดลองมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองทรัพยากรมาก

2. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design) นิยมใช้กับการทดลองที่มีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่จำกัด โดยทั่วไปนิยมศึกษาที่ 2 ระดับ จำนวนการทดลองเท่ากับ 2^{k-p} หรือ 3^{k-p} ที่ระดับ 3 ระดับ วิธีนี้เกิดจากการที่นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่า ในความเป็นจริงเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมีเพียงบางอิทธิพลหลัก และบางอิทธิพลร่วมเท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับอิทธิพลร่วมมีค่าสูง จะทำให้อัตราส่วนของผลจากอิทธิพลหลักต่อจำนวนอิทธิพลรวมทั้งหมดจะมีน้อยลง ดังนั้นจึงตัดการทดลองบางส่วนลดลงได้ ทำให้วิธีนี้มีข้อดี คือ ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองน้อยกว่าแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 จึงนิยมใช้ในขั้นตอนแรกของการทดลองเพื่อใช้พิจารณาว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่อผลตอบสนองมากที่สุด ส่วนข้อเสีย คือ การตีความผลจะซับซ้อนเนื่องจากในการทดลองมีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อนของผลกระทบ

ตารางที่ 2.4 จำนวนการทดลองเปรียบเทียบแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและแฟคทอเรียลบางส่วน

รูปแบบการทดลอง	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			จำนวนครั้งการทดลอง
		A	B	C	
แบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k)		2	2	2	8
แบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (3^k)		3	3	3	27
แบบแฟคทอเรียลบางส่วน (2^{k-p})		2	2	2	4
แบบแฟคทอเรียลบางส่วน (3^{k-p})		3	3	3	9

3. การทดลองแบบ Box-Behnken (Box-Behnken design) เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ใช้หลักการของ 2^2 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central point) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า 3^k ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ การทดลองแบบ Box-Behnken สามารถประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ แต่ใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย ข้อดี คือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effect) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic effect) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor interaction) แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลองมากและไม่สามารถลดจำนวนได้ และยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบ Central Composite เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษา มากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป การออกแบบการทดลอง Box-Behnken ที่ 3 ปัจจัยแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การทดลองแบบ Box-Behnken 3 ปัจจัย

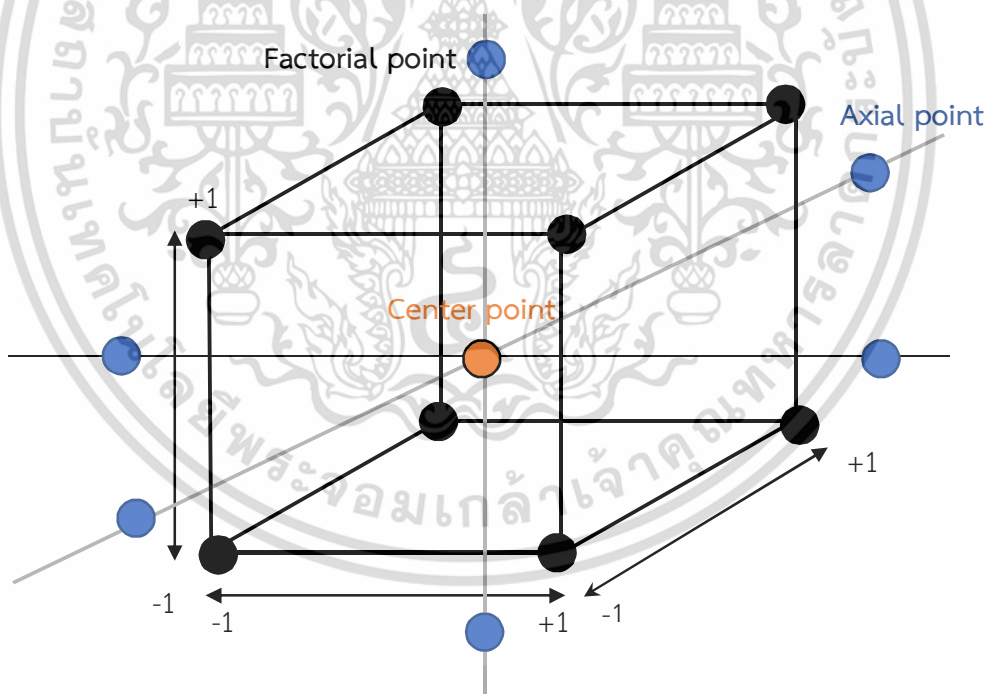
4. การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เหมาะสำหรับการในการศึกษาหรือสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสอง (Second-order or Quadratic model) การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ CCD มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองพหุนามอันดับสอง การออกแบบแบบ CCD เหมาะสำหรับการศึกษาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง และจำนวนการทดลองไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับแบบ Full factorial เช่น การศึกษา 3 ตัวแปร สำหรับ CCD ทำการทดลอง 16 การทดลอง (กรณีทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 2 การทดลอง) ขณะที่ Full factorial 3 ตัวแปรที่ 3 ระดับ ต้องทำการทดลองถึง 27 การทดลอง ยิ่งปัจจัยมีมากวิธีการออกแบบการทดลอง CCD จะใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่ามาก การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลางที่ 3 ปัจจัยแสดงดังรูปที่ 2.24

สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ CCD ที่ระดับ 3 ระดับ จะแทนสัญลักษณ์ด้วย $(-1, 0, 1)$ ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ CCD สำหรับปัจจัย 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1. Factorial point ซึ่งเป็นการนำการออกแบบ Full factorial แบบ 2 ระดับ คือค่า $-1, 1$ มาใช้ ดังนั้นที่ 3 ปัจจัยจะมีจำนวนการทดลอง $2^3 = 8$ การทดลอง
2. Center point เป็นค่ากลาง แทนด้วย 0 สำหรับออกแบบการทดลอง ที่จุดศูนย์กลาง $(0, 0, 0)$
3. Axial point หากกำหนดค่า α เป็น 1 จะแทนด้วย -1 และ 1 และค่าการทดลองจะมี ทั้ง $-1, 0$ และ 1



รูปที่ 2.24 การออกแบบส่วนประสมกลาง 3 ปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 การออกแบบการทดลองแบบ CCD สำหรับ 3 ปัจจัย

ลำดับการทดลอง	ชนิดของจุด	ปัจจัย		
		A	B	C
1	Factorial point	1	1	1
2	Factorial point	-1	1	1
3	Factorial point	1	-1	1
4	Factorial point	1	1	-1
5	Factorial point	-1	-1	1
6	Factorial point	-1	1	-1
7	Factorial point	1	-1	-1
8	Factorial point	-1	-1	-1
9	Axial point	-1	0	0
10	Axial point	0	1	0
11	Axial point	0	0	1
12	Axial point	-1	0	0
13	Axial point	0	-1	0
14	Axial point	0	0	-1
15	Center point	0	0	0
16	Center point	0	0	0

การทดลองแบบ CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factor) สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณและผลกระทบรวม 2 ปัจจัย การเปรียบเทียบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน การทดลองแบบ Box-Behnken และการทดลองแบบ CCD แสดงดังตารางที่ 2.6

ตัวอย่างการใช้ CCD สำหรับการออกแบบการทดลอง เช่น การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลได้และความบริสุทธิ์กรดแลคติกที่ได้จากเครื่อง short path evaporation โดยศึกษา 2 ปัจจัย 5 ระดับ ปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และอุณหภูมิของอีแวพอเรเตอร์ ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยมวลของสารที่กลั่นได้, เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของสารที่กลั่นได้ และเปอร์เซ็นต์การคืนกลับกรดแลคติก โดยทำการทดลอง 11 การทดลองเพื่อหาสมการกำลังสองเพื่อทำนายค่าต่างๆ [38] การศึกษาความเข้มข้นกรดแลคติกที่ได้จากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรีย *Lactobacillus* sp. LMI8 โดยศึกษา 3 ปัจจัย 5 ระดับ โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นน้ำตาลแลคโตสจากเวย์ (29.26-90.74 กรัมต่อลิตร) ความเข้มข้นน้ำแช่ข้าวโพด (8.565-21.435 กรัมต่อลิตร) และความเข้มข้นแอมโมเนียมซัลเฟต (0-11.625 กรัมต่อลิตร) ผลที่ได้จากการทดลอง 17 การทดลอง ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อคือใช้ น้ำตาลแลคโตส 59.64 กรัมต่อลิตร น้ำแช่ข้าวโพด 14.55 กรัมต่อลิตร และ แอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 5.65 กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผลได้กรดแลคติก 52.37 กรัมต่อลิตร พบว่าค่าตัวแปรที่ทำให้กรดแลคติกเพิ่มขึ้นคือความเข้มข้นน้ำตาลแลคโตสจากเวย์ ขณะที่อีก 2 ปัจจัยไม่มีผลในการเพิ่มร้อยละผลได้กรดแลคติกในช่วงที่ทำการทดสอบ และเทอมยกกำลังสองของทั้งสามตัวแปร มีผลให้ผลได้กรดแลคติกลดลง [39]

ตารางที่ 2.6 วัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ

แบบการทดลอง	วัตถุประสงค์ในการทดลอง
3^k Full factorial	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ใช้งบประมาณมาก
3^{k-p}	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีน้อยและไม่เหมาะในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองได้ทั้งหมด ในกรณีที่ Resolution ที่ใช้มีค่ามาก สามารถประมาณผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้
Box-Behnken	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณเท่านั้น - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ทุกค่า
CCD	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพ เพียง 1 ปัจจัย ยังคงใช้ CCD ได้ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และสามารถเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ตามระบุ - เป็นแผนการทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่ 3 ระดับ

จากวิธีการออกแบบการทดลองต่างๆ ที่กล่าวมา การทดลองนี้เลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง มาใช้ในการออกแบบการทดลองที่ 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่ 3 ระดับ เหมาะสำหรับศึกษารูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง และไม่ต้องใช้วิธีการทดลองมากนัก ในการออกแบบการทดลองการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง โดยศึกษาปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และระยะเวลาการเติม จะได้สมการทำนายร้อยละผลได้กรดแลคติก ซึ่งทำให้ทราบว่าปัจจัยใดมีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก และนำสมการที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองต่อไป

การหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ โดยอาศัยแบบจำลองของผลตอบสนองของปัญหา เป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ของหลาย ๆ ปัจจัย เพื่อหาจุดหรือค่าที่มีผลต่อผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Multiple regression analysis ซึ่งหากตัวแปรใดมีผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางสถิติ ($P < 0.05$) ตัวแปรนั้นจะปรากฏอยู่ในสมการกำลังสอง (Second order model) ตัวอย่างดังสมการที่ (2.7)

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (2.7)$$

โดย	Y	คือ	ค่าการตอบสนอง (ตัวแปรตาม)
	b_0	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเดลทดลอง
	b_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ linear effect
	b_{ii}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ square effect
	b_{ij}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
	X_i, X_j	คือ	ตัวแปรอิสระ

เมื่อทำการประมวลผลทางสถิติจะได้กราฟโครงร่าง (Contour plot) และกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) เพื่อช่วยในการประมวลผลระหว่างปัจจัยร่วม ดังแสดงตัวอย่างกราฟพื้นผิวตอบสนองดังรูปที่ 2.25 เป็นตัวอย่างของการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปกราฟิกสามมิติ

รูปที่ 2.25 กราฟพื้นผิวตอบสนอง

การออกแบบการทดลอง จนถึงขั้นตอนการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง สามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในการศึกษา โปรแกรมสำเร็จรูปชนิดหนึ่งที่สามารถใช้งานได้ง่ายโปรแกรมหนึ่งคือ โปรแกรม Minitab

Minitab เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ มีการพัฒนาจนถึง เวอร์ชัน 19 Minintab สามารถใช้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดย Minitab จะช่วยในการประมวลผลทางสถิติและการแสดงผลข้อมูลในลักษณะของตัวเลขและกราฟ Minitab สามารถนำมาใช้กับกระบวนการควบคุมคุณภาพ โปรแกรมนี้สามารถนำไปใช้กับนักวิจัย นักวิชาการ และผู้ใช้สถิติทั่วไป สำหรับขั้นตอนการทำงานอย่างง่ายของโปรแกรม Minitab เพื่อทำการออกแบบและสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปิดโปรแกรม Minitab และป้อนข้อมูลลงใน Worksheet
2. เลือกโปรแกรมเพื่อทำการออกแบบการทดลอง และเลือกจำนวนปัจจัยที่จะทำการศึกษา เพื่อให้โปรแกรมสร้างตารางที่ต้องทำการทดลอง
3. ทำการทดลองตามที่โปรแกรมออกแบบ และใส่ข้อมูลผลการทดลองที่ได้
4. ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติ เช่น $\alpha = 0.05$ และพิจารณาว่าท่อมใดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ สามารถตัดท่อมนั้นๆ ได้
5. ได้สมการทำนายค่าตัวแปรที่สนใจ และทำการเลือกสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง

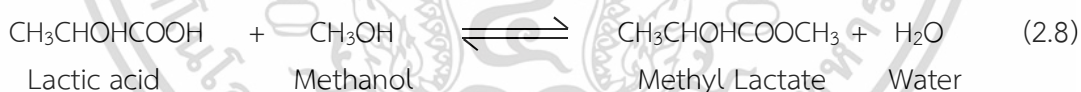
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยต่าง เป็นเกลือของไฮดรอกซีแอซิดต่างๆ หลังจากนั้นต้องนำมาผ่านขั้นตอนเพื่อคืนกลับเป็นกรดไฮดรอกซีก่อน วิธีการคืนกลับกรดแลคติกมีหลายวิธีดังนี้

2.5 การคืนกลับกรดแลคติก

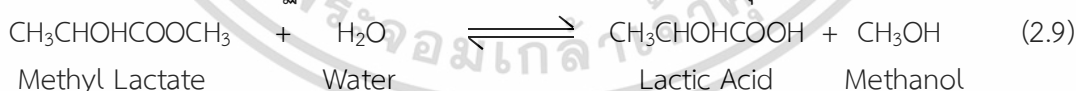
การผลิตกรดแลคติกมีต้นทุนการแยกและการคืนกลับกรดแลคติกสูง การพัฒนาประสิทธิภาพการแยกและการได้คืนกลับกรดแลคติกจะช่วยให้เกิดความคุ้มค่า การได้คืนกลับกรดแลคติกด้วยวิธีการกลั่นทำได้ยาก เพราะถึงแม้ว่ากรดแลคติกกับน้ำจะมีจุดเดือดที่แตกต่างกัน แต่กรดแลคติกมีความชอบน้ำสูง ที่ความเข้มข้นกรดแลคติกสูงอาจเกิดเป็นแลคเตทไดเมอร์ ในปัจจุบันมีการแยกและการได้คืนกลับกรดแลคติกหลายวิธี เช่น

2.5.1 การเอสเทอริฟิเคชันและการไฮโดรไลซิส

การกลั่นกรดแลคติกไม่สามารถทำได้ที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนกรดแลคติกเป็นสารประกอบเอสเทอร์ เช่น เมทิลแลคเตท ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ของกรดแลคติก กับ เมทานอล จากนั้นทำการระเหยเมทิลแลคเตทออกมาจากของผสม ดังสมการที่ 2.8



จากนั้นนำเมทิลแลคเตทมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยน้ำได้กรดแลคติกบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 2.9



งานวิจัยที่มีการนำการเอสเทอริฟิเคชันมาใช้ในการเพิ่มความบริสุทธิ์น้ำหมักจากกากน้ำตาล โดยใช้บิวทานอลและเรซินประจุบวกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลบิวทานอล : น้ำหมัก เป็น 5:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน 9 ชั่วโมง และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 285 องศาเซลเซียส และเวลาในการไฮโดรไลซิส 9 ชั่วโมง ร้อยละผลได้ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเท่ากับ 83.02 และร้อยละความบริสุทธิ์กรดแลคติกที่ได้หลังการไฮโดรไลซิสเป็น 83.66 เปอร์เซ็นต์ [8] การใช้

บิวทานอลและเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ถูกดัดแปลงด้วย SnCl_2 แทนกรดซัลฟิวริกเพื่อป้องกันการกัดกร่อนถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนแอมโมเนียมแลคเตทเป็นกรดแลคติก พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลบิวทานอล:แอมโมเนียมแลคเตทเป็น 3:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลา 6 ชั่วโมง ได้ผลได้บิวทิลแลคเตทเป็น 87.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลได้กรดแลคติก 89.7 เปอร์เซ็นต์ กรดแลคติกที่ได้มีความบริสุทธิ์ 90 เปอร์เซ็นต์ [40] วิธีการนี้ได้กรดแลคติกที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากเพื่อให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ดี และต้องทำการกำจัดน้ำในสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้ดี

2.5.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นการแยกที่มีประโยชน์ในเคมีอินทรีย์ ซึ่งตัวถูกละลายจะแยกออกจากของผสมด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยของผสมจะแยกขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย ซึ่งสารอินทรีย์จะแตกตัวเป็นไอออนแล้วอยู่ในชั้นน้ำ ในขณะที่สารอินทรีย์จะละลายอยู่ในชั้นสารอินทรีย์ โดยปกติสารหนึ่งๆ จะละลายในตัวทำละลายทั้งสองชนิด ดังนั้นตัวแปรสำคัญ คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution coefficient) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนความเข้มข้นกรดแลคติกในชั้นตัวทำละลายต่อชั้นน้ำ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของตัวทำละลาย คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ความเป็นพิษต่ำ และความหนืดต่ำ

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดกรดแลคติกเป็นสารจำพวกเอมีน แอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ เป็นต้น ตัวอย่างตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ ออกทานอล ไซโคเฮกซาโนน ไตรคาพิลเอมีน [41] การใช้สารละลายไตรเอทานอลามีน ใน 1-ออกทานอล [42] การใช้สารละลายผสมระหว่างแอมโมเนียมซัลเฟตและบิวทานอล ในการสกัดกรดแลคติกพบว่าได้ผลได้กรดแลคติกเป็น 86 เปอร์เซ็นต์ โดยกรดแลคติกมีความบริสุทธิ์ 93 เปอร์เซ็นต์ [43]

2.5.3 การอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) [44]

การอิเล็กโทรไลซิส เป็นการแยกด้วยไฟฟ้า โดยการใช้พลังงานผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เซลล์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในเซลล์ ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถแตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบ เรียกวิธีการนี้ว่าอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) และเรียกเซลล์ไฟฟ้านี้ว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปเซลล์อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นโลหะหรือแกรไฟต์ที่นำไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปใช้ขั้วเฉื่อยในเซลล์หนึ่ง ๆ จำแนกขั้วตามเกณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้ การจำแนกขั้วตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ก. ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ข. ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

การจำแนกขั้วตามการต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

ก. ขั้วบวก เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (ซึ่งขั้วนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือไอออนลบในสารละลายจะให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าบวก)

ข. ขั้วลบ เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (ซึ่งขั้วนี้จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เกิดขึ้น คือ ไอออนบวกในสารละลายจะมารับอิเล็กตรอนที่ขั้วนี้)

2. สารอิเล็กโทรไลต์ คือ สารที่มีสถานะเป็นของเหลวประกอบด้วยไอออนที่เคลื่อนที่ และนำไฟฟ้าได้ เช่น

ก. สารประกอบไอออนิกที่หลอมเหลว เช่น NaCl (s)

ข. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายกรด เบส เกลือ

3. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง

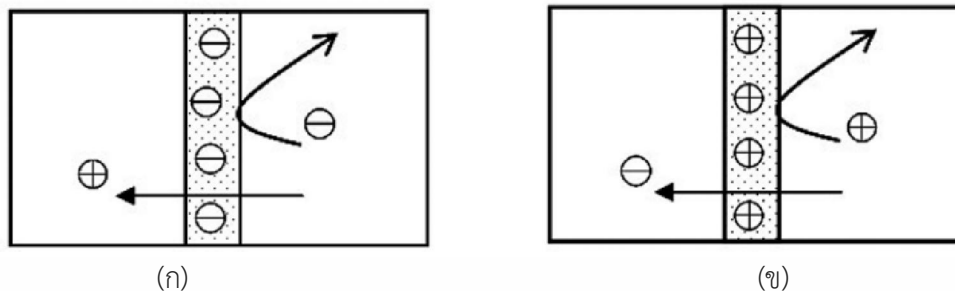
4. ตัวแบ่งแยกเซลล์ เป็นวัสดุที่ใช้แบ่งเซลล์ออกเป็นด้านแอโนดและแคโทด ใช้เมื่อต้องการแยกเอาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแอโนดและแคโทดออกจากกัน ในปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ ได้แก่ ไดอะแฟรม (Diaphragm) และเยื่อแผ่น (Membrane) โดยไดอะแฟรมจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สารละลายหรือก๊าซที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ด้านมาผสมกัน

