5

การพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยผ่านแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต

นางสาว วรรณา ศรีชวนชื่นสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวเคมีเทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2528

ISBN 974-564-794-2

009530
17207320

DEVELOPMENT OF A PRODUCTION PROCESS FOR URANIUM DIOXIDE FUEL PELLETS VIA AMMONIUM URANYL CARBONATE

MISS WANNA SRICHUANCHUENSKUL

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	การพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยผ่านแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต
โดย	นางสาว วรรณา ศรีชวนชื่นสกุล
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. เผด็จ สิทธิสุนทร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ สุพิชชา จันทร์โยธา)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยผ่านแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต

ชื่อนิสิต นางสาว วรรณา ศรีชวนชื่นสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ได้ทดลองผลิตเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยใช้กระบวนการผลิต ผ่านสารประกอบแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเตรียมตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต คือ ใช้สารละลายยูเรนิล ไนเตรตเข้มข้น 200 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการใช้ที่พอดีทำให้สารละลายยูเรนิล ไนเตรต มีความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 7.0 และสารละลายแอมโมเนียม คาร์บอเนตเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนจำนวนโมลของคาร์บอนและยูเรเนียมเท่ากับ 7.5 ควบคุมการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตะกอนที่ได้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ได้นำมาอัดเป็นเม็ดโดยตรง ไม่ต้องมีตัวประสาน แล้วเผาประสานด้วยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และรีดิวซ์ต่อเพื่อให้เป็น UO_2 ด้วยก๊าซไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ได้มีความหนาแน่นมากกว่า 91 เปอร์เซ็นต์ ของค่าทฤษฎี และมีค่าอัตราส่วนจำนวนโมล ของออกซิเจน และยูเรเนียม เท่ากับ 2.02

Thesis Title	Development of a Production Process for Uranium Dioxide Fuel Pellets Via Ammonium Uranyl Carbonate
Name	Miss Wanna Srichuanchuenskul
Thesis Advisor	Assistant Professor Chyagrit Siri - Upathum
Department	Nuclear Technology
Academic year	1985

ABSTRACT

A production process for uranium dioxide fuel pellets via ammonium uranyl carbonate was developed. The optimum conditions to produce ammonium uranyl carbonate precipitates were found to be : 200 g/l uranyl nitrate solution , the amount required for neutralization of the uranyl nitrate solution to pH 7.0 and 25% ammonium carbonate solution , C/U ratio of 7.5 , 40° C . The precipitates were dried at 80° C , calcined and reduced to UO_2 powder at 550° C in hydrogen atmosphere which was subsequently pressed to pellets without binder. Sintering and reduction was done at 1100° C , 1 hour each in CO_2 and H_2 atmosphere respectively. The final UO_2 pellets have density of more than 91% theoretical density and O/U ratio of 2.02

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ สุวรรณ แสงเพ็ชร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนับสนุน แนะนำ แก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณพิทักษ์ หองคง และคุณบุญสืบ ราชรัตนารักษ์ ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณสายใจ ลินจุลานนท์ ที่ช่วยจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วีระชัย บัญชรเทวกุล ที่ให้ข้อแนะนำในการวิเคราะห์ครั้งนี้

สุดท้าย ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 คำนำ 1

1.2 ความสำคัญของการวิจัย 1

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย 2

บทที่ 2 เรื่องทั่วไปเกี่ยวกับยูเรเนียม 3

2.1 การค้นพบและคุณสมบัติ 3

2.1.1 ประวัติ 3

2.1.2 ชนิดของยูเรเนียม 3

2.1.3 คุณสมบัติของยูเรเนียม 4

2.2 ออกไซด์ของยูเรเนียม 10

2.3 ยูเรเนียม ไดออกไซด์ 15

2.3.1 คุณสมบัติของผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 15

2.3.2 คุณสมบัติของยูเรเนียม ไดออกไซด์ หลังเผาประสาน 21

2.3.3 พฤติกรรมของเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์
ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 22

