กระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยด้วยวิธีใช้กรด

นายทวี ศิริอุดมรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2527

ISBN 974-563-952-4

A PROCESS FOR YELLOW CAKE PRODUCTION FROM THAI-MONAZITE BY ACID METHOD

Mr. Thawee Siri-udomrat

COLLEGE OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY
36138

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1984

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่ไบนาไซต์ในประเทศไทยด้วยวิธีใช้กรด
โดย	นายทวี ศิริอุดมรัตน์
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ศิริวัฒนา ไทรสมบรูณ์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยด้วยวิธีใช้กรด

ชื่อนิสิต นาย ทวี ศิริอุดมรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2527

บทคัดย่อ

ได้ทดลองพัฒนากระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยด้วยวิธีใช้กรดซัลฟูริก โดยทำการย่อยแร่ที่สภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ กัน พบว่าการย่อยแร่ขนาด -200 ถึง +200 เมช ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 90 % ในอัตราส่วนของกรดต่อแร่เป็น 1.5:1 ที่อุณหภูมิประมาณ 200°ซ เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จะสามารถสกัดยูเรเนียมออกมาได้ถึง 96.307 % จากนั้นทำการแยกแรร์เอิร์ทและทอเรียมออกด้วยการตกตะกอนเป็นออกซาเลตโดยใช้กรดออกซาลิก แล้วจึงทำให้ยูเรเนียมบริสุทธิ์ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนอิออนลบ โดยใช้เรซินแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์เอ -400 และการอีลูตจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อใช้ไนเตรตเป็นอีลูแอนต์ นำสารละลายยูเรเนียมบริสุทธิ์มาตกตะกอนเป็นแอมโมเนียมไดยูเรเนต ด้วยสารละลายแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ที่ pH 4.30-9.25 แล้วนำไปอบให้แห้งและเผา จะได้เป็นเค้กเหลืองที่มีความบริสุทธิ์ตามกำหนดมาตรฐานของ USAEC โดยจะมี U_3O_8 เข้มข้นถึง 75.209 %

Thesis Title	A PROCESS FOR YELLOW CAKE PRODUCTION FROM THAI-MONAZITE BY ACID METHOD
Name	Mr. Thawee Siri-udomrat
Thesis Advisor	Assistant Professor Chyagrit Siri-Upathum
Department	Nuclear Technology
Academic Year	1984

ABSTRACT

A process for yellow cake production from Thai-monazite by sulfuric acid method was developed. It was found in the experiment that uranium extraction could reach 96.307 % by digestion -200 to +270 mesh ore with 90 % sulfuric acid with acid to ore ratio 1.5:1 at 200°C for 1.5 hrs. Separation of rare earths and thorium was done by precipitation as oxalate salts with oxalic acid. Purification of uranium was achieved by using anion-exchange method with Amberlite IRA-400 resins. Elution shows the highest efficiency when nitrate solution was used as eluant. Ammonium diuranate could subsequently be precipitated from the uranium eluate by ammonium hydroxide solution at pH of 4.30-9.25. Calcined yellow cake products meet the USAEC specification with uranium content greater than 75.209 % U_3O_8.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย สุมิตร หัวหน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยเรื่องนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ สุวรรณ แสงเพ็ชร์ ที่ริเริ่มและสนับสนุนให้มีการวิจัยในเรื่องนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำ แก้ปัญหา จนการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณวนิดา จีนศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในการทดลองจนการวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณพรศรี พันธุ์เพียร ที่ให้คำแนะนำบางประการต่อการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณมะลิวัลย์ แย้มพราย ที่ช่วยจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฑ

สารบัญภาพ ..... ด

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 คำนำ 1

1.2 ปัญหาและความสำคัญของการวิจัย 2

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 7

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 7

2. ยูเรเนียม 8

2.1 วัสดุนิวเคลียร์ 8

2.2 ประวัติ 9

2.3 ความสำคัญของยูเรเนียม 10

2.4 ต้นกำเนิดของแร่ยูเรเนียม 11

2.5 ชนิดของยูเรเนียม 12

2.6 แหล่งแร่ยูเรเนียม 15

2.7 คุณสมบัติของยูเรเนียม 23

2.7.1 คุณสมบัติทางกายภาพ 23

2.7.2 คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ 26

2.7.3 คุณสมบัติทางเคมี 32

2.8 ประโยชน์ของยูเรเนียม 38

3. โมนาไซต์ 40

3.1 ประวัติ 40

3.2 องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ 41

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.3 กำเนิดของแร่ไบนาไซต์ 41

3.4 แหล่งแร่ไบนาไซต์ 43

3.5 แร่ไบนาไซต์ในประเทศไทย 43

3.6 คุณสมบัติของแร่ไบนาไซต์ 44

3.7 การแปรสภาพแร่ไบนาไซต์ 44

3.7.1 การแต่งแร่ 44

3.7.2 การสกัด 45

3.7.2.1 กระบวนการสกัดด้วยกรดซัลฟูริก 45

3.7.2.2 กระบวนการสกัดด้วยโซดาไฟ 55

3.7.2.3 การสกัดด้วยวิธีอื่น 61

3.8 ผลผลิตและประโยชน์ของแร่ไบนาไซต์ 62

3.8.1 แรร์เอิร์ท 62

3.8.2 ทอเรียม 63

3.8.3 ไดรโซเดียมฟอสเฟต 64

4. กระบวนการผลิตเค้กเหลือง 65

4.1 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 65

4.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 65

4.1.2 การผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 67

4.2 กระบวนการผลิตเค้กเหลือง 72

4.2.1 การทำให้สินแร่มีคุณค่ามากขึ้น 72

4.2.1.1 ทำให้เข้มข้นโดยการแยกขนาด 73

4.2.1.2 ทำให้เข้มข้นด้วยแรงโน้มถ่วง 73

4.2.1.3 ทำให้เข้มข้นโดยการจำแนกพวก 74

4.2.1.4 ทำให้เข้มข้นโดยการใช้แม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ 74

4.2.1.5 การลอยแร่ 75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.2.2 การเตรียมสินแร่ 76

4.2.2.1 การคลุกแร่ 76

4.2.2.2 การบดหยาบ 77

4.2.2.3 การบดแร่ 78

4.2.3 การสกัด 78

4.2.3.1 การเผาแร่ 79

4.2.3.2 การชะล้าง 81

4.2.3.2.1 การชะล้างด้วยกรด 81

ก. หลักการทั่วไป 81

ข. เงื่อนไขของกระบวนการ 81

ค. อุปกรณ์การชะล้าง .. 91

ง. วิธีของการชะล้างด้วยกรด 91

4.2.3.2.2 การชะล้างด้วยคาร์บอเนต . 95

ก. หลักการทั่วไป 95

ข. เงื่อนไขและการแปรเปลี่ยนของกระบวนการ. 98

ค. วิธีการชะล้างด้วยคาร์บอเนต 99

ง. การออกซิเดชันในกระบวนการชะล้างด้วยคาร์บอเนต 103

4.2.3.2.3 การชะล้างด้วยวิธีอิน-ซิตู 106

4.2.3.2.4 การชะล้างกองแร่ 107

4.2.3.2.5 การชะล้างด้วยแบคทีเรีย 108

4.2.3.2.6 การชะล้างด้วยตัวทำละลาย .. 109

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.2.3.3 การแยกของ เหลว-ของแข็งออกจากกัน .. 111

ก. การแยกของ เหลว-ของแข็งในระบบที่ใช้ด่าง 111

ข. การแยกของ เหลว-ของแข็งในระบบที่ใช้กรด 113

ค. ฟลอกคู เลชัน 115

4.2.4 การทำให้ เข้มข้นและบริสุทธิ์ 117

4.2.4.1 การแลก เปลี่ยนอิออน 118

ก. เรื่องทั่วไป 118

ข. เคมีของกระบวนการแลก เปลี่ยนอิออน. 120

1) เรซิน 120

2) แอม เบอร์ไลต์-ไออาร์ เอ-400. 125

3) ปฏิกิริยาของการแลก เปลี่ยนอิออน. 126

ค. ลักษณะทางกายภาพของกระบวนการแลก เปลี่ยนอิออน 127

ง. หลักการแลก เปลี่ยนอิออน 130

1) การดูดซับ 130

2) อีลูชัน 137

3) เรซิน-พอยชันนิง 143

4) รี เจ เนอ เรชัน 146

จ. กระบวนการแลก เปลี่ยนอิออนและอุปกรณ์ที่ใช้ 148

1) การแลก เปลี่ยนอิออนแบบคอลัมน์ . 148

2) การแลก เปลี่ยนอิออนแบบ เรซิน-อิน-พัลพ์ 156

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.2.4.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย 161

4.2.4.2.1 การสกัดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง 164

4.2.4.2.2 การสกัดอิออนบวก 165

4.2.4.2.3 การสกัดอิออนลบเชิงซ้อน .. 166

4.2.4.2.4 กระบวนการต่าง ๆ ที่นิยมใช้. 168

4.2.5 การตกตะกอน 169

4.2.5.1 การตกตะกอนจากสารละลายกรดที่บริสุทธิ์ . 169

4.2.5.2 การตกตะกอนจากสารละลายด่าง 173

4.2.6 การเตรียมเค้กเหลือง 178

4.2.6.1 การขจัดน้ำออก 178

4.2.6.2 การทำให้แห้งและการเผา 180

5. วิธีดำเนินการวิจัย 182

5.1 อุปกรณ์และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการวิจัย 182

5.2 การบดแร่ 193

5.3 การแยกขนาดแร่ 193

5.4 การหาปริมาณยูเรเนียมในแร่ 193

5.5 การสกัดแร่ 194

5.6 การตกตะกอนแยกทอเรียมและแรร์เอิร์thออกจากน้ำชะล้าง 199

5.7 การแลกเปลี่ยนอิออน 201

5.8 การตกตะกอนแอมโมเนียมไดยูเรเนต 207

5.9 การเตรียมเค้กเหลือง 208

5.10 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเค้กเหลือง 208

6. ผลการวิจัย 209

6.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมในแร่โมนาไซต์ 209

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

6.2 ผลการย่อยแร่ที่สภาวะต่าง ๆ 209

6.2.1 ผลของขนาด เม็ดแร่ต่อการย่อย เพื่อสกัดยู เร เนียม 211

6.2.2 ผลของอัตราส่วนกรดต่อแร่ที่มีต่อการย่อย เพื่อสกัดยู เร เนียม .213

6.2.3 ผลของความ เข้มข้นของกรดต่อการย่อย เพื่อสกัดยู เร เนียม ..215

6.2.4 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อย เพื่อสกัดยู เร เนียม 217

6.2.5 ผลของ เวลาต่อการย่อย เพื่อสกัดยู เร เนียม 219

6.3 ผลของการล้างตะกอนกากแร่ 221

6.4 ยีลด์ของการสกัดยู เร เนียมจากแร่โมนาไซต์ 222

6.5 ผลของการตกตะกอนแรร์ เอิร์ท 223

6.5.1 ผลของปริมาณกรดออกซาลิกที่ใช้ตกตะกอนแรร์ เอิร์ท 223

6.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อการตกตะกอนแรร์ เอิร์ทด้วยกรดออกซาลิก 225

6.6 ผลจากการแลก เปลี่ยนอิออน 226

6.6.1 ผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดซับ เหล็ก 226

6.6.2 ผลการสร้างกราฟสารละลายยู เร เนียมมาตราฐาน 228

6.6.3 ผลของอีลูแอนต์ชนิดต่าง ๆต่อการอีลูตยู เร เนียม 228

6.6.3.1 ผลของการอีลูตยู เร เนียมด้วยซัล เฟต 228

6.6.3.2 ผลของการอีลูตยู เร เนียมด้วยคลอไรด์ 230

6.6.3.3 ผลของการอีลูตยู เร เนียมด้วยไน เตรต 231

6.6.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อการดูดซับยู เร เนียม 232

6.6.5 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อการดูดซับยู เร เนียม 235

6.7 ผลของการตกตะกอนแอมโม เนียม ไดยู เร เนต 237

6.7.1 ผลของ pH ที่เริ่มตกตะกอนแอมโม เนียม ไดยู เร เนต ... 237

6.7.2 ผลของ pH ของสารละลายต่อการตกตะกอนแอมโม เนียม ไดยู เร เนต 237

6.8 ผลการวิเคราะห์เค้ก เหลือง 239

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 241

7.1 สรุปผลการวิจัย 241

7.2 ข้อเสนอแนะ 246

เอกสารอ้างอิง 247

ประวัติผู้เขียน 262

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การผลิตโมนาไซต์เข้มข้นของโลก	5
1.2	ผลผลิตแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยและปริมาณการส่งออกนอกประเทศ	6
2.1	คุณสมบัติของธาตุพิสไซล์	8
2.2	แร่ยูเรเนียมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญพร้อมทั้งส่วนประกอบของแร่	12
2.3	แร่ยูเรเนียมตามคุณสมบัติทางโลหะวิทยา	15
2.4	ปริมาณยูเรเนียมที่มีอยู่ในส่วนต่างๆของโลก	16
2.5	แหล่งแร่ยูเรเนียมในส่วนต่างๆของโลก	20
2.6	คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะยูเรเนียม	23
2.7	ไอโซโทปของยูเรเนียมในธรรมชาติ	26
2.8	ไอโซโทปต่างๆของยูเรเนียม	26
2.9	การสลายตัวของผลิตผลของ ^{238}U	28
2.10	การสลายตัวของผลิตผลของ ^{235}U	29
2.11	ปฏิกิริยาทางเคมีของโลหะยูเรเนียม	33
3.1	ส่วนประกอบของแร่โมนาไซต์จากประเทศต่างๆ	41
3.2	องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์	42
3.3	องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ก่อนแต่งแร่	45
3.4	ส่วนประกอบของผลึกไดรโซเดียมฟอสเฟตและน้ำล้างภายหลังการตกผลึก	58
4.1	องค์ประกอบมาตราฐานของเค้กเหลือง	70
4.2	ช่วงของ pH ที่อิออนลบชนิดต่างๆสามารถตกตะกอนยูเรเนียมจากสาร-ละลายซัลเฟตได้	84
4.3	ศักดาออกซิเดชัน-รีดักชันในสารละลายชะล้างของยูเรเนียม	89
4.4	ผลของออกซิแดนต์ต่อการละลายของ UO_2	105
4.5	ส่วนประกอบอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิดที่ใช้ในการชะล้าง (Silverman 9K)	110
4.6	องค์ประกอบของเรซินสังเคราะห์	121

ตารางที่ หน้า

4.7 เรซินชนิดต่าง ๆที่ใช้ในทางการค้า 121

4.8 เรซินแลกเปลี่ยนอิออนบวกชนิดต่าง ๆ 122

4.9 เรซินแลกเปลี่ยนอิออนลบชนิดต่าง ๆ 123

4.10 เรซินแลกเปลี่ยนอิออนลบที่ใช้กับยูเรเนียม 124

4.11 คุณสมบัติของตัวแลกเปลี่ยนอิออนทั้งสองชนิด 125

4.12 คุณสมบัติของ Amberlite IRA-400 126

4.13 ความสามารถถูกดูดซับได้ของอิออนแบบต่าง ๆของยูเรเนียม 131

4.14 กระบวนการรีเจเนอเรชันของเรซิน 147

4.15 เงื่อนไขของระบบ RIP 160

4.16 ตัวทำละลายที่ใช้แยกยูเรเนียมโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย 162

4.17 สารที่ใช้ในการสกัดยูเรเนียมด้วยตัวทำละลายจากสารละลายน้ำ 163

4.18 อัตราการกรองของตะกอนเค้กเหลืองแบบต่าง ๆ 179

6.1 ปริมาณยูเรเนียมในแร่โมนาไซต์ขนาดต่าง ๆ 209

6.2 ค่าความของรังสีเอกซ์เรืองของสารละลายมาตราฐานยูเรนีล ซัลเฟต เมื่อวัดในรูปของสารละลาย 211