ส่วนเยื่อแลกเปลี่ยนประจุเป็นแผ่นพอลิเมอร์บางๆ ที่มีความสามารถแยกและแลกเปลี่ยนอนุภาคที่มีประจุได้ โดยมีประจุอยู่ในพอลิเมอร์และจะใช้แรงดึงหรือแรงผลักรวมทั้งไฟฟ้าเพื่อช่วยในการคัดแยก โดยเยื่อชนิดนี้จะยอมให้อนุภาคที่มีประจุชนิดตรงข้ามกับตัวเองเดินทางผ่านตัวเยื่อ แต่จะผลักรวมอนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันออกไปไม่สามารถผ่านตัวเยื่อได้ เยื่อแบบแลกเปลี่ยนประจุจะมีด้วยกันอยู่สองชนิด คือ

- เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange membrane) เป็นเยื่อที่มีประจุลบบนแกนหลักของพอลิเมอร์ เช่น ซัลโฟเนต (SO_3^-) บนพอลิสไตรีน จึงยอมให้ประจุบวกผ่านเยื่อ แต่จะผลักรวมประจุลบออก ลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแสดงดังรูปที่ 2.26

- เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange membrane) เป็นเยื่อที่มีประจุบวกบนแกนหลักพอลิเมอร์ เช่น แอมโมเนียไอออน (NH_3^+) ซึ่งจะยอมให้ประจุลบผ่านเยื่อ แต่จะผลักรวมประจุบวกออก ลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบแสดงดังรูปที่ 2.26

ตัวอย่างของหลักการนำเยื่อแลกเปลี่ยนประจุไปใช้งานเป็นดังรูปที่ 2.27 การแยกจะเริ่มจากการบีบสารละลาย 2 สายเข้าสู่เซลล์ โดยสายหนึ่งเมื่อสารละลายเข้าสู่เซลล์ ไอออนบวกและลบ จะวิ่งข้ามเมมเบรนไปสู่ช่องว่างระหว่างเมมเบรนที่อยู่ถัดไป ความเข้มข้นไอออนในช่องนี้ (ช่องสีเหลือง) จึงมีความเข้มข้นไอออนลดลง จึงเรียกสายนี้ว่าสายเจือจาง (Dilute stream) ส่วนช่องว่างที่ไอออนวิ่งเข้ามา ทำให้ปริมาณไอออนในช่องว่างนี้เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นไอออนช่องนี้ (ช่องสีน้ำเงิน) จึงสูงขึ้น เรียกสารละลายช่องนี้ว่าสายเข้มข้น (Concentrated stream)

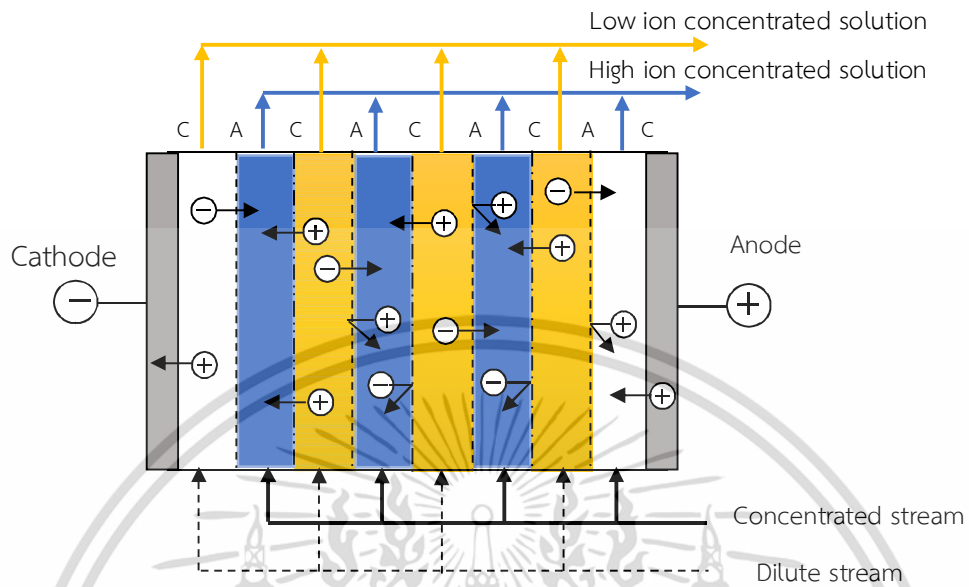


รูปที่ 2.26 เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (ก) และเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ (ข) [45]

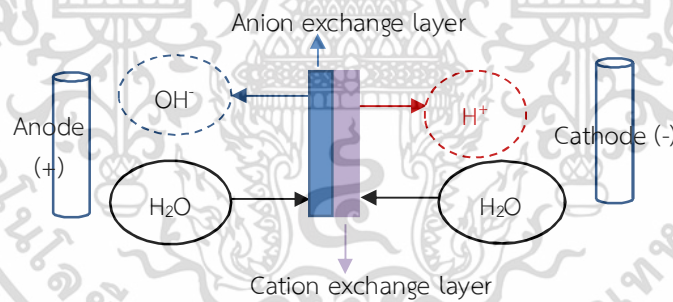
เยื่อแลกเปลี่ยนประจุสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกสามารถนำมาใช้ในการทำเซลล์เชื้อเพลิงได้ เพราะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจะปล่อยให้เฉพาะไฮโดรเจนไอออนที่เป็นประจุบวกผ่านตัวของมัน แต่จะกั้นให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบไหลออกสู่วงจรภายนอก เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ส่วนเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบสามารถนำมาใช้แยกไอออนของโลหะและกรดในน้ำทิ้งของโรงงานออกจากกันได้ เพราะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบจะปล่อยให้ไอออนลบของกรดไหลผ่านตัวเยื่อได้เท่านั้น แต่ไอออนของโลหะที่เป็นประจุบวกจะถูกผลักออก ถ้านำเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกและเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบมาใช้ร่วมกัน จะสามารถทำน้ำจืดและเกลือจากน้ำทะเลได้

เพราะในน้ำทะเลมีไอออนทั้งที่เป็นประจุบวกและประจุลบ ประจุบวกจะถูกแยกออกไปด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบจะถูกแยกออกไปด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ จะได้น้ำจืดและสารละลายที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง [45] และสามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะบางชนิด เช่น โลหะเงิน จากน้ำเสีย เป็นต้น [46] นอกจากนี้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกและเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบในปัจจุบันยังมีเยื่อแลกเปลี่ยนแบบไบโพลาร์ (Bipolar membrane) ซึ่งเป็นเยื่อแลกเปลี่ยนที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์สองชนิด พอลิเมอร์ด้านหนึ่งทำให้ไอออนบวกผ่าน อีกด้านหนึ่งทำให้ไอออนลบผ่าน และทำให้น้ำเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังแสดงในรูปที่ 2.28

เมื่อทำการต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้ครบวงจร และตั้งศักย์ไฟฟ้าให้วงจร จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น แต่กระแสไฟฟ้าอาจมีค่าลดลงได้โดย จากกฎของโอห์ม ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) และความต้านทาน (R) เป็นดังสมการ $V = IR$ เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ หากความต้านทานสูง กระแสจะมีค่าลดลง หากวาดกราฟระหว่างกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะได้กราฟเส้นตรง แต่บางครั้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.29 เพราะเกิดความต้านทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน การเกิดโพลาไรเซชันเกิดได้ 2 แบบ คือโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization) และโพลาไรเซชันเนื่องจากไคเนติกส์ (Kinetics polarization)

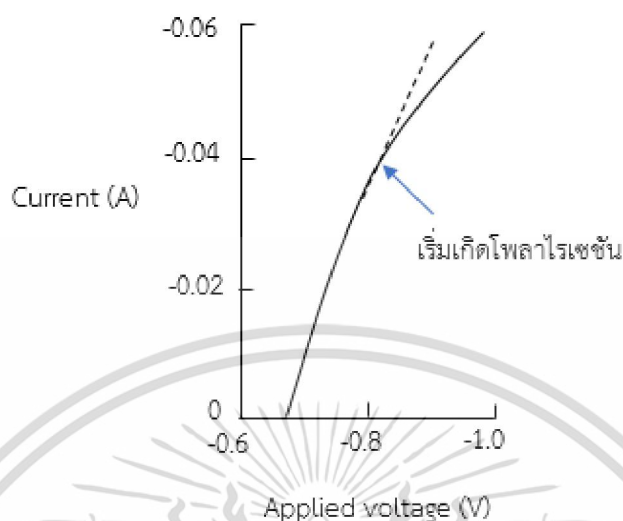


รูปที่ 2.27 หลักการทำงานของเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ โดยที่ C : เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก, A : เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ



รูปที่ 2.28 ไบโพลาร์เมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

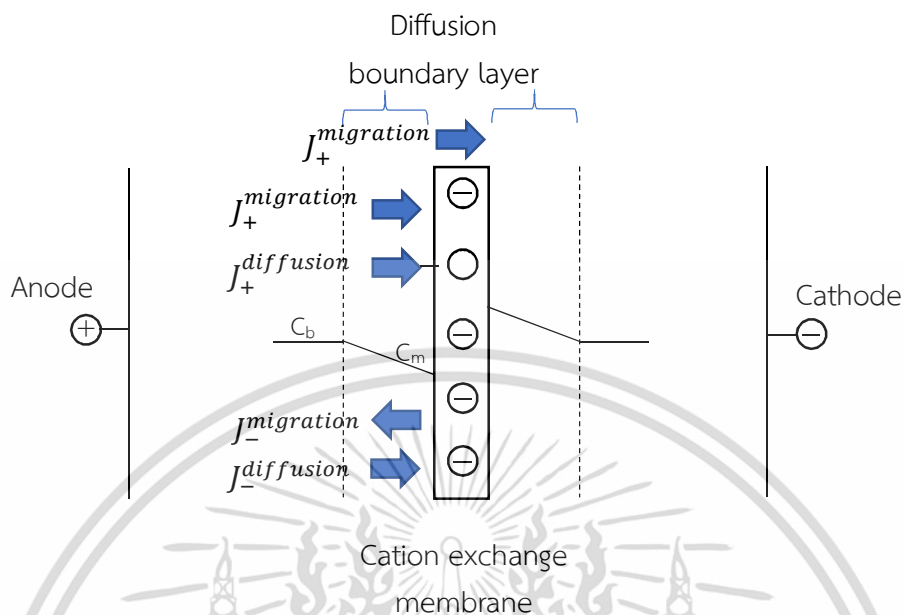


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดโฟลทาโรเซชัน [47]

การเกิดโฟลทาโรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นหากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของไอออนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้ว แต่ส่วนใหญ่ไอออนในสารละลายมีความเข้มข้นมาก เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้ว และเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นในสารละลายและที่ขั้ว การเคลื่อนที่ของไอออนที่ช้า แต่เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วเกิดการเบี่ยงเบนไปจากค่าทางทฤษฎี วิธีการลดปรากฏการณ์โฟลทาโรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น จึงต้องพยายามให้ไอออนเคลื่อนที่ไปสู่ผิวขั้วให้เร็วขึ้น อาจทำได้โดยการกวน

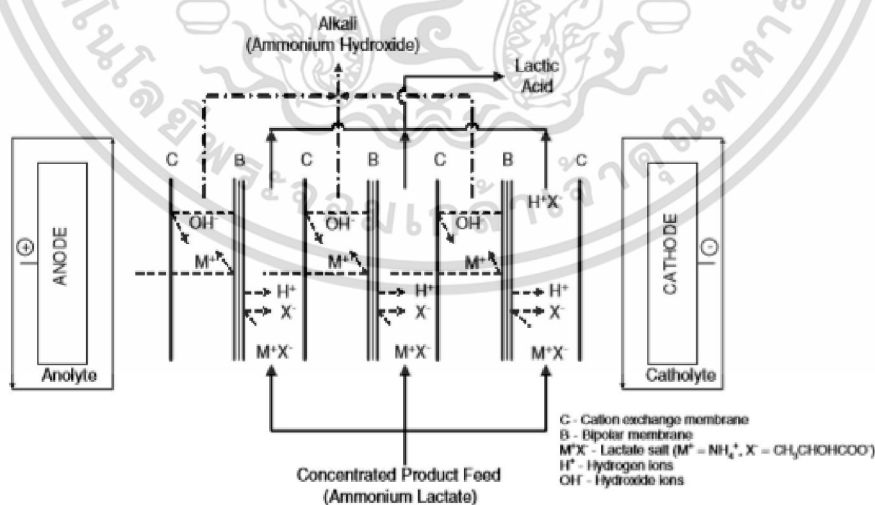
นอกจากนั้นเมื่อไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน จากด้านเจือจาง (Dilute) ไปยังด้านเข้มข้น (Concentrate) ความเข้มข้นของไอออนเคลื่อนที่ด้านเจือจางบริเวณใกล้เมมเบรนจะลดลง ขณะที่ความเข้มข้นไอออนด้านเข้มข้นที่บริเวณใกล้เมมเบรนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์โฟลทาโรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความต้านทานของสารละลายเพิ่มมากขึ้น และลดประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลซิส ปรากฏการณ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.30 [48]

การเกิดโฟลทาโรเซชันเนื่องจากโคเนตริกส์ เป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของขั้วเกิดเป็นก๊าซ ก๊าซนี้หากไม่ถูกเคลื่อนย้ายออกจากอิเล็กโทรดเช่นอาจเกิดการ adsorb ที่ผิวอิเล็กโทรดจะขวางทางการเคลื่อนที่เข้าออกของไอออน ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของการอิเล็กโทรไลซิสลดลง



รูปที่ 2.30 การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

ตัวอย่างการเปลี่ยนเกลือแลคเตท เป็นกรดแลคติก เป็นกรดแลคติก ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุแบบไบโพลาร์ ร่วมกับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก แสดงดังรูปที่ 2.31 ทำการป้อนสารละลายแอมโมเนียมแลคเตท ไอออนบวกของเกลือ (NH_4^+) จะผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก และไปจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่องข้างๆ ส่วนช่องเดิมไอออนลบ ($\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^-$) ของเกลือที่ทำการป้อนจะจับกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นกรดแลคติก



รูปที่ 2.31 แผนภาพการใช้ไฟฟ้าเคมีในการเปลี่ยนแอมโมเนียมแลคเตทเป็นกรดแลคติก
ที่มา : Datta และ Henry (2006) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีต่อการอิเล็กโทรไลซิส คือ ศักย์ไฟฟ้า เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึงระดับหนึ่งทำให้ค่าผลได้กรดแลคติกเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มมากเกินไปจะเกิดการใช้พลังงานมากเกินไปจนทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และยังอาจก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้ การศึกษาการใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า 10 15 20 โวลต์ สำหรับคืนกลับเกลือแลคเตทจากน้ำหมัก ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ พบว่าอัตราการเกิดอิเล็กโทรไลซิสเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้า ทำให้แลคเตทฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึง 20 โวลต์ มีการใช้พลังงานสูงเกินไป ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 15 โวลต์ [49] ขณะที่ Lech และ Trusek (2018) [50] ทำการคืนกลับแลคเตทจากเวย์หมัก ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ ในชุดอิเล็กโทรไลซิสแบบแบทช์และป้อนศักย์ไฟฟ้า 25 50 75 และ 100 โวลต์ ได้ผลเช่นเดียวกันคือเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าทำให้อัตราการเกิดอิเล็กโทรไลซิสเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิสารละลายสูง นอกจากนี้พบว่า การอิเล็กโทรไลซิสไม่ก่อให้เกิดฟาวลิงซึ่งเป็นข้อดีของวิธีการนี้

Wasinee และคณะ (2009) [51] ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจาก 5 เป็น 8 โวลต์ ทำให้ค่าผลได้กรดแลคติกสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์ ให้ค่ากรดแลคติกลดลง โดยได้ค่ากรดแลคติกสูงสุดเป็น 92 เปอร์เซ็นต์ มีความบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์

ปัจจัยอื่น เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ไม่ส่งผลต่อผลผลิตที่ได้มากนัก Simon และคณะ (2014) [52] ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ร่วมกับเยื่อแลกเปลี่ยนแบบประจุบวก โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 50 100 150 และ 200 กรัมต่อลิตร พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตไม่แตกต่างกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น เพราะโซเดียมไอออนผ่านเมมเบรนไม่แตกต่างกันเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ดังนั้นจึงมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือ (Desalination) ลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดเกลือเป็น 94 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย 50 และ 200 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ปัจจัยเกี่ยวกับอัตราการไหลของสารละลายผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอย่างมีนัยสำคัญ หากอัตราการไหลต่ำสารละลายมีเวลาอยู่ในเซลล์เพียงพอ แต่ที่อัตราการไหลสูง สารละลายจะมีการไหลวนหลายครั้งมากกว่าที่อัตราการไหลต่ำ [49]

ประสิทธิภาพของการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ และการได้กลับคืนมาของกรดแลคติก แสดงดังตารางที่ 2.7 และข้อดีข้อเสียของการคืนกลับกรดแลคติกทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ และการได้คืนกลับมาของกรดแลคติก

สภาวะการทดลอง	ผลการทดลอง	อ้างอิง
1. ความเข้มข้นกรด 40 กรัมต่อลิตร ความต่างศักย์ 0-15 โวลต์	การคืนกลับมากรด 40-100 เปอร์เซ็นต์	Boonkong และ คณะ (2009) [51]
2. ความเข้มข้นกรด 80-100 กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิเมตร กระแส 8-12 แอมป์ พื้นที่ผิวเมมเบรน : 200 ตารางเซนติเมตร	การคืนกลับมากรด 96.4-98.7 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการใช้กระแส 77.3-83 เปอร์เซ็นต์	Kim และคณะ (2001) [53]
3. ความเข้มข้นโซเดียมแลคเตท 100 – 200 กรัมต่อลิตร กระแส 15 แอมแปร์	การกลับคืนโซเดียมไฮดรอกไซด์ 88-93 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการใช้กระแส 81-84 เปอร์เซ็นต์	Lee และคณะ (1998) [54]
4. ความเข้มข้นกรดแลคติกในน้ำหมัก 76 กรัม ต่อลิตร ความต่างศักย์ 15 โวลต์	ความเข้มข้นกรดแลคติก 166.3 กรัมต่อลิตร การกลับคืนกรดแลคติก 100 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการใช้กระแสเฉลี่ย 69.5 เปอร์เซ็นต์	Young-Jung Wee และคณะ (2005) [55]

ที่มา : ดัดแปลงจาก Handoyo และคณะ (2019) [56]

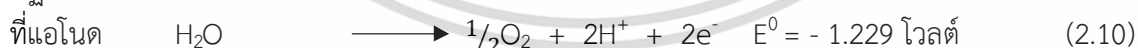
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการกลับคืนกรดแลคติก [57]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การสกัดด้วยตัวทำละลาย	- ลดความเสี่ยงการสลายตัวทางความร้อน - ไม่ก่อให้เกิดยิบซัม	- ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สูงมากนัก - ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม - สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพตัวทำละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันและไฮโดรไลซิส	- การเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการแยกเกิดขึ้นในเครื่องเดียวกัน - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง	- มีความซับซ้อน - ปฏิกิริยาสามารถเกิดย้อนกลับได้ในเฟสของเหลว - ปัญหาการกัดกร่อนและการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโฮโมจีเนียส
การแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า	- ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง - มีค่าการเลือกสูง - ไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	- เมมเบรนมีราคาสูง - ปัญหาการโพลาริเซชัน - อาจเกิดการอุดตันของเมมเบรน - การขยายขนาดทำได้ยาก

จากวิธีการกลับคืนของกรดแลคติก ทั้ง 3 วิธีที่กล่าวมา พบว่าวิธีการอิเล็กโทรไลซิส เป็นวิธีที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการใช้สารเคมีน้อย สามารถเปลี่ยนเกลือแลคเตทเป็นกรดแลคติกและได้เกลือไฮดรอกไซด์กลับคืนมา ดังนั้นงานวิจัยนี้ให้ความสนใจที่จะนำกรดแลคติกกลับคืนด้วยการอิเล็กโทรไลซิส การคืนกลับกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิสมีสิ่งที่จะต้องทราบคือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential) [58] เป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสำหรับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปจำนวนหนึ่ง จะเกิดก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา



เมื่อพิจารณาปฏิกิริยารวมทั้งเซลล์ไฟฟ้าแล้วพบว่า ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการแยกโซเดียมแลคเตทเท่ากับ - 2.057 โวลต์ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง จะต้องผ่านไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในเซลล์ จึงจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีความต้านทานเกิดขึ้นจากหลายๆ องค์ประกอบ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

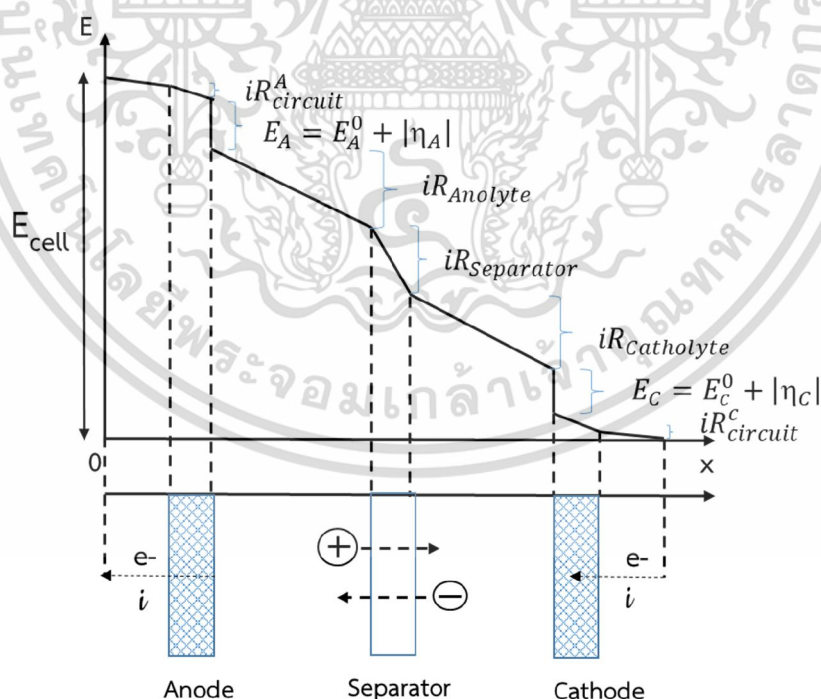
ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเป็นกรด-ด่าง ชนิดของขั้วไฟฟ้า ด้วยความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเคมี จึงต้องทำการให้ศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าค่าทางทฤษฎี เพื่อจะทำให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overvoltage)

การที่จะลดค่าศักย์ไฟฟ้านั้น จะต้องทำให้เซลล์ไฟฟ้ามีความต้านทานต่ำ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการนำไฟฟ้าสูง เป็นต้น โดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั่วไปสามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ดังสมการ (2.13)

$$E_{cell} = E_C^0 - E_A^0 - |\eta_C| - |\eta_A| - IR_{Catholyte} - IR_{Separator} - IR_{Anolyte} - IR_{Circuit}^C - IR_{Circuit}^A \quad (2.13)$$

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

จากสมการ (2.13) ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ เกิดได้จากมีค่าความต้านทานต่างๆ ในระบบ เช่น ค่าความต้านทานสารละลายด้านแคโทด ความต้านทานสารละลายด้านแอโนด ความต้านทานของเมมเบรน เป็นต้น จากค่าความต้านทานต่างๆ จึงทำให้เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าจะต้องทำการป้อนค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎี



รูปที่ 2.32 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ [59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองประกอบด้วย การผลิตกรดแลคติกจากสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยการย่อยด้วยต่าง และทำการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยด้วยต่างด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้มาเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุต่อไป โดยอุปกรณ์และวิธีการเป็นดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง มีดังต่อไปนี้

3.1.1 น้ำตาลทราย

3.1.2 กรดซัลฟิวริก

3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.4 บีมคูด-จ่ายสารเคมี ยี่ห้อ Dosser รุ่น MPA 0120PV

3.1.5 เครื่องวัดค่าพีเอช ยี่ห้อ Eutech รุ่น 2700

3.1.6 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Eutech รุ่น 700

3.1.7 เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSO) ยี่ห้อ Selemion™, ประเทศญี่ปุ่น สำหรับการทดลอง

3.3.1 รายละเอียดคุณลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยน แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ยี่ห้อ Selemion

คุณลักษณะ	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSO) (Monovalent-ion selective)
ความหนา (μm)	100
ความแข็งแรง (Burst Strength) (kPa)	150
ความต้านทาน ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
0.5 mol/L NaCl	2.3
0.25 mol/L Na ₂ SO ₄	2.3
0.25 mol/L H ₂ SO ₄	0.20
ทรานสปอร์ตน์ัมเบอร์ (t-Na ⁺)	>0.97

3.1.8 เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSE) ยี่ห้อ Neosepta ประเทศญี่ปุ่น สำหรับการทดลอง 3.3.2
รายละเอียดคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

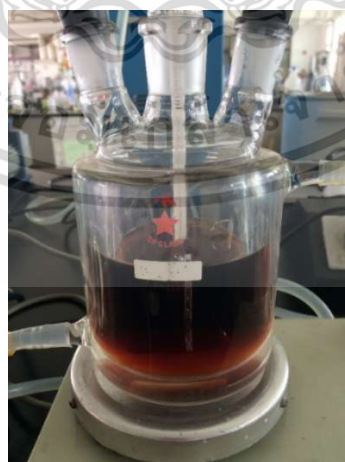
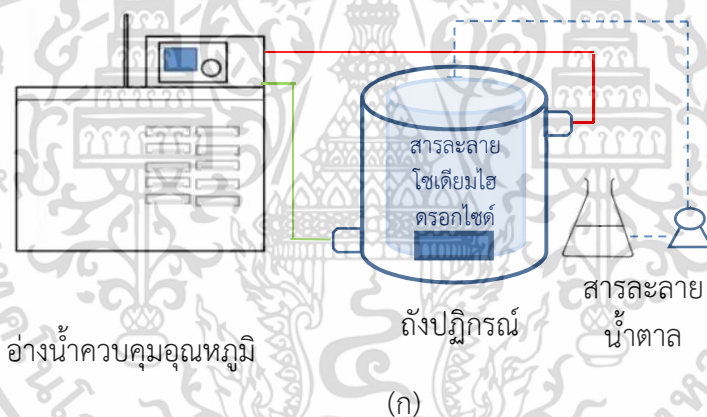
3.1.9 ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) เป็นตาข่ายสแตนเลส ขนาดความหนา 0.20 มิลลิเมตร

3.1.10 ชุดทดลองถังปฏิกรณ์ขนาด 300 มิลลิลิตร พร้อมแท่งกวน สำหรับการผลิตโซเดียมแลคเตท ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ยี่ห้อ Neosepta

คุณลักษณะ	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSE)
ความหนา (mm)	0.16
ความแข็งแรง (Burst Strength) (MPa)	≥ 0.35
ความต้านทานกระแสไฟฟ้า ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)*	1.8
อุณหภูมิที่แนะนำให้ใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)	≤ 40
พีเอชที่แนะนำให้ใช้งาน	0 ~ 14

*วัดด้วยสารละลาย 0.5 N โซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทดลองการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ตด้วยต่าง (ก) ถังปฏิกรณ์ขนาด 300 มิลลิลิตร (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีรายละเอียดดังนี้

1) ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ทำจากวัสดุสแตนเลสซึ่งแบ่งด้านแอโนดและแคโทดออกเป็นสองส่วนเท่ากัน แต่แต่ละส่วนมีขนาด $18 \times 13 \times 3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSO) พื้นที่เมมเบรน 144 ตารางเซนติเมตร

2) ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ทำจากอะคริลิก แต่แต่ละส่วนมีขนาดช่อง $14 \times 16 \times 2$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSE) พื้นที่เมมเบรนแต่ละแผ่นเป็น 120 ตารางเซนติเมตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 1 แผ่น (ก) สำหรับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น (ข)

3.1.12 เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatograph, HPLC) ยี่ห้อ Thermo Spectra SYSTEM รุ่น P2000 พร้อมคอลัมน์ Platisil 5 μm ODS ขนาด 250×4.6 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์กรดแลคติกด้วยการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง

ในการศึกษา การผลิตกรดแลคติกจากน้ำตาลได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลได้ของกรดแลคติก ดังนี้

3.2.1 การศึกษาเบื้องต้นผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติก

3.2.1.1 การศึกษาผลการเติมแบบแบทช์และเคมีแบทช์

1. นำน้ำตาลทรายปริมาณ 30 กรัม เติมน้ำจนได้สารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้น้ำตาลอินเวอร์ท

2. ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมลงในถังปฏิกรณ์ เปิดอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิที่ศึกษา และทำการกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก

3. ทำการเติมน้ำตาลอินเวอร์ทแบบแบทช์และเคมีแบทช์ที่อัตราการเติม 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับการเติมแบบแบทช์จะทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะๆ จนถึงเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับการเติมแบบเคมีแบทช์จะทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 8.3 (เวลาที่น้ำตาลอินเวอร์ทถูกป้อนจนหมด) และ 10 ชั่วโมง ตัวอย่างที่ถูกเก็บจะถูกนำไปวิเคราะห์ร้อยละผลได้กรดแลคติก และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลง

3.2.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3.5, 5.5, 8.5 และ 10.2 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เปิดอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และทำการกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก

2. ป้อนสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ท ในข้อ 3.2.1.1 (1) ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราการป้อนประมาณ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งสารละลายน้ำตาลหมด และทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งได้เวลา 24 ชั่วโมง

3. ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง

3.2.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.2.1.2 โดยใช้น้ำตาลอินเวอร์ท ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8.5 โมลาร์ ด้วยเวลาการเติม 8.3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส

3.2.1.4 การศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.2.1.2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยเติมน้ำตาลอินเวอร์ท ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเคมีแบทช์ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำตาลอินเวอร์ทที่ได้จาก

สารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 30, 45 และ 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8.5, 10 และ 15 โมลต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 8.3 และ 10 ชั่วโมง

3.2.2 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติกด้วยการออกแบบการทดลองแบบการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

นำน้ำตาลอินเวอร์ทเติมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเคมีแบทช์ โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ (T), ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น (C) และเวลาการเติม (F) ศึกษาผลของร้อยละผลได้กรดแลคติก

การศึกษานี้ใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่ตัวแปรและระดับดังแสดงในตารางที่ 3.3 ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก (Y) โดยมีค่ากลางคืออุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 6 โมลต่อลิตร และเวลาการเติม 4 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab และสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสองใน coded units ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1T + \beta_2C + \beta_3F + \beta_{11}T^2 + \beta_{22}C^2 + \beta_{33}F^2 + \beta_{12}(T*C) + \beta_{13}(T*F) + \beta_{23}(C*F) \quad (3.1)$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{12}, \beta_{13}$ และ β_{23} เป็นค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 3.3 ระดับของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ตัวแปร	ระดับตัวแปร				
	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	17.3	30	50	70	82.7
ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมล/ลิตร)	1.9	3.5	6	8.5	10
เวลาการเติม (ชั่วโมง)	0.73	2	4	6	7.3

3.3 การศึกษาวิธีการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ

3.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น

3.3.1.1 ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมแลคเตท โดยการค่อยๆ เติมสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ท ที่เตรียมจากสารละลายน้ำตาลทรายความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ลงในสารละลายเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร แบบเคมีแบทช์

3.3.1.2 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 3.3.1.1 มาเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จนกระทั่ง สารละลายมีค่าพีเอช ที่ประมาณ 9

3.3.1.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1.2 มากรอง สารละลายที่ผ่านการกรองถูกนำมา เจือจางให้ความเข้มข้นลดลงครึ่งหนึ่ง นำสารละลายปริมาตร 1.5 ลิตร บ้อนในด้านแอโนด และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.5 ลิตร บ้อนด้านแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.3.1.4 ติดตั้งปั๊มเข้ากับเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อบ้อนสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทด อัตราการไหลของสารละลายทั้งสองเป็น 30 มิลลิลิตรต่อวินาที

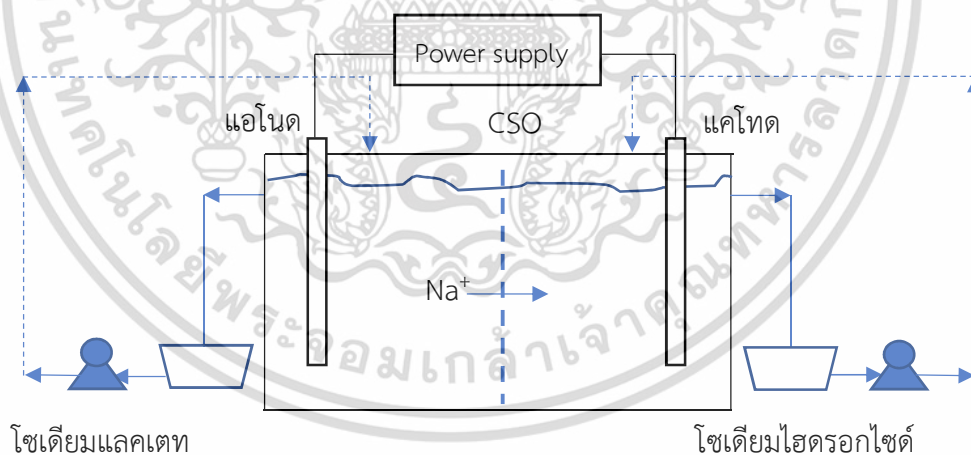
3.3.1.5 ทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 4 โวลต์ ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.3.1.6 ทำการเก็บสารละลายตัวอย่างทั้งสองด้าน จนกระทั่งสารละลายด้านแอโนดมีค่า พีเอชประมาณ 2-2.5 จึงหยุดทำการทดลอง

3.3.1.7 วิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทดด้วยการไทเทรต กับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และวิเคราะห์หาปริมาณกรดแลคติกที่เกิดขึ้นด้านแอโนดด้วย เครื่อง HPLC

3.3.1.8 ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 3.3.1.1-3.3.1.7 แต่ทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 6 และ 8 โวลต์ ตามลำดับ

3.3.1.9 ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 3.3.1.1-3.3.1.7 โดยใช้สารละลายโซเดียมแลคเตทเข้มข้น ทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์



รูปที่ 3.3 เซลล์อิเล็กโทรไลต์เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น
เมื่อ CSO คือเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

3.3.2 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก จำนวน 2 แผ่น

3.3.2.1 เตรียมสารละลายดังข้อ 3.3.1.1 และทำการติดตั้งปั๊มกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี พร้อมเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจำนวน 2 แผ่น

3.3.2.2 นำสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในช่องกลาง และป้อนสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ทางด้านแอโนดและแคโทด เปิดปั๊มเพื่อให้สารละลายหมุนวนในแต่ละช่อง

3.3.2.3 ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์

3.3.2.4 ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทด ทุก 30 นาที และเก็บตัวอย่างสารละลายทุก 1 ชั่วโมง เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น

3.3.2.5 ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 3.3.2.1-3.3.2.4 แต่ทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 8 และ 12 โวลต์ ตามลำดับ

3.4 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง

3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติก

ในการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ให้นำตัวอย่างที่ถูกเก็บที่เวลาต่างๆ มาเจือจาง และปรับด้วยกรดให้ได้พีเอชประมาณ 2 และนำตัวอย่างที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง โดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ UV ที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 5 มิลลิโมล เป็นเฟสเคลื่อนที่

สำหรับการอิเล็กโทรไลซิส ให้นำตัวอย่างมาเจือจางและวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์

นำตัวอย่างที่ถูกเก็บที่เวลาต่างๆ ถูกทำให้หยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ด้วยวิธี DNSA

3.4.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำตัวอย่างที่เก็บมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

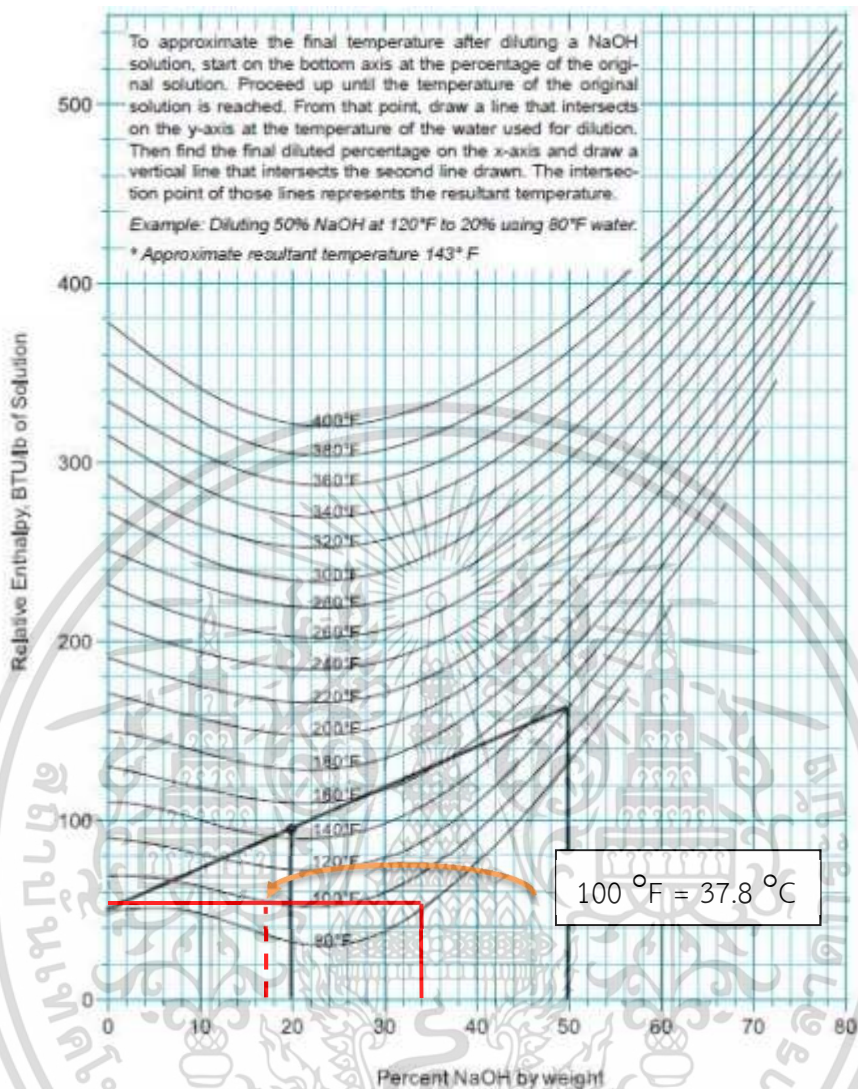
ในบทนี้ได้บรรยายถึงผลการศึกษากการผลิตรวดแลคติกจากสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยการย่อยด้วยต่าง เริ่มจากศึกษากการผลิตรวดแลคติกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาผลการเติมแบบแบทช์และเคมีแบทช์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสารตั้งต้น หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการเติมสารละลายน้ำตาลเข้าทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคมีแบทช์ จากนั้นได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโซเดียมแลคเตทที่ได้มาเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลซิส ร่วมกับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยศึกษาปัจจัยที่มีต่อร้อยละการได้กลับคืนของกรดแลคติก และการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีรายละเอียดผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตรวดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในการย่อยน้ำตาลด้วยต่างพบว่ามีการใช้ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลไม่เข้มข้นมากนัก เนื่องจากที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในระบบแบทช์ ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาโดยการใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นสูง 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร และพัฒนาให้ได้อ้อยผลได้สูงด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดกรดแลคติก

จากข้อมูลของคู่มือ caustic soda ในรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร หรือความเข้มข้นประมาณ 34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (86 °F) มาทำการเติมน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้สารละลายใหม่ความเข้มข้น โดยประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้สารละลายอุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น 7.8 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการย่อยด้วยต่างจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนจากปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นกว่าการเจือจางด้วยน้ำ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิสารละลายเพิ่มมากขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดได้ลดลงถ้าปฏิกิริยาค่อยๆ เกิดขึ้น เคมีแบทช์จะช่วยให้ปฏิกิริยาค่อยๆ เกิดขึ้น และทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง ดังนั้นการย่อยด้วยต่างที่ความเข้มข้นสารละลายสูงจึงต้องใช้ระบบแบบเคมีแบทช์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกมีหลายปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการเติม



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของสารละลายเมื่อเจือจางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำ [36]

4.1.1 การศึกษาเบื้องต้นผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติก

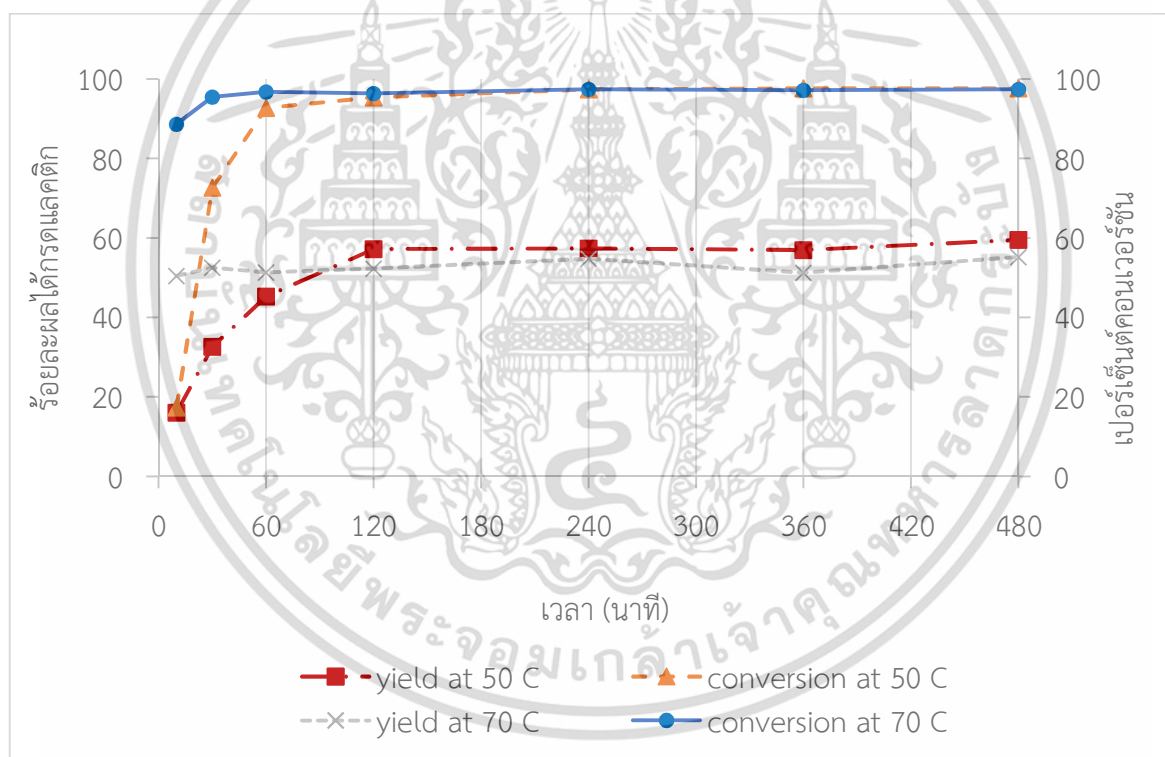
การศึกษาค่าผลการทดลองแบบแบทช์ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถูกเก็บที่เวลา 10 30 60 120 240 360 และ 480 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากรูปสังเกตเห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 60 และ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 นาที ปฏิกริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วปฏิกริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ร้อยละผลได้กรดแลคติกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของกรดแลคติกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 10 นาที และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็น 55 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

480 นาที ขณะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ร้อยละผลได้กรดแลคติกเพียง 16 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 120 นาที ร้อยละผลได้กรดแลคติกเป็น 57 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นร้อยละผลได้กรดแลคติกเกือบจะคงที่และให้ค่าผลได้กรดแลคติกเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 480 นาที

ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นแต่ค่าร้อยละผลได้กรดแลคติกต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อาจเกิดจากเมื่อทำการเติมน้ำตาลอินเวอร์ทลงในสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์แบบแบทช์ พบว่าอุณหภูมิสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดเป็น 58 และ 93 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลง การเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาเกิดเร็วแต่อาจทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ C_7 หรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของไพรวอลตีไฮด์ และ C_6 -ไดคาร์บอนิล [18, 33] จึงเป็นผลให้ค่าร้อยละผลได้กรดแลคติกลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำการศึกษาในระบบเคมีแบทช์ต่อไป



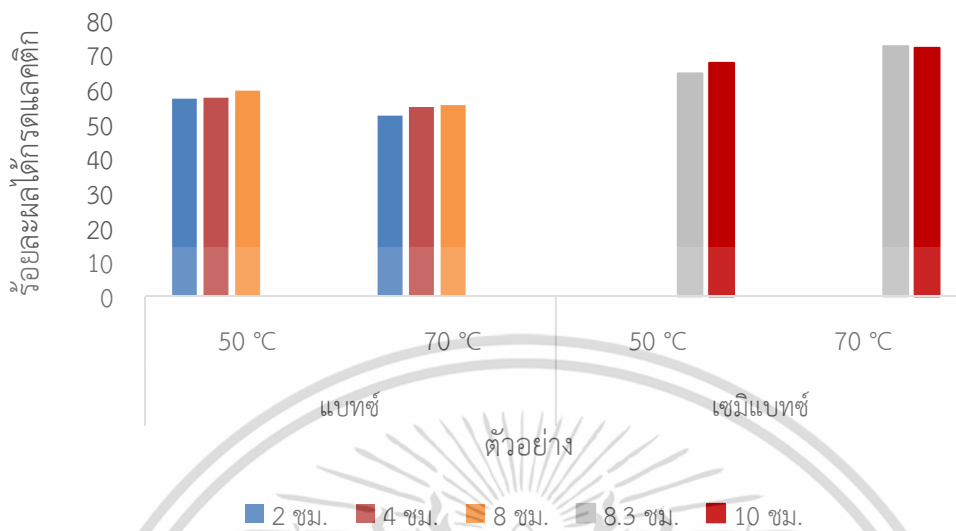
รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้กรดแลคติกและเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของน้ำตาลอินเวอร์ทที่เวลาต่างๆ สำหรับการเติมแบบแบทช์

ร้อยละผลได้กรดแลคติกในแบทช์และเคมีแบทช์ถูกศึกษา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับการศึกษาแบบแบทช์ หลังจากชั่วโมงที่ 2 ร้อยละผลได้เกือบจะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้กรดแลคติกเป็น 57.2 และ 59.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 2 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ

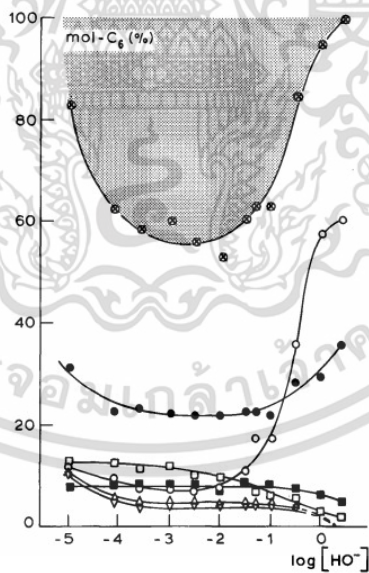
70 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้กรดแลคติกเป็น 52.3 และ 55.3 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 2 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าร้อยละผลได้กรดแลคติกเกือบจะคงที่ ที่เวลา 2-8 ชั่วโมง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน ประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 ปฏิกริยาเกือบจะเสร็จสมบูรณ์แล้ว ค่าร้อยละผลได้จึงเพิ่มขึ้นอีก ไม่มากนัก แต่ผลจากการเติมแบบเคมีแบบทซ์ พบว่าค่าร้อยละผลได้มีค่าเป็น 64.5 และ 67.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 72.3 และ 71.9 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8.3 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ การที่ร้อยละผลได้กรดแลคติกในระบบเคมีแบบทซ์สูงกว่าระบบแบบทซ์เนื่องจากในระบบเคมีแบบทซ์สามารถควบคุมอุณหภูมิของปฏิกริยาได้ดี โดยอุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส และยังรักษาให้ระดับความเข้มข้นต่างในระบบมีค่าสูง และน้ำตาลในระบบให้ต่ำ ตลอดเวลา

การทดลองในระบบเคมีแบบทซ์นี้ได้ผลได้ร้อยละกรดแลคติกสูงจากการใช้สารละลายน้ำตาลที่ใช้สูง เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยที่ผ่านมามีผลได้ร้อยละของกรดแลคติกเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ต่อกรัมกลูโคส เมื่อใช้กลูโคสเข้มข้น 50 มิลลิโมล และ 0.5-10 โมลไปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ในถึงปฏิกริยาแบบแบบทซ์ที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส [33] de Bruijn และคณะ (1986) [18] นำน้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ เช่น กลูโคส ฟรุคโตส แมนโนส เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร มาทำการย่อยด้วยไปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความ เข้มข้นไฮดรอกไซด์สูงกว่าพีเอช 13 พบว่าได้กรดแลคติก 60 เปอร์เซ็นต์โมลคาร์บอน Montgomery (1996) [30] ทำการย่อยกลูโคสด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ กรดแลคติกลดลงเมื่อความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้น โดยได้ผลได้ร้อยละกรดแลคติกสูงสุดเป็น 25 และ 7 เปอร์เซ็นต์โมลกรดแลคติกต่อโมลกลูโคส ที่ความเข้มข้นกลูโคส 1.8 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ณัฐภูมิ รัตนเจียรสกุล (2016) [60] พบว่าการควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลระบบให้ต่ำจะทำให้ กรดแลคติกเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลต่ำช่วยให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติกเนื่องจากต่างจะทำการย่อย น้ำตาลให้ได้น้ำตาล C_3 ก่อนจะเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก ความเข้มข้นน้ำตาลสูงจะทำให้เกิดกรดแซคคารินิก เนื่องจากปฏิกริยาอีโนไลเซชัน (Enolization)/ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เบต้า-อีลิมีเนชัน (β -elimination) และเบนซิลลิก รีอะเรนจ์เมนต์ (Benzillic acid rearrangement) โดยปฏิกริยาแสดงดัง รูปที่ 2.16 [18] ดังนั้นการใช้ระบบเคมีแบบทซ์จึงเหมาะสำหรับการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยด้วยต่างเมื่อ ใช้ความเข้มข้นสารตั้งต้นสูงเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นในงานศึกษานี้จึงจะใช้ระบบแบบเคมีแบบทซ์เพื่อศึกษาต่อไป

จากการทดลองที่ผ่านมาของ de Bruijn และคณะ (1986) [18] ได้ทำการศึกษาความเข้มข้น ของไฮดรอกไซด์ไอออนจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นมอโนแซ็กคาไรด์ 0.025 โมลต่อลิตร ในปฏิกริยาการย่อยด้วยต่าง ที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไอออน มากกว่า 0.1 M (พีเอชมีค่ามากกว่า 13) มีการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติกสูงมาก ขณะที่ผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น กรดไกลโคลิก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรด 2,4 ไดไฮดรอกซีบิวทริก ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ดังนั้นการควบคุมให้ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์สูงๆ มีผลในการเพิ่มร้อยละผลได้กรดแลคติก การค่อยๆ เติม สารละลายมอโนแซ็กคาไรด์ลงในสารละลายต่างแบบเคมีแบบทซ์ จึงเป็นการควบคุมปริมาณต่างในระบบให้ มากเกินพอตลอดเวลาที่เกิดปฏิกริยา เพื่อให้เกิดร้อยละผลได้กรดแลคติกเพิ่มขึ้น การทดลองนี้จึงเลือกใช้ ความเข้มข้นต่างมากเกินพอและค่อยๆ เติมสารละลายน้ำตาลลงในต่างแบบเคมีแบบทซ์



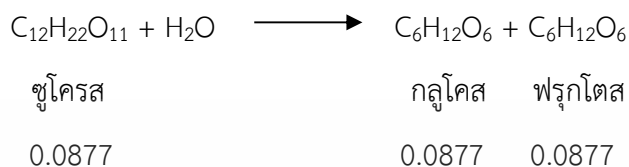
รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง สำหรับการเติมแบบแบบทซ์ และ เซมิแบบทซ์ ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.4 ปริมาณการเกิดกรดคาร์บอกซิลิกที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไอออนต่างๆ โดยที่บริเวณ สีเทา คือ กรดที่มีคาร์บอนมากกว่า 6 อะตอม, ⊗ คือกรดที่มีคาร์บอนน้อยกว่าและเท่ากับ 6 อะตอม, ○ คือกรดแลคติก, ● คือกรดแซคคารินิก, △ คือกรดไกลโคลิก, ▽ คือกรดฟอร์มิก, □ คือกรดอะซิติก และ ■ คือกรด 2,4 ไดไฮดรอกซีบิวทริก
ที่มา : de Bruijn และคณะ (1986) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซูโครส 1 โมล จะได้กลูโคสและฟรุคโตส อย่างละ 1 โมล ดังสมการ น้ำตาลซูโครสเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตรสารละลาย 100 มิลลิลิตร มีน้ำตาลซูโครสหนัก 30 กรัม คิดเป็น 0.0877 โมล เกิดเป็นกลูโคส และ ฟรุคโตสอย่างละ 0.0877 โมล



ในทางทฤษฎีปฏิกิริยาการย่อยด้วยต่าง

กลูโคส 1 โมล ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล จะได้โซเดียมแลคเตท 2 โมล

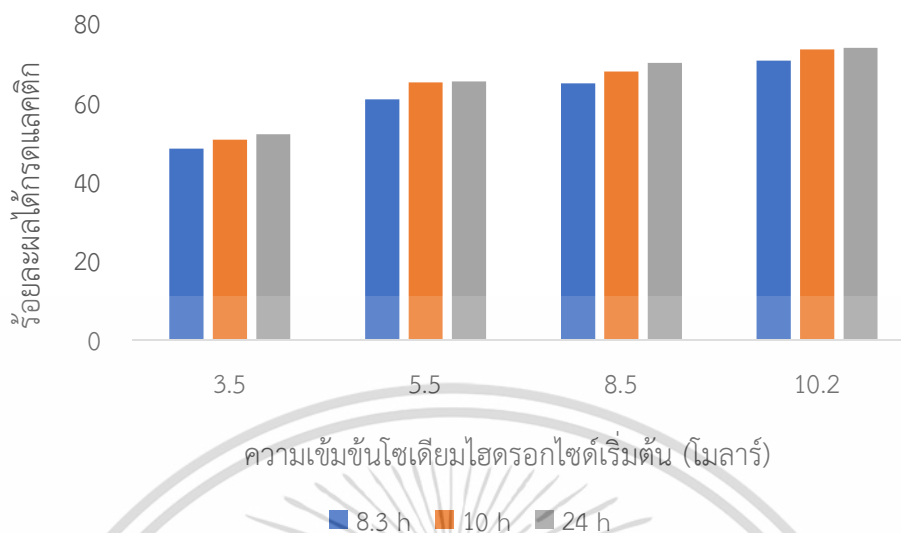
กลูโคส 0.0877 โมล จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ $0.0877 \times 2 = 0.175$ โมล

ฟรุคโตส 0.0877 โมล จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ $0.0877 \times 2 = 0.175$ โมล

รวมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ทำปฏิกิริยา เท่ากับ $0.175 + 0.175 = 0.35$ โมล ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร คิดเป็น 3.5 โมลต่อลิตร

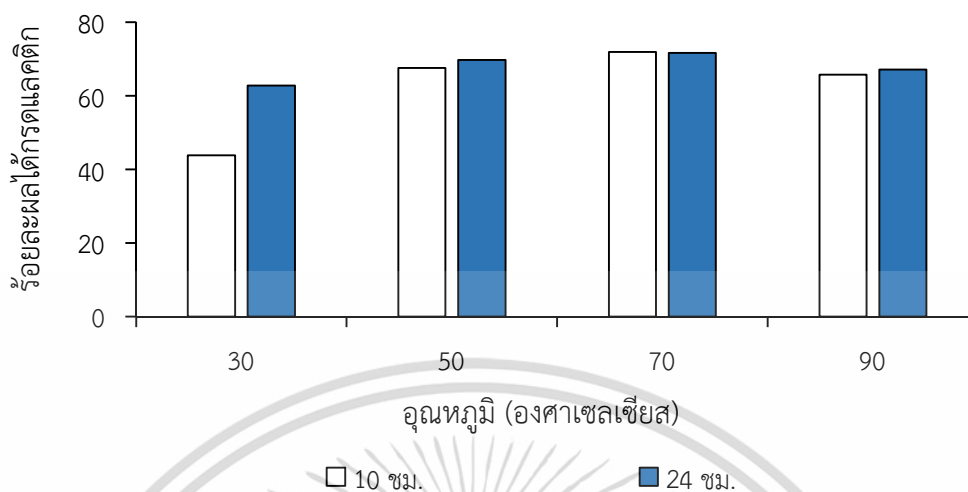
ดังนั้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายน้ำตาลซูโครส 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.5 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำการศึกษา และเพิ่มความเข้มข้นสารละลายต่างมากขึ้นเพื่อเพิ่มผลได้ร้อยละกรดแลคติก

เมื่อนำน้ำตาลอินเวอร์ทความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 3.5 5.5 8.5 และ 10.2 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละผลได้กรดแลคติก เป็น 52 65 70 และ 73 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ de Bruijn และคณะ (1986) [18] แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8.5 เป็น 10.2 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละผลได้กรดแลคติกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร เหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยากับน้ำตาลอินเวอร์ทที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.5 5.5 8.5 และ 10.2 โมลต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ

การศึกษาผลของอุณหภูมิของการย่อยด้วยต่าง ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ 30 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับการผลิตกรดแลคติก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และได้ผลได้กรดแลคติกต่ำกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ร้อยละผลได้เปลี่ยนจาก 43.8 เป็น 62.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 10 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้มีค่าเพิ่มขึ้น และร้อยละผลได้สูงสุดเป็น 72 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 องศาเซลเซียส ผลได้ร้อยละกรดแลคติกลดลงเป็น 67 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดผลิตภัณฑ์ C_7 หรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของไพรวอลตีไฮด์ และ C_6 -ไดคาร์บอนิล [18, 33] ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการศึกษานี้จึงเลือกทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส

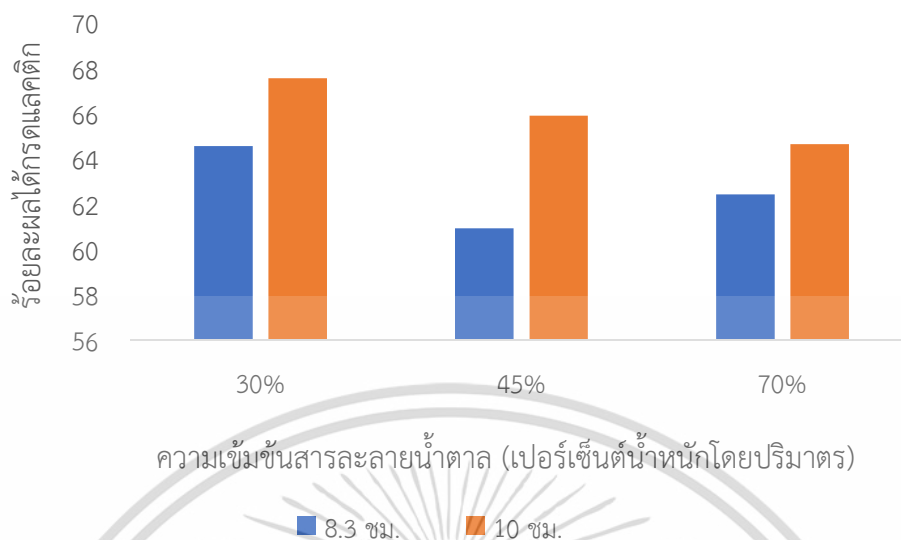


รูปที่ 4.6 ร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

เมื่อต้องการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ท ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายให้สูงตลอดเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นที่ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 45 และ 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร จึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10.2 และ 15 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