บทที่ 3 กระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 32

3.1 การผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 32

3.2 กระบวนการผลิตผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 กระบวนการเคมีแบบแห้ง 33
3.2.2 กระบวนการเคมีแบบเปียก 34
3.2.2.1 กระบวนการเอดียู 34
3.2.2.2 กระบวนการเอยูซี 37
3.3 การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 48
3.3.1 วิธีแกรนูเลชัน 48
3.3.2 การอัดโดยตรง 48
3.4 การเผาประสาน 49
3.4.1 การเผาประสานแบบรีดิวซ์ 49
3.4.2 การเผาประสานแบบออกซิไดซ์ 49
3.5 คุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ได้จาก
กระบวนการเอยูซี 55
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย 60
4.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 60
4.1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ 60
4.1.2 สารเคมี 61
4.2 การเตรียมตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต 64
4.2.1 ทดลองหาความเข้มข้นของสารละลายยูเรนิล ไนเตรต
ที่เหมาะสม 64
4.2.2 ทดลองหาอัตราส่วนของจำนวนโมลของคาร์บอน และ
ยูเรเนียมที่เหมาะสม 64
4.2.3 ทดลองหาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 65
4.2.4 ทดลองหาชนิดของสารละลายที่ประกอบด้วย
แอมโมเนียม คาร์บอเนตที่เหมาะสม 65
4.3 การเตรียมผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การอัดและเผาประสาน 67
4.4.1 เผาประสานแบบออกซิไดซ์ 67
4.4.2 เผาประสานแบบรีดิวซ์ 67
บทที่ 5 ผลการวิจัย 68
5.1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต 68
5.1.1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของสารละลายยูเรนิล ไนเตรตที่เหมาะสม 68
5.1.2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนจำนวนโมลของคาร์บอน และยูเรเนียมที่เหมาะสม 71
5.1.3 ผลการทดลองหาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 76
5.1.4 ผลการทดลองหาชนิดของสารละลายที่ประกอบด้วย แอมโมเนียม คาร์บอเนตที่เหมาะสม 78
5.2 ผลการวิเคราะห์ผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 81
5.3 ผลการวิเคราะห์เม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ 91
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 104
6.1 สรุปผลการเตรียมตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต 104
6.2 สรุปผลการเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 105
6.3 ข้อเสนอแนะ 107
เอกสารอ้างอิง 108
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองหาการกระจายขนาดอนุภาคของแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต และยูเรเนียม ไดออกไซด์ 112
ภาคผนวก ข. วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย 123
ภาคผนวก ค. รูปแสดงลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ไดยูเรเนต 128
ประวัติผู้เขียน 129

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ไอโซโทปของยูเรเนียมในธรรมชาติ	3
2.2	กระบวนการเพิ่มสมรรถนะของ ^{235}U	4
2.3	ไอโซโทปต่าง ๆ ของยูเรเนียม	6
2.4	การสลายตัวของผลิตผลของ ^{238}U	7
2.5	การสลายตัวของผลิตผลของ ^{235}U	8
2.6	คุณสมบัติของ UO_3	14
2.7	แสดงจุดหลอมเหลวของ UO_2 ในบรรยากาศต่าง ๆ	18
2.8	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของยูเรเนียม ไดออกไซด์	20
2.9	ผลของวิธีการเผาประสานต่อค่าการนำความร้อน ค่าอัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียม และความหนาแน่น	21
2.10	กระบวนการผลิตผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ วิธีต่าง ๆ และค่าความหนาแน่นของยูเรเนียม ไดออกไซด์หลังเผาประสาน	22
3.1	แสดงคุณสมบัติของสารประกอบยูเรเนียมที่สามารถใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้	33
3.2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต	47
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสาน	50
3.4	ปริมาณของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในผงและเพลเลทของยูเรเนียม ไดออกไซด์	56
5.1	แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายยูเรนิล ไนเตรต	68
5.2	ผลการวิเคราะห์ตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนจำนวนโมลของคาร์บอนและยูเรเนียม	71
5.3	ผลการวิเคราะห์ตะกอนแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.4 แสดงผลการวิเคราะห์แอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต โดยเปลี่ยนแปลงชนิดของสารละลายของแอมโมเนียม คาร์บอเนต 78