6.3 ผลของขนาดเม็ดแร่ต่อการย่อยเพื่อสกัดยูเรเนียม 213

6.4 ผลของอัตราส่วนกรดต่อแร่ที่มีต่อการย่อยเพื่อสกัดยูเรเนียม 215

6.5 ผลของความเข้มข้นของกรดต่อการย่อยเพื่อสกัดยูเรเนียม 217

6.6 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยเพื่อสกัดยูเรเนียม 219

6.7 ผลของเวลาต่อการย่อยเพื่อสกัดยูเรเนียม 221

6.8 ผลของการล้างยูเรเนียมออกจากตะกอนกากแร่ 222

6.9 ผลของยีลด์ของการสกัดยูเรเนียมจากแร่โมนาไซต์ 222

6.10 ผลของปริมาณกรดออกซาลิกต่อการตกตะกอนแรร์เอิร์ท 223

6.11 ผลของอุณหภูมิต่อการตกตะกอนแรร์เอิร์ทด้วยกรดออกซาลิก 225

6.12 ผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดซับเหล็ก 226

6.13 ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองของสารละลายยูเรเนียมมาตราฐาน เมื่อวัดในรูปของสารละลายแห้งบนกระดาษกรอง 228

ตารางที่ หน้า

6.14 ผลของการอีลูตยูเรเนียมด้วยซัลเฟต 230

6.15 ผลของการอีลูตยูเรเนียมด้วยคลอไรด์ 231

6.16 ผลของการอีลูตยูเรเนียมด้วยไนเตรต 232

6.17 ผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อการดูดซับยูเรเนียม 235

6.18 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อการดูดซับยูเรเนียม 237

6.19 ผลของ pH ของสารละลายต่อการตกตะกอนแอมโมเนียม ไดยูเรเนต 239

6.20 ผลของการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์เค้กเหลืองเปรียบเทียบกับค่ามาตราฐาน 240

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	การเปลี่ยนสถานะของยูเรเนียม	24
2.2	การสลายตัวของ ^{238}U	27
2.3	การสลายตัวของ ^{235}U	28
2.4	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของวัสดุฟิสไซล์ ^{235}U	29
2.5	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของวัสดุเฟอร์ไทล์ ^{238}U และ ^{232}Th	30
2.6	ปฏิกิริยาลูกโซ่	31
2.7	ผลผลิตจากการแตกตัวของ ^{235}U	31
2.8	โพเทนเชียลไดอะแกรมของยูเรเนียมใน 1.0N $HClO_4$ ที่ 25 °ซ	34
2.9	การเปลี่ยนแปลงจากโลหะยูเรเนียมเป็นออกไซด์ของยูเรเนียม	37
3.1	ขั้นตอนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยการใช้กรดซัลฟุริก	46
3.2	การตกตะกอนของสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟต	51
3.3	การตกตะกอนด้วยตัวทำละเทิน	52
3.4	การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยการใช้โซดาไฟ	56
4.1	วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์	68
4.2	แผนภูมิแสดงการเตรียมยูเรเนียมเกรดนิวเคลียร์จากเค้กเหลือง	71
4.3	การเปลี่ยนแปลง EMF และอัตราการละลายของ UO_2 เมื่อใช้คลอเรตกับ เมื่อใช้เหล็กผสมคลอเรต	88
4.4	ผลของ Fe^{+3} ต่อการสกัดยูเรเนียม	88
4.5	ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟุริกต่อการสกัดยูเรเนียม	90
4.6	แผนภูมิการชะล้างด้วยกรด	92
4.7	แผนภูมิการชะล้างด้วยการทำพักกิง	94
4.8	ผลของอุณหภูมิ ความดันของออกซิเจน และความเข้มข้นรวมของไบคาร์บอเนต-คาร์บอเนต ต่ออัตราการละลายของยูเรเนียม	99
4.9	แผนภูมิการชะล้างด้วยอัลคาไลน์คาร์บอเนต	100
4.10	แผนภูมิการชะล้างด้วยตัวทำละลาย	110

รูปที่ หน้า

4.11 โครงสร้างของควอ เตอร์นารี-แอมโม เนียม ซึ่ง เป็น เรซินแลก เปลี่ยนอิออนลบ 124

4.12 จุด เบรคทรูและจุดอิ่มตัวของการดูดซับยู เร เนียมด้วย เรซิน 131

4.13 กราฟของการ เกิดอีลูชันของอีลูแอนด์ชนิดต่างๆ 139

4.14 อีลูชันของ เรซินบริสุทธ์กับ เรซินที่มีพอยชัน 145

4.15 ความ เข้มข้นของยู เร เนียมใน เรซินที่สัมพันธ์กับความลึกของ เม็ด เรซินใน คอลัมน์ที่สอง 149

4.16 การแลก เปลี่ยนอิออนแบบสามคอลัมน์ 149

4.17 การแลก เปลี่ยนอิออนแบบสี่วัฏจักร (คอลัมน์) 150

4.18 กราฟแสดงการรั่วออกของยู เร เนียมในการแลก เปลี่ยนอิออนแบบคอลัมน์ 151

4.19 สารละลายที่ไหลผ่านระบบการแลก เปลี่ยนอิออนแบบสามคอลัมน์ 153

4.20 คอลัมน์แลก เปลี่ยนอิออนแบบฟิกซ์ เบดที่ใช้กับยู เร เนียม 155

4.21 การแลก เปลี่ยนอิออนแบบต่อ เนื่องด้วยระบบสามคอลัมน์ 156

4.22 วงจรแสดงการไหลของสารละลายในกระบวนการ RIP แบบ 14 ชุด 157

4.23 ตะกร้า RIP 159

4.24 ระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย 162

4.25 แผนภูมิกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่างๆในการแยกยู เร เนียม ออกจากสารละลายซัล เฟต 168

4.26 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการตกตะกอนยู เร เนียมด้วยโซ เดียมไฮดรอกไซด์ 175

4.27 อุณหภูมิที่ใช้ในการ เผาสลายแอมโม เนียม ไดยู เร เนต 180

5.1 เครื่องบดแร่ 188

5.2 เครื่องแยกขนาด เม็ดแร่ 188

5.3 เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer 189

5.4 ชุด เครื่องมือสำหรับย่อยแร่ 189

5.5 ชุด เครื่องมือแลก เปลี่ยนอิออน 190

5.6 คอลัมน์แลก เปลี่ยนอิออน 190

5.7 ชุด เครื่องมือตกตะกอนแอมโม เนียม ไดยู เร เนต 191

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

5.8 เครื่องอินดักทีฟ คัพเปิล พลาสม่า อิมิชชัน สเปกโตรมิเตอร์ 191

5.9 แผนภูมิของระบบการวัดด้วยรังสีเอกซ์เรืองแสง 192

5.10 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทย ด้วยวิธีใช้กรด 195

6.1 กราฟสารละลายมาตราฐานยูเรเนียม (วัดในรูปของสารละลาย) 210

6.2 ผลของขนาดเม็ดแร่ต่อการสกัดยูเรเนียม 212

6.3 ผลของอัตราส่วนกรดต่อแร่ที่มีต่อการสกัดยูเรเนียม 214

6.4 ผลของความเข้มข้นของกรดต่อการสกัดยูเรเนียม 216

6.5 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดยูเรเนียม 218

6.6 ผลของเวลาต่อการสกัดยูเรเนียม 220

6.7 ผลของปริมาณกรดออกซาลิกต่อการตกตะกอนของแรร์เอิร์ท 224

6.8 ผลของ pH ต่อการดูดซับเหล็ก 227

6.9 กราฟสารละลายมาตราฐานยูเรเนียม (วัดจากสารละลายแห้งบนกระดาษกรอง) 229

6.10 ผลของอีลูแอนต์ทั้งสามชนิดต่อการอีลูตยูเรเนียม 233

6.11 ผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับยูเรเนียม 234

6.12 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับยูเรเนียม 236

6.13 ผลของ pH ต่อการตกตะกอนแอมโมเนียม ไดยูเรเนต 238