

การพัฒนากระบวนการผลิต เค้ก เหลืองระดับกึ่งห้องทดลองจากแร่ซีโนต์



นาย แสง เกิดประทุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

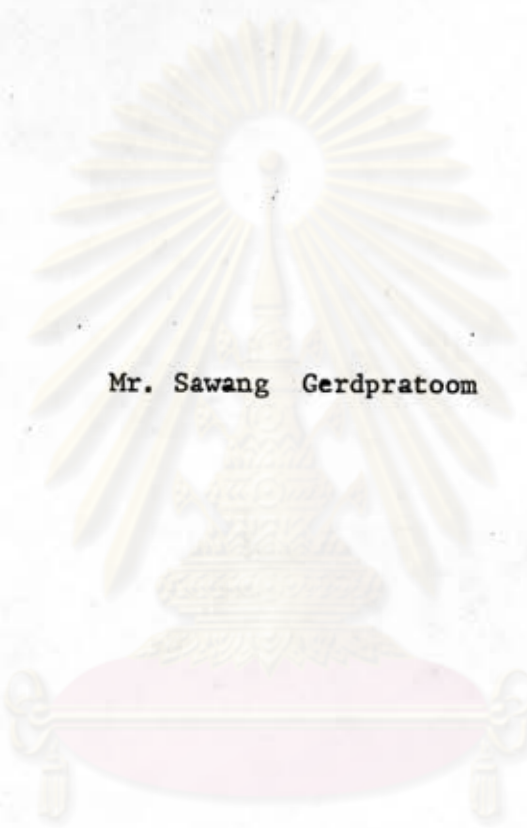
พ.ศ. 2528

ISBN 974-564-149-9

009312

i 181 Δ 029 Δ

DEVELOPMENT OF PROCESSES FOR BENCH SCALE
PRODUCTION OF YELLOW CAKE FROM EUXENITE



Mr. Sawang Gerdpratoom

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1985

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิต เค้ก เหลืองระดับกึ่งห้องทดลอง
จากแร่วชิโนค้

โดย นาย แสง เกิดประทุม

ภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... *สุประดิษฐ์ นูนาค* คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ นูนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... *สุวรรณ์ แสงเพชร* ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพชร)

..... *ชยากริต ศิริอุปถัมภ์* กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

..... *ศิริวัฒนา ไทรสมบูรณ์* กรรมการ
(อาจารย์ ศิริวัฒนา ไทรสมบูรณ์)

..... *สุพิชชา จันทร์โยธา* กรรมการ
(อาจารย์ สุพิชชา จันทร์โยธา)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิต เค้ก เหลืองระดับกึ่งห้องทดลอง จากแร่ยูซีไนต์
ชื่อนิสิต	นาย แสง เกิดประทุม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์
ภาควิชา	นิเวศศาสตร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2527



บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิต เค้ก เหลืองระดับกึ่งห้องทดลอง จากแร่ยูซีไนต์ในประเทศ โดยใช้กรดซัลฟูริกย่อยแร่ และใช้การแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับ การสกัดด้วยตัวทำละลายในการเพิ่มความบริสุทธิ์ยูเรเนียมและคกตะกอนยูเรเนียมด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตประกอบด้วยภาชนะย่อยแร่ หน่วยแลกเปลี่ยนไอออนชนิดคอดัมภ์ หน่วยสกัดด้วยตัวทำละลาย และหน่วยคกตะกอนเค้กเหลือง โดยสามารถบ่อนแร่ได้วันละ 2 กิโลกรัม (๘ ชั่วโมง) และผลิตเค้กเหลืองความบริสุทธิ์สูงตามมาตรฐาน USAEC ได้ประมาณวันละ 10-50 กรัม การทดลองได้รวมถึงการทำเงื่อนไขการย่อยสลายแร่ด้วยกรดซัลฟูริก การออกแบบสร้างหน่วยแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอดัมภ์ทำงานอย่างค่อเนื่องขนาด 4 วัฏจักร การประเมินจำนวนขั้นในการสกัด (Extraction) และการสกัดกลับ (Stripping) ของมิก เซอร์-เซทเลอร์ แบบไหลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity flow mixer-settler) และการออกแบบสร้างเครื่องคกตะกอนเค้กเหลืองแบบค่อเนื่อง เพื่อให้ได้เค้กเหลืองที่มีขนาด เม็ดโตและมีความหนาแน่นสูง

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title Development of Processes for Bench Scale
 Production of Yellow Cake from Euxentite
Name Mr. Sawang Gerdpratoom
Thesis Advisor Assistant Professor Chyagrit Siri-Upathum
Department Nuclear Technology
Academic year 1984



ABSTRACT

A Process for yellow cake production from local Euxenite was developed in Bench Scale by using sulphuric acid digestion with simultaneously ion-exchange and solvent extraction purification steps. Uranium was then precipitated as uranium diuranate by ammonia solution. Equipment used in this process includes : digestion vessels, columnar ion-exchange, solvent extraction and precipitation units. Ore feed to the process could be adjusted up to 2 kilogram per day (8 hours operation) with yellow cake product purity meet the requirement of USAEC standard of about 10-50 gram per day. Included in this experiment are the leaching characteristics of the ore, the design and construction of continuous columnar 4-cycle ion exchange unit, determination of the extraction and stripping stages of a gravity flow mixer-settler and the design and construction of continuous yellow cake precipitation unit with large grain size and high density product.



กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ สุวรรณ แสงเพชร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนับสนุนและคำปรึกษาแนะนำทางด้านวิชาการ และทางปฏิบัติ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ และคุณฉวีวรรณ สุวรรณโพธิ์รุ่ง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของ แก๊ส เหลือง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว และคุณวินัย อนุวัฒน์มงคล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณคณาจารย์ และนิสิตภาควิชานิเวศศาสตร์เทคโนโลยีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. ประภัสสร รวยแท้ ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องการพิมพ์วิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ



หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 เรื่องทั่วไปของยูเรเนียม	5
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ยูเรเนียม	5
2.2 กระบวนการผลิตเค้ก เหลือง	13
2.2.1 การเตรียมและแต่งแร่	18
2.2.2 การย่อยสลายแร่	18
2.2.3 การออกแบบเครื่องย่อยสลายแร่	47
2.2.4 การเพิ่มความบริสุทธิ์ยูเรเนียม	55
2.2.4.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	57
2.2.4.2 การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์	87
2.2.5 การตกตะกอนยูเรเนียม	159
2.2.6 การย่างแห้ง (Calcination)	164
บทที่ 3 อุปกรณ์	167
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	167
3.1.1 เครื่องย่อยสลายแร่	167
3.1.2 เครื่องมือแลกเปลี่ยนไอออนแบบต่อเนื่อง	171

	หน้า
3.1.3 Mixer-Settler	175
3.1.4 เครื่องกรอง Leach Liquor	181
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	181
บทที่ 4 การทดลอง	185
4.1 การทดลองย่อยสลายแร่ระดับห้องทดลอง	185
4.1.1 การเตรียมสารตัวอย่าง	185
4.1.2 การทดลองหาปริมาณของ MnO_2 ที่เหมาะสมในการ ย่อยสลายแร่ด้วยกรดซัลฟูริก	185
4.1.3 การทดลองหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในการ ย่อยสลายแร่	185
4.1.4 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของแร่ต่อสารละลายที่เหมาะสม ..	186
4.1.5 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายแร่.....	186
4.2 การทดลองย่อยสลายแร่ด้วย เครื่องมือระดับกึ่งห้องทดลอง.....	186
4.3 การทำยูเรเนียมให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน แบบต่อเนื่อง	187
4.3.1 การเตรียมสารละลายที่ได้จากการย่อยแร่	187
4.3.2 การนำสารละลายผ่านเรซิน	187
4.3.3 การทดลองเพื่อศึกษาการจับยูเรเนียมในแต่ละคอลัมน์.....	189
4.3.4 การทดลองเพื่อหาปริมาณของเหล็กในขณะ Washing.....	189
4.3.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอิลูค ยูเรเนียมออกจากเรซิน	189
4.4 การสกัดยูเรเนียมด้วยตัวทำละลายอินทรีย์	189
4.4.1 สารละลายที่ใช้ในการทดลอง.....	189
4.4.2 การทดลองเพื่อหา เวลาที่ใช้สกัดจนถึงสมดุล	190
4.4.3 การทดลองหา เวลาที่ใช้สกัดจนถึงสมดุล	190
4.4.4 การทดลองเพื่อหา เวลาในการแยกชั้น	190
4.4.5 การทดลองเพื่อหา เส้นสมดุลของการสกัดด้วยเอมีน.....	191