5.5 ผลการวิเคราะห์ผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 81

5.6 ผลการวิเคราะห์กรีนเพลเลทและซินเตอร์เพลเลทของยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยการเผาประสานแบบออกซิไดซ์ที่ 1100 องศาเซลเซียส 92

5.7 ผลการวิเคราะห์กรีนเพลเลทและซินเตอร์เพลเลทของยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยการเผาประสานแบบรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 102

6.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีระหว่างตัวอย่างที่ได้จากการเตรียม ซึ่งได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดและค่าตามทฤษฎี 106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเปลี่ยนแปลงสถานะของยูเรเนียม	5
2.2	ปฏิกิริยาการแตกตัวแบบลูกโซ่	9
2.3	ผลผลิตจากการแตกตัวของ ^{235}U	9
2.4	เฟส ไดอะแกรมของออกไซด์ยูเรเนียม ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1500 °C	11
2.5	เฟส ไดอะแกรมของออกไซด์ยูเรเนียม ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C	12
2.6	รูปร่างผลึกของ UO_2	15
2.7	การเกิดออกซิเดชันขึ้นเองของ UO_2 ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง	16
2.8	เฟส ไดอะแกรมของ $UO_2 - U_3O_8$	17
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของ UO_2 กับอุณหภูมิ และความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลง	18
2.10	ผลของอัตราส่วนของออกซิเจนและยูเรเนียมที่มีต่อการนำความร้อนของยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	19
2.11	ผลของการถูกรังสีนิวตรอนปริมาณต่าง ๆ ต่อค่าการนำความร้อนของ UO_2 ที่อุณหภูมิ 60 °C	20
2.12	ระบบควบคุมคุณภาพวัสดุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของ KWU	23
2.13	แสดงลักษณะรอยร้าวของเม็ดเชื้อเพลิง	25
2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอัตราการเกิดเบิร์นอัพของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่มีความหนาแน่น 95% TD	26
2.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอัตราการเกิดเบิร์นอัพของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน	27
2.16	กลไกการปลดปล่อยฟิชชันก๊าซ	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.17 ความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยฟิชชันก๊าซกับรูพรุนเปิด หลังการเบิร์นอัพไป 1 วัฏจักร 29
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารูพรุนเปิดกับความหนาแน่นของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ 30
2.19 กลไกการเกิดพีซีไอ (Pellet / Clad interaction) 31
3.1 ขั้นตอนการผลิตยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยกระบวนการเอดียู 35
3.2 แสดงแผนผังเครื่องมือที่ใช้ผลิต โดยกระบวนการเอดียู 36
3.3 แสดงขั้นตอนของกระบวนการเอยูซี 38
3.4 แสดงการผลิตผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยกระบวนการเอยูซี ที่ RBU .. 38
3.5 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของตะกอนเอยูซีและยูเรเนียม ไดออกไซด์ 39
3.6 แสดงการกระจายของขนาดรูพรุนของผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 40
3.7 แสดงเครื่องมือการตกตะกอนเอยูซี 41
3.8 แสดงเครื่องมือการตกตะกอนเอยูซีแบบต่อเนื่อง 42
3.9 แสดงเตาเผาแบบ fluidized bed ในเตาเผาและรีดิวซ์เอยูซีเป็นยูเรเนียม ไดออกไซด์ 43
3.10 ผลของอุณหภูมิในการตกตะกอนที่มีต่อการกระจายขนาดอนุภาคของผงเอยูซี 44
3.11 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย UNH ที่มีต่อการกระจายขนาดอนุภาคของผง AUC 45
3.12 ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อยูเรเนียม ที่มีต่อการกระจายขนาดอนุภาคของผง AUC 45
3.13 ผลของชนิดสารละลายแอมโมเนียม คาร์บอเนต ที่มีต่อการกระจายของอนุภาคของผง AUC 46
3.14 แสดงลักษณะของผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ จากกระบวนการเคมีแบบแห้งและกระบวนการเอยูซี 47
3.15 กราฟเปรียบเทียบการเผาประสานแบบรีดิวซ์และออกซิไดซ์ 51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.16 แสดงการเผารีดิวซ์ของการเผาประสานแบบออกซิไดซ์ของยูเรเนียม ไดออกไซด์ ในบรรยากาศของไฮโดรเจน 51

