

การเลือกนำกลับนิกเกิดจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม
โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

นายยุทธพงษ์ เข้มกล้าด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELECTIVE RECOVERY OF NICKEL FROM WASTEWATER IN THE STAINLESS STEEL INDUSTRY BY
HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Yuttapong Khemglad

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511520

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเลือกนำกลับนิกเกิลจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม
โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

โดย

นายยุทธพงษ์ เข้มกลัด

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

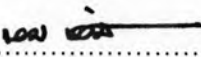
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

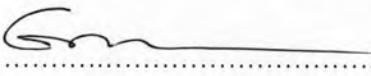
รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

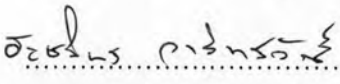
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุกกร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประกร รามกุล)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

ยุทธพงษ์ เข้มกวด : การเลือกนำกลับนิกเกิลจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเยื่อแผ่น
 เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. (SELECTIVE RECOVERY OF NICKEL FROM WASTEWATER IN THE
 STAINLESS STEEL INDUSTRY BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. อัญชลีพร
 วาริตสวัสดิ์ หล่ทองคำ, 89 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกสกัดเพื่อเลือกนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมผลิตแผ่น
 เหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการการสกัดและ
 การเลือกนำกลับไอออนนิกเกิล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนหรือน้ำเสียจากกระบวนการ
 ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและ
 สารละลายนำกลับ และอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ สารสกัดที่ใช้คือ
 D2EHPA, Cyanex 301, Cyanex 272 และ LIX 860-I โดยใช้โครซีนเป็นตัวทำละลาย กรดซัลฟิวริกเป็น
 สารละลายนำกลับ และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบสวนทาง จากนั้นเพื่อเพิ่ม
 ประสิทธิภาพการนำกลับไอออนนิกเกิลจึงใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดุล ต่อแบบอนุกรมกัน พบว่าภาวะที่เหมาะสมใน
 การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลด้วย 1 มอดูล และ 2 มอดูล เหมือนกัน คือ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของ
 สารละลายป้อนเท่ากับ 4 สารสกัด คือ LIX 860-I ความเข้มข้นของสารสกัดระหว่าง 0.2-0.8 M และความเข้มข้น
 ของสารละลายนำกลับระหว่าง 0.5-2.5 M พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดและความเข้มข้นของ
 สารละลายนำกลับ เพอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 0.8 M
 เพอร์เซ็นต์การนำกลับจะลดลง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ได้เพอร์เซ็นต์การ
 นำกลับไอออนนิกเกิลสูงสุด คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเพอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลจะลดลงเมื่อ
 อัตราการไหลของทั้งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษผลของอัตราส่วนโดย
 ปริมาตรของสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ พบว่าที่อัตราส่วน 3500:3500 (มิลลิลิตร:มิลลิลิตร)
 เพอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลสูงสุด คือ 82% และ 58% เมื่อใช้ 1 มอดูล 98% และ 87%
 เมื่อใช้ 2 มอดูล ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อใช้ 2 มอดูล ความเข้มข้นไอออนนิกเกิลที่เหลือในถังสารละลายป้อนเท่ากับ
 1 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งไม่เกินข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต..... ยุทธพงษ์ เข้มกวด
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2551.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970520421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: LIQUID MEMBRANE/HOLLOW-FIBER/NICKEL/WASTEWATER

YUTTAPONG KHEMGLAD: SELECTIVE RECOVERY OF NICKEL FROM WASTEWATER IN THE STAINLESS STEEL INDUSTRY BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng. Sc., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. ANCHALEEPORN W. LOTHONGKUM, D. Eng., 89 pp.

The selective extraction and recovery or stripping of nickel ions from wastewater in the stainless steel industry by hollow fiber supported liquid membrane was studied. The effects of the pH of feed (wastewater), types of the extractants, concentrations of the extractant and stripping solutions, flow rates of feed and stripping solutions, and volumetric ratio of feed to stripping solutions were investigated. The extractants, i.e., D2EHPA, Cyanex 301, Cyanex 272 and LIX 860-I were dissolved in kerosene as a membrane solution, which was supported by a microporous hydrophobic hollow fiber membrane extractor. Sulfuric acid was used as the stripping solution. Feed and stripping solutions flowed countercurrently. Consequently, two consecutive modules of hollow fiber were applied for a higher recovery of nickel ions. The optimum conditions of a single-module operation were same as those of 2-module operation. The results showed that LIX 860-I was the most effective to extract as well as selectively retrieve nickel ions from wastewater at a feed pH of 4. The percentage of the recovery of nickel ions increased with the concentrations of LIX860-I and sulfuric acid. However, it decreased after the concentration of LIX 860-I was higher than 0.8 M. More nickel ions were recovered at the flow rates of feed and stripping solutions of 100 ml/min and reduced when the flow rates increased. In addition, in this study equal volume of feed and stripping solutions of 3500:3500 (ml:ml) is recommended to attain more nickel ions recovery. The maximum extraction and selective recovery of nickel ions by a single-module operation are 82% and 58%, and 98%, and 87% by 2-module operation. The amount of nickel ions remained in the feed solution after passing 2-module operation is 1 ppm, which is in accordance with the permissible limit of Thailand.

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....*ยงยุทธ กษมกลัด*.....
 Field of study.....Chemical Engineering.....Principal Advisor's signature.....*[Signature]*.....
 Academic year....2008.....Co-advisor's signature.....*A.W. Lothongkum*.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ต่างๆ และอบรมสั่งสอน ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ อาจารย์ ดร. ประกร รามกุล ที่ให้คำแนะนำและทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจ ขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนา อุตสาหกรรมระดับปริญญาโท ห้องปฏิบัติการ Mass Separation คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณบริษัท ไทยน็อคซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน) ที่ร่วมทำงานวิจัยนี้ ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื้อเพื่อการใช้เครื่อง Inductively coupled plasma spectroscopy ขอขอบคุณทุกท่านในกลุ่มวิจัยห้องปฏิบัติการ Mass Separation ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณป้า และพี่ ที่สนับสนุนด้านการเรียนและให้ กำลังใจอย่างต่อเนื่องจนทำให้เกิดความสำเร็จของข้าพเจ้าในวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
สัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	4
2.1.1 เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน	4
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ.....	8
2.1.2.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง	9
2.1.2.2 ตัวรองรับชนิดแผ่นมันววนหรือชนิดเกลียววน.....	9
2.1.2.3 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง.....	10
2.2 ชนิดของสารสกัด.....	12
2.2.1 สารสกัดที่เป็นกรด.....	12
2.2.2 สารสกัดที่เป็นเบส.....	14
2.2.3 สารสกัดที่เป็นกลาง.....	15
2.3 การถ่ายเทมวล.....	15
2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบพาสซีฟ	15
2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบมีสารสกัดหรือตัวพา.....	16
2.3.2.1 การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเทท.....	16
2.3.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่.....	17

2.4	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	20
2.5	กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น.....	21
2.6	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรม การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น.....	22
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.7.1	งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	24
2.7.2	งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะหนัก และไอออนนิกเกิลโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	26
2.7.3	งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดไอออนโลหะหนัก จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	29
บทที่ 3	การทดลอง.....	31
3.1	สารเคมี.....	31
3.2	อุปกรณ์.....	32
3.3	วิธีการทดลอง.....	34
	ตอนที่ 1 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล.....	34
3.3.1	การศึกษามลของชนิดสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อน.....	36
3.3.2	การศึกษามลของความเข้มข้นของสารสกัด.....	36
3.3.3	การศึกษามลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก.....	36
3.3.4	การศึกษามลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ.....	36
3.3.5	การศึกษามลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง สารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ.....	36
	ตอนที่ 2 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	37

3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....	37
3.3.7 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก.....	38
3.3.8 การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง สารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ.....	38
3.3.9 เปรียบเทียบการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของ กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับน้ำสังเคราะห์ โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล.....	39
ตอนที่ 1 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของโรงงาน อุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้น ใยกลวง 1 มอดูล.....	40
4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของชนิดของสารสกัด และค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน.....	40
4.2 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....	44
4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก.....	45
4.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ.....	46
4.5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง สารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ.....	47
ตอนที่ 2 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุง ด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	49
4.6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของความเข้มข้นของ สารสกัด LIX 860-I โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	49
4.7 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	51

4.8 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง สารละลายป้อนต่อสารละลายน้ำกลับ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พอง ด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	52
4.9 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability, P).....	53
4.10 การเปรียบเทียบการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของ กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ.....	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน และเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ.....	12
3.1	สารเคมี.....	31
3.2	สมบัติของมอดูลเส้นใยกลวง.....	33
4.1	ไอออนโลหะในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม.....	38
ก.1.1	ข้อมูลการศึกษาผลของชนิดสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย บ่อนใช้สารสกัด D2EHPA โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	65
ก.1.2	ข้อมูลการศึกษาผลของชนิดสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย บ่อนใช้สารสกัด Cyanex 301 โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	66
ก.1.3	ข้อมูลการศึกษาผลของชนิดสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย บ่อนใช้สารสกัด Cyanex 272 โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	68
ก.1.4	ข้อมูลการศึกษาผลของชนิดสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย บ่อนใช้สารสกัด LIX 860-I โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	69
ก.2	ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I โดยใช้ เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	71
ก.3	ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	72
ก.4	ข้อมูลการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายบ่อนและสารละลาย นำกลับโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	74
ก.5	ข้อมูลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายบ่อนต่อ สารละลายนำกลับโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล.....	75
ก.6	ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I โดยใช้ เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	77
ก.7	ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	78
ก.8	ข้อมูลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายบ่อนต่อ สารละลายนำกลับโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล.....	80

ตารางที่		หน้า
ก.9	ข้อมูลการศึกษาการเปรียบเทียบการนำกลับไอออนิกเกิดจากน้ำเสียของ กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะการเกิดอิมัลชัน.....	5
2.2	ลำดับของเฟสในเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน.....	5
2.3	ขั้นตอนการแยกด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน และลักษณะ ของเฟสเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันชนิดเยื่อแผ่นน้ำมัน.....	7
2.4	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	9
2.5	ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน.....	10
2.6	เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง และกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น.....	11
2.7	การถ่ายเทมวลแบบพาสซีฟ.....	16
2.8	การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเทท.....	17
2.9	การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเททในการสกัดที่นอลออกจากน้ำทิ้ง.....	17
2.10	การถ่ายเทมวลควบคุมแบบไปทางเดียวกัน	18
2.11	การถ่ายเทมวลควบคุมแบบสวนทาง.....	19
2.12	การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเททและแบบควบคุม	20
2.13	กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น.....	22
2.14	กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรด ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น.....	23
3.1	สูตรโครงสร้างของสารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	32
3.2	มอดูลเส้นใยกลวง.....	33
3.3	การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลโดยใช้ 1 มอดูล ลักษณะการไหลแบบ หมุนวน สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในมอดูลไหลสวนทางกัน.....	34
3.4	การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลโดยใช้ 2 มอดูล ลักษณะการไหลแบบ หมุนวน สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในมอดูลไหลสวนทางกัน.....	37

ภาพที่	หน้า	
4.1	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัดที่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, [H ₂ SO ₄] = 1.5 M, Q _{feed} =Q _{strip} =100 ml/min, V _{feed} =V _{strip} =3,500 ml ที่เวลา 240 min.....	41
4.2	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัด ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, [H ₂ SO ₄] = 1.5 M, Q _{feed} =Q _{strip} =100 ml/min, V _{feed} =V _{strip} =3,500 ml ที่เวลา 240 min.....	41
4.3	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียมกับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [LIX 860-I] = 0.6 M, [H ₂ SO ₄] = 1.5 M, Q _{feed} = Q _{strip} = 100 ml/min, V _{feed} = V _{strip} = 3,500 ml ที่เวลา 240 min.....	43
4.4	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่าการเลือกนำกลับไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัดที่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, [H ₂ SO ₄] = 1.5 M, Q _{feed} =Q _{strip} =100 ml/min, V _{feed} =V _{strip} =3,500 ml ที่เวลา 240 min.....	44
4.5	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียมกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I, pH _{feed} = 4, [H ₂ SO ₄] = 1.5 M, Q _{feed} = Q _{strip} = 100 ml/min, V _{feed} = V _{strip} = 3,500 ml ที่เวลา 240 min	45
4.6	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความ เข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก [LIX 860-I] = 0.8 M, pH _{feed} = 4, Q _{feed} = Q _{strip} = 100 ml/min, V _{feed} = V _{strip} = 3,500 ml ที่เวลา 240 min.....	46
4.7	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับอัตราการไหลของ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลาต่างๆ [LIX 860-I] = 0.8 M, pH _{feed} = 4, [H ₂ SO ₄] = 2.0 M, V _{feed} = V _{strip} = 3,500 ml.....	47
4.8	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ [LIX 860-I] = 0.8 M, pH _{feed} = 4, [H ₂ SO ₄] = 2.0 M, Q _{feed} = Q _{strip} = 100 ml/min ที่เวลา 240 min.....	48

ภาพที่	หน้า	
4.9	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในสารละลายนำกลับกับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$ ที่เวลา 240 min.....	49
4.10	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 1.5 \text{ M}$ (1 มอดูล), $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$ (2 มอดูล), $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min.....	50
4.11	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{strip}} = V_{\text{feed}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min.....	50
4.12	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min.....	51
4.13	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min.....	52
4.14	ความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$ ที่เวลา 240 min.....	53
4.15	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $-V_f \ln (C_f/C_{f,0})$ ของไอออนนิกเกิลในสารละลายป้อนกับเวลาการสกัดเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 80 min.....	54

ภาพที่	หน้า	
4.16	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนิกเกิดกับการใช้เยื่อแผ่นเหลวหนึ่งมอดูลและสองมอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 80 min.....</p>	54
4.17	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนิกเกิด เหล็ก และ โครเมียมกับชนิดของสารละลายป้อน [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min.....</p>	55

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทมวล
$C_{i,strip} (i)$	ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในถังสารละลายนำกลับที่เวลาใดๆ
$C_{i,feed} (o)$	ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในถังสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
$C_{Ni,feed} (i)$	ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในถังสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ
$C_{Ni,feed} (o)$	ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในถังสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
$C_{Ni,strip} (i)$	ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในถังสารละลายนำกลับที่เวลาใดๆ
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกลวง
D'	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
$[H^+]$	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม
[HR]	ความเข้มข้นของสารสกัด
L	ความยาวของเส้นใยกลวง
l	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
N	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
$[Ni^{2+}]$	ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิล
$[NiR_2]$	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนนิกเกิล
P	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient)
Q_{feed}	อัตราการไหลของสารละลายป้อนในฝั่งท่อ
Q_{strip}	อัตราการไหลของสารละลายนำกลับในฝั่งเปลือก
R	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
r_i	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
S	สารสกัดชนิดไซลเวท
T	อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
t	เวลา
V_{feed}	ปริมาตรของสารละลายป้อน
V_{strip}	ปริมาตรของสารละลายนำกลับ

อักษรกรีก

ε	ความพรุนของเส้นใยกลาง
η	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ตัวห้อย

feed	สารละลายป้อน
strip	สารละลายนำกลับ