4.4.6	การทดลองหา เส้นสมดุขของสภาวะการสตริปด้วย สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	191
4.4.7	การทดสอบการไหลของของเหลวใน Mixer-Settler ค้นแบบที่สร้าง	191
4.4.8	การทดสอบระบบการไหลของของเหลวใน Mixer-Settler 21 stages	192
4.4.9	การทดลองสกัดยูเรเนียมให้บริสุทธิ์ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ใน 21 stages Mixer-Settler	193
4.4.10	การทดลองคัมไลดคาร์บอเนตในสารละลายยูเรเนียม.....	194
4.4.11	การทดลองตกตะกอนยูเรเนียมในรูปโคยูเรเนต.....	194
บทที่ 5	ผลการวิจัย	196
5.1	ผลการทดลองย่อยสลายแร่ระดับห้องทดลอง	196
5.1.1	ผลการทดลองหาปริมาณของ MnO_2 ที่เหมาะสมในการ ย่อยสลายแร่ยูซีไนต์	196
5.1.2	ผลการทดลองหาความเข้มข้นของกรดที่ เหมาะสมในการ ย่อยสลายแร่ยูซีไนต์	197
5.1.3	ผลการทดลอง เพื่อหาสัดส่วนของแร่คือสารละลายที่เหมาะสม ..	198
5.1.4	ผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลาย แร่ยูซีไนต์	199
5.2	ผลการทดลองย่อยสลายแร่ด้วย เครื่องมือระดับกึ่งห้องทดลอง.....	200
5.3	ผลการทดลองแยกยูเรเนียมและทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการ แลกเปลี่ยนไอออนแบบต่อเนื่อง	201
5.3.1	ผลการทดลอง เพื่อศึกษาการจับยูเรเนียมของ เรซิน.....	201
5.3.2	ผลการทดลอง เพื่อหาปริมาณยูเรเนียมและ เหล็กใน สารละลายที่ใช้ล้างเรซิน	204
5.3.3	ผลการทดลอง เพื่อหาอุณหภูมิที่มีผลต่อการหลุด.....	205
5.3.4	ผลการทดลอง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของเรซิน.....	206

5.3.5	ผลการทดลอง เพื่อหาผลของอัตราการใช้สารละลาย ที่มีต่อการดูดซับ	207
5.4	ผลการทดลอง เพื่อหาคุณสมบัติในการสกัดและการแยกชั้นของ การสกัดด้วยเอมีน	208
5.4.1	ผลการทดลอง เพื่อหา เวลาที่ใช้สกัดจนถึงสมดุล	208
5.4.2	ผลการทดลอง เพื่อหา เวลาที่ใช้สกัดจนถึงสมดุล	209
5.4.3	ผลการทดลอง เพื่อหา เวลาที่เอมีนจะแยกชั้นในชั้นต่าง ๆ ...	209
5.4.4	ผลการทดลอง เพื่อหา เส้นสมดุลของการสกัดด้วยเอมีน	209
5.4.5	ผลการทดลอง เพื่อหา เส้นสมดุลของการสกัดด้วยสาร ละลายคาร์บอนเนต	210
5.4.6	ผลการทดสอบระบบของ Mixer-Settler คันแบบ	210
5.4.7	ผลการทดสอบระบบการไหลของ 21 stages Mixer-Settler	214
5.4.8	ผลการทดลองทำยูเรเนียมให้บริสุทธิ์โดยใช้เอมีนเป็นตัว สกัดใน 21 stages Mixer-Settler	214
5.5	ผลการตกตะกอนและการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์	214
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	219
6.1	สรุปผลการย่อยสลายแร่ยูเรเนียมด้วยกรดซัลฟูริก	219
6.2	ข้อเสนอแนะการย่อยสลายแร่ยูเรเนียมด้วยกรดซัลฟูริก	219
6.3	สรุปผลการแยกยูเรเนียมให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการแลกเปลี่ยน แบบต่อเนื่อง	219
6.4	สรุปผลการเพิ่มความบริสุทธิ์ของยูเรเนียมโดยกระบวนการสกัด ด้วยไตรออกทิล เอมีน	220
6.5	ข้อเสนอแนะในการทำยูเรเนียมให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการแลกเปลี่ยน อ็อกไซด์แล้วตามด้วยการสกัดด้วยเอมีน	221
6.6	ข้อเสนอแนะในการตกตะกอนยูเรเนียม	221
6.7	ข้อเสนอแนะในการนำ Barren Solution จากกระบวนการ แลกเปลี่ยนอ็อกไซด์ไปใช้ประโยชน์	221

เอกสารอ้างอิง	223
ภาคผนวก การทบทวนวิทยานิพนธ์โดยใช้อัลตราไวโอเลต สเปกโตรมิตรี	226
ประวัติผู้เขียน	231



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงปริมาณการใช้พลังงานนิวเคลียร์	3
1.2 แสดงแนวโน้มความต้องการ เค้ก เหลืองของโลก	3
1.3 แสดงปริมาณความต้องการ เค้ก เหลืองของโลก	4
1.4 แสดงปริมาณการใช้เค้ก เหลืองของยุโรป	4
2.1 แสดงการละลายของยูเรเนียมและวาเนเดียมจากแร่ที่เผาด้วย เกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ	17
2.2 แสดงผลการเผาแร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่มีต่อการกรอง	19
2.3 แสดงผลการละลายของยูเรเนียมจากแร่ที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	19
2.4 แสดงผลจากการเผาแร่ที่มีต่อการตกตะกอนของตะกอน	20
2.5 แสดงกระบวนการย่อยสลายแร่ด้วยต่าง	23
2.6-2.7 แสดงผลอันเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของกรดในการย่อยสลายแร่ พิคซ์เบลนด์	31
2.8 เปรียบเทียบการละลายของ UO_2 กับแร่พิคซ์เบลนด์จากการย่อยสลายด้วย กรด H_2SO_4 ที่ pH 1.5 อุณหภูมิ 25 °C	32
2.9 แสดงผลอันเกิดจากความเข้มข้นของฟอสเฟต อีออน (PO_4^{3-}) ที่มีต่อค่า emf	35
2.10 แสดงการเปลี่ยนออกซิเดชันของยูเรเนียม วาเนเดียมและเหล็กอีออน ในช่วง emf ต่าง ๆ	36
2.11 แสดงผลของ emf ที่มีต่อการย่อยสลายยูเรเนียมจากแร่พิคซ์เบลนด์	36
2.12 แสดงผลของอัตราส่วน Fe^{3+}/Fe^{2+} ที่มีต่ออัตราการละลาย UO_2	37
2.13 แสดงผลของความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่มีต่ออัตราการละลาย UO_2	37
2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า emf และการละลายของ UO_2 โดยใช่ $NaClO_3$ อย่างเดียวและใช้ $FeCl_2$ ผสมด้วย	38
2.15 แสดงผลของความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่มีต่อการย่อยสลายแร่ยูเรเนียม	38
2.16 แสดงผลการเติม Fe^{2+} และ Mn^{2+} ที่มีต่ออัตราการละลายแร่ยูเรเนียม	39
2.17 แสดงผลของความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่มีต่อการละลายแร่ยูเรเนียม	39
2.18 แสดงผลของความเข้มข้นของ H_2SO_4 ที่มีต่อการย่อยสลายแร่ยูเรเนียม	42

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

2.19	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการละลายของ UO_2	43
2.20	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยสลายแร่วีทซ์เบลนด์	43
2.21	แสดงขนาดของ เม็ดแร่ที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายยูเรเนียม จากการย่อยสลายด้วยค่าง	45
2.22	แสดงความดันของออกซิเจนที่มีผลต่อการละลายของ UO_2	46
2.23	แสดง เครื่องกวนแบบ Axial-Flow Impellers	49
2.24-2.25	แสดง เครื่องกวนแบบ Radial-Flow Impellers	50
2.26	แสดง การไหลเวียนของของเหลวในถังที่ไม่มี Baffle	50
2.27	แสดง การไหลเวียนของของเหลวจากการกวนด้วย Axial-flow turbine..	51
2.28	แสดง การไหลเวียนของของเหลวจากการกวนด้วย Impeller	51
2.29	แสดง ค่าคงที่ใช้คำนวณหาค่าสั่งของ เครื่องกวนสาร	54
2.31	แสดง โครงสร้างของ เรซินชนิด Strong base quaternary ammonium anion exchange	57
2.32	แสดง จุด break through และจุดอิ่มตัวของ เรซินในคอลัมน์	63
2.33	แสดง ความสูงของ เรซินในคอลัมน์ที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของสารละลาย ที่ปล่อยผ่าน เรซินและปริมาณยูเรเนียมในสารละลาย	65
2.34	แสดง ปริมาณยูเรเนียมที่จับโดย เรซิน (Permutit SKB) 10 มิลลิเมตร ให้สัมพันธ์กับสารละลายในเวลาต่าง ๆ กันโดยใช้สารละลาย 1 กรัม ต่อลิตร จำนวน 250 มิลลิลิตร	65
2.35	แสดง การเกิดอ้อนเชิงซ้อนของ เกล็ดชนิดต่าง ๆ ในการทำ Anion Exchange	66
2.36	แสดงผลของ pH ที่มีต่อความสามารถในการจับยูเรเนียมของ เรซิน	67
2.37	แสดง การ elution ที่ดีและไม่ดี	72
2.38	แสดง การอีลูตยูเรเนียมออกจาก เรซินโดยใช้สารละลายชนิดต่าง ๆ	72
2.39	แสดง การชะล้างยูเรเนียมออกจาก เรซินใหม่และ เรซินที่ใช้งานมาแล้ว 100 cycles	74
2.39/1	แสดง การชะล้างยูเรเนียมออกจาก เรซิน (elution) และความเข้มข้น ของยูเรเนียมในสารละลาย	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.40 แสดงแบบ เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์.....	81
2.41 แสดงชุด Continuous ion-exchange column	82
2.42 แสดงชุด Continuous ion-exchange column	82
2.43 แสดงชุด Ion-exchange	83
2.44 แสดงชุด Ion-exchange แบบ belt type	83
2.45 แสดงชุด Resin-in-pulp	84
2.46 แสดงตะกร้าที่ใช้ใส่เรซินใน Resin-in-pulp ion-exchange	85
2.47 แสดงการเคลื่อนที่ของเรซินในแต่ละตะกร้าในกระบวนการ R.I.P.....	85
2.48 แสดงถังใส่เรซินในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแบบต่อเนื่อง	86
2.49 แสดงการสกัดด้วยตัวทำละลายครั้งเดียว	88
2.50 แสดงการสกัดแบบต่อเนื่องหลาย stages	90
2.51 แสดงการสกัดแบบตัวทำละลายกลับไปใช้ใหม่ได้	93
2.52 แสดงการสกัดลำดับส่วน	93
2.53 แสดงการสกัดลำดับส่วนเพื่อแยกยูเรเนียม, พลูโทเนียม และผลผลิตจาก ปฏิกิริยาแตกตัว	94
2.54 แสดงแผนภาพ McCabe-Thiele ที่ใช้คำนวณหาจำนวน stage	96
2.55 แสดงแผนภาพ McCabe-Thiele แสดงความเข้มข้นของสารในชั้นน้ำ และชั้นสารอินทรีย์ของแต่ละชั้น	97
2.56 แสดง McCabe-Thiele diagram แบบต่าง ๆ	98
2.57 ขอบเขตอัตราการไหลของการสกัดด้วยตัวทำละลาย	99
2.58 แสดงความสามารถในการสกัดยูเรเนียมของเอมีนชนิดต่าง ๆ	106
2.59 แสดงผลของ pH ต่อการสกัดยูเรเนียมโดยใช้เอมีนเป็นตัวสกัด	107
2.60 สมดุลไอโซเทอมของการสกัดยูเรเนียมจากสารละลายกรดด้วยเอมีน	107
2.61 แสดงผลของซิลิเกตไอออนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย	110
2.62 แสดงจำนวน stage ที่ใช้ในการสกัดที่ pH ต่าง ๆ	110
2.63 แสดงเส้นสมดุลของการกระจายตัวของยูเรเนียมในสารละลาย TBP 30 % ..	117
2.64 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียมที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของ ยูเรเนียมในชั้นน้ำ โดยใช้ TBP ในน้ำมันก๊าดสกัดที่อุณหภูมิห้อง	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.65	ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัวของยูเรเนียมใน TBP 30 % 119
2.66	แผนภาพแสดงการสกัดยูเรเนียมโดยกระบวนการคาเปกซ์ (Dapex) 121
2.67	แสดงกระบวนการสกัดแยกยูเรเนียมและวาเนเดียม 121
2.68	แสดงการสกัดยูเรเนียมด้วยกระบวนการเอแม็กซ์ 122
2.69	แสดงการสกัดยูเรเนียมด้วย 0.1 M tri-n-octylamine in 98 % Kerosene 2 % tri-decanol โดย aqueous phase pH 0.5M SO ₄ ⁺² . 124
2.70	แสดงกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์โดย Amex Process 125
2.71	ภาคตัดขวางแสดงการไหลของสารละลายใน Mixer Settler 126
2.72	แสดงการไหลของสารละลายใน mixer-settler 127
2.73	แผนภาพแสดงกระบวนการผลิต เค้ก เหลืองของบริษัท Kerr-McGee ไฮสทริอุม อเมริกา 128
2.74	แสดง Mixer-Settler แบบ In-line Mixer-Settler 129
2.75 (a)	แสดงรูปร่างของ Mixer-Settler แบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นแบบของเหลว ไหลในแนวระดับ 130
2.75 (b)	แสดงรูปร่างของ Mixer-Settler แบบต่าง ๆ ซึ่งของเหลวไหลใน แนวระดับ 131
2.76	แสดง Mixer-Settler แบบใช้เกลียวส่วนผสมของเหลว 132
2.77	แสดง Pump-Mix Mixer-Settler 133
2.78	แสดง Airlift Mixer-Settler 134
2.79	แสดง Airlift Mixer-Settler 135
2.80	แสดง Pulsed Mixer-Settler 136
2.81	แสดง Mixer-Settler แบบของเหลวไหลด้วยแรงโน้มถ่วง 136
2.82	Mixer-Settler สำหรับการสกัดยูเรเนียมด้วย TBP ของอังกฤษ(UKAEA).. 137
2.83	Mixer-Settler ใช้สำหรับทำเซอร์โคเนียมให้บริสุทธิ์ด้วยเฮกไซน- ไฮโอไซยาเนต 137
2.84	แสดงขนาดและโครงสร้างของใบพัดที่ใช้กับ Pump-Mix, Mixer-Settler.. 139
2.85	แสดงความสัมพันธ์การสร้างขนาดของใบพัดและห้อง Settler 140
2.86	แสดงการไหลของของเหลวของ Mixer-Settler แบบ box contactor.. 142

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.87 แสดงระดับของของเหลวในท้อง Mixer และท้อง Settler	142
2.88 แสดงการหาจำนวน stage จากการสกัดแบบ counter-current	145
2.89 แสดงเส้นสมดุลของการสกัดและการสกัดรีป	149
2.90 แสดงแผนภาพของการสกัดและการสกัดรีป	149
2.91 แสดงขนาดของ Mixer-Settler สำหรับการผลิตในระดับต่าง ๆ	151
2.92 แสดงแผนผังของ Pump-Mix Mixer-Settler	152
2.93 แสดงแผนผังของ Mixer-Settler แบบของเหลวไหลโดยแรงโน้มถ่วง ของโลก	153
2.94 แสดงแผนผังการทดสอบ Mixer-Settler ต้นแบบ	154
2.95 แสดง Pump-Mix Mixer-Settler ของ AAEC	155
2.96 แสดงการตกตะกอนของยูเรเนียมจากสารละลายซัลเฟตด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 23°C	161
2.97 แสดงการสลายตัวด้วยความร้อนของแอมโมเนียมไดยูเรเนต	165
3.1 แสดงเครื่องมือย่อยสลายแร่ระดับห้องทดลอง	167
3.2 แสดงชุด เครื่องมือในการย่อยสลายแร่ระดับห้องทดลอง	168
3.3 แสดงส่วนประกอบภายในของ Digester	169
3.4 แสดงชุด เครื่องย่อยสลายแร่ระดับกึ่งห้องทดลอง	169
3.5 แสดงคอลัมน์บรรจุเรซินและภาชนะ เก็บสารละลาย	170
3.6 แสดง เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนอย่างค่อเนื่อง	171
3.7 แสดงระบบวาล์วและระบบท่อของ เครื่องแลกเปลี่ยนไอออน	172
3.8 แสดงระบบควบคุมความร้อนที่ใช้ลูนเรซินและลูน eluant	173
3.9 แสดงส่วนประกอบของบีมม็อนสาร	173
3.10 แผนผัง Mixer-Settler ต้นแบบ	174
3.11 แสดงต้นแบบ Mixer-Settler ที่สร้าง	175
3.12 แผนผัง 21 stages Mixer-Settler ที่ใช้ในการทดลอง	176
3.13 (ก) 21 stages Mixer-Settler ที่สร้างขึ้น	177
3.13 (ข) แสดงการทดสอบระบบการไหลของของเหลวใน 21 stages Mixer-Settler	177

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงชุด 21 stages Mixer-Settler ขณะสกัดยูเรเนียม	178
3.15 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลว	178
3.16 แสดงเครื่องคกตะกอน เค้ก เหลืองพร้อมทั้งชุดควบคุม	179
3.17 แสดงเครื่องกรองสารละลายยูเรเนียมโดยใช้ทราย	180
3.18 แสดงเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์ (A A)	183
3.19 แสดงเครื่องอินดักทีฟสเปกโตรมิเตอร์ (ICPS)	183
3.20 แสดงเครื่องเรืองรังสีเอ็กซ์แบบ Wave length dispersive.....	184
3.21 แสดงเครื่องเรืองรังสีเอ็กซ์แบบ Energy dispersive.....	184
4.1 แสดงการไหลของของสารละลายและระบบวาล์วของ เครื่องแลกเปลี่ยนไอออน แบบค้อนเนื่อง	188
4.2 (ก) แสดงชุดเครื่องมือทดลองหาเวลาในการแยกชั้น	191
4.2 (ข) แสดงชุดทดสอบระบบของ Mixer-Settler คั่นแบบ	192
4.3 แสดงชุด Mixer-Settler 21 stages ที่ใช้สกัดยูเรเนียม	192
4.4 แสดงทิศทางการไหลของสารละลายใน 21 stages Mixer-Settler ...	193
4.5 แสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ทำยูเรเนียมให้บริสุทธิ์	194
4.6 แสดงเครื่องคกตะกอนยูเรเนียมแบบค้อนเนื่อง	195
5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมโดยใช้ MnO_2 ในปริมาณต่าง ๆ	196
5.2 แสดงผลของความเข้มข้นกรดที่มีผลต่อการย่อยสลายยูเรเนียม	198
5.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การละลายของยูเรเนียมที่ Pulp density ต่าง ๆ	199
5.4 แสดงผลของการย่อยสลายแร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	200
5.5 แสดงเปอร์เซ็นต์สกัดยูเรเนียมจากแร่ที่เวลาต่าง ๆ โดยการย่อยสลาย ด้วยกรดซัลฟูริกระดับกึ่งห้องทดลอง	201
5.6 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายหลังผ่าน เรซินของแคล์ คอลัมน์	202
5.7 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายหลังผ่าน เรซิน.....	203
5.8 แสดงปริมาณของยูเรเนียมและเหล็กในน้ำล้าง เรซิน	204
5.9 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายที่ใช้สกัดยูเรเนียมจาก เรซิน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	205

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 แสดงการเสื่อมสภาพของการจับยูเรเนียมของเรซิน	206
5.11 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายจากการอิไลคยูเรเนียม โดยใช้อัตราการใช้ของสารละลายต่างกัน	207
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้สกัดกับ เปอร์เซนต์การสกัดยูเรเนียม ของไดรอกทิล เอมีน	208
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซนต์การสกัดกับ เวลา	209
5.14 แสดงเส้นสมดุลของการสกัดด้วยไดรอกทิล เอมีน	211
5.15 แสดงเส้นสมดุลของการสกัดด้วยสารละลาย Na_2CO_3	212
5.16 แสดงระบบการไหลของของเหลวใน Mixer-Settler คั้นแบบ	213
5.17 แสดงการแยกชั้นในท้อง Settler	213
5.18 แสดงการเกิดตะกอนใน Mixer-Settler	214
5.19 แสดง เค้ก เหลืองที่ผลิตได้จากการวิจัยนี้	217
5.20 แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยวิธี เรืองรังสีเอ็กซ์	218
6.1 แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ตะกอนออกซาเลตจาก Barren Solution ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	222

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแร่ยูเรเนียม	7
2.2 แสดงช่วง pH ที่ยูเรนิลและยูเรนิลสัออนตกตะกอน	30
2.3 แสดงผลของความเร็วยวของเครื่องกวนที่มีต่ออัตราการละลายของยูเรเนียม	47
2.4 แสดงขั้นตอนในการทำยูเรเนียมให้บริสุทธิ์โดยวิธีต่าง ๆ	55
2.5 แสดงมาตรฐานความบริสุทธิ์ของเค้กเหลือง	56
2.6 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของ Duolite A 101 D เรซิน	60
2.7 แสดง Anion Exchange Resins ชนิดต่าง ๆ	61
2.8 แสดงค่าคงที่ของสมดุลในการจับอออนชนิดต่าง ๆ ของเรซิน	64
2.9 แสดงความสามารถในการจับยูเรเนียม เมื่อมีอออนชนิดต่าง ๆ ปนอยู่	66
2.10 แสดงผลของ Fe^{+3} ที่มีต่อความสามารถในการจับยูเรเนียมของเรซิน	68
2.11 แสดงสารที่ใช้เป็นตัวอิลูตกับเรซินชนิด Strong-Base	70
2.11/1 แสดงความเข้มข้นและความถี่จำเพาะของสารละลาย NaOH	78
2.12 Solution Flow Rates in column Ion-exchange	79
2.13 สารเคมีที่ใช้สกัดยูเรเนียม	102
2.14 แสดงผลของ diluent ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียม	104
2.15 แสดงผลของตัวออกซิไฟท์ที่มีต่อการสกัดยูเรเนียม	105
2.16 สัมประสิทธิ์การกระจายระหว่างสารละลายซัลเฟตและโครโอโซออกทิลเอมีน..	109
2.17 สัมประสิทธิ์การสกัดของอออนของโลหะด้วยเซกันดารี และเทอร์เชียรีเอมีน...	114
2.18 แสดงความเข้มข้นของโมลลิบ เคนัมที่ยอมให้มีได้ในตัวทำละลายอินทรีย์	116
2.19 แสดงลักษณะการกระจายตัวของแต่ละวัฏภาคที่มีผลต่ออัตราการไหลใน กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์.....	143
2.20 แสดงแบบลักษณะของ Mixer-Settler แบบของเหลวไหลในแนวระดับ ให้เหมาะสมกับงาน	156
2.21 ขนาดของ Mixer-Settler ของ KAPL และ AAEC ชนิด Pump-Mix	157
2.22 แสดงขนาดของ UKAEC Windscale Gravity-Flow Mixer-Settler ..	158
2.23 แสดงผลของความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีต่อการตกตะกอนยูเรเนียม	163

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.24 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการตกตะกอนยูเรเนียม	163
3.1 แสดงองค์ประกอบของแร่ยูซีไนต์	182
5.1 แสดงผลการสกัดยูเรเนียมโดยการใช้ MnO_2 ปริมาณต่าง ๆ กัน	196
5.2 แสดง เปอร์ เซนต์การสกัดยูเรเนียมโดยใช้กรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ...	197
5.3 แสดง เปอร์ เซนต์การละลายของยูเรเนียมในการย่อยสลายที่ Pulp density ต่าง ๆ	198
5.4 แสดง เปอร์ เซนต์การละลายของยูเรเนียมจากแร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	199
5.5 แสดงผลการละลายยูเรเนียมออกจากแร่	200
5.6 แสดงปริมาณของยูเรเนียมที่ปนมากับสารละลายหลังคั่นเรซินในแต่ละคอลัมน์..	201
5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมและเหล็กในสารละลายที่ใช้ล้างเรซิน..	204
5.8 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมที่หลุดมากับสารละลายที่ใช้อีลุตเรซินที่ อุณหภูมิต่าง ๆ	205
5.9 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในการอีลุตจากเรซินใหม่ และเรซินเก่า.....	206
5.10 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมจากการอีลุตด้วยอัตราการไหลต่าง ๆ	207
5.11 แสดง เปอร์ เซนต์การสกัดที่สัมพันธ์กับเวลา	208
5.12 แสดง เปอร์ เซนต์การสกัดรีปยูเรเนียมจากสารละลายโครออกทิล เอมีน.....	209
5.13 แสดง เวลาในการแยกชั้นของเอมีน	209
5.14 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมใน เอมีนและในชั้นน้ำที่สมดุล	210
5.15 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมใน เอมีนและในชั้นสารละลายโซเดียม คาร์บอเนต ที่สมดุล	210
5.16 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายชั้นน้ำและชั้นเอมีนของแต่ละ stage	215
5.17 แสดงความหนาแน่นของสารละลายแต่ละชั้นในกระบวนการสกัดด้วยเอมีน.....	216
5.18 แสดงผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของ แคท เหลือง	217