การเพิ่มการนำกลับแบบคัดเลือกปรอทจากน้ำที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง

นายสวัสดิ์ภพ สมบูรณ์ปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCEMENT OF SELECTIVE RECOVERY OF MERCURY FROM NATURAL GAS WELL WATER VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Sawatpop Somboonpanya

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

591093

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มการนำกลับแบบคัดเลือกปรอทจากน้ำที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายสวัสดิ์ภพ สมบูรณ์ปัญญา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

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

สวัสดิ์ภพ สมบูรณ์ปัญญา : การเพิ่มการนำกลับแบบคัดเลือกปรอทจากน้ำที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง (ENHANCEMENT OF SELECTIVE RECOVERY OF MERCURY FROM NATURAL GAS WELL WATER VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อุรา ปานเจริญ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการนำกลับไอออนปรอทจากสารละลายป้อนคือน้ำทิ้งจากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันในการเลือกชนิดของสารสกัดและตัวทำละลายที่เหมาะสม และค่าการคัดเลือกของสารสกัดแต่ละชนิดเพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงเนื่องจากการปฏิบัติการด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใช้สารสกัดในปริมาณน้อยกว่าและเวลาในการปฏิบัติการสั้น ปัจจัยอื่นที่ศึกษาด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ จำนวนมอดูล และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ผลการวิจัยพบว่าร้อยละของการสกัดไอออนปรอทสูงสุดเมื่อใช้สารสกัด Tri–n–octylamine (TOA) ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน การเพิ่มจำนวนหอสกัดมีผลต่อร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเล็กน้อย เมื่อสกัดด้วย 4 หอสกัด ด้วยเวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง ได้ค่าร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทสูงสุดเท่ากับ 98 และ 60 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายโทลูอีน 2 % โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อายุการทำงานของเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงที่มีสมรรถนะในการสกัดไอออนปรอทสูงไม่เกิน 120 นาที

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m) เท่ากับ 0.011 และ 1.028 เซนติเมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน แสดงว่าขั้นตอนควบคุมปฏิกิริยาการสกัดคือการถ่ายเทมวลของไอออนปรอทผ่านชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ภาควิชา...วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970621121: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MERCURY / NATURAL GAS WELL WATER / SELECTIVE RECOVERY / HOLLOW FIBER LIQUID MEMBRANE

SAWATPOP SOMBOONPANYA : ENHANCEMENT OF SELECTIVE RECOVERY OF MERCURY FROM NATURAL GAS WELL WATER VIA 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., 100 pp.

The selective enhancement of mercuric ions (Hg(II)) recovered from the natural gas well water by hollow fiber supported liquid membrane was investigated. Emulsion liquid membrane was applied to select types of the extractants and solvents, and the selectivity of the extractant for further experiments by hollow fiber supported liquid membrane due to a lower amount of extractant and shorter operating time. The parameters studied by using hollow fiber supported liquid membrane were pH of feed solution, the concentration of extractant in the liquid membrane, the concentration of sodium hydroxide as a stripping solution, the volumetric flow rates of feed and stripping solutions, the numbers of columns or liquid membrane modules, and life time of hollow fiber supported liquid membrane. From the experimental results, tri–n–octylamine (TOA) in toluene found to be the most suitable extractant. The increase in liquid membrane modules had almost no significance on the extraction and recovery of mercuric ions. By using 4 modules within 3.5 h, the percentages of extraction and recovery of mercuric ions achieved 98 % and 60 %, respectively. These values obtained at the pH of feed solution of 2.5, the TOA concentration of 2 % (v/v), the concentration of sodium hydroxide at 0.5 M, and the flow rates of the feed and stripping solutions of 100 ml/min. The life time at high performance extraction lasted until 120 min.

The mass transfer coefficients of the aqueous phase (k_i) and organic phase (k_m) were 0.011 and 1.028 cm/s. The mass transfer coefficient of the organic phase was higher than that of the aqueous phase, that means the rate controlling step was the diffusion of mercuric ions through the film layer between feed solution and liquid membrane.

Department.....Chemical..Engineering.....Student's signature.....Sawatpop Somboonpanya.....

Field of study ....Chemical..Engineering .....Principal advisor's signature .....

Academic year .....2007.....Co–advisor's signature.....Anchaleep.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำสอน คำแนะนำ และโอกาส รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้และมีกำลังใจในการทำวิจัยจนกระทั่งประสบผลสำเร็จ และยังกรุณาหาเงินทุนวิจัยสนับสนุน ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์ทั้งสอง จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ประกร รามกุล และ อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว.-สสว.) บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียมจำกัด (มหาชน) ที่ร่วมสนับสนุนการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณฑรรชนก ประภาสวัสดิ์ อีกทั้งเพื่อนและพี่ในกลุ่มวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หาวิทยาลัย และท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน สนับสนุนการศึกษา ให้กำลังใจและส่งเสริมให้ปฏิบัติตนเป็นคนดีของสังคมตลอดมาจนผู้วิจัยประสบความสำเร็จในในวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฎ
สารบัญภาพ.....ฏ
สัญลักษณ์.....ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....1
1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับปรอท.....2
1.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท.....2
1.1.3 ปรอทและความเป็นพิษ.....3
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....5
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอท.....5
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว.....6
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....9
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....9
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....10
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....10
บทที่ 2 ทฤษฎี.....11
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....11
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process).....12
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane).....14
2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน
(Flat–sheet Supported Liquid Membrane).....14
2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน
(Spiral–wound Supported Liquid Membrane).....15

หน้า

2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane : HFSLM).....16
2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo–liquid Membrane).....19
2.2 ชนิดของสารสกัด.....21
2.2.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant).....21
2.2.2 สารสกัดชนิดเบส (Basic Extractant).....22
2.2.3 สารสกัดชนิดซอลเวท (Solvating Extractant).....23
2.3 กลไกการถ่ายเทมวล.....24
2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter–Transport).....24
2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co–Transport).....25
2.4 ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายเทมวล.....27
2.4.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant: K_{ex}) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท.....27
2.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient: D).....28
2.4.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient: P).....28
2.4.4 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient: k).....29
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง.....34
3.1 สารเคมี.....34
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....35
3.3 วิธีการทดลอง.....37
3.3.1 ศึกษาผลของชนิดสารสกัดต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....37
3.3.2 ศึกษาผลของสารสกัดที่มีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....38
3.3.3 ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....39
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....40

หน้า

3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์
ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....41
3.3.6 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
ต่อการสกัดไอออนปรอท.....42
3.3.7 ศึกษาจำนวนหอสกัดในการสกัดต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....43
3.3.8 ศึกษาผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....44
3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวง.....45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....46
4.1 ผลการทดลอง.....47
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไอออนในน้ำทิ้ง
จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ.....47
4.1.2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....47
4.1.3 ผลของสารสกัดที่มีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....49
4.1.4 ผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....50
4.1.5 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....52
4.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์
ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....54
4.1.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
ต่อการสกัดไอออนปรอท.....57
4.1.8 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....58
4.1.9 ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....60

หน้า

4.2 การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี....63
4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท....63
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน....64
4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m)....65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....67
5.1 สรุปผลการทดลอง....67
5.2 ข้อเสนอแนะ....69
รายการอ้างอิง....71
ภาคผนวก....76
ภาคผนวก ก (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา)....77
ภาคผนวก ข (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ)....81
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ)....91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....100

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของปรอท.....3
ตารางที่ 1.2 รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของปรอท.....4
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....34
ตารางที่ 3.2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในการทดลอง.....36
ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบไอออนโลหะในน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ.....47
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยา
การสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลาย
เยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร.....65
ตารางที่ ข–1 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....82
ตารางที่ ข–2 ผลของสารสกัดที่มีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....83
ตารางที่ ข–3 ผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....84
ตารางที่ ข–4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์
ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....85
ตารางที่ ข–5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อ
การสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....86
ตารางที่ ข–6 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
ต่อการสกัดไอออนปรอท.....87
ตารางที่ ข–7 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดต่อการสกัดไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....88
ตารางที่ ข–8 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดต่อการนำกลับไอออนปรอท
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง.....89
ตารางที่ ข–9 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
ต่อการสกัดไอออนปรอท.....90

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ....12
รูปที่ 2.2 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน....13
รูปที่ 2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน....15
รูปที่ 2.4 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน....16
รูปที่ 2.5 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับเส้นใยกลวง....17
รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อน
และสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นใน
ชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง....17
รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต....19
รูปที่ 2.8 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะ
และไอออนไฮโดรเนียมแบบสวนทาง....25
รูปที่ 2.9 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะ
และไอออนไฮโดรเนียมแบบไปทางเดียวกัน....26
รูปที่ 2.10 แผนผังการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว....30
รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัด Tri–n–octylamine (TOA) และ Aliquat 336....35
รูปที่ 3.2 มอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง....36
รูปที่ 3.3 การปฏิบัติการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง
ในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว....40
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท....48
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการคัดเลือกของสารสกัดกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท....49
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน
กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท....50
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน
กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท....51
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA
กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท....52
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA
กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท....53

หน้า

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....55
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....56
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท.....57
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดที่จำนวนหอสกัดต่าง ๆ.....59
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับที่จำนวนหอสกัดต่าง ๆ.....60
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....61
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....62
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.5-2 % โดยปริมาตร.....63
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln (C_f / C_{f,0})$ ของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลา.....64
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ กับ $1/[R_3N]^2[H^+]$.....66

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทมวล
C_f	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา (t)
$C_{f,0}$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น
C_{feed}	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า
C_{raf}	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก
C_{st}	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
D	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient)
% E	ร้อยละการสกัด
$[H^+]$	ความเข้มข้นของโปรตอน
H_{FUSION}	Enthalpy of Fusion
K_{ex}	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (Equilibrium Constant)
k	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k_B	ค่าคงที่ของ Boltzmann เท่ากับ 1.3807×10^{-23} J/K
k_i	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน
k_m	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว
k_s	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายนำกลับ
L	ความยาวของเส้นใยกลวง
l	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
M	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
M_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน
M_{if}	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว

M_{is}	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
M_s	ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ
N	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
P	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient)
P_m	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน
Q_f	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
r	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
r_i	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
r_o	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
r_{lm}	รัศมี Log–mean ของเส้นใยกลวง
% R	ร้อยละการนำกลับ
$[R_3N]$	ความเข้มข้นของสารสกัด TOA
S	สารสกัดชนิดซอลเวท
S_{FUSION}	Entropy of Fusion
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
t	เวลา
V	ปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวง
V_f	ปริมาตรของสารละลายป้อน

อักษรกรีก

ε	ความพรุนของเส้นใยกลวง
π	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416
η	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ตัวห้อย

f	สารละลายป้อน
s	สารละลายนำกลับ
m	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
if	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
is	ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