การสกัดแยกแบบเสริมฤทธิ์ยูเรเนียมจากไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง

นายวราพล สะสมทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNERGISTIC SEPARATION OF URANIUM FROM RAW TRISODIUMPHOSPHATE FROM MONAZITE PROCESSING BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

MR. WARAPON SASOMSUB

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

501175

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดแยกแบบเสริมฤทธิ์ยูเรเนียมจากไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายวราพล สะสมทรัพย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์)

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

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

วราพล สะสมทรัพย์ : การสกัดแยกแบบเสริมฤทธิ์ยูเรเนียมจากไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง (SYNERGISTIC SEPARATION OF URANIUM FROM RAW TRISODIUMPHOSPHATE FROM MONAZITE PROCESSING BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อุรา ปานเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์, 93หน้า.

การสกัดแยกแบบเสริมฤทธิ์ยูเรเนียมจากไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่าเมื่อใช้สารสกัดคือสารละลาย Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ผสมกับสารละลาย TBP ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน และสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรในการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นของไอออนยูเรเนียมประมาณ 45 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์เท่ากับ 0.49 และร้อยละของการสกัดสูงกว่าการสกัดด้วยสารละลาย Aliquat 336 หรือ TBP เพียงชนิดเดียว การสกัดรอบเดียวแบบเสริมฤทธิ์สามารถสกัดไอออนยูเรเนียมและนำกลับได้ร้อยละ 34 และ 18 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละของการสกัดนี้สูงกว่าการสกัดด้วยสารสกัดชนิดเดียวประมาณร้อยละ 6 และเมื่อทำการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ 7 รอบ ประมาณ 7 ชั่วโมง สามารถสกัดและนำกลับไอออนยูเรเนียมได้ร้อยละ 99 และ 53 และเหลือปริมาณไอออนยูเรเนียมในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไอออนยูเรเนียมที่นำกลับได้เท่ากับ 23.73 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้อัตราการไหลของทั้งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสม คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกสูงขึ้นจะสามารถสกัดและนำกลับไอออนยูเรเนียมได้มากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....วราพล สะสมทรัพย์.....

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

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

4970553121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SYNERGISTIC SEPARATION / URANIUM / TRISODIUMPHOSPHATE / HOLLOW FIBER LIQUID MEMBRANE

WARAPON SASOMSUB : SYNERGISTIC SEPARATION OF URANIUM FROM RAW TRISODIUMPHOSPHATE FROM MONAZITE PROCESSING BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. URA PANCHAROEN, D. Eng Sc., THESIS CO-ADVISOR : DR. SIRINART LAOHAROCHANAPAN, Ph. D., 93 pp.

Synergistic separation of uranium in trisodiumphosphate from monazite processing by hollow fiber supported liquid membrane was studied. By using 0.1 M Aliquat 336 and 0.06 M Tributylphosphate (TBP) in kerosene as an extractant and 0.5 M nitric acid solution as a stripping solution to separate uranium ions from trisodiumphosphate solution with uranium ions of 45 ppm, the synergistic extraction coefficient was 0.49. The percentage of synergistic extraction was higher than that obtained by using a single extractant, Aliquat 336 or TBP. The synergistic extraction in one column (one cycle) achieved the percentage of extraction about 34, which was higher than the extraction by a single extractant about 6 %, and the percentage of stripping about 18. The percentages of extraction and stripping reached 99 and 53 by seven-cycle separation in 7 hours, resulting in the uranium ions in trisodiumphosphate solution of 0.22 ppm and the recovery of uranium ions about 23.73 ppm. The optimum flow rates of feed solution and stripping solution were at 100 ml/min. In addition, the increase in nitric acid concentration enhanced the percentages of extraction and stripping.

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....Warapon Sasomsub.....

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

Academic year.....2007.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และการอบรม สั่งสอน รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ และดร.ประกร รามากุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ร่วมทำงานวิจัยนี้ และให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ Inductively Couples Plasma Spectroscopy (ICP)

ขอขอบคุณ คุณฑรรชนก ประภาสวัสดิ์ รวมทั้งพี่และเพื่อนทุกคนในกลุ่มวิจัย Mass Separation ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และเป็นที่ปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา คุณบุญเลิศ สวนมะม่วง ที่กรุณาจัดเตรียมสารเคมี คุณกัลยา ช่างเครื่อง ที่ช่วยเหลือและแก้ไขปัญหาในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง และท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

ความสำเร็จที่เกิดขึ้นของผู้วิจัยในวันนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลยหากขาดคุณพ่อและคุณแม่ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ อย่างสูงที่ให้กำเนิด คอยเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และสนับสนุนการศึกษาของ พี่วรรณธนาที่ส่งเสียค่าเรียน และคุณณพัฐอรที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมา.....1
1.1.1 สมบัติของไตรโซเดียมฟอสเฟต.....3
1.1.2 สมบัติของธาตุยูเรเนียม.....4
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....6
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนยูเรเนียม.....6
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนของธาตุอื่น ๆ.....9
1.3 วัตถุประสงค์.....11
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....11
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....12
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....12
บทที่ 2 ทฤษฎี.....13
2.1 ตัวพาที่สนับสนุนการถ่ายเทมวล 13
2.1.1 รูปแบบของเยื่อแผ่น (Membrane Module) 16
2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....17
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane) 18
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane) 20

2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน
(Flat Sheet Supported Liquid Membrane).....20
2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน
(Spiral-type Supported Liquid Membrane) 22
2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง
(Hollow Fiber Supported Liquid Membrane : HFSLM) 23
2.3 กลไกการถ่ายเทมวล.....26
2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport) 26
2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport) 27
2.4 ชนิดของสารสกัด.....29
2.4.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) 29
2.4.2 สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant) 30
2.4.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant) 31
2.5 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) 31
บทที่ 3 การทดลอง.....36
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....36
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....38
3.3 วิธีการทดลอง.....39
3.3.1 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....39
3.3.2 การศึกษาชนิดของสารสกัด D2EHPA, TBP, Cyanex 923, TOA
และ Aliquat 336 ต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลาย
ไตรโซเดียมฟอสเฟต.....39
3.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA และ Aliquat 336 ต่อ
การสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....41
3.3.4 การศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารสกัดผสม

ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์.....42
3.3.5 การศึกษาความเข้มข้นของไอออนยูเรเนียมในสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟต.....43
3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....44
3.3.7 การศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....45
3.3.8 การศึกษาอัตราการไหลของสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....46
3.3.9 การศึกษาจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....49
4.1 ชนิดของสารสกัด.....49
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA และ Aliquat 336 ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....50
4.3 ผลของชนิดและอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารสกัดผสมในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดไอออนยูเรเนียม.....52
4.3.1 ปฏิกิริยาของสารสกัดหลัก Aliquat 336.....54
4.3.2 ปฏิกิริยาการช่วยสกัดของ TBP.....56
4.4 ความเข้มข้นของไอออนยูเรเนียมในสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟต.....60
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....60
4.6 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....61
4.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....63
4.8 ผลของจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....64

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....68
รายการอ้างอิง.....69
ภาคผนวก.....73
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ).....74
ภาคผนวก ข (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา).....86
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ).....88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....93

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....36
ตารางที่ 3.2 สมบัติต่าง ๆ ของชุดเส้นใยกลวง.....38
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการศึกษาชนิดของสารสกัดชนิดเดียวต่อการสกัดไอออนยูเรเนียม
จากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....74
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนยูเรเนียม
จากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....75
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ต่อการสกัดไอออนยูเรเนียม
จากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....76
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์.....77
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟต.....78
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการสกัด
ไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....79
ตารางที่ ก.7 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจาก
สารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....81
ตารางที่ ก.8 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนยูเรเนียมจาก
สารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....83
ตารางที่ ก.9 ข้อมูลผลการศึกษาจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลาย
ไตรโซเดียมฟอสเฟต.....85
ตารางที่ ข.1 ค่าการละลายของยูเรเนียมในสารละลายต่าง ๆ 87

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ **หน้า**

รูปที่ 1.1 กระบวนการย่อยแร่โมนาไซต์....2
รูปที่ 1.2 ธาตุยูเรเนียม....5
รูปที่ 1.3 แร่ uraninite 5
รูปที่ 2.1 การแพร่ที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี....13
รูปที่ 2.2 การสนับสนุนการถ่ายเทมวล....14
รูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่....14
รูปที่ 2.4 กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่....15
รูปที่ 2.5 ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลว....16
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลว....17
รูปที่ 2.7 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว....18
รูปที่ 2.8 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน....19
รูปที่ 2.9 รูพรุนของตัวรองรับชนิดแผ่นแบนที่ทำจาก PTFE....20
รูปที่ 2.10 กลไกการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน....21
รูปที่ 2.11 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน....21
รูปที่ 2.12 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน....22
รูปที่ 2.13 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในมอดูลเยื่อแผ่นเหลว ที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง....23
รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายนำกลับ เมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลอง....24
รูปที่ 2.15 กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง....25
รูปที่ 2.16 ทิศทางการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันของไอออนของโลหะและไอออนไฮโดรเนียม....27
รูปที่ 2.17 ทิศทางการถ่ายเทมวลแบบทางทางเดียวกันของไอออนของโลหะ และไอออนไฮโดรเนียม....28
รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างเคมีของสารสกัด....37
รูปที่ 3.2 ตัวรองรับชุดเส้นใยกลวง....38

รูปที่ 3.3 การปฏิบัติในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode).... 40
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสกัดยูเรเนียมกับเวลาของสารสกัดชนิดต่าง ๆ 50
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA และ Aliquat 336 ในตัวทำละลายเคโรซีนกับร้อยละการสกัดไอออนยูเรเนียม 51
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดผสมของสารละลาย Aliquat 336 กับสารละลาย TBP, D2EHPA, TOA และ Cyanex 923 ในตัวทำละลายเคโรซีนกับร้อยละการสกัดไอออนยูเรเนียม 53
รูปที่ 4.4 ร้อยละการสกัดไอออนยูเรเนียมของสารสกัดเดี่ยว TBP, Aliquat 336 และสารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP 54
รูปที่ 4.5 การถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนยูเรเนียมด้วยสารสกัด Aliquat 336 และสารละลายนำกลับกรดไนตริก 55
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนยูเรเนียมในสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟต เมื่อใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....56
รูปที่ 4.7 การถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนยูเรเนียมด้วยสารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP และสารละลายนำกลับกรดไนตริก 57
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนยูเรเนียมในสารละลายป้อนไตรโซเดียมฟอสเฟต เมื่อใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรและ TBP ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร.....58
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกในกับร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนยูเรเนียม 61
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนยูเรเนียม 62
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนยูเรเนียม.....63
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดกับร้อยละการสกัดและการนำกลับยูเรนียมสะสม.....64
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมกับปริมาณที่สกัดและนำกลับได้ 65

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมกับร้อยละการสกัด
และการนำกลับของแต่ละรอบการสกัด.....65
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดไอออนยูเรเนียมกับปริมาณที่สกัด
และนำกลับได้ของแต่ละรอบการสกัด.....66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

D	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient)
D'	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
k_B	ค่าคงที่ Boltzmann
$K_{ex,1}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดหลัก
$K_{ex,2}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดช่วย
$K_{ex,(1+2)}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดผสม
M	ไอออนโลหะ
r	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว
R	หมู่ฟังก์ชันของสารสกัด
S	สารสกัดชนิดโซลเวท
$S.C.$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์
T	อุณหภูมิ
$V_{organic}$	ปริมาตรของสารอินทรีย์
$V_{aqueous}$	ปริมาตรของสารละลาย
X	ไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลาย
β	ค่าคงตัวความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลว
η	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
π	ค่าคงที่เท่ากับ 3.1416