3.17 กราฟเปรียบเทียบการเผาประสานแบบรีดิวซ์ ของยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการเอยูซี และกระบวนการเคมีแบบแห้ง 52

3.18 แสดงวิธีการเผาประสาน เพื่อใช้ควบคุมโครงสร้างของเม็ดเชื้อเพลิง 53

3.19 เปรียบเทียบเตาเผาที่ใช้ในการเผาประสานแบบรีดิวซ์ และแบบออกซิไดซ์ 54

3.20 แสดงลักษณะของเอยูซี และยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ผลิตโดย KWU 55

3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง กับพื้นที่ผิวจำเพาะของผงยูเรเนียม ไดออกไซด์ 57

3.22 แสดงโครงสร้างรูพรุนของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่มีการขึ้นรูปแตกต่างกัน 58

3.23 แสดงความแตกต่างของโครงสร้างและความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง ยูเรเนียม ไดออกไซด์ เมื่อมีการเติม U_3O_8 ปริมาณต่างกัน 59

4.1 Sedimentation analyzer RS-1000 61

4.2 Elemental analyzer Model 240 C 62

4.3 เตาเผาแบบท่ออุณหภูมิ 1400 °C 62

4.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก 63

4.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง 63

4.6 แสดงเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผารีดิวซ์แอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต 66

ฌ 5.1 (ก) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 69

5.1 (ข) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 2 69

5.1 (ค) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 3 70

5.1 (ง) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 4 70

5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนโมลของคาร์บอน และยูเรเนียม กับปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต.. 72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3 (ก) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 5 73
5.3 (ข) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 6 73
5.3 (ค) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 7 74
5.3 (ง) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 8 74
5.3 (จ) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 9 75
5.3 (ฉ) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 10 75
5.3 (ช) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 11 76
5.4 (ก) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 12 77
5.4 (ข) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 13 77
5.4 (ค) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 14 78
5.5 (ก) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 15 79
5.5 (ข) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 16 79
5.5 (ค) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 17 80
5.5 (ง) ลักษณะของผลึกแอมโมเนียม ยูเรนิล คาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 18 80
5.6 (1) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 82
5.6 (2) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 4 83
5.6 (3) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 5 และตัวอย่างที่ 6 84
5.6 (4) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 7 และตัวอย่างที่ 8 85
5.6 (5) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 9 และตัวอย่างที่ 10 86
5.6 (6) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 11 และตัวอย่างที่ 12 87
5.6 (7) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 13 และตัวอย่างที่ 14 88
5.6 (8) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 15 และตัวอย่างที่ 16 89
5.6 (9) ลักษณะของผลึกยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 17 และตัวอย่างที่ 18 90
5.7 แสดงลักษณะของกรีนเพลเลทของยูเรเนียม ไดออกไซด์ 91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.8 (1) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์..... 93

ตัวอย่างที่ 1 โดยเผาประสานแบบออกซิไดซ์ที่ 1100 องศาเซลเซียส 93

5.8 (2) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 2..... 93

5.8 (3) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 3..... 94

5.8 (4) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 4..... 94

5.8 (5) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 5..... 95

5.8 (6) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 6..... 95

5.8 (7) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 7..... 96

5.8 (8) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 8..... 96

5.8 (9) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 9..... 97

5.8 (10) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 10.... 97

5.8 (11) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 11.... 98

5.8 (12) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 12.... 98

5.8 (13) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 13.... 99

5.8 (14) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 14.... 99

5.8 (15) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 15.... 100

5.8 (16) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 16.... 100

5.8 (17) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 17.... 101

5.8 (18) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 18.... 101

5.9 (1) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ จากการ 103

เผาประสานแบบรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ของตัวอย่างที่ 1 103

5.9 (2) ลักษณะโครงสร้างของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ตัวอย่างที่ 16 จาก 103

การเผาประสานแบบรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส..... 103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย