อิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก

นางสาวเรณินทร์ สุขสุชะโน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547
ISBN 974-17-6107-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTRODIALYSIS FOR SEPARATION OF CITRIC ACID FROM FERMENTATION BROTH

Miss Ranin Suksuchano

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Biotechnology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6107-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก
โดย	นางสาวเรณินทร์ สุขสุชะโน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพัฒน์ เจริญพรวัฒนา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรณินทร์ สุขสุชะโน : อิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก (ELECTRODIALYSIS FOR SEPARATION OF CITRIC ACID FROM FERMENTATION BROTH) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. นลิน นิลอุบล , 117 หน้า. ISBN 974-17-6107-4

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสและหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อเป็นแนวทางในการนำกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสมาใช้ควบคู่กับการหมักเพื่อเพิ่มผลผลิต โดยสร้างโมดูลระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีพื้นที่การใช้งานของเยื่อแผ่น 0.0035 ตารางเมตร ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารป้อน ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมัก ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลายและอุณหภูมิของระบบ พบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกกรดมะนาว ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวต่อน้ำหมักโซเดียม - ซิเตรทเป็น 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 40 กรัมต่อลิตร และน้ำหมักโซเดียม - ซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 โดยใช้ภาวะในการแยกที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ อัตราการไหลในหน่วยปริมาตรสัมพัทธ์เทียบกับปริมาตรจุในโมดูล 15.86 ต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิของระบบ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ได้ฟลักซ์ซิเตรท 0.88×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตร.วินาที โดยมีประสิทธิภาพในการแยกกรดมะนาว 3.77×10^{-3} กรัมต่อคูลอมบ์และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาวเท่ากับ 5.64 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม โดยข้อจำกัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส คือ การเกิด concentration polarization และ kinetic polarization ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง นอกจากนี้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอิเล็กโทร - ไดแอลิซิสมาใช้ควบคู่กับการหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตรเพื่อเพิ่มผลผลิต ซึ่งมีการดึงน้ำหมักออกจากถังหมักแล้วจึงแยกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แยกได้จะถูกป้อนกลับเข้าไปในถังหมักเพื่อควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง ส่วนน้ำหมักที่ผ่านอิเล็กโทรไดแอลิซิสนั้นถูกป้อนกลับเข้าไปยังถังหมักซึ่งมีการเติมน้ำตาลกลูโคสลงไปด้วย แต่พบว่าอิเล็กโทรไดแอลิซิสไม่สามารถรักษาอัตราการผลิตกรดมะนาวให้อยู่ในระดับสูงได้ เนื่องจากโมดูลและพื้นที่การใช้งานของเยื่อแผ่นมีขนาดเล็กไปจึงทำให้อัตราการแยกและอัตราการผลิตไม่สัมพันธ์กัน

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีชีวภาพ.....
ปีการศึกษา.....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4372535723 : MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEY WORD : ELECTRODIALYSIS / ION EXCHANGE MEMBRANE / CITRIC ACID SEPARATION RANIN SUKSUCHANO: ELECTRODIALYSIS FOR SEPARATION OF CITRIC ACID FROM FERMENTATION BROTH. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SURAPONG NAVANKASATTUSAS, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. MANA SRIYUDTHSAK, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. NALINE NILUBOL, Ph.D. 117 pp. ISBN 974-17-6107-4

The purpose of this research was to study the effect of variables on the performance of electrodialysis process for separation of citric acid from fermentation broth and to optimize operating conditions for increasing product from fermentation. A laboratory scale module with an effective membrane area of 0.0035 m^2 was built. The variables studied were the feed concentration, the pH of fermentation broth, the electrical voltage across the electrodialysis cells, the feed flow rate and the temperature of the system. The optimal operating conditions for this process were concentration ratio of citric acid to sodium citrate broth, 1:2 with 40 $g.l^{-1}$ initial citric acid concentration and 80 $g.l^{-1}$ sodium citrate broth at pH 5, electrical voltage 5 volt across the electrodialysis cells, space velocity 15.86 h^{-1} at 40 degree celsius. The citrate flux was found to be 0.88 x 10^{-5} $kg.m^{-2}.s^{-1}$, the separation efficiency was 3.77 x 10^{-3} $g.C^{-1}$ and the specific energy consumption was 5.64 $kWh.kg^{-1}$. The performance of practical electrodialysis system was controlled by concentration polarization and kinetic polarization that decreased the the efficiency of the system. Furthermore, the feasibility of using electrodialysis module in conjuction with simultaneous citric acid fermentation in 5 Liter, fermentor was performed. During fermentation, broth was drain from a fermentor and electrodialysis was used to separate citric acid and sodium hydroxide. Sodium hydroxide was pumped back into a fermentor for maintenance of the pH, besides the electrodialysed broth was returned into a fermentor with added glucose. It was found that, electrodialysis cannot maintain the high production rate since the module and membrane area was too small thus the rate of production and separation was not correlate.

Field of study..... Biotechnology..... Student's signature.....

Academic year.....2004..... Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิตและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความสมบูรณ์ โดยได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์ รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตลอดจนให้คำแนะนำแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพัฒน์ เจริญพรวัฒนา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิชที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการและกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพเราะ ปิ่นพานิชการ และอาจารย์วาสนา โตเลี้ยง ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการสั่งซื้อและจัดหาอุปกรณ์และสารเคมี รวมทั้งช่วยเหลือซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาวที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่สำคัญในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆภาควิชาจุลชีววิทยา ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ และขอขอบคุณฐิติวรดา นินทนาวงศา และวรรณรัตน์ ภูมิวงศ์พิทักษ์ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ เทคโนโลยีชีวภาพและสุดท้ายขอขอบคุณนัยนา อภิรดี อัจฉรา วรรณกร พี่อณุมาศ พี่วนิดา พี่พงษ์ศักดิ์ พี่ไพบูลย์ พี่ชัชฎาภรณ์ พี่ณัฐพล น้องจิ๋ว นิว อ๊อบ ตาลและพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่สถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมา 1

1.2 สมบัติทางเคมีของกรดมะนาว 1

1.3 ประโยชน์ของกรดมะนาว 3

1.4 การผลิตกรดมะนาว 3

1.5 การแยกกรดมะนาว 6

1.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 7

1.7 หลักการของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 8

1.8 ข้อจำกัดของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 10

1.9 การออกแบบระบบอิเล็กโทรไดแอลิซิส 11

1.10 ตัวแปรสำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 13

1.11 การประเมินสมรรถนะของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 14

1.12 งานวิจัยการแยกกรดมะนาวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส 15

1.13 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 16

1.14 ขอบเขตของงานวิจัย 17

1.15 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 17

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 18

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตกรดมะนาว 20

2.2.2 การกำจัดเซลล์และสารแขวนลอยต่างๆ 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 การทดลองแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส โดยเวียนแบบกะ 21

2.2.4 การทดลองแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส ควบคู่กับการหมักในระดับ ถังหมักขนาด 5 ลิตร 25

2.2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดมะนาวโดยใช้เครื่องไฮเพอร์ฟอแมนซ์-ลิควิดโครมาโตกราฟฟี 27

2.2.6 วิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยการไทเทรต 27

2.2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 28

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลของของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก..... 29

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน1 ต่อ 2 ที่มีต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก 36

3.3 ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก 42

3.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก 48

3.5 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก 55

3.6 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก 61

3.7 การแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิสควบคู่กับการหมักในระดับ ถังหมักขนาด 5 ลิตร 66

4. สรุปผลการทดลอง 69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 70

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ 75

ภาคผนวก ข การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 77

ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐาน 78

ภาคผนวก ง การคำนวณ 79

ภาคผนวก จ ข้อมูลในการทดลอง 83

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 117

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คุณลักษณะทางเคมีตามมาตรฐานกรดมะนาว	2
2.1	สรุปแผนการทดลองการศึกษาปัจจัยทางเคมีต่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	23
2.2	สรุปแผนการทดลองการศึกษาปัจจัยทางกายภาพต่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	24
จ.1	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 0 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรท	83
จ.2	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 40 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรท	84
จ.3	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 80 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรท	85
จ.4	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 120 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรท	86
จ.5	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 160 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรท	87
จ.6	ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 5 และ10 กรัมต่อลิตร	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

จ.7 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 15 และ30 กรัมต่อลิตร 89

จ.8 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 25 และ50 กรัมต่อลิตร 90

จ.9 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 40 และ80 กรัมต่อลิตร 91

จ.10 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 50 และ100 กรัมต่อลิตร 92

จ.11 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าความเป็นกรดด่างที่ 2.5 ของน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร 93

จ.12 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าความเป็นกรดด่างที่ 3 ของน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร 94

จ.13 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าความเป็นกรดด่างที่ 5 ของน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร 95

จ.14 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าความเป็นกรดด่างที่ 7 ของน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร 96

จ.15 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 160 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 97

จ.16 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 98

จ.17 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 360 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 99