การศึกษาการใช้สารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร เริ่มทำการศึกษาโดยใช้การทดลองแบบแบทช์ พบว่าหลังจากเติมสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ท ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสารละลายเกิดการฟุ้งปะทะออกจากถังปฏิกรณ์ทันที เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และอุณหภูมิของสารละลายเมื่อเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายด้วยต่างเมื่อความเข้มข้นสารละลายสูง จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้มาก [61] ดังนั้นการทำปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยต่างสำหรับความเข้มข้นวัตถุดิบสูงไม่สามารถทำได้ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

ผลการทดลองความเข้มข้นทั้งสามแบบแบทช์แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าผลได้ร้อยละกรดแลคติกที่เวลา 10 ชั่วโมง เป็น 68 66 และ 65 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเข้มข้นน้ำตาลเป็น 30 45 และ 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลเพิ่มทำให้กรดแซคคารินิกเพิ่มขึ้น [18] ดังนั้นผลได้ร้อยละกรดแลคติกจึงลดลงเมื่อสารละลายน้ำตาลอินเวอร์ทเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ร้อยละผลได้กรดแลคติกเมื่อใช้น้ำตาลความเข้มข้นสูงเป็นสารตั้งต้น ที่เวลาต่างๆ

4.1.2 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อผลได้ร้อยละกรดแลคติกด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

จากผลในเบื้องต้น ปัจจัยที่น่าสนใจในการผลิตกรดแลคติก คือ อุณหภูมิ (T), ความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (C) และเวลาการเติม (F) เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาพิจารณา และใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อทำการออกแบบการทดลองได้การทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง โดยมีลำดับการทดลองแบบสุ่ม และร้อยละผลได้กรดแลคติกของแต่ละการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1

จากการศึกษาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย พบว่าค่าผลได้กรดแลคติกมีค่าต่ำที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ (การทดลองที่ 18 และ 20) อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อร้อยละผลได้ ที่ค่ากลางของทดลอง (การทดลองที่ 3 และ 6 และการทดลองที่ 5 และ 8 ตามลำดับ) ส่วนเวลาการเติมมีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกน้อย

จากผลการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองป้อนในโปรแกรม Minitab ได้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับทำนายค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก ดังสมการที่ (4.1) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก เป็นดังตารางที่ 4.2

$$Y = 60.85 + 20.77*T + 10.39*C + 5.01*F - 6.69*(T*T) - 6.83*(C*C) - 3.47*(F*F) - 0.80*(T*C) - 0.09*(T*F) + 0.09*(T*F) + 0.42*(C*F) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลที่ได้กรดแลคติกจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การทดลอง	ระดับตัวแปร			ค่าจริง			ร้อยละผลได้ ณ เวลาหยุด ป้อน (%)
	T	C	F	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความเข้มข้น NaOH (โมล/ลิตร)	เวลา การเติม (ชั่วโมง)	
1	0	0	0	50.0	6.0	4	59.96
2	0	0	1.633	50.0	6.0	7.3	64.19
3	-1.633	0	0	17.3	6.0	4	20.26
4	0	0	0	50.0	6.0	4	61.40
5	0	-1.633	0	50.0	1.9	4	17.92
6	1.633	0	0	82.7	6.0	4	68.54
7	0	0	-1.633	50.0	6.0	0.734	41.78
8	0	1.633	0	50.0	10.0	4	70.17
9	0	0	0	50.0	6.0	4	60.34
10	1	-1	1	70.0	3.5	6	65.44
11	1	-1	-1	70.0	3.5	2	57.55
12	0	0	0	50.0	6.0	4	59.63
13	0	0	0	50.0	6.0	4	62.03
14	1	1	1	70.0	8.5	6	76.62
15	-1	1	1	30.0	8.5	6	30.23
16	0	0	0	50.0	6.0	4	59.49
17	1	1	-1	70.0	8.5	2	69.77
18	-1	-1	-1	30.0	3.5	2	7.62
19	-1	1	-1	30.0	8.5	2	20.33
20	-1	-1	1	30.0	3.5	6	13.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก

Source	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	8764.66	876.47	12.27	0.000
Linear	7523.32	2507.77	35.11	0.000
T	5750.41	5750.41	80.51	0.000
C	1438.62	1438.62	20.14	0.002
F	334.29	334.29	4.68	0.059
Square	1215.33	405.11	5.67	0.018
T*T	591.91	591.91	8.29	0.018
C*C	615.62	615.62	8.62	0.017
F*F	159.46	159.46	2.23	0.169
2-Way Interaction	6.58	2.19	0.03	0.992
T*C	5.13	5.13	0.07	0.795
T*F	0.06	0.06	0.00	0.977
C*F	1.39	1.39	0.02	0.892
Error	642.84	71.43		
Lack-of Fit	637.71	127.54	99.52	0.000
Pure Error	5.13	1.28		
Total	9407.50			

Model Summary

S = 8.45143, R-sq = 93.17%, R-sq (adj) = 85.57%

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ในตารางที่ 4.2 พบว่าปัจจัยที่ไม่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก (P-value>0.05) คือเทอม interaction และเทอม F^2 จึงตัดเทอมเหล่านั้นทิ้ง และแสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ใหม่ ดังตารางที่ 4.3 พร้อมทั้งแสดงสมการกำลังสองเชิงถดถอยในรูปแบบ Coded units ระหว่างร้อยละผลได้กรดแลคติกกับปัจจัยที่ทำการศึกษ ดังสมการที่ (4.2) โดยมีค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 0.914

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้กรดแลคติก หลังตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

Source	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	8598.61	1433.10	23.03	0.000
Linear	7523.32	2507.77	40.30	0.000
T	5750.41	5750.41	92.42	0.000
C	1438.62	1438.62	23.12	0.000
F	334.29	334.29	5.37	0.037
Square	1055.87	527.93	8.48	0.004
T*T	551.65	551.65	8.87	0.011
C*C	574.60	574.60	9.23	0.010
Error	808.88	62.22		
Lack-of Fit	803.76	89.31	0.000	0.000
Pure Error	5.13	1.28		
Total	9407.50			

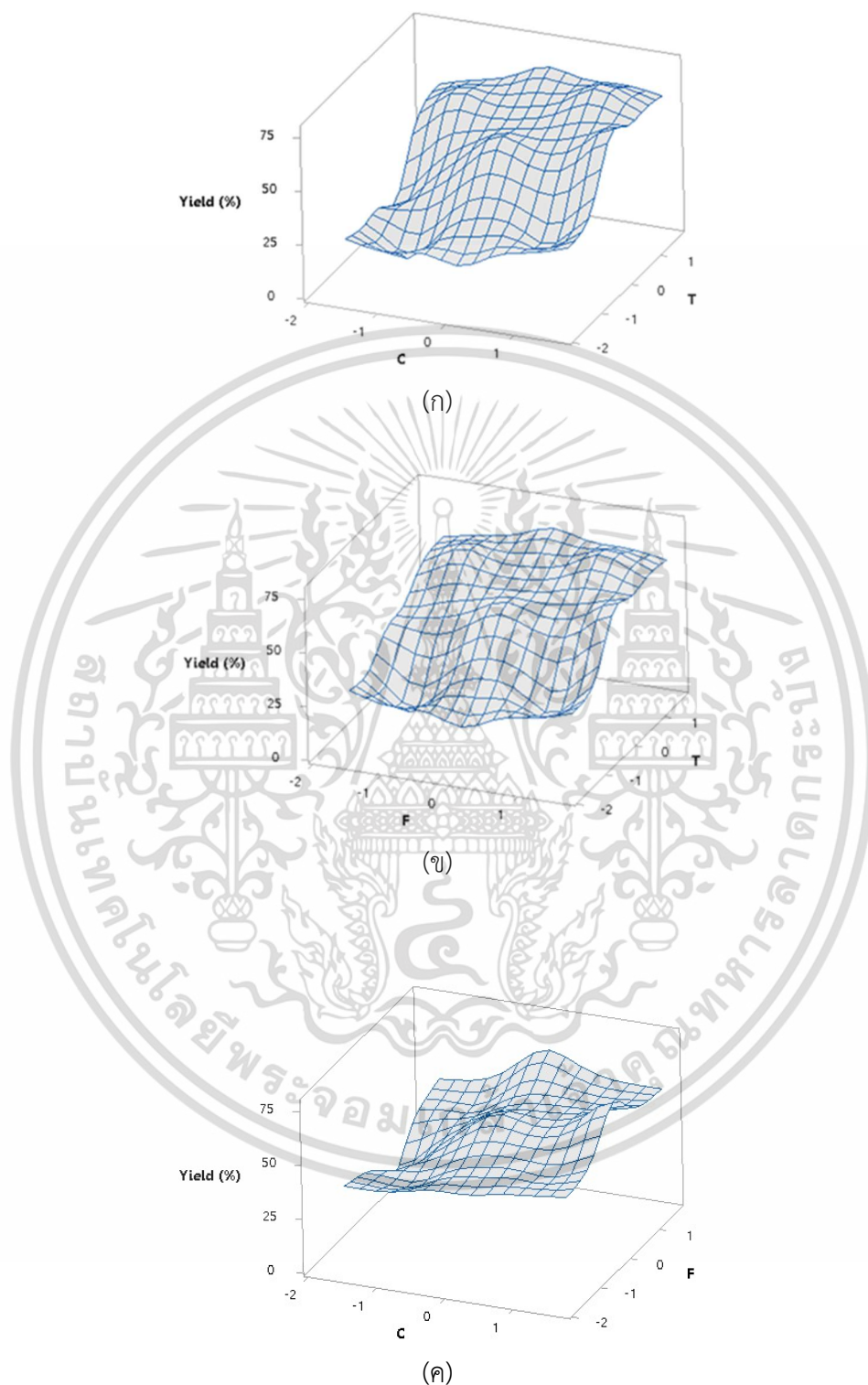
Model Summary

S = 7.88809, R-sq = 91.40%, R-sq (adj) = 87.43%

$$Y = 58.21 + 20.77*T + 10.39*C + 5.01*F - 6.45*T^2 - 6.58*C^2 \quad (4.2)$$

กราฟพื้นผิวตอบสนองต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) – (ค) จากรูปการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติกมาก ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 70 เป็น 83 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละผลได้เพิ่มไม่มากนัก การเพิ่มอุณหภูมิช่วยเพิ่มค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็น C₇ หรือกรดคาร์บอกซิลิกน้ำหนักโมเลกุลสูง [18, 33] ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงป้องกันการเกิดปฏิกิริยา aldolization ซึ่งจะผลิตพอลิไฮดรอกซีแอซิดที่มีขนาด >C₆ [18] ขณะที่เวลาในการเติมมีผลต่อการศึกษาในช่วงทดสอบน้อย เนื่องจากสามารถควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลในระบบให้ต่ำตลอดเวลาการเติมแบบช้าๆ ในการทดลองที่ 2 ให้ผลได้ร้อยละดีกว่าการเติมเร็วขึ้นในการทดลองที่ 7 สภาวะที่ให้ค่าการผลิตกรดแลคติกสูงสุดในช่วงที่ทำการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร และเวลาการเติม 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟพื้นผิวตอบสนอง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ก) อุณหภูมิกับเวลาการเติม (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาการเติม (ค) ต่อผลได้กรดแลคติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตกรดแลคติกด้วยวิธีการเติมน้ำตาลลงในสารละลายต่างแบบเคมีแบบซิงในงานวิจัยนี้ให้ค่าผลได้ร้อยละกรดแลคติกสูง เมื่อเทียบกับหลายๆ งานวิจัยที่ผ่านมา ที่ใช้วิธีการทางเคมีในการผลิตกรดแลคติก ด้วยวิธีการที่ใช้ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งสภาวะที่ใช้ทำการศึกษาเกิดที่อุณหภูมิไม่สูง ความดันบรรยากาศ จึงมีความน่าสนใจที่จะใช้วิธีนี้ในการผลิตกรดแลคติกต่อไป

4.2 การศึกษาวิธีการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ

ในการทดลองปฏิกิริยาการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของเกลือแลคเตท ซึ่งต้องทำการเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก วิธีการในการเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกมีหลายวิธี วิธีการหนึ่งคือการใช้ไฟฟ้าเคมีร่วมกับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก อีกทั้งยังได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการย่อยสลายด้วยต่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ

ในการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างเพื่อให้ได้ร้อยละกรดแลคติกปริมาณมาก จึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป ซึ่งในการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยการอิเล็กโทรไลซิส นั้น มีการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุร่วมด้วย ซึ่งเยื่อนั้นไม่สามารถทนต่างเข้มข้นสูงมาก ดังนั้นจึงทำการลดความเข้มข้นต่าง เพื่อลดค่าพีเอชของสารละลายโดยวิธีการคาร์บอนเนชัน

4.2.1 การคาร์บอนเนชันสารละลายที่ได้จากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง

การคาร์บอนเนชันเป็นการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลาย สำหรับการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ยังคงมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป จึงทำให้ค่าพีเอชสารละลายมีค่าสูง จนมีผลต่อเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ การลดค่าพีเอชสารละลายสามารถทำได้โดยการใช้กรดเช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดซัลฟิวริก โดยได้ตะกอนโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมซัลเฟตดังสมการ



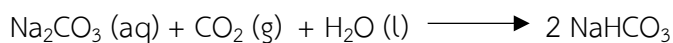
การลดค่าพีเอชสารละลายโดยการเติมกรดทำได้ง่าย แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรุนแรง เนื่องจากความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายจากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ทมีมาก และจะเกิดการคายความร้อนสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการปรับลดค่าพีเอช

การคาร์บอนเนชัน ทำโดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายโซเดียมแลคเตท ดังรูปที่ 4.9 ก่อนการคาร์บอนเนชันสารละลายมีค่าพีเอชมากกว่า 14 เมื่อผ่านการคาร์บอนเนชัน พีเอชสารละลายจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตดังรูปที่ 4.10 เมื่อพีเอชสารละลายเป็น 12 จะเกิดสารละลายคาร์บอนเนตขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ



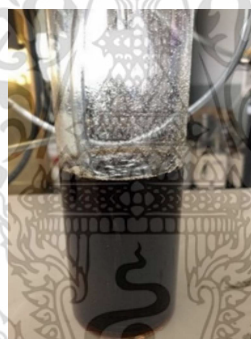
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป จะเกิดไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และคาร์บอเนตลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสารละลายมีพีเอช 10 สารละลายจะมีสัดส่วนของคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตอย่างละเท่ากัน โดยการเกิดไบคาร์บอเนตแสดงได้ดังสมการ

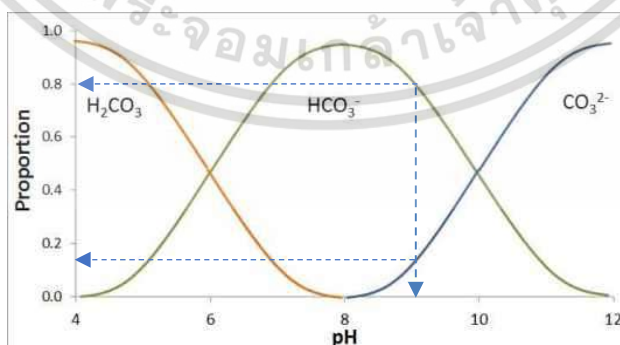


เมื่อพีเอชสารละลายลดลงจนกระทั่งพีเอชเป็น 9 จะเกิดตะกอนขึ้น ที่พีเอชนี้สารละลายจะมีสารประกอบไบคาร์บอเนตอยู่ในปริมาณมากกว่าคาร์บอเนต และจากความสามารถในการละลายของโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยเพียง 10.3 กรัม ขณะที่คาร์บอเนตละลายน้ำได้ 30.7 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.4 ที่พีเอชนี้จึงเกิดตะกอนโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ เมื่อกรองตะกอนออก ได้ตะกอนดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนสารละลายที่ได้จะนำไปผ่านการอิเล็กโทรไลซิสต่อไป

ผลพลอยได้ที่เป็นตะกอนโซเดียมไบคาร์บอเนต สามารถนำมาผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกเพื่อได้โซเดียมไฮดรอกไซด์กลับคืนมา ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการย่อยน้ำตาลด้วยต่างได้ [52]



รูปที่ 4.9 การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมแลคเตท



รูปที่ 4.10 สัดส่วนของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3), ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่พีเอชต่างๆ

ที่มา : <https://microscopesandmonsters.wordpress.com/tag/chemistry/> [62]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะตะกอนที่ได้จากการคาร์บอนเนชันสารละลายโซเดียมแลคเตท

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการละลายน้ำของโซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์

สาร	ความสามารถในการละลายน้ำ
โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)	10.3 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)	30.7 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	ละลายน้ำได้ดีมาก 109 กรัม/ 100 มิลลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส

ที่มา : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> [63]

การอิเล็กโทรไลซิสในการทดลองนี้ ได้ทำการทดลองด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุแผ่นเดียวและเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแผ่นเดียว

การทดลองอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแผ่นเดียว เป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่บรรจุสารละลายและเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 4.12

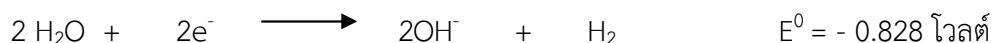
เมื่อเติมสารละลายโซเดียมแลคเตทเจือจาง และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำลงในเซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้า โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



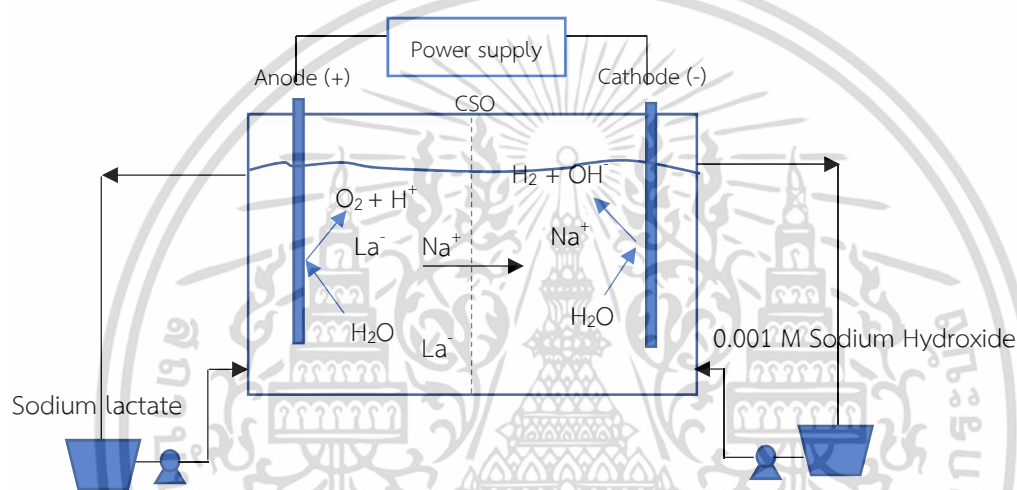
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



โดยมีปฏิกิริยารวมเป็น



$$\text{ค่า } E^0_{\text{cell}} = E^0_{\text{cathode}} - E^0_{\text{anode}} = -0.828 - 1.229 = -2.057 \text{ V}$$

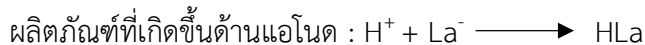


รูปที่ 4.12 แผนภาพการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น โดยที่ CSO คือเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก

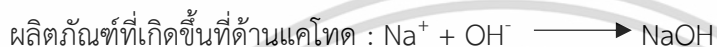
ค่า E^0 ที่ขั้วแอโนดและแคโทดที่ปรากฏเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ที่สภาวะมาตรฐาน คือ ขั้วไฟฟ้าจุ่มในสารละลายที่มีความเข้มข้นไอออน 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งในสภาวะการทดลองจริงไม่ใช่ที่สภาวะมาตรฐาน จึงทำให้ค่า E^0 ที่ใช้งานต่างจากค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี นอกจากนั้นในระบบยังมีความต้านทานอื่นๆ เช่น ความต้านทานเนื่องจากสารละลาย ความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน ความต้านทานจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เป็นต้น การจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบนี้จึงทำการจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าต้องไม่น้อยกว่า 2.057 โวลต์ ดังนั้นในการศึกษาจะทำการศึกษาที่ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 4 โวลต์

ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการอิเล็กโทรไลซิส เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์มีผลให้เพิ่มแรงขับเคลื่อนของไอออนที่ต้องแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น [46] ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการศึกษาการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 4 6 และ 8 โวลต์ ตามลำดับ

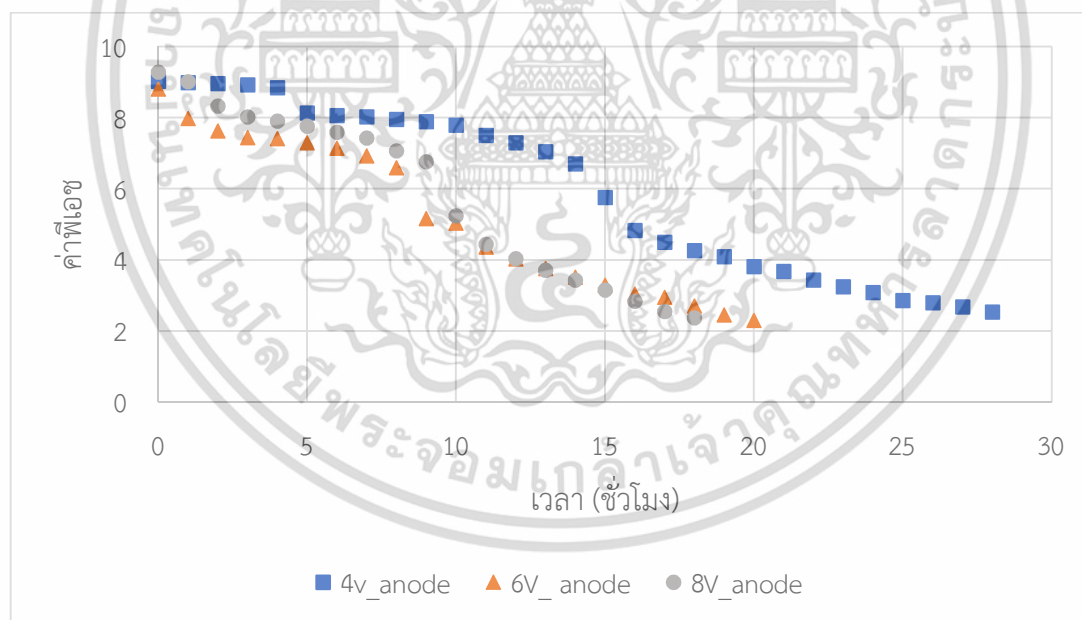
จากการทดลองอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจำนวน 1 แผ่น ดังรูปที่ 4.12 เมื่อทำการป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตททางด้านแอโนด โซเดียมแลคเตทจะแตกตัวเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และแลคเตทไอออน (La^-) ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดจะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งจะรวมกับแลคเตทไอออนเกิดเป็นกรดแลคติก (HLA) ทางด้านแอโนด ดังสมการ



ทางด้านแคโทด โซเดียมไอออนที่แพร่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกไปยังด้านแคโทดที่เป็นขั้วลบ ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดคือปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โซเดียมไอออนจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้เกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการ



ผลิตภัณท์ที่เกิดขึ้นทางด้านแอโนด คือ กรดแลคติก จึงทำให้ค่าพีเอชสารละลายด้านแอโนดมีค่าลดลง ที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ จะเกิดการลดลงของพีเอชได้ช้ากว่าที่โซเดียมแลคเตท 6 และ 8 โวลต์ เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และเกิดกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.14 ทำให้ปฏิกิริยาต้องใช้ระยะเวลานานกว่า

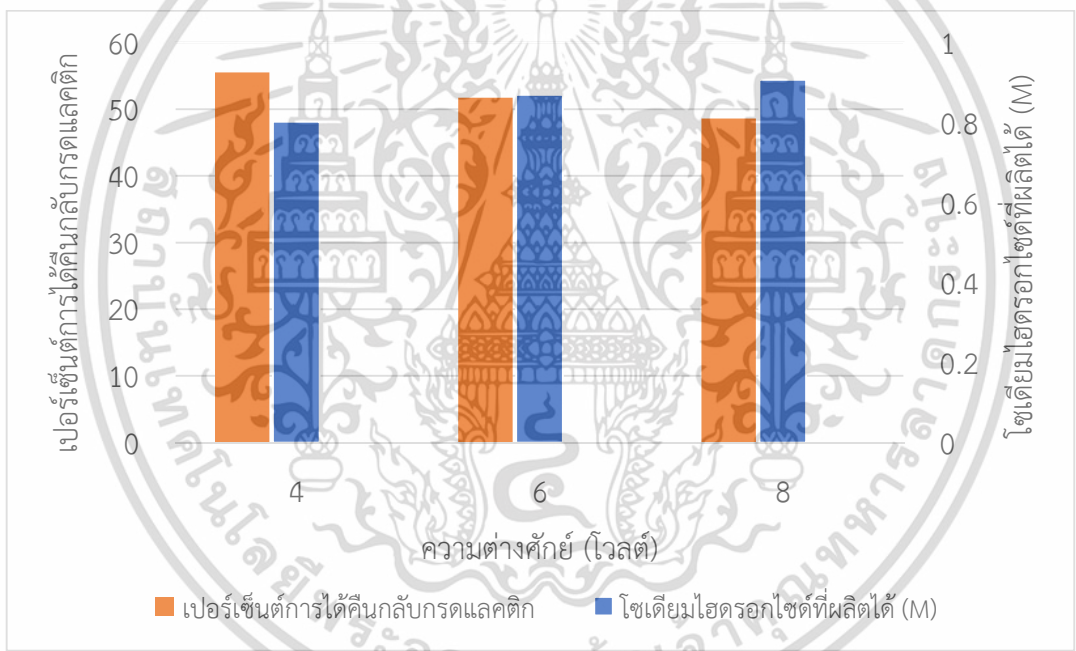


รูปที่ 4.13 ค่าพีเอชสารละลายด้านแอโนด การอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่เวลาต่างๆ ที่ค่าความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์

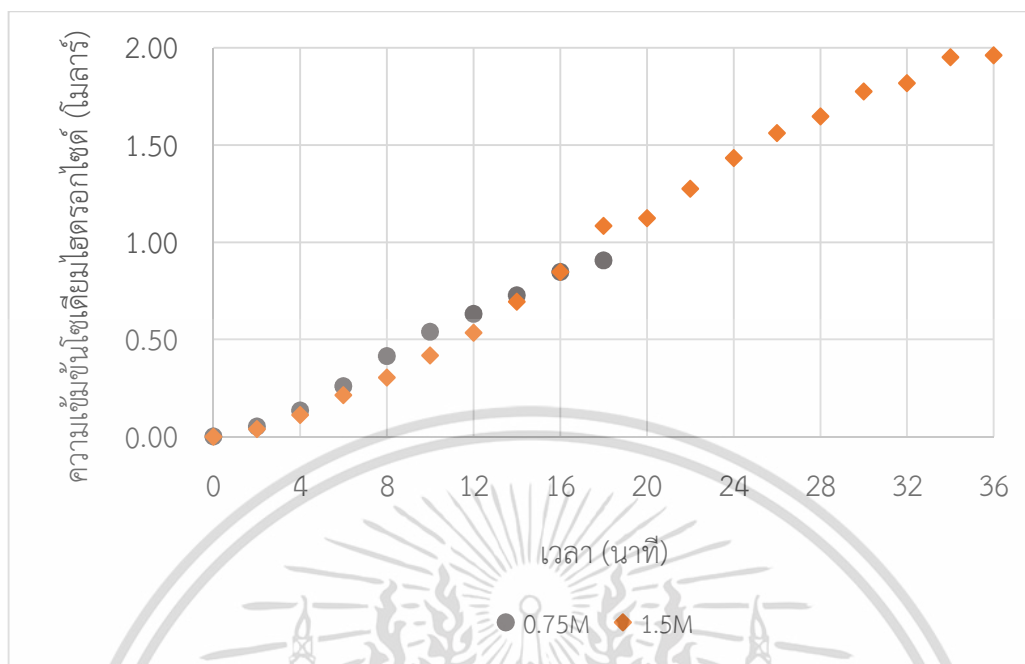
ต่างๆ ได้ง่ายขึ้น และทำให้เกิดฟองก๊าซในเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าและพื้นที่ของเมมเบรนที่ให้โซเดียมไอออนผ่านลดลง ซึ่งฟองก๊าซนี้ยังลดการนำไฟฟ้าภายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์อีกด้วย [52]

นอกจากนั้นการศึกษาโดยใช้สารละลายโซเดียมแลคเตทที่ไม่ผ่านการเจือจาง ทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์ เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมแลคเตทเจือจาง พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมแลคเตทที่ไม่เจือจางให้ค่าร้อยละการคืนกลับกรดแลคติกเป็น 40.5 เปอร์เซ็นต์ และให้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.96 โมลต่อลิตร ที่เวลา 36 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโซเดียมแลคเตทเริ่มต้น ไม่มีต่ออัตราการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Simon และคณะ (2014) [52] เนื่องจากโซเดียมไอออนที่ผ่านเมมเบรนขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การได้คืนกลับกรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์

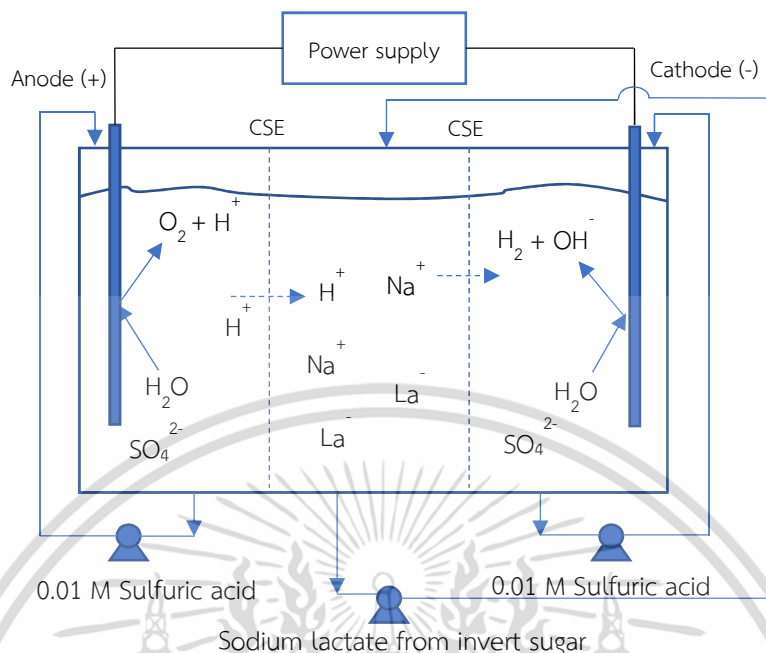


รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นไฮโดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลาย 0.75 และ 1.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์

4.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจำนวน 2 แผ่น

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าสารละลายกรดแลคติกที่อยู่ทางด้านแอนโนดสามารถถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารอื่นได้ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงการอิเล็กโทรไลซิสโดยใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจำนวน 2 แผ่น และทำการป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทระหว่างเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เพื่อป้องกันการถูกออกซิไดซ์ของกรดแลคติกที่ขั้วแอนโนด และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ทางด้านแอนโนดและแคโทด ดังแผนภาพการทดลองในรูปที่ 4.17

ในการทดลองที่ผ่านมาเนื่องจากความเข้มข้นโซเดียมแลคเตทเริ่มต้นไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ดังนั้นจึงทำการป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากกระบวนการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างโดยไม่ผ่านการเจือจางเป็นสารตั้งต้น ก่อนนำสารละลายมาผ่านการคาร์บอนเนชัน และผ่านการกรอง และนำมาป้อนในเซลล์อิเล็กโทรไลซิส ที่ช่องตรงกลาง ส่วนสารละลายที่ขั้วแอนโนดและแคโทด ทำการป้อนสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร การใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพื่อให้สารละลายมีการนำไฟฟ้าในตอนเริ่มทำการทดลอง เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริกมีค่าการนำไฟฟ้าเป็น 17 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ขณะที่น้ำกลั่นมีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 11 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.17 ชุดทดลองไฟฟ้าเคมี ที่มีเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (CSE) จำนวน 2 แผ่น

ที่ด้านแอโนด น้ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะข้ามผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ไปยังช่องกลางซึ่งเป็นช่องระหว่างเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก สารละลายโซเดียมแลคเตท ที่แตกตัวเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และแลคเตทไอออน (La^-) ในช่องกลาง ไฮโดรเจนไอออนจะรวมกับแลคเตทไอออนเกิดเป็นสารละลายกรดแลคติกตรงช่องกลาง

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นช่องระหว่างเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก : $H^+ + La^- \longrightarrow HLa$

ส่วนโซเดียมไอออน (Na^+) จะผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ไปยังด้านแคโทด ที่ซึ่งน้ำเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โซเดียมไอออนจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทางด้านแคโทด

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทด : $Na^+ + OH^- \longrightarrow NaOH$

เมื่อทำการทดลองเริ่มทำการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ให้กับสารละลายในการทดลองเป็นเวลา 480 นาที พบว่าสารละลายด้านแอโนดและช่องที่ป้อนสารละลายโซเดียมแลคเตทมีค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ ส่วนสารละลายด้านแคโทดมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะเกิดการแตกตัวของน้ำเกิดไฮโดรเจนไอออน ค่าพีเอชควรจะลดลง แต่เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของสารละลายด้านแอโนดพบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่า

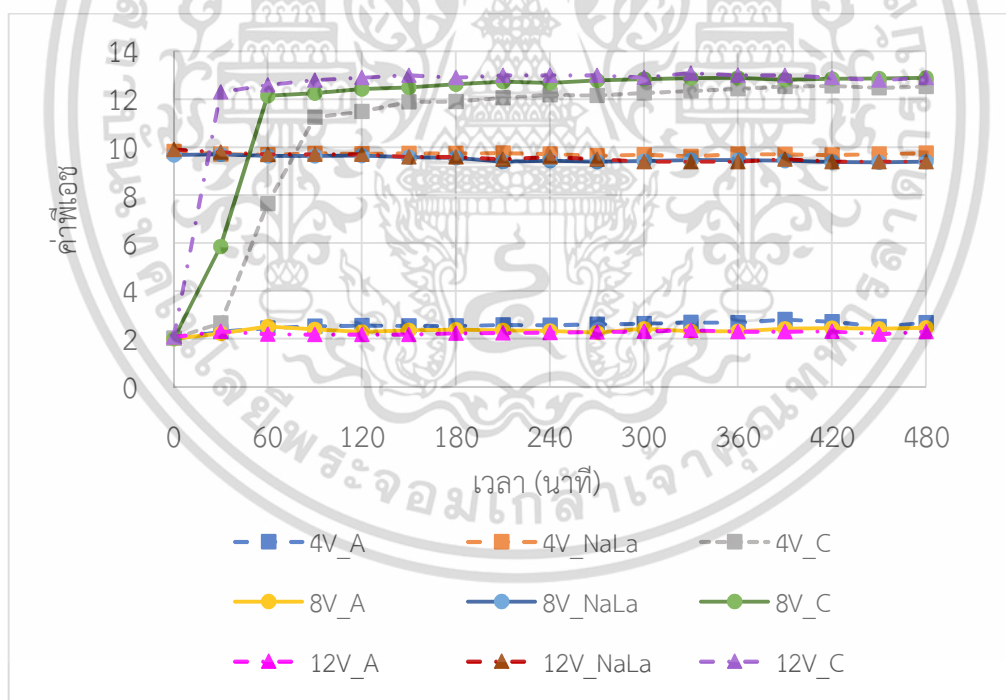
ไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นข้ามผ่านเมมเบรนไปยังช่องกลาง และเมื่อเวลาผ่านไป กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพียง 0.13 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีค่าน้อยแสดงว่าปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเกิดขึ้นน้อย ทำให้ค่าพีเอชสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง

ที่ช่องระหว่างเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก ค่าพีเอชสารละลายเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากกรดแลคติกที่เกิดขึ้นเป็นกรดอ่อน เมื่อเกิดขึ้นในสารละลายโซเดียมแลคเตทซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ จึงทำให้ค่าพีเอชสารละลายเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

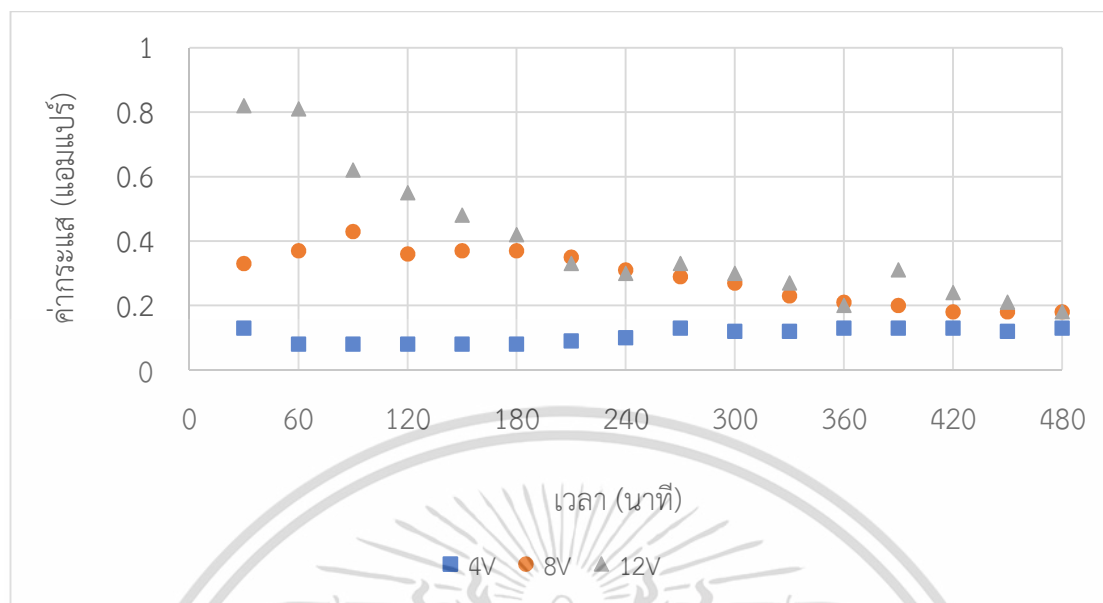
หากพิจารณาปริมาณกรดแลคติกที่น้ำจะเกิดขึ้น พบว่าเมื่อสารละลายเกลือแลคเตทที่เวลาเริ่มต้นมีความเข้มข้นประมาณ 1 โมลต่อลิตร ในสารละลาย 500 มิลลิลิตร จะประกอบด้วยแลคเตทไอออน 0.5 โมล แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกในด้านแอโนดเป็น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จึงมี H^+ คิดเป็น $0.005 \times 2 = 0.01$ โมล

ไฮโดรเจนไอออน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับแลคเตทไอออน 1 โมล ได้กรดแลคติก 1 โมล เมื่อมีไฮโดรเจนไอออนเพียง 0.01 โมล จึงทำปฏิกิริยากับแลคเตทไอออนได้เพียง 0.01 โมล ได้กรดแลคติก 0.01 โมล คิดเป็นกรดแลคติกที่สามารถเกิดขึ้น $(0.01/0.5) \times 100 = 2$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณน้อยมาก

ดังนั้นความเข้มข้นกรดแลคติกที่เกิดขึ้นนั้นน้อยมากทำให้เมื่อนำไปทำการฉีดด้วยเครื่อง HPLC จึงไม่สามารถเห็นพีคที่แสดงการเกิดกรดแลคติก ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.18 ค่าพีเอชเมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 8 และ 12 โวลต์

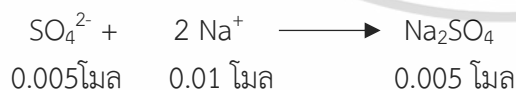


รูปที่ 4.19 ค่ากระแสเมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 8 และ 12 โวลต์



รูปที่ 4.20 โครมาโทรแกรมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอิเล็กโทรไลซิสที่เวลา 480 นาที ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์

ขณะที่ด้านแคโทดกรดซัลฟิวริกแตกตัวได้ซัลเฟตไอออน 0.005 โมล โซเดียมไอออนเมื่อผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกมายังแคโทด จะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออน เกิดเป็นโซเดียมซัลเฟต 0.005 โมล ดังสมการ



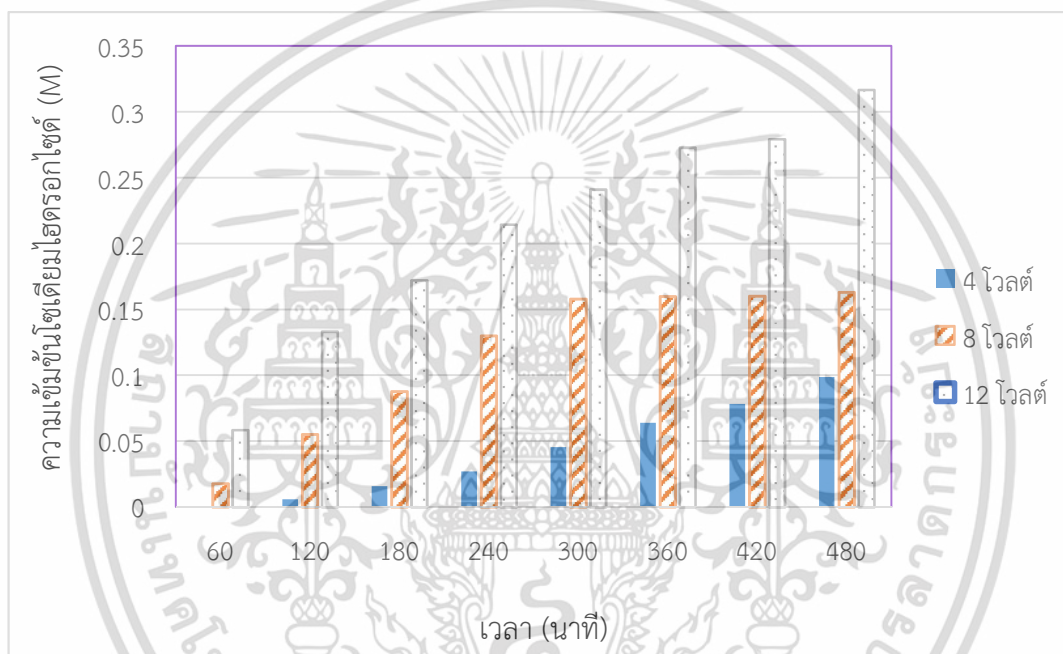
หลังจากนั้นโซเดียมไอออนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนมาจะเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอชสารละลายเพิ่มขึ้น โดยมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 11 และ 12 ที่เวลา 90 และ 210 นาที ตามลำดับ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 4 โวลต์

เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบเป็น 8 และ 12 โวลต์ พบว่าค่าพีเอชสารละลายด้านแอโนดและโซเดียมแลคเตตยังคงเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชสารละลายด้านแคโทดพบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นของค่าพีเอชเร็วขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น โดยสารละลายด้านแคโทดมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 12 ใช้เวลาเพียง 30 นาที ที่ค่าความต่างศักย์ 12 โวลต์ ผลที่ได้นี้ได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองของ Lech และ Trusek (2018) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ทำให้อัตราการเกิดอิเล็กโทรไลซิสเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาลดลง [50]

เมื่อทำการไทเทรตหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในด้านแคโทดด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าในการทดลองเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ในด้านแคโทดเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในด้านแคโทดเป็นดังรูปที่ 4.21 โดยมีค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.10 0.16 และ 0.32 โมลาร์ ที่เวลา 480 นาที



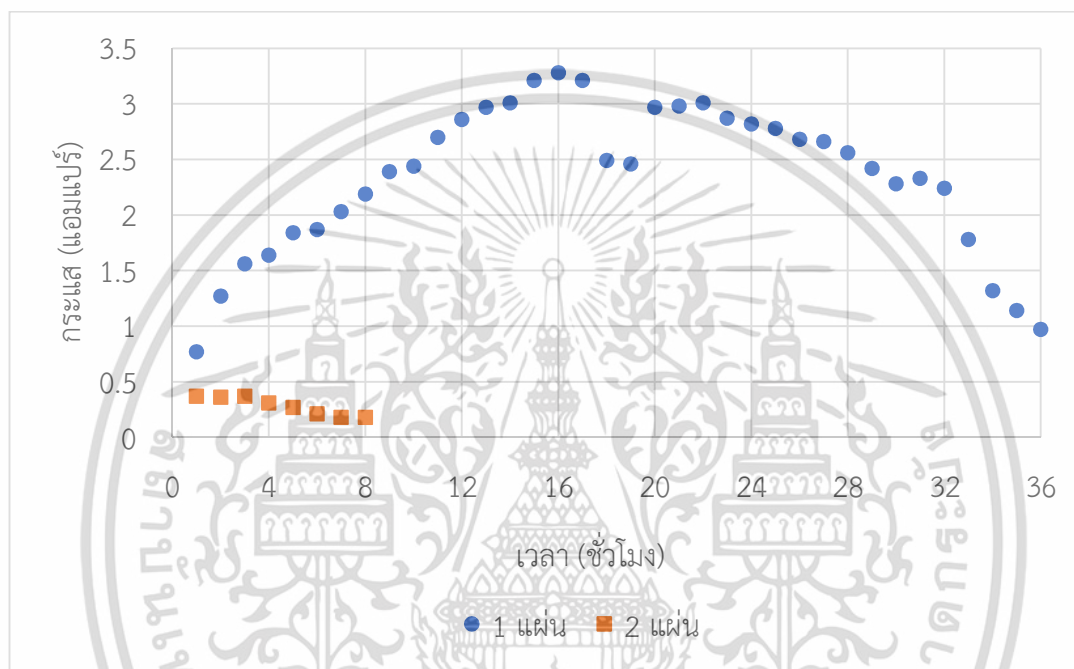
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทด เมื่อทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 4 8 และ 12 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น

สำหรับการทดลองโดยการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกจำนวน 2 แผ่น ไม่สามารถเห็นผลการเกิดกรดแลคติก ขณะที่การใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบ 1 แผ่น สามารถได้คืนกลับกรดแลคติก ที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติต่างกัน เช่น ความหนา และความต้านทานเยื่อแลกเปลี่ยนประจุทั้งสองแตกต่างกัน และเยื่อแลกเปลี่ยนที่ใช้สำหรับการทดลองแบบ 1 แผ่น เป็นเยื่อที่มีความจำเพาะยอมให้โซเดียมไอออนผ่านได้มากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นชุดการทดลองที่แตกต่างกัน การใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นในระบบมากกว่า โดยที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์ ค่ากระแสที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น มีค่ากระแสในระบบต่ำกว่าเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น แสดงว่าความต้านทานในระบบของเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น สูงกว่าส่งผลให้ยังไม่พบการเกิดกรดแลคติก แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น สามารถได้คืนกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเพื่อการได้คืนกลับกรดแลคติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรปรับปรุงชุดทดลอง และเลือกศึกษาใช้เมมเบรนชนิดอื่น เช่น ไบโพลาร์ และศึกษาความเข้มข้นสารละลายด้านอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มการได้คืนกลับกรดแลคติกต่อไป

อย่างไรก็ตามการอิเล็กโทรไลซิส ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก สามารถช่วยให้เกิดการคืนกลับกรดแลคติก โดยได้กรดแลคติกกลับคืนมาถึง 40-50 เปอร์เซ็นต์ วิธีการนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยนำกลับคืนโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดแลคติกได้ จึงเป็นวิธีการที่ควรจะถูกนำพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการคืนกลับกรดแลคติกต่อไป



รูปที่ 4.22 ค่ากระแสการอิเล็กโทรไลซิสด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 และ 2 แผ่น ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในการผลิตกรดแลคติกด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างแบบเคมีแบทช์ มีปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้กรดแลคติก คือ ค่าความเข้มข้นต่าง อุณหภูมิ โดยค่าความเข้มข้นต่างซึ่งต้องใช้ความเข้มข้นสูง และน้ำตาลที่ใช้ต้องมีความเข้มข้นต่ำ ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรสูงเกิน 90 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือที่ 70 องศาเซลเซียส สำหรับระยะเวลาการเติมมีผลน้อยในช่วงความเข้มข้นต่างที่ทำการศึกษา การย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างนี้ปฏิกิริยาคายความร้อน การใช้ระบบเคมีแบทช์จึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งกับปฏิกิริยาการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง และจำเป็นอย่างยิ่งเมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นสูง

สำหรับการเปลี่ยนโซเดียมแลคเตทเป็นกรดแลคติกด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลซิสสามารถทำได้ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น โดยให้ร้อยละการคืนกลับกรดแลคติกประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.9 โมลาร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงชุดทดลองอิเล็กโทรไลซิส เช่น ทำการทดลองโดยใช้ชุดเมมเบรนหลายๆ รูปแบบ เช่น การใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกสลับกับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ, การใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก เยื่อแลกเปลี่ยนประจุลบ และเยื่อแลกเปลี่ยนแบบไบโพลาร์ร่วมกัน
2. ศึกษาความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรด สำหรับการทดลองอิเล็กโทรไลซิสเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] “Lactic acid market.” [Online]. Available :
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lactic-acid-and-poly-lactic-acid-market>. 7 February 2014.
- [2] Abdel-Rahman M.A., Tashiro Y. and Sonomoto K. “Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation process” **Biotech Advances.**, vol.31, 2013. Pp. 877-902
- [3] Ye L.Z., Hudari M.S.B., Li Z., and Wu J.C. “Highly efficient production of L-lactic acid from xylose by newly isolated *Bacillus coagulans* C106” **Bioresource Technology**, vol.131, 2013. Pp.38-44
- [4] Byuag Y. and Yang R.M. “Alkaline degradation of fructofuranosides” **Carbohydrate research**, vol.280, 1996. Pp.47-57
- [5] Xiuyi Y., Jin F., Tohji K., Kishita A. and Enomoto H. “Hydrothermal conversion of carbohydrate biomass to lactic acid” **AICHE J.**, vol.56, no.10, 2010. Pp.2727-2733
- [6] Gao P., Li G., Yang F., Lv X., Fan H., Meng L. and Yu X. “Preparation of lactic acid formic acid and acetic acid from cotton cellulose by alkaline pre-treatment and hydrothermal degradation” **Industrial Crops and Products**, vol.48, 2013. Pp.61-67
- [7] Bicker M., Endres S., Ott L. and Vogel H. “Catalytic conversion of carbohydrates in subcritical water: A new chemical process for lactic acid production” **J.of Molecular Catalyss A: Chemical.**, vol.239, 2005. Pp.151-157
- [8] ภัทรพล นามทอง, ประสงค์ วงศ์วิชา และสมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, “การเพิ่มความบริสุทธิ์กรดแลคติกจากน้ำหมักกากน้ำตาลด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันและกระบวนการไฮโดรไลซิส” **วารสารนเรศวร**, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2, 2012. หน้า 27-32
- [9] Komesu A., Regina M., Maciel W. and Filho R.M. “Separation and purification technologies for lactic acid-A brief review” **BioResource**, vol.12, no.3. 2017. Pp.6885-6901.
- [10] Arnold E. Stutz. **Glycoscience: epimerization, isomerization and rearrangement reactions of carbohydrates.** 1st edition: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2001.
- [11] สมพร เพ็ลนใจ. เคมีอินทรีย์ 1. กรุงเทพมหานคร. 2552.
- [12] Jerry March. **Advanced organic chemistry.** 3rd editions: New York : John Wiley. 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Selman S. and Eastham J.F. “Benzilic acid and related rearrangement” **Q. Rev. Chem. Soc.** vol.14, no.3. 1960. Pp.221-235.
- [14] “Benzillic rearrangement.” [Online]. Available :
<https://www.organic-chemistry.org/namedreactions/benzilic-acid-rearrangement.shtml>. 7 February 2014.
- [15] “Tautomerization.” [Online]. Available :
<https://www.clutchprep.com/organic-chemistry/tautomerization> . 7 February 2014.
- [16] “Cannizaro reaction.” [Online]. Available :
<http://tamagozilla.blogspot.com/2015/10/aldol-condensation-cannizzaro-reaction.html>. 11 March 2014.
- [17] Gibbs M. “On the mechanism of the chemical formation of lactic acid from glucose studied with C14 labeled glucose” **J. Am. Chem. Soc.** vol.72, no.9. 1950. Pp. 3964-3965.
- [18] de Bruijn J.M., Kieboom A.P.G. and Bekkum H.v. “Alkaline degradation of monosaccharides III. Influence of reaction parameters upon the final product composition” **Recl. Trav. Chim. Pays-Bas**, vol.105, 1986. Pp.176-183.
- [19] Manas M.G., Campos J., Sharninghausen L.S., Lin E. and Crabtree R.H. “Selective catalytic oxidation of sugar alcohols to lactic acid. **Green Chemistry**, vol.17, 2015. Pp.594-600.
- [20] สุขใจ ชูจันทร์. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.
- [21] Narayanan N., Roychoudhury P.K. and Srivastava A. “L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization” **Electronic Journal of Biotechnology**, vol.7, 2004. Pp.167-179.
- [22] Dotta R. and Henry M. “Lactic acid : recent advances in products, processes and technologies- a review” **J. of Chemical Technology Biotechnol**, vol.81, 2006. Pp.1119-1129.
- [23] Laopaiboon P., Thani A., Leelavatcharamas V., Laopaiboon L. “Acid hydrolysis of sugarcane bagasse for lactic acid production” **Bioresource Technology**, vol.101, 2010. Pp. 1036-1043.

- [24] Oonkhanonda B., Jonglertjunyaa W., Srimaruta N., Bunpacharta P., Tantinukula S., Nasonglab N. and Sakdaronnarong C. “Lactic acid production from sugarcane bagasse by an integrated system of lignocellulose fractionation, saccharification, fermentation, and ex-situ nanofiltration” **Journal of Environmental Chemical Engineering**, vol.5, 2017. Pp.2533-2541
- [25] Ou M.S., Ingram L.O. and Shanmugam K.T. “L-(+) lactic acid production from non-food carbohydrates by thermolerant *Bacillus coagulans*” **J. Ind Microbial Biotechnol**, vol.38, 2011. Pp.599-605
- [26] Chena H., Chena B., Sub Z., Wanga K., Wanga B., Wanga Y., Sia Z., Wua Y., Caia D. and Qin P. “Efficient lactic acid production from cassava bagasse by mixed culture of *Bacillus coagulans* and *Lactobacillus rhamnosus* using stepwise pH controlled simultaneous saccharification and co-fermentation” **Industrial crops and products**, vol.146, 2020. Pp.1-7
- [27] Yin H., Yin H., Wang A. and Shen L. “Catalytic conversion of glycerol to lactic acid over graphite-supported nickel nanoparticles and reaction kinetics” **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, vol.57, 2018. Pp.226-235.
- [28] Li K.-T., Li J.-Y., Li H.-H. “Conversion of glycerol to lactic acid over Cu–Zn–Al and Cu–Cr catalysts in alkaline solution” **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, vol.79, 2017. Pp.74-79
- [29] Yan X., Jin F., Tohji K., Kishita A. and Enomoto H. “Hydrothermal Conversion of Carbohydrate Biomass to Lactic Acid” **AICHE J.**, vol.56, 2010. Pp.2727-2733.
- [30] Yang Y.B. and Montgomery R. “Alkaline degradation of glucose: effect of initial concentration of reactants” **Carbohydrate research**, vol.280, 1996. Pp.27-45.
- [31] Niemeli K. and Sjostrom E. “The Conversion of Cellulose into Carboxylic Acids by a Drastic Alkali Treatment” **Biomass**, vol.11. 1986, Pp.215-221.
- [32] Niemeli K. “Conversion of xylan, starch, and chitin into carboxylic acids by treatment with alkali” **Carbohydrate research**, vol.204, 1990. Pp.37-49.
- [33] Shapper P.A. and Friedemann T. “Sugar activation by alkali I. formation of lactic and saccharinic acids” **Journal of Biological Chemistry**, vol.86, 1930. Pp.345-374
- [34] วรินทร์ มังกรศรี. “การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ในสารละลายต่าง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [35] Yang B.Y. and Montgomery R. “Alkaline degradation of invert sugar from molasses” **Bioresource Technology**, vol.98, 2007. Pp.3084-3089

- [36] “caustic soda enthalpy.” [Online]. Available :
<https://www.oxy.com/ourbusinesses/chemicals/products/documents/causticsoda/caustic.pdf>. 16 January 2014.
- [37] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพฑูริย์. **การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 2551.
- [38] Komesu A., Maciel M.R.W. and Filho R.M. “Central composite experimental design applied to evaluate the lactic acid concentration by short path evaporation” **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, vol.117, 2017. Pp.89-94
- [39] de Lima C.J.B., Coelho L.F. and Contiero J. “The Use of Response Surface Methodology in Optimization of Lactic Acid Production: Focus on Medium Supplementation, Temperature and pH Control” **Food Technol. Biotechnol.**, vol.48, no.2. 2010. Pp.175–181
- [40] Sun X., Wang Q., Zhao W., Ma H. and Sakata K. “Extraction and purification of lactic acid from fermentation broth by esterification and hydrolysis method” **Separation and Purification Technology**, vol.49, 2006. Pp.43–48
- [41] ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย, โครงการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวเคมีที่ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบต้นน้ำ. 2550.
- [42] Udachan I.S. and Sahoo A.K. “A Study of parameters affecting the solvent extraction of lactic acid from fermentation broth”, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, vol.31, no.3. 2014. Pp.821-827
- [43] Kumar S., Yadav N., Nain L. and Khare S.K. “A simple downstream processing protocol for the recovery of lactic acid from the fermentation broth” **Bioresource Technology**, vol.318, 2020. 124260
- [44] วิทย์ สุนทรนันท์. “การศึกษาเทคนิคใหม่ในการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรไลซิส.” โครงการวิจัยเลขที่ 154-CHEM-2541
 ทูลส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [45] พงษ์พิศณู เมืองเจริญ. “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเยื่อแลกเปลี่ยนประจุ” **บทความศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**, กรกฎาคม- กันยายน. 2552. หน้า 47-50
- [46] Guvenc A. and Karabacakoglu B. “Use of electrodialysis to remove silver ions from model solutions and wastewater” **Desalination**, vol.172, 2005. Pp.7-17
- [47] ชุติมา ศรีวิบูลย์. **เคมีวิเคราะห์ 2**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2539.

- [48] Krol J.J. Ion exchange membrane. Mass transfer limitation. 1997. Print available from [www.membrane.nl/serve/these/john_krol THESIS_john_k.pdf](http://www.membrane.nl/serve/these/john_krol%20THESIS_john_k.pdf) อ้างอิงจาก วาซิณี บุญคง. “การแยกกรดแลคติกจากน้ำหมักโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและอิเล็กโทรไดออลิซิส” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.
- [49] Ryu H-W., Kim Y-M. and Wee Y-J. “Influence of Operating Parameters on Concentration and Purification of L-lactic Acid Using Electrodialysis” **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, vol.17, 2012. Pp.1261-1269
- [50] Lech M. and Trusek A. “Batch electrodialysis of lactic acid obtained from LAB fermentation” **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, vol.17, 2012. Pp.12611-1269
- [51] Boonkong W., Sangvanich P., Petsom A. and Thongchul N. “Comparison of an Ion Exchanger and an In-House Electrodialysis Unit for Recovery of L-Lactic Acid from Fungal Fermentation Broth” **Chemical Engineering Technology**, vol.32, 2009. Pp.1542-1549
- [52] 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.
- [53] Kim Y.H. and Moon S-H. “Lactic acid recovery from fermentation broth using one-stage electrodialysis” **J. Chemical Technology and Biotechnology**, vol.76, 2001. Pp. 169-178
- [54] Lee E.G., Moon S-H., Chang Y.K., Yoo I-K. and Chang H.N. “Lactic acid recovery using two-stage electrodialysis and its modelling” **J. of Membrane Science**, vol.145, 1998. Pp.53-66.
- [55] Wee Y-J., Yun J-S., Lee Y.Y., Zeng A-P and Ryu H-W. “Recovery of Lactic Acid by Repeated Batch Electrodialysis and Lactic Acid Production Using Electrodialysis Wastewater” **J.of Bioscience and Bioengineering.**, vol.99, no.2. 2015. Pp.104-108
- [56] Handojo L., Wardani A.K., Regina D., Bella C., Kresnowati and Wenten G. “Electro-membrane processes for organic acid recovery” **Royal Society of Chemistry Advances.**, vol.9, 2019. Pp.7854-7869
- [57] Komesu A., Maciel M.R.W., Oliveira J.A.R., Martins L.H.S. and Filho R.M. “Purification of Lactic Acid Produced by Fermentation: Focus on Non-traditional Distillation Processes” **Separation and Purification Reviews.**, vol.46, 2017. Pp.241-257.

- [58] Pletcher D. and Walsh F.C. A. **Industrial electrochemistry**. London : Chapman & Hall. 1993.
- [59] ชันทอง สุนทรภา. **เทคโนโลยีเมมเบรน**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [60] ณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล. “การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [61] Yang B.Y. and Montgomery R. “Alkaline degradation of invert sugar from molasses” **Bioresource Technology**, vol.98, 2007. Pp.3084-3089.
- [62] “proportion bicarbonate.” [Online]. Available ; <https://microscopesandmonsters.wordpress.com/tag/chemistry/>. 14 February 2014
- [63] “solubility sodium bicarbonate” [Online]. Available <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> 14 February 2014
- [64] Miller G.L. “Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar” **Analytical Chemistry**, vol.31, no.3. 1959. Pp.426-428



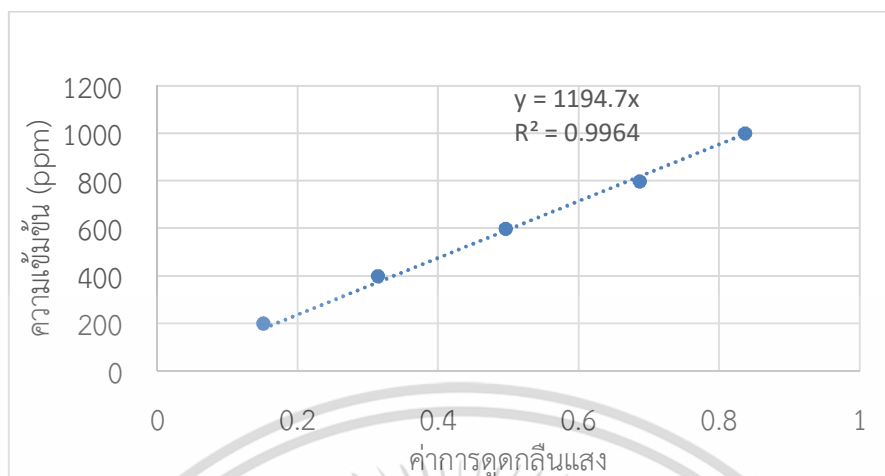
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส

1. การเตรียมสารละลาย DNSA [64]
 - 1.1 ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้ละลายเข้ากันจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
 - 1.2 ชั่งไดโนโตรซาลิซิลิกแอซิด 2.5 กรัม ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 มิลลิลิตร จากข้อ 1.1 คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
 - 1.3 ชั่งโซเดียมโพแทสเซียมทาเทรต 75 กรัม ใส่ลงในสารละลายข้อ 1.2 เติมน้ำกลั่นให้ได้ ปริมาตรสุดท้ายเป็น 250 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เก็บสารละลาย DNSA นี้ไว้ในขวดสีน้ำตาลเพื่อไม่ให้เสียสภาพ
2. การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส
 - 2.1 ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้น 100 250 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ลงในหลอดทดลอง 4 หลอด หลอดละ 1 ความเข้มข้น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเตรียม blank โดยใช้ น้ำเปล่า ปริมาตร 1 มิลลิลิตร 1 หลอด
 - 2.2 ปิเปตสารละลาย DNSA ลงในหลอดทดลองจากข้อ 2.1 หลอดละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารในหลอดทดลองให้เป็นเนื้อเดียวกัน
 - 2.3 ปิดฝาของหลอดทดลองด้วยลูกแก้วเพื่อป้องกันการระเหย แล้วนำหลอดทดลองไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที
 - 2.4 นำสารละลายที่ผ่านการต้มแล้วมาแช่ในน้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองทุกหลอด เขย่าให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน
 - 2.5 นำสารละลายในหลอดทดลองทุกหลอดมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำเปล่า ในสารละลาย DNSA เป็น Blank จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสแต่ละความเข้มข้น
 - 2.6 สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานน้ำตาลรีดิวซ์

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง
 - 3.1 เก็บตัวอย่างหลังจากทำปฏิกิริยาที่เวลาต่าง ๆ ของแต่ละการทดลอง
 - 3.2 นำตัวอย่างที่เก็บได้มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงของสารที่มีความเข้มข้นสูงเกินกว่านี้ได้
 - 3.3 ปิเปตสารละลายตัวอย่างความเข้มข้นที่เจือจางแล้วจากข้อ 3.2 ลงในหลอดทดลองแต่ละหลอด ปริมาณหลอดละ 1 มิลลิลิตร และน้ำเปล่าปริมาตร 1 มิลลิลิตร 1 หลอด เพื่อใช้เป็น Blank
 - 3.4 ปิเปตสารละลาย DNSA ลงในหลอดทดลองทุกหลอด หลอดละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารในหลอดทดลองให้เป็นเนื้อเดียวกัน
 - 3.5 ปิดฝาของหลอดทดลองด้วยลูกแก้วเพื่อป้องกันการระเหย แล้วนำหลอดทดลองไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที
 - 6) นำสารละลายที่ผ่านการต้มแล้วมาแช่ในน้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองทุกหลอด เขย่าให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน
 - 7) นำสารละลายในหลอดทดลองทุกหลอดมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยใช้น้ำเปล่าในสารละลาย DNSA เป็น Blank บันทึกค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง
 - 8) นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแต่ละหลอดที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ได้ เพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นกลูโคส

4. การคำนวณค่าคอนเวอร์ชันน้ำตาลกลูโคส

$$\%conversion = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}$$

โดย C_{A0} คือ ปริมาณกลูโคสที่เวลาเริ่มต้น

C_A คือ ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์กรดแลคติก

1. วิธีการวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกของสารละลายตัวอย่าง
 - 1.1 เก็บตัวอย่างหลังเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่าง ๆ
 - 1.2 นำตัวอย่างที่เก็บได้มาเจือจางเพื่อความเข้มข้นไม่เกินค่าในกราฟมาตรฐาน ค่อยๆ ทำการเติมกรดซัลฟิวริก จนกระทั่งได้พีเอชประมาณ 2-2.5 เพื่อเปลี่ยนจากผลิตภัณฑ์เกลือโซเดียมแลคเตตเป็นกรดแลคติก
 - 1.3 นำสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์มากรองด้วยที่กรองสารสำหรับเข็มฉีดยา (Syringe filter) และนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC
 - 1.4 จดบันทึกพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมของกรดแลคติก
 - 1.5 นำพื้นที่ที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติก
 - 1.6 คำนวณค่าผลได้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติก

2. การคำนวณค่าผลได้ของกรดแลคติก คำนวณได้ตั้งสมการสมการการคำนวณค่าผลได้ของกรดแลคติก

$$\%yield = \frac{C_{La}}{C_{A0}} \times 100$$

โดย C_{A0} คือปริมาณของน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_{La} คือปริมาณของกรดแลคติกที่เกิดขึ้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3. ร้อยละกรดแลคติกที่น่ากลับได้

$$Recovery (\%) = \frac{C_{LA}}{C_{NaLA}} \times 100$$

เมื่อ C_{LA} คือ ความเข้มข้นกรดแลคติกที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (โมลต่อลิตร)
 C_{NaLA} คือ ความเข้มข้นโซเดียมแลคเตตเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ร้อยละผลได้และเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันจากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	50 องศาเซลเซียส		70 องศาเซลเซียส	
	ร้อยละผลได้ (%)	%conversion	ร้อยละผลได้ (%)	%conversion
10	16.1	17.4	50.5	88.6
30	32.7	72.7	52.6	95.5
60	45.3	92.8	51.3	96.8
120	57.2	95.4	52.3	96.4
240	57.4	97.4	54.8	97.4
360	57.0	97.7	51.3	97.2
480	59.5	97.7	55.3	97.4

ตารางที่ ค.2 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบแบตช์และเซมิแบตช์ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

ร้อยละผลได้กรดแลคติก (%)					
เวลา (ชั่วโมง)	แบตช์		เวลา (ชั่วโมง)	เซมิแบตช์	
	50 °C	70 °C		50 °C	70 °C
2	57.2	52.3	8.3	64.5	72.3
4	57.4	54.8	10	67.5	71.9
6	59.5	55.3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาล เริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น ต่างๆ ในระบบเซมิแบทช์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ร้อยละผลได้กรดแลคติก (%)				
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)			
	3.5	5.5	8.5	10.2
8.3	48.1	60.5	64.5	70.2
10	50.3	64.8	67.5	73.0
24	51.7	65.00	69.8	73.4

ตารางที่ ค.4 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาล เริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบเซมิแบทช์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ร้อยละผลได้กรดแลคติก (%)				
เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	30	50	70	90
10	43.8	67.5	71.9	65.7
24	62.8	69.7	71.6	67.1

ตารางที่ ค.5 ร้อยละผลได้กรดแลคติกที่ได้จากการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ความเข้มข้นน้ำตาล เริ่มต้น 30 45 และ 70 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในระบบเซมิแบทช์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ร้อยละผลได้กรดแลคติก (%)			
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำตาล (% น้ำหนักต่อปริมาตร)		
	30	45	70
8.3	64.5	60.9	62.4
10	67.5	65.9	64.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ร้อยละผลได้คีนกลักรดแลคติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 4 6 และ 8 โวลต์

ความเข้มข้น (mo/L)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ร้อยละผลได้คีนกลักรดแลคติก (%)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ (M)
0.75	4	55.5	0.802
	6	51.7	0.869
	8	48.6	0.907
1.5	8	40.5	1.960

ตารางที่ ค.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ เมื่อใช้ความเข้มข้นโซเดียมแลคเตท 0.75 และ 1.5 โมลต่อลิตร และใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 แผ่น ที่ความต่างศักย์ 8 โวลต์

เวลา (ชั่วโมง)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้ (M)	
	0.75 M	1.5 M
0	0.001	0.001
2	0.052	0.040
4	0.136	0.112
6	0.260	0.214
8	0.414	0.305
10	0.540	0.419
12	0.633	0.536
14	0.728	0.695
16	0.847	0.848
18	0.907	1.086
20		1.124
22		1.276
24		1.433
26		1.562
28		1.647
30		1.776
32		1.819
34		1.952
36		1.962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ
สารละลายโซเดียมแลคเตท ที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น

เวลา (นาท)	สารละลายด้านแอโนด (+)		สารละลาย โซเดียมแลคเตท		สารละลายด้านแคโทด (-)		กระแส (A)
	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	
0	2.02	16.88	9.82	>200	2.02	16.88	
30	2.3	9.32	9.71	195.40	2.66	7.80	0.13
60	2.45	6.90	9.69	205.70	7.64	6.10	0.08
90	2.53	7.02	9.74	200.50	11.25	9.13	0.08
120	2.55	7.68	9.73	207.50	11.49	10.90	0.08
150	2.54	6.98	9.74	196.00	11.89	14.86	0.08
180	2.54	7.23	9.74	206.60	11.91	17.71	0.08
210	2.58	8.03	9.75	195.60	12.06	20.40	0.09
240	2.57	8.04	9.71	181.20	12.19	27.80	0.10
270	2.61	7.65	9.65	172.40	12.16	33.00	0.13
300	2.63	7.88	9.69	181.40	12.26	34.90	0.12
330	2.69	7.05	9.62	169.40	12.35	42.40	0.12
360	2.68	7.37	9.71	168.40	12.44	49.80	0.13
390	2.81	7.34	9.70	192.10	12.53	58.60	0.13
420	2.71	7.80	9.68	167.40	12.56	55.40	0.13
450	2.51	8.19	9.71	191.50	12.48	59.30	0.12
480	2.67	8.34	9.75	96.50	12.53	65.60	0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ
สารละลายโซเดียมแลคเตท ที่ศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น

เวลา (นาท)	สารละลายด้านแอโนด (+)		สารละลาย โซเดียมแลคเตท		สารละลายด้านแคโทด (-)		กระแส (A)
	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	
0	2.01	13.67	9.68	180.50	2.01	13.67	
30	2.22	9.73	9.70	182.60	5.85	7.74	0.33
60	2.51	9.25	9.64	187.00	12.14	15.46	0.37
90	2.4	9.04	9.64	>200	12.25	29.40	0.43
120	2.29	8.92	9.65	163.50	12.42	31.40	0.36
150	2.35	8.83	9.58	175.60	12.49	51.40	0.37
180	2.38	8.81	9.56	190.30	12.62	62.60	0.37
210	2.36	8.74	9.40	184.60	12.73	73.05	0.35
240	2.33	8.13	9.43	193.80	12.68	93.50	0.31
270	2.26	8.32	9.39	171.50	12.79	93.90	0.29
300	2.42	7.03	9.42	175.80	12.84	96.30	0.27
330	2.31	7.60	9.46	>200	12.88	107.40	0.23
360	2.31	8.18	9.46	180.80	12.89	114.70	0.21
390	2.42	7.37	9.43	195.00	12.81	121.5	0.2
420	2.45	6.83	9.38	187.50	12.85	132.00	0.18
450	2.42	6.38	9.37	193.70	12.87	137.90	0.18
480	2.46	7.60	9.39	181.20	12.89	139.30	0.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ
สารละลายโซเดียมแลคเตท ที่ศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น

เวลา (นาท)	สารละลายด้านแอนไอออน (+)		สารละลาย โซเดียมแลคเตท		สารละลายด้านแคโทด (-)		กระแส (A)
	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	
0	2.08	10.97	9.90	175.3	2.08	10.97	
30	2.32	4.78	9.80	179.1	12.30	20.9	0.82
60	2.19	5.57	9.70	172.1	12.60	44.3	0.81
90	2.18	6.73	9.70	>200	12.80	60.8	0.62
120	2.18	7.38	9.70	>200	12.90	94.54	0.55
150	2.18	7.18	9.60	176.3	13.00	93.7	0.48
180	2.24	6.01	9.60	159.8	12.90	99.2	0.42
210	2.25	7.52	9.50	159.7	13.00	105.6	0.33
240	2.26	7.72	9.60	160.01	13.00	113.9	0.30
270	2.29	7.32	9.50	125.9	13.00	127.4	0.33
300	2.32	6.18	9.40	153.2	12.90	140.8	0.30
330	2.36	6.01	9.40	173.3	13.10	146.8	0.27
360	2.30	6.85	9.40	169.5	13.00	157.8	0.20
390	2.30	6.79	9.50	174.6	13.00	149.8	0.31
420	2.31	7.21	9.40	173.4	12.90	148.4	0.24
450	2.20	6.67	9.40	172.9	12.80	150.07	0.21
480	2.30	6.59	9.40	170	12.90	148.4	0.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรด 0.01 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้า 4 8 และ 12 โวลต์ ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้เยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)		
	4 โวลต์	8 โวลต์	12 โวลต์
60	0.0006	0.0179	0.0584
120	0.0058	0.0552	0.1331
180	0.0159	0.0877	0.1721
240	0.0269	0.1299	0.2143
300	0.0455	0.1578	0.2409
360	0.0640	0.1599	0.2727
420	0.0782	0.1600	0.2792
480	0.0987	0.1630	0.3166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 และ 2 แผ่น ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์

เวลา (ชั่วโมง)	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	
	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 1 แผ่น	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น
1	0.77	0.37
2	1.27	0.36
3	1.56	0.37
4	1.64	0.31
5	1.84	0.27
6	1.87	0.21
7	2.03	0.18
8	2.19	0.18
9	2.39	
10	2.44	
11	2.70	
12	2.86	
13	2.97	
14	3.01	
15	3.21	
16	3.28	
17	3.21	
18	2.49	
19	2.46	
20	2.97	
21	2.98	
22	3.01	
23	2.87	
24	2.82	
25	2.78	
26	2.68	
27	2.66	
28	2.56	
29	2.42	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 1 และ 2 แผ่น ที่ค่าความต่างศักย์ 8 โวลต์ (ต่อ)

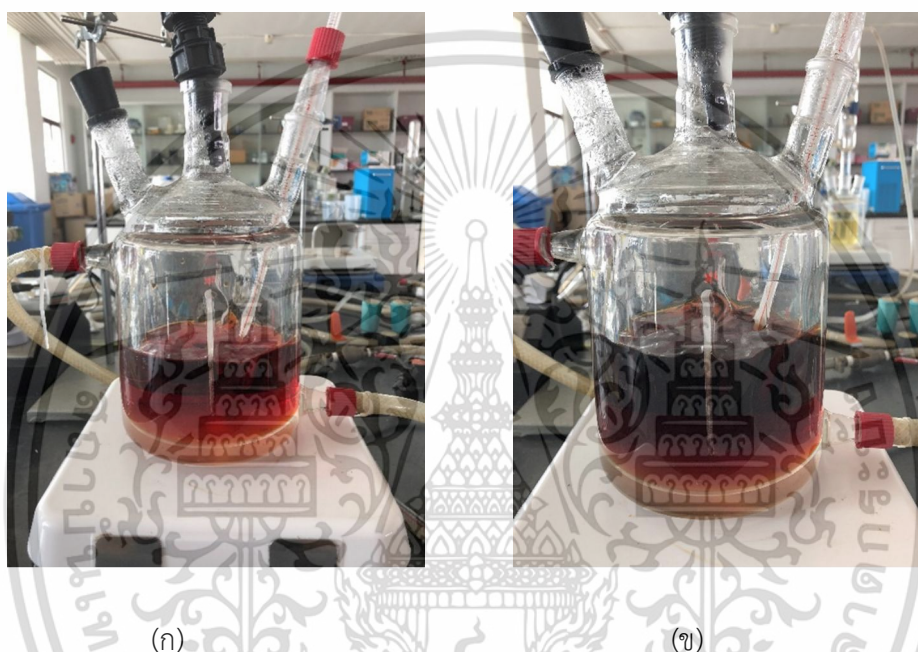
เวลา (ชั่วโมง)	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	
	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 1 แผ่น	เยื่อแลกเปลี่ยนประจุ 2 แผ่น
30	2.28	
31	2.33	
32	2.24	
33	1.78	
34	1.32	
35	1.14	
36	0.97	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ภาพการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมแลคเตทที่ผลิตด้วยการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่าง ที่ความเข้มข้นน้ำตาล 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบ เซมิแบทช์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ ง.1 การเกิดปฏิกิริยาการย่อยน้ำตาลอินเวอร์ทด้วยต่างแบบเซมิแบทช์ ของสารละลายน้ำตาลเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.5 โมลต่อลิตร ในระบบ เซมิแบทช์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา (ก) 2 ชั่วโมง และ (ข) 8 ชั่วโมง

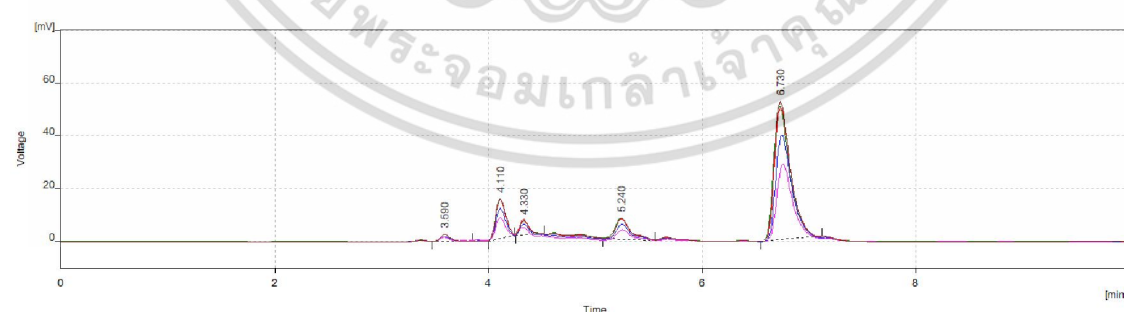
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเกิดฟองแก๊สในการอิเล็กโทรไลซิสสารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก 2 แผ่น



รูปที่ ๓.2 การเกิดฟองแก๊สระหว่างการอิเล็กโทรไลซิส สารละลายโซเดียมแลคเตทที่ได้จากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง

3. ลักษณะโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลอินเวอร์ต์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบแบทช์ ที่เวลา 10, 60, 120, 240 และ 480 นาที



รูปที่ ๓.3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อน้ำตาลอินเวอร์ต์ด้วยต่าง ระหว่างน้ำตาลอินเวอร์ต์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบแบทช์ ที่เวลา 10, 60, 120, 240 และ 480 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวรินลดา สิริแสงสว่าง
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤศจิกายน 2518 ที่จังหวัดสมุทรสาคร
ที่อยู่	88/167 หมู่บ้านวรารมย์-สายไหม ถนนสายไหม แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพฯ 10200
ประวัติการศึกษา	2540 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2543 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2543-2547	ผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ.2547-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้