จ.18 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 680 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

จ.19 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 980 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 101

จ.20 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 4 โวลต์ 102

จ.21 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ 103

จ.22 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 6 โวลต์ 104

จ.23 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 7 โวลต์ 105

จ.24 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอุณหภูมิของระบบที่ 25 องศาเซลเซียส 106

จ.25 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอุณหภูมิของระบบที่ 30 องศาเซลเซียส 107

จ.26 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากการทดลองแปรอุณหภูมิของระบบที่ 40 องศาเซลเซียส 108

จ.27 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 109

จ.28 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 110

จ.29 ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 111

จ.30 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวและพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 112

จ.31 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 113

จ.32 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อฟลักซ์ซิเตรท ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว 114

จ.33 ข้อมูลจากการทดลองแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิสควบคู่กับการหมักในระดับถังหมักขนาด 5 ลิตร ซึ่งข้อมูลในตารางนี้เป็นข้อมูลในส่วนของอิเล็กโทรไดแอลิซิส 115

จ.34 ข้อมูลจากการทดลองแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิสควบคู่กับการหมักในระดับถังหมักขนาด 5 ลิตร ซึ่งข้อมูลในตารางนี้เป็นข้อมูลในส่วนของถังหมักขนาด 5 ลิตร 116

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดมะนาว	2
1.2	วิถีการผลิตกรดมะนาวโดยยีสต์ผ่านทางวัฏจักรเครปส์	5
1.3	ลักษณะทั่วไปของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส	8
1.4	การแยกกรดมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	9
1.5	การเกิด Concentration Polarization ของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก	11
1.6	อิเล็กโทรไดแอลิซิสแบบกะ	12
1.7	อิเล็กโทรไดแอลิซิสแบบต่อเนื่อง	12
1.8	อิเล็กโทรไดแอลิซิสแบบป้อนและปล่อยออก	13
2.1	กระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส	22
2.2	การต่อระบบของกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิสควบคู่กับถังหมักขนาด 5 ลิตร	26
3.1	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	30
3.2	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	31
3.3	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	31
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 0 กรัมต่อลิตร	32
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 40 กรัมต่อลิตร	32
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 80 กรัมต่อลิตร	33
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 160 กรัมต่อลิตร	34
3.9	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	34
3.10	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท	35
3.11	ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	35
3.12	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	37
3.13	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	37
3.14	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	38
3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 10 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 5 กรัมต่อลิตร	38
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 30 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 15 กรัมต่อลิตร	39
3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 50 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 25 กรัมต่อลิตร	39
3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 40 กรัมต่อลิตร	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 100 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 50 กรัมต่อลิตร	40
3.20	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	41
3.21	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อที่มีต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท	41
3.22	ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรทในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	42
3.23	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	43
3.24	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	44
3.25	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	44
3.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่ 2.5	45
3.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่ 3	45
3.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่ 5	46
3.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่ 7	46
3.30	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.31	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท ..	47
3.32	ผลของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	48
3.33	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	49
3.34	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	50
3.35	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	50
3.36	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 160 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	51
3.37	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	51
3.38	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 360 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	52
3.39	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 680 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	52
3.40	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 980 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	53
3.41	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	53
3.42	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท	54
3.43	ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	54
3.44	ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.45	ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	56
3.46	ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	57
3.47	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์	57
3.48	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	58
3.49	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์	58
3.50	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ศักย์ไฟฟ้า 7 โวลต์	59
3.51	ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	59
3.52	ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท	60
3.53	ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	60
3.54	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	61
3.55	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไดแอลิซิส	62
3.56	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	62
3.57	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่อุณหภูมิของระบบ 25 องศาเซลเซียส	63
3.58	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส	63
3.59	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่อุณหภูมิของระบบ 40 องศาเซลเซียส	64
3.60	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว	64
3.61	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่าฟลักซ์ซิเตรท	65
3.62	ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว	65
3.63	รูปแบบการผลิตกรดมะนาวและอัตราการผลิตกรดมะนาวในถังหมักขนาด 5 ลิตรเมื่อใช้ควบคู่กับอิเล็กโทรไดแอลิซิส	67
3.64	ความเข้มข้นของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทในอิเล็กโทรไดแอลิซิส	68
3.65	ฟลักซ์ซิเตรทที่เวลาต่างๆของการใช้อิเล็กโทรไดแอลิซิสควบคู่กับการหมัก	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.1 กราฟมาตรฐานของกรดมะนาว	78
ค.2 กราฟมาตรฐานของกลูโคส	78
ง.1 การใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าและเวลา	81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย