

การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนำมวลเบาที่  
ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์



นางสาวสุภา ศีรินาม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF ADVANCED SURROGATE LIGHT WATER REACTOR FUEL PELLETS  
COMPOSED OF METALLIC CERIUM POWDER AND ZIRCONIUM HYDRIDE



Miss Supha Sirinam

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่อง  
ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะ  
ซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์

โดย

นางสาวสุภา ศิรินาม

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

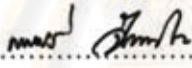
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

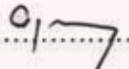
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุลยพงศ์ วงศ์แสง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุลยพงศ์ วงศ์แสง)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

สุภา ศิรินาม : การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบกั่วหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์.  
 (FABRICATION OF ADVANCED SURROGATE LIGHT WATER REACTOR FUEL PELLETS COMPOSED OF METALLIC CERIUM POWDER AND ZIRCONIUM-HYDRIDE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.ศุภพงษ์ วงศ์แสง, 72 หน้า.

ผลงานนิวเคลียร์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในปัจจุบัน และได้มีงานวิจัยเพื่อพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มากขึ้นตามลำดับ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบใหม่สำหรับใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา โดยประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผลิตได้ 3 ประการคือ ความหนาแน่น หาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio) และการทดสอบ High temperature quench ซึ่งผลที่ได้คือเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านการแพร่ไฮโดรเจนจะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแพร่ไฮโดรเจน และเม็ดที่มีค่า H/Zr ratio สูงกว่าจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่า ส่วนการหาค่า H/Zr ratio ได้ทำการวิเคราะห์ 2 วิธีคือการคำนวณจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ผลที่ได้คือเม็ดเชื้อเพลิงที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนให้ค่า H/Zr ratio ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับให้ค่า H/Zr ratio สูงกว่าค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับเป็นค่าเฉลี่ยที่ผิว ส่วนค่าที่ได้จากเครื่อง TGA เป็นค่าเฉลี่ยทั้งเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง การทดสอบ High temperature quench เป็นการทดสอบความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง โดยเผาที่อุณหภูมิ 700 °C แล้วปล่อยลงน้ำที่อุณหภูมิต่ำอย่างรวดเร็ว พบว่าในการทดลองครั้งแรกน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงสูงขึ้น และลดลงเมื่อทำการทดลองต่อเนื่อง 4 ครั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากขณะที่ทำการเผาเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเกิดออกไซด์ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นในตอนแรก และเมื่อนำกลับมาเผาใหม่และปล่อยลงน้ำทำให้เม็ดเชื้อเพลิงแตกและร่วงออกบางส่วน เป็นสาเหตุให้น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....๙๗.....  
 ปีการศึกษา...2553.....

## 5170504021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : CERIUM ZIRCONIUM FUEL/ HYDROGEN PER ZIRCONIUM RATIO

SUPHA SIRINAM: FABRICATION OF ADVANCED SURROGATE LIGHT WATER REACTOR FUEL PELLETS COMPOSED OF METALLIC CERIUM POWDER AND ZIRCONIUMHYDRIDE. THESIS ADVISOR: DOONYAPONG WONGSAWAENG, Ph.D., 72 pp.

Nowadays, nuclear power has been used much more widely, together with increasing research activities on nuclear fuel development. This thesis presents a nuclear fuel development research in Thailand. The objective of this study was to fabricate advanced surrogate fuel pellets for light water reactors. The pellets consisted of cerium powder and zirconium hydride. Three properties of surrogate fuel pellets were determined: density, hydrogen-to-zirconium ratio (H/Zr ratio), and performance under high temperature quench test. The results showed that the surrogate fuel pellets which underwent hydrogen diffusion exhibited higher density than those which did not undergo this process. In addition, pellets with higher H/Zr ratio exhibited more density than those with lower H/Zr ratio. Two methods were used to determine the H/Zr ratio: TGA data calculation and reflective beta backscatter. Results indicated that pellets which underwent the hydrogen diffusion process exhibited the H/Zr ratio in the same direction. Moreover the ratio from reflective beta backscatter determination was higher than that from TGA calculation. This was because results from reflective beta backscatter represented the surface average, while the value from TGA calculation represented the average of the whole pellet. High temperature quench test was used to determine, the strength of surrogate fuel pellets. Pellets were heated to 700 °C and then quickly dropped into water at room temperature. Results indicated that pellets weighted more after the first quench, and then decreased after four subsequent quenches. This was because of oxide formation during the initial heating, and in later heating and quenches the pellets cracked and some parts turned into loose powder, reducing the weight of the pellet specimens.

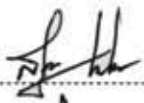
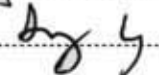
Department : ...Nuclear Technology...

Student's Signature

Field of Study : ...Nuclear Technology...

Advisor's Signature

Academic Year : ..... 2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจาก ผศ.ดร.ดุลยพงศ์ วงศ์แสง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษาและ ตรวจสอบรายงานการวิจัยจนได้เล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุน งานวิจัยในการทำวิจัย มา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณวรวิมล ประสิทธิ์วุฒิศักดิ์ ที่ช่วยในการจัดอุปกรณ์การทดลอง และ ทำให้การทดลองเป็นไปอย่างราบรื่น

และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ สนับสนุนงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อคุณพ่อ คุณแม่ ผู้ซึ่งให้ความเมตตากรุณาเป็น กำลังใจให้การศึกษาของผู้เขียนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 คำสำคัญที่ใช้ในหัวข้อการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี .....	4
2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู.....	4
2.1.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	4
2.1.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์.....	5
2.1.1.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเพาเซื่อเพลิง.....	5
2.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	6
2.1.2.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์.....	6
2.1.2.2 แท่งเชื้อเพลิง.....	6
2.1.2.3 แท่งควบคุม.....	7

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.1.2.4	7
2.1.2.5	7
2.1.3	7
ยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์	7
2.1.4	10
2.1.5	13
2.1.5.1	13
2.1.5.2	13
2.1.5.3	15
2.1.6	15
2.1.7	17
2.2	18
3	21
3.1	21
3.1.1	21
3.1.2	26
3.1.3	28
3.2	30
3.3	33
3.3.1	33
3.3.2	33
3.3.3	34
3.3.4	34



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4.1.1 การหาอัตราส่วนของซีเรียมที่สามารถผสมอยู่ในเซอร์โคเนียมในปริมาณมากที่สุดที่ยังสามารถอัดเป็นเม็ดได้.....	35
4.1.2 การทำการแพร่ไฮโดรเจนด้วยเครื่อง TGA .....	36
4.1.3 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio).....	37
4.1.3.1 การคำนวณหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากผลที่ได้จากเครื่อง TGA.....	37
4.1.3.2 การคำนวณหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ.....	39
4.1.4 การคำนวณค่าความหนาแน่น.....	43
4.1.5 การทดสอบ High temperature quench.....	44
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	46
5.1.1 ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง.....	46
5.1.2 ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง.....	48
5.1.3 ผลการทดสอบ High temperature quench.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
5.2.1 การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง.....	50
5.2.2 การเผาผลาญเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง.....	50
5.2.3 การทำการแพร่ไฮโดรเจน.....	51
5.2.4 การหาเลขอะตอมเฉลี่ย.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 72



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รายละเอียดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในยุคแรกๆ บางเครื่อง.....	5
4.1	อัตราส่วนผสมระหว่างผงโลหะซีเรียมต่อผงโลหะเซอร์โคเนียม.....	35
4.2	ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน และค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณ.....	39
4.3	ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวด้านข้าง) ....	40
4.4	ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวดัดขวาง) ....	40
4.5	ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ (บริเวณผิวด้านข้าง) .....	42
4.6	ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ (บริเวณผิวดัดขวาง) .....	42
4.7	ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่คำนวณได้.....	43
4.8	ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม และค่าความหนาแน่นที่ได้จากการวิเคราะห์.....	44
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับครั้งที่ทำการทดสอบ High temperature quench.....	45

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียม.....	11
2.2	ลักษณะโครงสร้างของเชื้อเพลิง $UZrH_{1.6}$ (ยังไม่ได้ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์).....	12
2.3	Phase diagram ของโลหะเซอร์โคเนียมกับไฮโดรเจนและเส้นของความดัน ก๊าซไฮโดรเจน (ในหน่วย $pH_2 = 10^k$ บรรยากาศ).....	12
2.4	แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ.....	14
2.5	(ก) แสดงการเกาะตัวของอนุภาคก่อนและหลังการอัด (ข) ความหนาแน่น เทียบกับแรงที่ใช้ในการอัด.....	14
2.6	ลักษณะผงโลหะในกระบวนการโลหะซินเตอร์ (ก) เม็ดผงสภาพปกติ (ข) เม็ด ผงที่ขึ้นรูปด้วยการอัด (ค) เม็ดผงโลหะที่ผ่านการเผาผลาญและตรงบริเวณ รอยเชื่อมระหว่างเม็ดผงโลหะ.....	15
2.7	การจัดระบบวัด (ก) แบบส่งผ่าน (ข) แบบกระเจิงกลับ.....	18
3.1	แบบแม่พิมพ์.....	21
3.2	แม่พิมพ์.....	22
3.3	เครื่องอัดไฮดรอลิค.....	22
3.4	แผนรูปแสดงการทำงานของเครื่อง TGA.....	23
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักของวัตถุที่ ได้จากเครื่อง TGA.....	24
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักของวัตถุกับค่าความต่างศักย์.....	24
3.7	เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA).....	25
3.8	เครื่องเผา.....	25
3.9	เครื่องชั่ง.....	26
3.10	ผงโลหะซีเรียม.....	26
3.11	ผงโลหะเซอร์โคเนียม.....	27
3.12	แอลกอฮอล์แห้ง.....	28
3.13	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เลขอะตอมเฉลี่ยด้วยวิธีการกระเจิงรังสีเบตา แบบกระเจิงกลับ (beta backscatter).....	29

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.14	เม็ดซีเรียมเซอร์โคเนียมที่อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค.....	30
3.15	เม็ดซีเรียมเซอร์โคเนียมหลังจากทำการเผาผลาญที่อุณหภูมิสูง.....	31
3.16	เม็ดซีเรียมเซอร์โคเนียมที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนด้วยเครื่อง TGA.....	32
3.17	เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้จากการทำ High temperature quench หลังทำการทดลอง 5 ครั้ง .....	33
4.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการทำการc แพร่ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH (เม็ดที่ 1) ในเครื่อง TGA.....	36
4.2	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการทำการ แพร่ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH (เม็ดที่ 2) ในเครื่อง TGA.....	36
4.3	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองกับครั้งที่ทำการ ทดสอบ High temperature quench.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานไฟฟ้า นอกเหนือจาก ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ พลังน้ำ พลังลม พลังแสงอาทิตย์ และอื่นๆ เมื่อศึกษาประเภทของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแล้ว สามารถแบ่งประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูออกได้เป็น 3 ประเภทคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์ (เครื่องปฏิกรณ์กำลัง) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อผลิตเชื้อเพลิง และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งทั้งสามประเภทมีการออกแบบเพื่อการใช้งานที่ต่างกัน

เชื้อเพลิงจัดเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์คือจากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน โดยเชื้อเพลิงที่เป็นที่รู้จักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์นั้น จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ ( $UO_2$ ) ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ ( $UZrH$ ) เนื่องจากเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแต่ละชนิดนั้นมีองค์ประกอบที่ต่างกัน ทำให้มีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในส่วน of เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแล้วพบว่า มีข้อดีหลายอย่างคือ โมเลกุลของไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอน (neutron moderator) จะแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมที่อยู่ในเนื้อเชื้อเพลิง ส่งผลให้ปริมาณของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนที่จะใช้ในถังปฏิกรณ์มีน้อยลง จึงทำให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กลงด้วย ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนอยู่ด้านนอกเชื้อเพลิง และที่สำคัญเชื้อเพลิงแบบนี้จะมีสัมประสิทธิ์การเกิดฟิชชันลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือเป็นเชื้อเพลิงแบบ negative temperature coefficient of reactivity ทำให้เชื้อเพลิงแบบนี้มีความปลอดภัยสูง แต่เนื่องจากความไม่สะดวกหลายประการในการขออนุญาตใช้ยูเรเนียมในงานวิจัยจึงได้ใช้ซีเรียมแทนยูเรเนียม และได้มีการใช้ซีเรียมอย่างแพร่หลายในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม [1]

ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงและเพื่อการพัฒนาชิ้นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์

1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่มากที่สุด โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ในเครื่อง TGA ที่อุณหภูมิสูง

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจำลองในด้านความหนาแน่นและลักษณะทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงหลังทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงจำลองลดลงอย่างรวดเร็ว (High temperature quench)

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การผลิตเชื้อเพลิงจำลองซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์โดยวิธีการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ความดัน ไม่เกิน 4,000 psi โดยมีอัตราส่วนซีเรียมต่อเซอร์โคเนียม (Ce/Zr ratio) ประมาณ 0.03 และทำการแพร่ไฮโดรเจน (hydrogen diffusion) ให้ได้ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio) ปริมาณมากที่สุดโดยใช้วิธีการสังเคราะห์ในเครื่อง TGA ที่อุณหภูมิสูง

1.3.2 ศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ที่เหมาะสม และคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผลิตขึ้น 2 อย่างคือ ความหนาแน่น และลักษณะทางกายภาพจากการทดสอบ High temperature quench ซึ่งเผาเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C เพื่อหาความสัมพันธ์ของมวลที่เปลี่ยนไปของเม็ดเชื้อเพลิงหลังจากปล่อยลงน้ำกับจำนวนครั้งที่ทดสอบ High temperature quench

## 1.4 คำสำคัญที่ใช้ในหัวข้อการวิจัย

เม็ดเชื้อเพลิงจำลอง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม การทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ การทดสอบ High temperature quench

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบแม่พิมพ์ (mold) สำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง พร้อมส่งชื่อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง
- 1.5.3 ทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงจาก  $Al_2O_3$  และ  $CeO_2$
- 1.5.4 อัดเม็ดเชื้อเพลิงจากการผสมระหว่าง Ce และ Zr ที่มีค่าอัตราส่วน Ce/Zr ประมาณ 0.03
- 1.5.5 นำเม็ด CeZr ที่อัดได้ไปเผาผสานเพื่อเพิ่มความหนาแน่นที่อุณหภูมิ  $1200\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.5.6 นำเม็ด CeZr ที่เผาผสานแล้วไปทำการแพร่ไฮโดรเจน (hydrogen diffusion) ให้ได้ค่าอัตราส่วน H/Zr มากที่สุด
- 1.5.7 วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วน H/Zr จากการบันทึกจากเครื่อง TGA และคำนวณค่าปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ที่เหมาะสม
- 1.5.8 วิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH ที่ผลิตได้
- 1.5.9 ทดสอบ High temperature quench และวิเคราะห์ผล
- 1.5.10 สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้องค์ความรู้ในการผลิตเชื้อเพลิงแบบใหม่สำหรับใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำมวลเบา
- 1.6.2 สามารถนำซีเรียมซึ่งผลิตได้ในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านการทำวิจัย
- 1.6.3 ได้องค์ความรู้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงที่เตรียมขึ้น



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

เนื้อหาทางทฤษฎีที่น่าเสนอจะเกี่ยวกับองค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA เชื้อเพลิงที่ใช้ พร้อมทั้งคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและการแพร่ ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตเชื้อเพลิงแบบไฮโดรด์ กระบวนการผลิตขึ้นส่วนโดยกรรมวิธีโลหะผง รวมไปถึงคุณสมบัติของรังสีเบตาที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเฉลี่ยในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ด้วยวิธีการกระเจิงกลับ และเทคนิคการวัดรังสี ดังอธิบายต่อไปนี้

##### 2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์ และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อเพาะเชื้อเพลิง [2]

2.1.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (research reactor) ซึ่งถือเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่สร้างขึ้นก่อนแบบอื่น อันเป็นพื้นฐานความรู้นำไปพัฒนาในเรื่องอื่นๆ ตามมา เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัยในยุคแรกๆ แสดงดังตาราง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

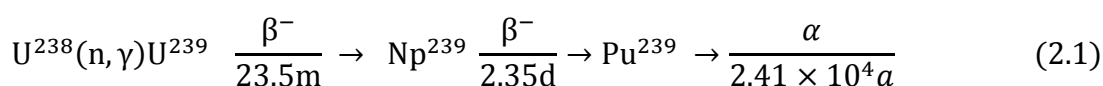
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในยุคแรกๆ บางเครื่อง [3]

ชื่อ	สถานที่	ปฏิบัติการเดินเครื่อง	เชื้อเพลิง	มอดเตอเรเตอร์	ฉากรกความเย็น	ตัวสะท้อน	กำลัง	Remarks
CP-1	Chicago, Illinois, USA	December 1942	natural uranium	graphite	air	graphite	200 W	World's first nuclear reactor
LOPO	Los Alamos, N. Mexico, USA	May 1944	enriched (~15%) U, $UO_2SO_4$ dissolved in water	$H_2O$	$H_2O$	beryllium oxide	1 W	First enriched uranium reactor (Homogeneous type)
CP-3	Argonne, Illinois, USA	May 1944	natural uranium rods	$D_2O$	$D_2O$	graphite	300 kW	First heavy water reactor
Clementine	Los Alamos, N. Mexico, USA	November 1946	$^{239}Pu$ rods	—	Hg	natural uranium	25 kW	First fast reactor
BSR	Oak Ridge, Tennessee, USA	November 1950	enriched uranium	$H_2O$	$H_2O$	$H_2O$	100 kW	First swimming pool reactor
EBR-1	NRTS, Arco Idaho, USA	December 1951	90% enriched uranium rods	—	NaK	natural U	100 kW	First breeder reactor and power prototype
EBWR	Argonne, Illinois, USA	December 1956	1.5% $^{235}U$ plates	$H_2O$	$H_2O$	$H_2O$	5 MW	First boiling water reactor
GLEEP	Harwell, U.K.	August 1947	natural uranium bars	graphite	air	graphite	100 kW	First English reactor
BEPO	Harwell, U.K.	July 1948	natural uranium rods	graphite	air	graphite	6 MW	—
DIMPLE	Harwell, U.K.	—	natural uranium	$D_2O$	$D_2O$	—	30 W	—
ZEPHYR	Harwell, U.K.	—	$^{239}Pu$	—	—	natural U	low	—
ZEEP	Chalk River, Canada	April 1945	natural uranium	$D_2O$	$D_2O$	—	—	First Canadian reactor
NRX	Chalk River, Canada	August 1947	natural uranium cylindrical rods	$D_2O$	$D_2O$	graphite	40 MW	High flux reactor
G-1	Marcoule, France	—	natural uranium	graphite	air	—	—	—
P-2	Saclay, France	—	natural uranium	$D_2O$	$CO_2$	—	1500 kW	—

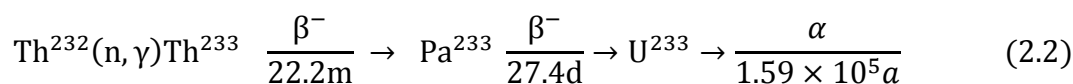
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจะเน้นการวิจัยพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในสาขาต่างๆ การออกแบบและการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ การผลิตไอโซโทปรังสี (radioisotope) และวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ ในสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ (nuclear medicine)

2.1.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์ หรือเครื่องปฏิกรณ์กำลัง (power reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

2.1.1.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเพาะเชื้อเพลิง (breeder reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้สร้างขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนเฟอร์ไทล์ไอโซโทป (fertile isotope) ให้เป็นฟิสไซล์ไอโซโทป (fissile isotope) เพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปฏิกิริยานิวเคลียร์การแปรธาตุหลังดูดกลืนนิวตรอนและการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ตามความสัมพันธ์ที่ 2.1 และ 2.2



และ



โดยมี  $\text{U}^{238}$  และ  $\text{T}^{232}$  เป็นเฟอร์ไรล์ไอโซโทป เมื่อดูดกลืนเทอร์มอลนิวตรอนจะกลายเป็นฟิสไซล์ไอโซโทปคือ  $\text{P}^{239}$  และ  $\text{U}^{233}$  ตามลำดับ

โดยในการทำวิจัยนี้จะเน้นในส่วนที่เกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งจะอธิบายองค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย โดยประเทศไทยเริ่มมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งอยู่ในการดูแลของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปพส) และประเทศไทยได้มีการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนแกนเครื่องปฏิกรณ์ใหม่และตั้งชื่อใหม่เป็น “เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย – 1/1” ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ปัจจุบันสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้เปลี่ยนชื่อเป็นสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)

## 2.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยมีส่วนประกอบที่สำคัญหลายส่วน โดยจะอธิบายแต่ละส่วน ซึ่งส่วนประกอบที่กล่าวถึงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย จะอ้างอิงค่าตัวแปรต่างๆ ขององค์ประกอบนั้นๆ กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย – 1/1 ที่มีในประเทศไทย [4] ดังนี้

2.1.2.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core) ซึ่งมีลักษณะเป็น hexagonal array มีการจัดวางเชื้อเพลิงในลักษณะตั้งตรง แกนเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบทั้งหมดจะอยู่ใต้น้ำลึกประมาณ 8.5 เมตร

2.1.2.2 แท่งเชื้อเพลิง (fuel rod) เป็นยูเรเนียมที่อยู่ในรูปของ U-ZrH (Uranium-Zirconium hydride) คิดเป็นยูเรเนียม 235 ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะไม่ถึงร้อยละ 20 มีมวลประมาณ 5695.2 กรัมต่อ 1 แท่งเชื้อเพลิง (core) ส่วนบนและส่วนล่างของแท่งเชื้อเพลิงเป็นตัวสะท้อนนิวตรอนทำจากแกรไฟต์ (graphite reflector)

2.1.2.3 แท่งควบคุม (control rods) ภายในเครื่องได้มีการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีแท่งเชื้อเพลิงและแท่งควบคุมปะปนกันเป็นรูปหกเหลี่ยม เพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่และระดับกำลังในแกนปฏิกรณ์ได้ตามต้องการ โดยแท่งควบคุมมีลักษณะและขนาดคล้ายแท่งเชื้อเพลิง แต่ส่วนบนเป็น  $B_4C$  (boron carbide) ซึ่งเป็นตัวดูดจับนิวตรอน และส่วนล่างจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิง แท่งควบคุมจะมี 4 แท่ง และมีแท่งควบคุมแบบพิเศษ (transient) ซึ่งไม่มีเนื้อเชื้อเพลิงอีก 1 แท่ง

2.1.2.4 ตัวลดทอนพลังงานนิวตรอน (neutron moderator) คือตัวที่ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนพลังงานสูงซึ่งเกิดขึ้นหลังเกิดปฏิกิริยาฟิชชันให้เป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อไป เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้เป็น U-ZrH นิวตรอนเร็วที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันในเชื้อเพลิงจะถูกหน่วงความเร็วตั้งแต่เริ่มเกิด บางครั้งจึงเรียกแท่งเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่าแท่งเชื้อเพลิงมอดเคอ-เรเตอร์ (fuel-moderator element) ส่วนสารหน่วงความเร็วถัดมาคือน้ำ ( $H_2O$ ) โดยน้ำจะทำหน้าที่ 2 ส่วนคือเป็นตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนและตัวระบายความร้อน (coolant)

2.1.2.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/1 ใช้อเมริกันเซียม เบอริลเลียม (Americium Beryllium, Am-Be) มีความแรงรังสี 3 คูรี มีค่าครึ่งชีวิต 458 ปี สามารถให้ความหนาแน่นนิวตรอน (neutron flux) ที่  $3 \times 10^3$  neutrons/cm<sup>2</sup>-s

### 2.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA และเชื้อเพลิงแบบยูเรเนียม-เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (UZrH)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA [5] เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีการติดตั้งประมาณ 65 เครื่อง และใช้ใน 24 ประเทศ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA มีคุณสมบัติและระดับกำลังที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20 กิโลวัตต์ ถึง 16 เมกะวัตต์ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA มีการออกแบบที่ทำให้มีลักษณะที่เรียกว่า inherent safety ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจากระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม (engineered safety)

แนวคิดของระบบความปลอดภัยแบบ inherent safety เริ่มจากในปี ค.ศ. 1956 โดย Dr. Edward Teller และนักวิจัยในเมืองแซนดีเอโก รัฐแคลิฟอร์เนีย ได้มีแนวคิดในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ปลอดภัย โดยเริ่มจากแนวคิดที่ว่า ในสภาวะดับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย และตั้งแท่งควบคุมทุกแท่งออกหมดทันที เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจะสามารถเดินเครื่องต่อได้ โดยที่แท่งเชื้อเพลิงจะไม่หลอมละลาย หรืออีกนัยหนึ่ง เพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติ หรืออุบัติเหตุที่เกิดจากระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย และระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม ในกรณีที่เกิดความบกพร่อง ดังนั้นการออกแบบความปลอดภัยแบบ inherent safety โดยใช้หลักการของธรรมชาติ จะช่วยเสริมและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย นอกเหนือจากระบบความปลอดภัยแบบระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม แม้ว่าระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม จะขัดข้องหรือแท่งควบคุมทุกแท่งถูกดึงออกหมด แนวคิดของ “หลักการวอร์มนิวตรอน” (วอร์มนิว ตรอน หรือ epithermal neutron มีช่วงพลังงานระหว่าง 0.025 – 1 eV) ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบความปลอดภัยแบบ inherent safety ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA โดยทั่วไปในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (water-cooled) ถ้ามีการดึงแท่งควบคุมออกหมดแบบทันทีทันใด จะทำให้เกิดอุบัติเหตุรุนแรง ซึ่งทำให้แท่งเชื้อเพลิงเกิดการหลอมละลายได้ ทั้งนี้เนื่องจากนิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชัน ยังเป็นโคลด์นิวตรอน (cold neutron มีช่วงพลังงานระหว่าง  $5 \times 10^{-5}$  eV – 0.025 eV) จากการเกิดอันตรกิริยากับน้ำที่อยู่รอบ ๆ แท่งเชื้อเพลิง จึงทำให้อะตอมยูเรเนียมในแท่งเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องได้ ดังนั้น จะทำให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น และทำให้แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายได้ แต่สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA ใช้ตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน (moderator) คือ ไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนผสมอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง เมื่อแท่งควบคุมถูกดึงออกทันทีทันใด จะทำให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น และส่งผลให้นิวตรอนที่อยู่ภายในแท่งเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึก เริ่มมีพลังงานสูงกว่านิวตรอนที่อยู่ในน้ำ นิวตรอนในแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงขึ้นนี้ (warm neutron) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในแท่งเชื้อเพลิงลดลง และยังหลุดลอดออกมาในน้ำที่อยู่รอบ ๆ ดังนั้น ผลสุดท้ายที่เกิดขึ้นคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA จะมีการกักพลังงานโดยอัตโนมัติ ภายในระยะเวลาสั้น ซึ่งความปลอดภัยแบบ inherent safety นี้สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการใช้ระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมมาก จึงอาจกล่าวได้ว่า แท่ง

เชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA ทำหน้าที่เหมือนตัวควบคุมกำลังแบบอัตโนมัติ (automatic power regulator) และสามารถทำให้ดับเครื่องได้อย่างปลอดภัย โดยไม่ต้องใช้ระบบความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม บริษัท General Atomics ได้ออกแบบแท่งเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นสูง และใช้โลหะผสมยูเรเนียมกับเซอร์โคเนียม ผลการทดสอบพบว่า โลหะผสมสามารถต้านทานการผุกร่อนได้เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ดังนั้นแท่งเชื้อเพลิงแบบ ยูเรเนียม-เซอร์โคเนียม-ไฮไดรด์ (Uranium-Zirconium-Hydride, UZrH) ซึ่งถูกคิดค้นและพัฒนาโดยบริษัท General Atomics ได้ถูกนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA และทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยชนิดนี้มีความปลอดภัยสูงขึ้นไป นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA ยังสามารถทำการเพิ่ม (pulse) ให้นิวตรอนสูงขึ้นไปถึง  $10^3$  เท่าภายในเวลาในระดับมิลลิวินาที นั่นแสดงว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้อย่างรวดเร็ว

ประโยชน์และข้อดีของแท่งเชื้อเพลิงแบบ UZrH มีดังต่อไปนี้ [6]

2.1.3.1 เนื่องจากการใช้หลักการของ warm neutron ดังนั้นทำให้เกิด prompt negative temperature coefficient of reactivity เมื่อเปรียบเทียบกับ delayed coefficient of reactivity ของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยประเภทอื่นๆ เช่น แบบที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ plate type ซึ่งทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA มีความปลอดภัยมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ plate type

2.1.3.2 สารประกอบ UZrH มีความเสถียรทางเคมี (ทดสอบ quench ที่อุณหภูมิ 1200 °C) ในขณะที่แท่งเชื้อเพลิงแบบ aluminum plate type จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับน้ำแบบปลดปล่อยความร้อนที่อุณหภูมิ 650 °C

2.1.3.3 เปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA เป็นแบบเหล็กกล้าไร้สนิมหรือ alloy 800 สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 950 °C ในขณะที่เปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิงแบบ plate type สามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 650 °C

2.1.3.4 แท่งเชื้อเพลิงแบบ UZrH สามารถกักเก็บผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียส (fission products) ได้ดีกว่าแท่งเชื้อเพลิงแบบ plate type ซึ่งเปลือกหุ้มจะหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 650 °C และจะปลดปล่อยผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียส (fission

products) ออกมา ในขณะที่อุณหภูมิเท่ากันนั้น แท่งเชื้อเพลิงแบบ UZrH สามารถเก็บกักผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียสไว้ได้ประมาณ 99 % ถึงแม้ว่าจะไม่มีเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

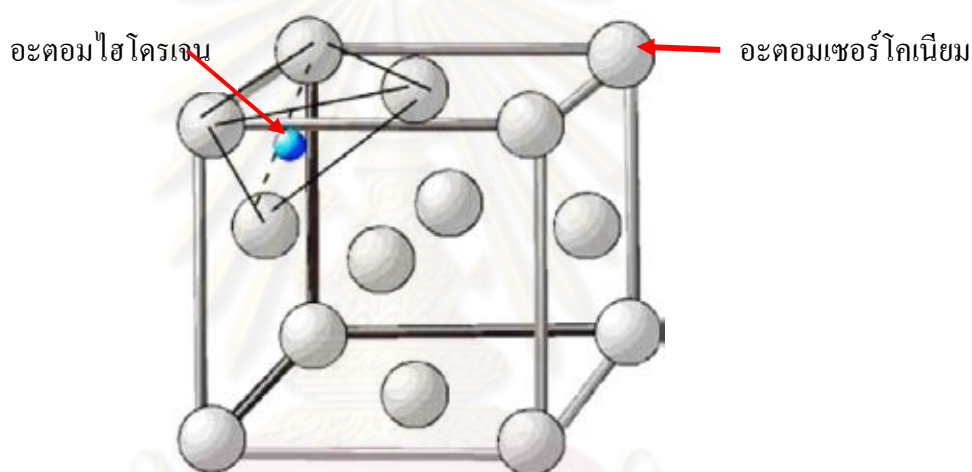
#### 2.1.4 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง UZrH และกระบวนการแพร่ (Diffusion)

โดยปกติแล้วแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ประกอบด้วยท่อโลหะเซอร์โคเนียม (เรียกว่า cladding) ที่บรรจุเม็ดเชื้อเพลิงไว้ด้านใน ช่องว่างแคบๆจะถูกเว้นไว้ระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงกับท่อเซอร์โคเนียม เรียกว่า pellet-cladding gap เพราะเมื่อเชื้อเพลิงยูเรเนียมถูกเผาผลาญในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงและขยายตัวออก และการแตกตัวของยูเรเนียมแต่ละครั้งโดยปฏิกิริยาฟิชชันจะได้ธาตุที่เกิดจากการแตกตัว (fission products) ออกมา 2 ตัว ซึ่งปริมาตรรวมของ fission products นี้จะมากกว่าปริมาตรของยูเรเนียมก่อนที่จะแตกตัว ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถูกใช้งาน ช่องว่างที่เว้นไว้จะช่วยทำให้เม็ดเชื้อเพลิงที่บวมขึ้นระหว่างการใช้งานไม่ดัน cladding ออกมากเกินไปจนทำให้เกิดความเครียดใน cladding มากเกินกว่าค่าความปลอดภัย ภายในแท่งเชื้อเพลิงจะมีการอัดก๊าซฮีเลียมไว้ที่ความดัน 20 บรรยากาศ ซึ่งก๊าซฮีเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุดของก๊าซทั้งหมด จึงช่วยนำความร้อนระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงกับ cladding ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงไม่ร้อนมากเกินไป เหตุผลที่ต้องใช้ 20 ความดันบรรยากาศเพราะว่าในระหว่างการใช้งานจะมีก๊าซจากการเกิดฟิชชัน (fission gas) โดยส่วนมากเป็นก๊าซซีนอน (Xenon) ออกมาจากเม็ดเชื้อเพลิง ก๊าซซีนอนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำมากและจะเจือจางก๊าซฮีเลียม จึงจำเป็นต้องอัดความดันก๊าซฮีเลียมไว้มากตอนเริ่มต้นเพื่อไม่ให้ถูกเจือจางมากเกินไประหว่างการใช้งาน

การแพร่เป็นกระบวนการที่อะตอมของธาตุหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอีกธาตุหนึ่ง ซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของก๊าซ ของเหลว และของแข็ง โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสสารที่สภาพเป็นก๊าซนั้น เคลื่อนที่เร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ในของเหลวและของแข็ง การแพร่จะอาศัยการสั่นสะเทือนเนื่องจากความร้อนในของแข็ง ซึ่งจะทำให้อะตอมสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ การแพร่กระจายของอะตอมในโครงผลึกมีกลไกหลักที่สำคัญ 2 แบบ [7] คือ

2.1.4.1 กลไกการแพร่แบบช่องว่างหรือแทนที่ อะตอมจะสามารถเคลื่อนที่ในโครงผลึกจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ถ้าอะตอมนั้นมีพลังงานกระตุ้นอย่างเพียงพอ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการสั่นสะเทือนเนื่องจากความร้อน และมีช่องว่างหรือความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในโครงผลึก ทำให้อะตอมสามารถเกิดการแพร่แบบกลไกการแทนที่ได้

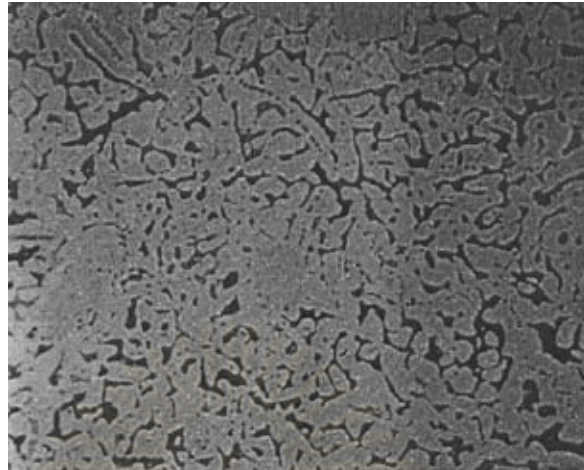
2.1.4.2 กลไกการแพร่แบบเซลล์แทรก จะเกิดขึ้นโดยที่อะตอมมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งของช่องระหว่างอะตอมหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งของช่องระหว่างอะตอมหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง



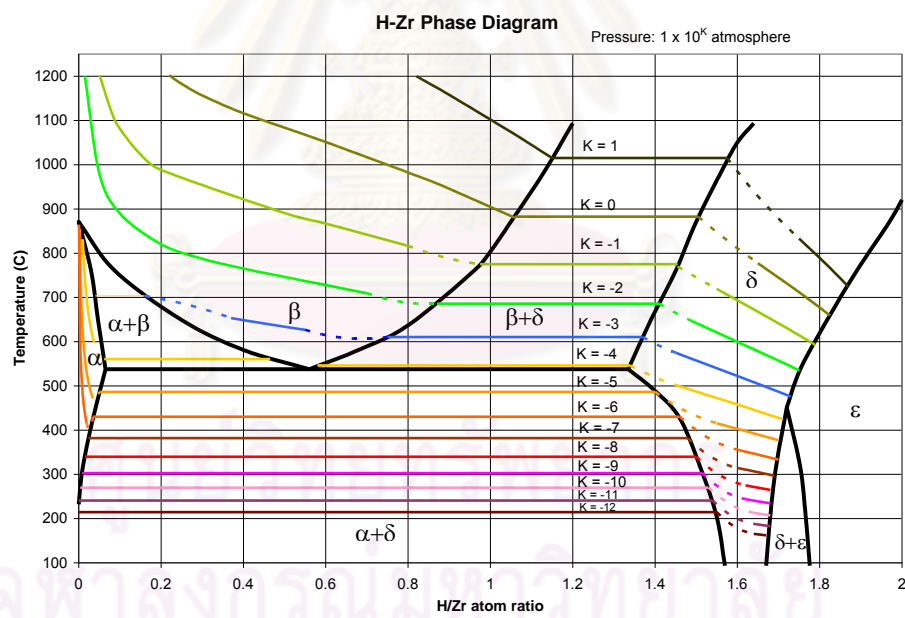
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียม [8]

เชื้อเพลิง UZrH ประกอบด้วย Uranium phase ในรูปของแข็งอยู่ใน Zirconium hydride matrix ในรูปของแข็ง อัตราส่วนทางอะตอมของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สามารถหน่วงนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ  $\text{UZrH}_{1.6}$  ภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นโครงสร้างของเชื้อเพลิง  $\text{UZrH}_{1.6}$  ส่วนที่เป็นสีดำคือ Uranium phase ซึ่งแทรกตัวอยู่ใน Zirconium hydride matrix ซึ่งลักษณะเป็นสี่เทา





ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของเชื้อเพลิง  $\text{UZrH}_{1.6}$  (ยังไม่ได้ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์) [9]



ภาพที่ 2.3 phase diagram ของโลหะเซอร์โคเนียมกับไฮโดรเจน และเส้นของความดันก๊าซไฮโดรเจน(ในหน่วย  $\text{pH}_2 = 10^k$  บรรยากาศ) [10]

ภาพที่ 2.3 แสดง Zr-H phase diagram โดยมีเส้นความดันก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$  isobars) แสดงอยู่ด้วย ในการเดินเครื่องปกติไฮโดรเจนบริเวณผิวของ  $UZrH_{1.6}$  จะสร้างสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) กับก๊าซไฮโดรเจนในช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงกับปลอกเชื้อเพลิง (pellet-cladding gap) ทำให้มีความดันก๊าซไฮโดรเจนในแท่งเชื้อเพลิงที่ประมาณ  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-2}$  บรรยากาศ อุณหภูมิพื้นผิวของเม็ดเชื้อเพลิงจะอยู่ที่ประมาณ  $510\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีก๊าซฮีเลียมภายใน และประมาณ  $385\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีโลหะเหลวใน pellet-cladding gap เพื่อช่วยนำความร้อน

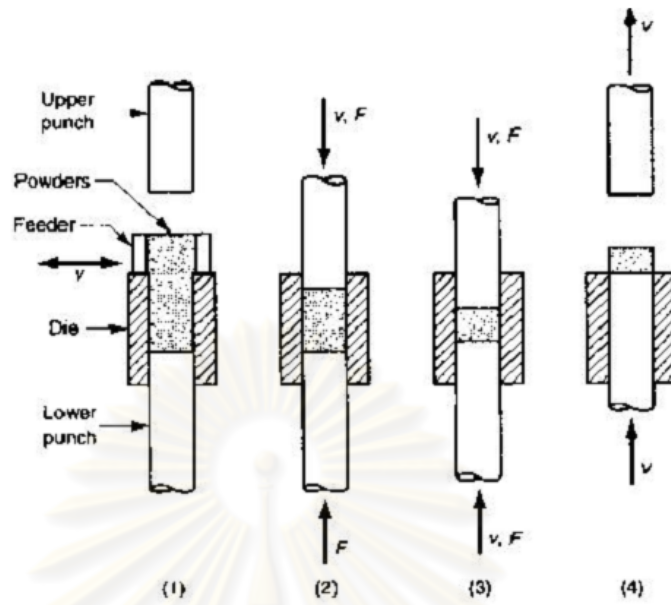
## 2.1.5 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนโดยกรรมวิธีโลหะผง [11]

### 2.1.5.1 การผสมโลหะผง (mixing)

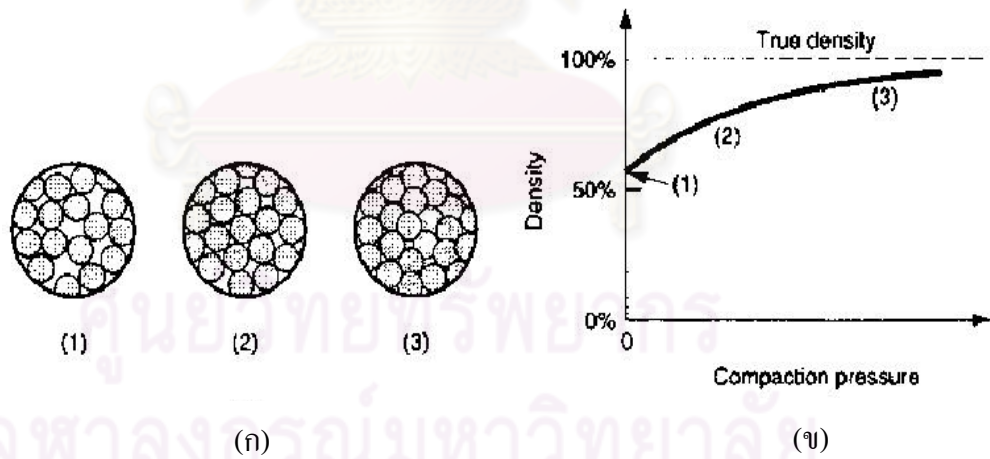
การผสมโลหะและตัวผสมเข้าด้วยกันอย่างถูกต้องนั้น เป็นเรื่องสำคัญในการทำชิ้นงานที่ได้มีเนื้อสม่ำเสมอ สามารถทำได้โดยเติมตัวผสมเข้ากับผงโลหะหลัก ในระหว่างการผสมผง (mixing) ฟังก์ชันเดียวของการผสมตัวผสมมากเกินไป (over mixing) เพราะจะทำให้อนุภาคผงมีขนาดเล็กลง และมีความแข็งผิดไปจากเดิม ซึ่งผงโลหะนี้ต้องปราศจากออกไซด์ เพราะจะทำให้การเผาผลาญไม่ได้ผล

### 2.1.5.2 การอัดขึ้นรูป (compacting)

จุดประสงค์หลักของการอัดขึ้นรูปคือ การทำให้โลหะผงจับตัวกันเป็นก้อนโดยมีรูปร่างและมีมิติใกล้เคียงกับวัสดุที่ต้องการมากที่สุด โดยการนำผงโลหะที่ผสมเข้ากันดีแล้ว นำมาอัดจนได้รูปที่ต้องการ โดยชิ้นงานที่ได้เรียกว่า green compact หมายถึงชิ้นงานที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างจากการเข้ารูปกันตัวเอง (inter lock) แต่ยังไม่สามารถใช้งานได้ โดยมีขั้นตอนการอัดดังแผนภาพที่ 2.4



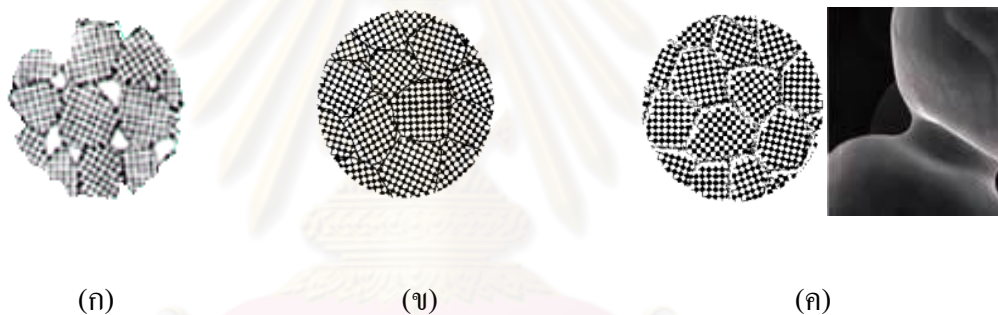
ภาพที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ [12]



ภาพที่ 2.5 [13] (ก) แสดงการเกาะตัวของอนุภาคก่อนและหลังการอัด (ข) ความหนาแน่นเทียบกับแรงที่ใช้ในการอัด

### 2.1.5.3 การเผาผสาน (sintering)

การเผาผสาน (sintering) คือ การให้ความร้อนกับชิ้นงาน green compact จนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ผงโลหะชิดตัวเข้าหากันจนเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม (atomic force) แต่อุณหภูมิที่ให้จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมจะมีค่าลดลงตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่กระบวนการขัดขวางการยึดเกาะตัวระหว่างอนุภาคจากการทำเผาผสานเช่น การสัมผัสไม่เต็มหน้าระหว่างอนุภาค การเกิดฟิล์มบนหน้าอนุภาค และการไม่เกิดสภาพการยึดตัวแบบพลาสติก สิ่งเหล่านี้จะลดอิทธิพลลงไปตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงถือว่าอุณหภูมิจึงสูงจะทำให้การเผาผสานได้ผลดีขึ้น



ภาพที่ 2.6 [14] ลักษณะผงโลหะในกระบวนการโลหะซินเตอร์ (ก) เม็ดผงสภาพปกติ (ข) เม็ดผงที่ขึ้นรูปด้วยการอัด (ค) เม็ดผงโลหะที่ผ่านการเผาผสานและตรงบริเวณรอยเชื่อมระหว่างเม็ดผงโลหะ

### 2.1.6 รังสีเบตา (beta-ray)

การสลายตัวโดยการแผ่รังสีเบตา คือ การสลายตัวของนิวไคลด์ที่มีความไม่เสถียรเนื่องจากนิวเคลียสมีปริมาณโปรตอนมากหรือน้อยเกินไป โดยรังสีเบตาแบ่งได้ 2 แบบคือ เบตาลบหรืออิเล็กตรอน (electron,  $\beta^-$  หรือ  ${}_{-1}^0e$ ) และเบตาบวกหรือโพสิตรอน (positron,  $\beta^+$  หรือ  ${}_{+1}^0e$ ) [15]

เบตาลบหรืออิเล็กตรอน เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวตรอนมากเกินไป จึงต้องทำการลดจำนวนนิวตรอนลงเพื่อให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะเสถียร จึงทำการเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นโปรตอนตามความสัมพันธ์ 2.3 โดยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา นิวเคลียสที่ปล่อยเบตาลบจะทำให้กลายเป็นนิวเคลียสชนิดใหม่ที่มีเลขอะตอมสูงขึ้นหนึ่ง



เบตาบวกหรือโพสิตรอน ซึ่งเป็นปฏิอนุภาค (anti-particle) ของอิเล็กตรอน กล่าวคือมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ทุกประการเหมือนกันกับอิเล็กตรอน แต่มีค่าประจุเป็นบวก นิวเคลียสที่ปลดปล่อยโพสิตรอนออกมาเป็นนิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนมากเกินไปจนทำให้ไม่อยู่ในสภาวะเสถียร จึงทำการเปลี่ยนโปรตอนให้เป็นนิวตรอนตามความสัมพันธ์ 2.4 โดยการปลดปล่อยโพสิตรอนออกมา นิวเคลียสที่ปล่อยเบตาบวกจะทำให้กลายเป็นนิวเคลียสชนิดใหม่ที่มีเลขอะตอมลดลงหนึ่ง



ในเบื้องต้นเมื่อรังสีเบตาถูกค้นพบนั้น เชื่อกันว่ามีเพียง 3 อนุภาคเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทั้งหมดกล่าวคือ นิวเคลียสตั้งต้น นิวเคลียสผลผลิตและอนุภาคเบตา อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า พลังงานปลดปล่อยเนื่องจากกระบวนการนั้นมีมากกว่าที่รวบรวมได้เมื่อพิจารณาเพียง 3 อนุภาค และส่วนต่างระหว่างพลังงานปลดปล่อยและพลังงานรวมของทั้ง 3 อนุภาคก็มีค่าไม่คงที่ ดังนั้นในปี 1931 Pauli ได้เสนอให้มีการพิจารณาถึงอนุภาคที่ 4 จากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยรังสีเบตา ซึ่งอนุภาคที่ 4 นี้มีมวลน้อยมากจนสามารถไม่นำมาพิจารณาได้ ขณะเดียวกันก็ไม่มีค่าประจุ ภายหลังจากอนุภาคที่ 4 ถูกตั้งชื่อโดย Fermi ว่า นิวตริโน (neutrino,  $\nu$ ) สำหรับกระบวนการปลดปล่อยเบตาบวก และแอนตินิวตริโน (anti-neutrino,  $\bar{\nu}$ ) สำหรับกระบวนการปลดปล่อยเบตาลบ ดังความสัมพันธ์ที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

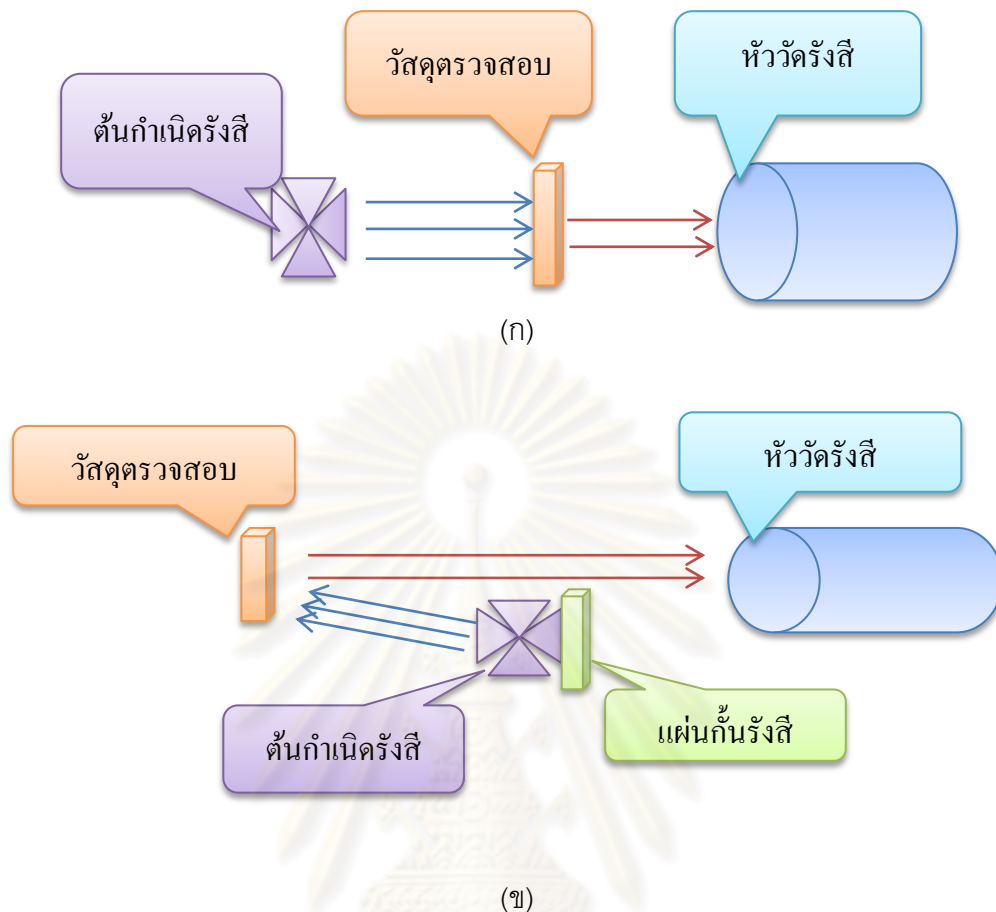
$$zP \rightarrow z^{-1}D + {}_{+1}^0e + v + Q \quad (2.5)$$

$$zP \rightarrow z_{+1}^A D + {}_{-1}^0e + \bar{v} + Q \quad (2.6)$$

### 2.1.7 เทคนิคการวัดรังสี

เทคนิคการวัดรังสี แบ่งออกเป็น 2 แบบคือการวัดรังสีแบบส่งผ่าน (transmission technique) และการวัดรังสีแบบกระเจิงกลับ (scattering technique) โดยทั้ง 2 เทคนิคมีวิธีการที่ต่างกันคือ การวัดรังสีแบบส่งผ่านจะมีการจัดระบบวัด โดยให้วัสดุที่ต้องการวัดอยู่ระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัด ส่วนเทคนิคการวัดรังสีแบบกระเจิงกลับจะมีการวางระบบวัด โดยให้ต้นกำเนิดรังสีอยู่ระหว่างหัววัดกับวัสดุ และเพื่อป้องกันไม่ให้รังสีจากต้นกำเนิดรังสีเข้าหัววัดโดยที่ไม่กระทบกับวัสดุ จำเป็นต้องมีแผ่นกั้นรังสีเพื่อป้องกันรังสีจากต้นกำเนิดโดยตรง เพื่อให้มั่นใจว่ารังสีที่วัดได้จากหัววัดนั้นเป็นค่าที่ได้จากการกระเจิงจากวัสดุ สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ภาพที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.7 การจักระบบวัด (ก) แบบส่งผ่าน (ข) แบบกระเจิงกลับ

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 M.T. Simnad [16] ได้อธิบายการพัฒนาและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแบบ TRIGA โดยเน้นถึงเทคนิคการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อให้เม็ดเชื้อเพลิงสามารถรองรับขยายตัวเมื่อเกิด fission product ขึ้น โดยสามารถเก็บผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันไว้ในเม็ดเชื้อเพลิงได้ทั้งหมด โดยที่เม็ดเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 0.5-1.5 นิ้ว โดยทำการวัดคุณสมบัติของเชื้อเพลิง และ cladding และบันทึกความดันของแก๊สในเชื้อเพลิง ภายใต้สภาวะ steady state และ pulse operation โดยเชื้อเพลิงถูกแบ่งออกเป็น 4 เฟสคือ alpha phase, beta phase, delta phase และ epsilon phase โดยแยกแบ่งตามอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

โดยเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติดังนี้ คือคุณสมบัติด้านกายภาพ เซอร์โคเนียมไฮไดรด์มีความหนาแน่นไฮโดรเจนสูง โดยที่สัดส่วนที่สูงที่สุดเท่ากับสัดส่วนของน้ำ ( $ZrH_2$ ) และมีความเสถียรภาพทางความร้อน โดยสามารถรับได้ถึง  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะ steady state และ  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะ pulse operation ที่สั้นๆ คุณสมบัติด้านความหนาแน่นไฮโดรเจนมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมโดยความหนาแน่นไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับสี่เท่าของอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่อุณหภูมิห้อง คุณสมบัติด้านความหนาแน่นของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์จะลดลงเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ delta phase

2.2.2 Donald R.Olander และ Marowen Ng [17] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเชื้อเพลิงประเภทไฮไดรด์ในเตาปฏิกรณ์แบบนำมวลเบาอัดความดัน พบว่าเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ ( $U_{0.31}ZrH_{1.6}$ ) มีข้อดีกว่าเชื้อเพลิงออกไซด์มากสำหรับเตาปฏิกรณ์แบบนำอัดความดัน มีการปล่อยก๊าซฟิชชันน้อยมากจนถึงอุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิสูงสุดของเชื้อเพลิง การขยายตัวจากปฏิกิริยาฟิชชันในระยะแรกๆ ของการใช้งานอาจมากถึง 5% สำหรับอุณหภูมิเกิน  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  การกระจายตัวใหม่ของไฮโดรเจนเนื่องจากอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆ มากกว่าบริเวณตรงกลางและจะเกิดความเครียดขึ้นในเม็ดเชื้อเพลิง โดยความเครียดมาจาก 2 ส่วนคือ ความเครียดจากความร้อน (thermal stresses) และความเครียดที่เกิดจากอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่ไม่เท่ากันตลอดเม็ดเชื้อเพลิง (hydrogen stress) โดย thermal stress จะดึงตรงกลางและจะบีบข้างนอก ส่วน hydrogen stress จะดึงข้างนอกและบีบตรงกลาง ซึ่งผลรวมของ thermal stress และ hydrogen stress เรียกว่าความเครียดรวม เม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สฮีเลียมความเครียดรวมจะน้อยกว่าความเครียดแตกหัก ส่วนในแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้โลหะเหลว ความเครียดแตกหักจะสูงมากบริเวณแกนกลางของเม็ดเชื้อเพลิง แต่บริเวณพื้นผิวรอบๆ จะยังคงสภาพอยู่ได้เนื่องจากได้รับแรงดันจากภายนอกที่มากกว่า การจัดเรียงตัวใหม่ในแนวแกนจะถ่ายโอนไฮโดรเจนปริมาณมากจากส่วนกลางของแท่งเชื้อเพลิงไปยังบริเวณขอบรอบนอกของแท่งเชื้อเพลิง

2.2.3 Zoltán Hózer และคณะ [18] ได้อาศัยเหตุการณ์ที่เกิดในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Pack ในขณะที่ทำความสะอาด Tank ทำให้เกิดความเสียหายต่อเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง อุณหภูมิของแท่ง



เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระบายความร้อนไม่เพียงพอ และส่วนประกอบที่เป็นเซอร์โคเนียก็ถูกออกซิไดซ์เป็นอย่างมาก การเปิด tank ทำความสะอาดโดยน้ำเย็นทำให้เกิด quench ขึ้นทำให้เกิดการแตกของส่วนประกอบเซอร์โคเนีย และเพื่อที่จะให้เข้าใจปรากฏการณ์ที่กล่าวมาดียิ่งขึ้น จึงได้ทำการทดสอบกลับ โดยเพิ่มอุณหภูมิด้วยไฟฟ้าให้กับแท่งเชื้อเพลิง การทดลองนี้ครอบคลุมเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นรวมทั้งการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากกระทบไอน้ำเป็นเวลานาน และการ quench เนื่องจากน้ำเย็น จากปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้มัดเชื้อเพลิงเปราะ ในขณะที่เม็ดเชื้อเพลิงจะแตกในสภาวะสุดท้ายของการทดลอง ผลโดยส่วนมากที่เกิดขึ้นนี้มีความคล้ายกับเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นจริง สำหรับเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นมีความเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิและปฏิกิริยาทางเคมีถูกสร้างขึ้นมาให้คล้ายกับเหตุการณ์จริงที่เกิดขึ้น การประเมินการทดสอบ สุดท้ายชี้ให้เห็นว่าการเปราะของเซอร์โคเนียสูง เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันและการดูดซึมน้ำไฮโดรเจนของส่วนประกอบเซอร์โคเนีย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

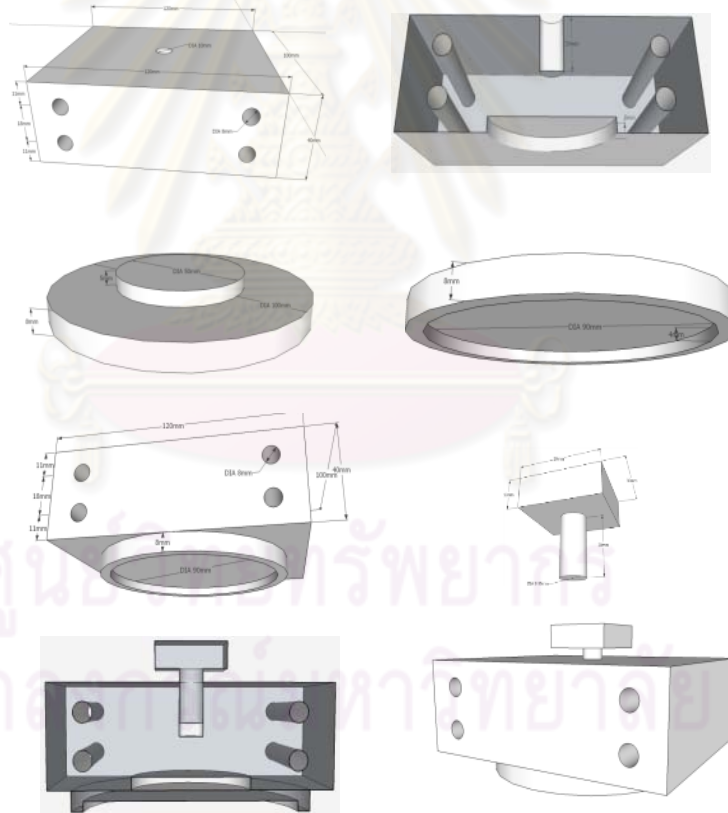
##### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

###### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

###### 3.1.1.1 แม่พิมพ์ (mold)

ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ โดยออกแบบเพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งานกับเครื่อง

อัดไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.1 แบบแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.2 แม่พิมพ์

### 3.1.1.2 เครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press)

เครื่องอัดไฮดรอลิกแบบใช้มืออัด (manual) ที่สามารถอัดโดยใช้ความดันไม่เกิน

4,000 psi



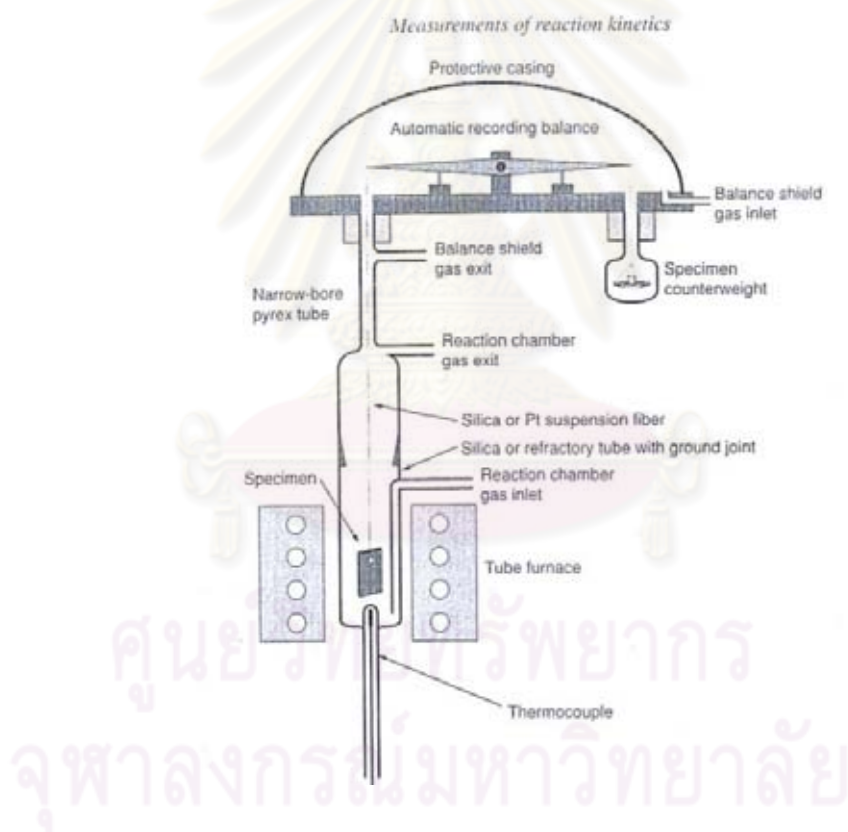
มาตรวัดความดัน

คันโยก

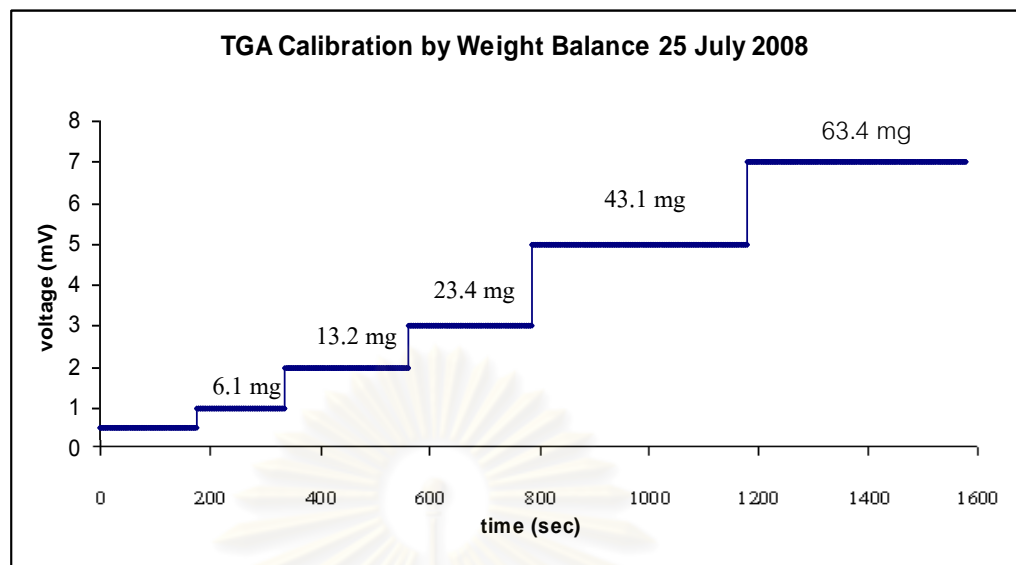
ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก

### 3.1.1.3 เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer

Thermo Gravimetric Analyzer หรือ TGA เป็นเครื่องมืออีกประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ทำการแพร่ไฮโดรเจนได้โดยอาศัยหลักการของค่าทอร์ก (torque) ที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักวัสดุ (specimen) โดยน้ำหนักของวัสดุจะมีความมากขึ้นเมื่อมีไฮโดรเจนแพร่เข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ทอร์กมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าทอร์กที่ได้จะแสดงออกมาในภาพของสัญญาณความต่างศักย์ โดยความต่างศักย์ที่ได้จะแปรผันตรงกับทอร์ก ซึ่งทอร์กแปรผันตรงกับน้ำหนัก

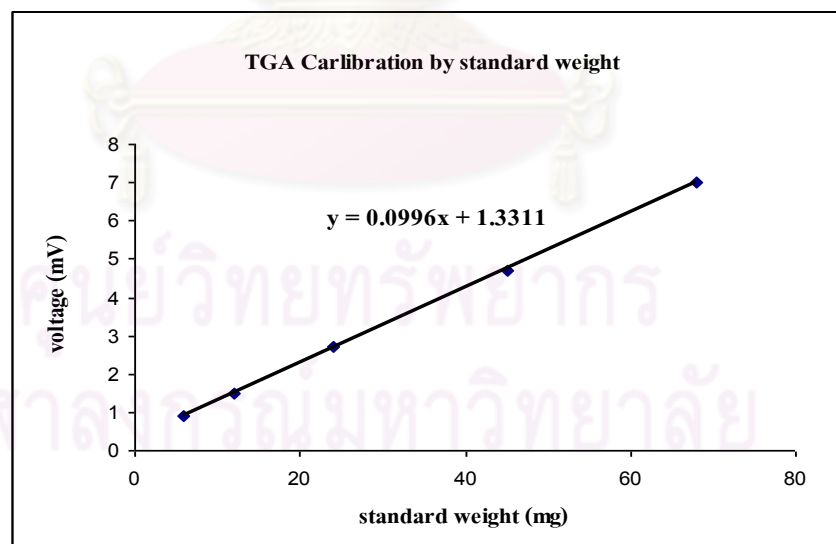


ภาพที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง TGA



ภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักของวัตถุที่ได้จากเครื่อง TGA

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความต่างศักย์ที่ได้ สามารถนำมาเขียนกราฟ เพื่อที่จะทราบน้ำหนักได้จากปริมาณค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากเครื่อง TGA โดยมีค่าอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์กับน้ำหนัก (mV/mg) เป็น 0.1



ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักของวัตถุกับค่าความต่างศักย์



ภาพที่ 3.7 เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

#### 3.1.1.4 เครื่องเผา (furnace)

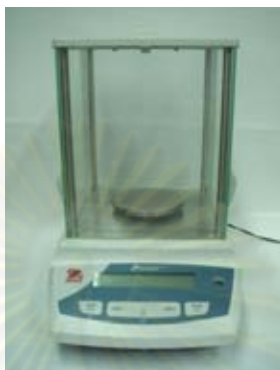
เครื่องเผาที่ใช้เป็นเครื่องเผาที่ให้ความร้อนสูงสุดได้ที่  $1,220\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ทำให้มีอุณหภูมิคงที่ตามต้องการ



ภาพที่ 3.8 เครื่องเผา

### 3.1.1.5 เครื่องชั่ง (balance)

ใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA214 ซึ่งมีความละเอียดโดยมีทศนิยม 4 ตำแหน่ง สำหรับชั่งสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่จะใช้ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

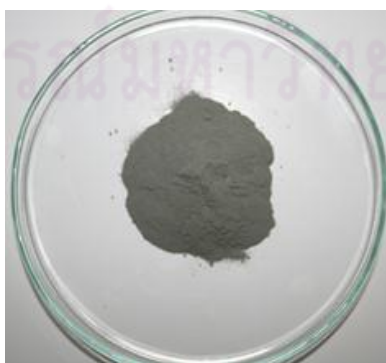


ภาพที่ 3.9 เครื่องชั่ง

## 3.1.2 สารตั้งต้นหลักในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

### 3.1.2.1 ผงโลหะซีเรียม (Cerium powder, Ce) [19]

ซีเรียมคือธาตุที่มีเลขอะตอม 58 เป็นธาตุโลหะลักษณะเงินอยู่ในกลุ่มแลนทาไนด์ (lanthanide group) ใช้ในการทำโลหะผสมสี สามารถยึดเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นได้ สามารถละลายในสารละลายต่างและกรดเข้มข้นได้อย่างรวดเร็ว ในสภาพที่เป็นโลหะบริสุทธิ์สามารถติดไฟได้เองถ้าตัดเฉือนหรือขีดข่วนด้วยมีด ซีเรียมออกไซด์ที่ซึ้เข้าในน้ำเย็นและจะรวดเร็วในน้ำร้อน มีจุดหลอมเหลวที่  $795\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3.10 ผงโลหะซีเรียม

### 3.1.2.2 ผงโลหะเซอร์โคเนียม (Zirconium powder, Zr) [20]

เซอร์โคเนียมคือธาตุที่มีเลขอะตอม 40 เป็นโลหะทรานซิชันมีสีขาวเทาคล้ายไทเทเนียม เซอร์โคเนียมสกัดได้จากแร่เซอร์คอน มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนมาก มีจุดหลอมเหลวที่ 1855 °C



ภาพที่ 3.11 ผงโลหะเซอร์โคเนียม

### 3.1.2.3 ตัวผสม (binder)

เนื่องจากในงานวิจัยหนึ่ง [21] ได้ใช้ตัวผสมเป็นกลุ่มแอลกอฮอล์ และในการทดลองนี้จึงเลือกใช้แอลกอฮอล์แข็ง (alcohol jel) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มแอลกอฮอล์เป็นตัวผสม เนื่องจากราคาถูก แอลกอฮอล์แข็งเป็นเชื้อเพลิงที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบหลัก ใช้ในการหุงต้มหรืออุ่นอาหาร แอลกอฮอล์แข็งที่จำหน่ายตามท้องตลาดแบ่งตามลักษณะเนื้อได้ 2 ประเภท คือ ลักษณะเนื้อแข็งและกึ่งแข็ง ซึ่งจะมีลักษณะแข็งขุ่นเหมือนเทียนไข และลักษณะเนื้อเจล ซึ่งจะเป็นเจลใสเหมือนเจลใส่ผสม บรรจุอยู่ในภาชนะหลายรูปแบบ สะดวกในการพกพาติดตัว ใช้งานจุดไฟได้ทันที เชื้อเพลิงชนิดนี้เมื่อติดไฟจะให้ความร้อนสูง ไม่มีกลิ่น ไม่แสบตา ไม่มีเขม่า จึงเป็นที่นิยมใช้โดยเฉพาะตามร้านอาหาร





ภาพที่ 3.12 แอลกอฮอล์แข็ง

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.1.3.1 ต้นกำเนิดรังสีเบตา (beta source)

ในงานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีเบตา คือ  $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$  ที่มีค่าพลังงานสูงสุด (maximum continuous energy) คือ 2.28 MeV รังสีจะถูกปลดปล่อยจากต้นกำเนิดรังสีในทุกทิศทาง รังสีที่ผ่านเข้าไปในหัววัด GM tube จะเกิดอันตรกิริยากับแก๊สภายในหัววัดและจะมีอัตราการนับเกิดขึ้นเมื่อรังสีเข้าชนกับวัสดุต่างๆ เช่น วัสดุที่ใช้ทำต้นกำเนิดไอโซโทปรังสี อาจเกิดการเบี่ยงเบน หรือ กระเจิงในตัววัสดุนั้นๆ เมื่อรังสีเกิดการกระเจิงกลับในมุมประมาณ 180 องศาจะเรียกว่า backscattered แสดงว่ารังสีที่ปลดปล่อยไปในทิศทางต่างๆ บางส่วนจะเกิดการกระเจิงกลับเข้าไปสู่หัววัด และทำให้อัตราการนับที่เกิดขึ้นไม่ถูกต้อง เหตุการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุที่เป็นภาชนะรองรับสารรังสี ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นจะต้องมีการพิจารณาในการเตรียมสารรังสีที่ให้อนุภาคเบตาที่ใช้ในการทดลอง จำนวนของการกระเจิงกลับจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของ backing material และจะมีค่าสูงสุดที่การกระเจิงกลับจะคงที่เรียกว่า “saturation backscattering” การเกิด backscattering จะเป็นฟังก์ชันกับเลขอะตอมของ backing material และพลังงานของอนุภาคเบตา

ในการจัดลักษณะการทดลองจะเป็นการจัดเพื่อทำการทดลองแบบรังสีกระเจิงกลับ จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันไม่ให้รังสีมีการกระเจิงเข้าสู่หัววัดก่อนที่จะกระทบเนื้อเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง นั่นคือจะมีแผ่นกันรังสี (mask) ที่รองรับต้นกำเนิดรังสี ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงเป็นค่าที่ได้จากการกระเจิงกลับของรังสีเบตากับเม็ดเชื้อเพลิงจำลองอย่างแน่นอน

### 3.1.3.2 หัววัดรังสีแบบไกเกอร์-มุลเลอร์ (Geiger-Muller detector, GM detector)

หัววัดรังสีแบบไกเกอร์มุลเลอร์ที่ใช้เป็นยี่ห้อ LUDLUM รุ่น L2200 เป็นหัววัดที่ทำงานในช่วงไกเกอร์-มุลเลอร์ ทำงานที่ค่าทวิคูณของก๊าซ คือช่วงที่ปริมาณไอออนที่เกิดทั้งหมดไม่ขึ้นกับปริมาณของไอออนจากการไอออไนซ์ปฐมภูมิ จึงไม่สามารถวัดพลังงานได้ เนื่องจากไอออนถูกเร่งที่สนามไฟฟ้าสูง จึงทำให้มีการไอออไนซ์ต่อเนื่องจากการเหนี่ยวนำของโฟตอน ทำให้มีปริมาณไอออนในการวัดรังสีแต่ละครั้งมีจำนวนมาก ได้สัญญาณพัลส์ขนาดโตมาก แต่จะมีประสิทธิภาพในการนับรังสีต่ำเพราะก๊าซที่ไอออไนซ์ใช้เวลาในการคืนสภาวะปกตินาน จึงมี date time ของหัววัดรังสีสูงกว่าหัววัดรังสีบรรจุก๊าซอื่นๆ มักใช้ในการวัดรังสีที่มีอัตราการนับต่ำ เช่น ในเครื่องสำรวจบริเวณรังสีและเครื่องมือวัดรังสีประจำบุคคล หลอดไกเกอร์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกโลหะผิวด้านในฉาบด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ ส่วนขั้วบวกเป็นเส้นลวดโลหะอยู่เป็นแกนกลางของหลอด ภายในบรรจุแก๊สเฉื่อย ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง

### 3.1.3.3 เครื่องนับรังสี (scaler)

ตัวนับวัดรังสีที่ใช้เป็นยี่ห้อ LUDLUM จะถูกต่อจากหัววัดเพื่อทำการวัดปริมาณรังสีที่เข้าสู่หัววัด โดยรังสีที่เข้าสู่หัววัดต้องเป็นรังสีที่ได้จากการกระเจิงจากเนื้อเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เลขอะตอมเฉลี่ยด้วยวิธีการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 นำผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมผสมเข้าด้วยกัน โดยมีตัวผสมคือแอลกอฮอล์แห้ง นำส่วนผสมทั้งสามคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยให้มีปริมาณผงโลหะซีเรียมมากที่สุดที่ยังสามารถอัดเป็นเม็ดได้ โดยอัตราส่วน Ce:Zr มากที่สุดที่ทำได้คือ 0.03:1 โดยโมล ซึ่งเชื้อเพลิงหนึ่งเม็ดประกอบด้วยผงโลหะเซอร์โคเนียม 5 กรัม และผงโลหะซีเรียม 0.23 กรัม [ภาคผนวก ก] และอัดที่ความดันประมาณ 3,200 -3,400 psi ซึ่งเมื่อทำการอัดเป็นเม็ดแล้ว จะได้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีลักษณะดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เม็ดซีเรียมเซอร์โคเนียมที่อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

3.2.2 นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่อัดได้ไปทำการเผาผลาญ (Sintering) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและให้ผงโลหะทั้งสองหลอมเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน การที่นำเม็ดเชื้อเพลิงไปทำการเผาผลาญเพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้กับเม็ดเชื้อเพลิงและทำให้ผงโลหะทั้งสองหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเมื่อทำการเผาผลาญแล้ว จะได้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีลักษณะดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 เม็ดซีเรียมเซอรโคเนียมหลังจากทำการเผาผลาญที่อุณหภูมิ 1,200 °C

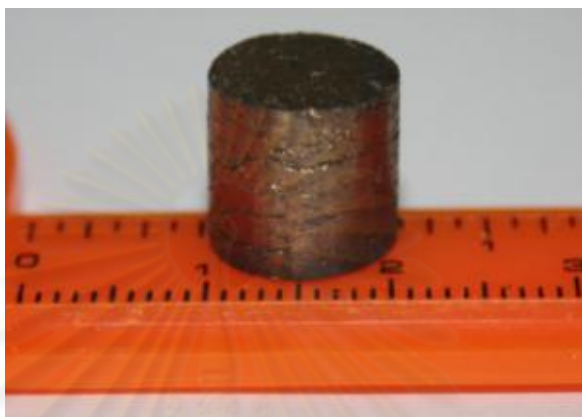
3.2.3 นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ทำการเผาผลาญเรียบร้อยแล้ว ไปทำกระบวนการแปรไฮโดรเจนโดยใช้เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer หรือ TGA โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.1 แขนงเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่อง TGA ที่อยู่ในช่อง (chamber) และทำการปิด chamber ให้สนิทและดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศที่ความดันประมาณ  $10^{-2}$  torr พร้อมกับใส่เครื่องเผา (furnace) ครอบ chamber โดยให้ chamber อยู่ตรงกลางของเครื่องเผา

3.2.3.2 เปิดก๊าซอาร์กอนเข้าภายใน chamber เพื่อขจัดก๊าซออกซิเจนที่ยังหลงเหลืออยู่ออกจาก chamber และเปิดให้เครื่องเผาเริ่มทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 750 °C และเมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วเปิดก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber และปรับค่าการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไฮโดรเจนเป็น 20:40 โดยก๊าซที่ปล่อยเข้าไปใน chamber ผ่านตัวกรองออกซิเจนและไอน้ำ (oxy clear filter)

3.2.3.3. เริ่มบันทึกค่าตั้งแต่เริ่มปล่อยไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber เมื่อค่าที่บันทึกได้โดยเครื่อง TGA เริ่มคงที่ ให้ทำการลดอุณหภูมิทุกๆ 25 °C ค่าที่บันทึกได้จะเริ่มเพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่อีกครั้ง ให้ทำซ้ำจนลดอุณหภูมิมลงมาถึงประมาณ 500 °C ก็ทำการปิดเครื่องเผา ปิดการส่งก๊าซเข้า chamber ปิดการบันทึกค่า และรีบนำเครื่องเผาออกอย่างรวดเร็ว

3.2.3.4 นำค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA มาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio) ซึ่งเมื่อทำการแพร่ไฮโดรเจนแล้ว จะได้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีลักษณะดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 เม็ดซีเรียมเซอร์โคเนียมที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนด้วยเครื่อง TGA

3.2.4 นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านการแพร่ไฮโดรเจนแล้วไปทำการทดสอบหา H/Zr ratio จากการคำนวณจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และการคำนวณจากค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบด้วยการวัดการกระเจิงกลับของรังสีเบตา (beta backscatter) โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีเบตา  $Sr^{90}-Y^{90}$  ร่วมกับระบบวัดรังสีดังภาพที่ 3.13 โดยทำการวัด 2 แบบคือวัดผ่านผิวด้านข้างของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง และวัดตรงกลางผิวเมื่อทำการตัดขวาง

3.2.5 นำเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับไปทดสอบ High temperature quench เพื่อหาปริมาณมวลที่เปลี่ยนแปลงกับจำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ โดยเผาเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่อุณหภูมิ  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน แล้วจุ่มลงในน้ำอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 3.17 เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้จากการทำ High temperature quench หลังทำการทดสอบ 5 ครั้ง

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การวิเคราะห์หา H/Zr ratio ภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจากเครื่อง TGA

3.3.1.1 ทำการทดลองตามข้อ 3.2.3

3.3.1.2 นำค่าที่บันทึกได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่า H/Zr ratio ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

3.3.2 การหาอัตราส่วนไฮโดรเจนจากการคำนวณหาเลขอะตอมเฉลี่ยด้วยวิธีวัดรังสีเบตาแบบกระจกกลับ

3.3.2.1 จัดระบบการวัดดังภาพที่ 3.13 โดยทำการวัด 2 แบบดังข้อ 3.2.4 ซึ่งมีขั้นตอนในการทำเหมือนกัน

3.3.2.2 วัดขณะที่ระบบมีเฉพาะต้นกำเนิดรังสี เพื่อให้ได้ข้อมูลของค่ารังสีเบตากระจกกลับของอากาศ

3.3.2.3 วัดขณะที่มีตัวรองเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลของค่ารังสีเบตากระจกกลับของอากาศและตัวรองเม็ดเชื้อเพลิง ถ้าค่าที่ได้จากข้อ 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงได้ว่าการจัดระบบวัดสามารถใช้งานได้จริง โดยค่าที่วัดได้กำหนดให้เป็นค่า  $I_0$

3.3.2.4 วัดขณะที่มีเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง พร้อมบันทึกค่าที่นับวัดได้ กำหนดให้เป็นค่า I

3.3.2.5 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และหาค่า H/Zr ratio ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

### 3.3.3 การคำนวณหาค่าความหนาแน่น

นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านการแพร่ไฮโดรเจนแล้วไปวัดน้ำหนัก และวัดปริมาตร โดยการแทนที่น้ำเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น โดยทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นก่อนและหลังการทำการแพร่ไฮโดรเจน

### 3.3.4 การทดสอบ High temperature quench

3.3.4.1 วัดน้ำหนักเริ่มต้นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

3.3.4.2 เฝामีตเชื้อเพลิงจำลองที่อุณหภูมิ 700 °C ประมาณ 30 นาที

3.3.4.3 ปลอ่ยเม็ดเชื้อเพลิงจำลองลงน้ำที่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็ว บันทึกน้ำหนักหลังปลอ่ยลงน้ำ

3.3.4.4 นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมาเช็ดให้แห้ง แล้วนำกลับไปเฝำทำตามขั้นตอน

3.3.4.2-3.3.4.3 ทั้งหมด 5 ครั้ง

3.3.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและสรุปผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

##### 4.1.1 การหาอัตราส่วนของซีเรียมที่สามารถผสมอยู่ในเซอร์โคเนียในปริมาณมากที่สุดที่ยังสามารถอัดเป็นเม็ดได้

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเรียมต่อเซอร์โคเนียที่ทำให้สามารถอัดเป็นเม็ดได้ โดยที่มีปริมาณซีเรียมผสมอยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมากที่สุด ซึ่งได้ทำการทดลองโดยเพิ่มปริมาณของซีเรียมทีละ 0.01% โดยโมล ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างผงโลหะซีเรียมต่อผงโลหะเซอร์โคเนีย [ภาคผนวก ก]

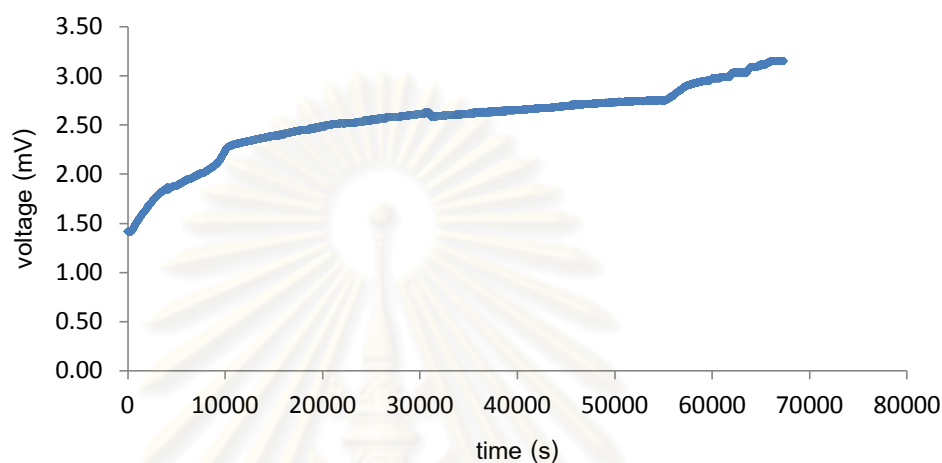
ผงโลหะซีเรียม (Ce) : ผงโลหะเซอร์โคเนีย (Zr)	ผลการอัด
0.01 : 1	สามารถอัดเป็นเม็ดได้
0.02 : 1	สามารถอัดเป็นเม็ดได้
0.03 : 1	สามารถอัดเป็นเม็ดได้
0.04 : 1	ไม่สามารถอัดเป็นเม็ดได้

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนซีเรียมต่อเซอร์โคเนียที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.03:1 โดยโมล ในขณะที่อัตราส่วนที่มากกว่านี้ไม่สามารถอัดเป็นเม็ดได้ ซึ่งลักษณะของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่อัดได้จะแตกทันทีที่นำออกจากแม่พิมพ์ สาเหตุที่ต้องให้มีปริมาณซีเรียมในอัตราส่วนที่มากที่สุด เนื่องจากในงานวิจัยนี้ซีเรียมเป็นธาตุที่ใช้แทนยูเรเนียม ซึ่งยูเรเนียมเป็นส่วนที่จะให้เกิดพลังงานในการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณซีเรียมมาก นั่นก็หมายถึงมีส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงมากก็จะสามารถทำให้มีพลังงานมากด้วยเช่นกัน

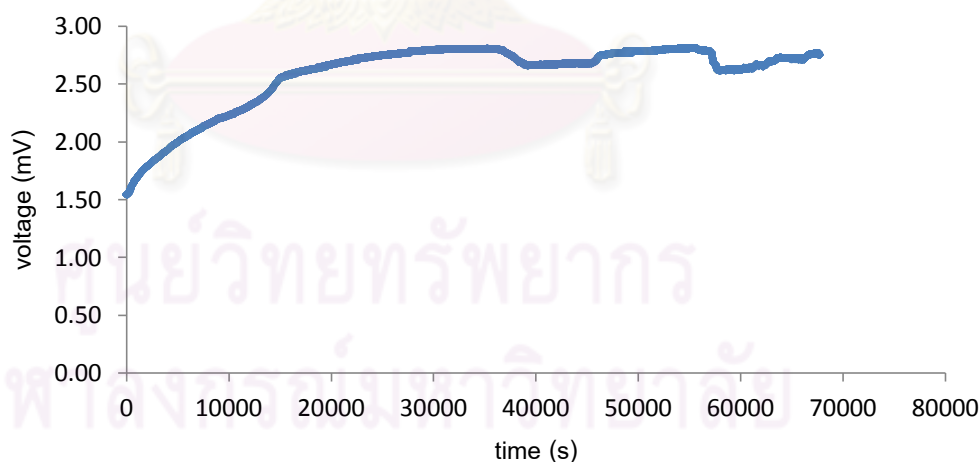


#### 4.1.2 การทำการแพร์ไฮโดรเจนด้วยเครื่อง TGA

จากการทดลองตามข้อ 3.2.3 ผลการทดลองที่ได้เป็นการบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเป็นการบันทึกจากตัวรับสัญญาณที่เชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีการเก็บข้อมูลเป็นคู่อันดับ แล้วนำมาแปลผลเป็นกราฟ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการทำการแพร์ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH (เม็ดที่ 1) ในเครื่อง TGA



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการทำการแพร์ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH (เม็ดที่ 2) ในเครื่อง TGA

ลักษณะของกราฟดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 นั้น บ่งชี้ว่าอัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาประมาณหนึ่งในสี่ของการเก็บข้อมูล แต่หลังจากนั้นอัตราจะไม่ค่อยคงที่ และมีบางช่วงที่กราฟลดต่ำลง ซึ่งหมายความว่ามีการแพร่ออกของไฮโดรเจน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio)

การคำนวณค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจะทำการคำนวณ 2 วิธี คือ การคำนวณจากเครื่อง TGA และการคำนวณจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระจกกลับ

##### 4.1.3.1 การคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากผลที่ได้จากเครื่อง TGA

การเก็บข้อมูลจากเครื่อง TGA จะเป็นการเก็บข้อมูลค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลา โดยค่าความต่างศักย์ที่บันทึกได้เป็นผลเนื่องมาจากค่าทอร์กที่เปลี่ยนแปลง คือเมื่อมีไฮโดรเจนแพร่เข้าไปแทรกในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีน้ำหนักมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าทอร์กและค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันถ้าไฮโดรเจนแพร่ออกจากเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะลดลง ส่งผลให้ค่าทอร์กและค่าความต่างศักย์ลดลง

กำหนดค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ดังนี้

มวลอะตอมของเซอร์โคเนียม (Atomic mass of Zirconium,  $A_{Zr}$ ) คือ 91.224

มวลอะตอมของไฮโดรเจน (Atomic mass of Hydrogen,  $A_H$ ) คือ 1.0079

มวลอะตอมของซีเรียม (Atomic mass of Cerium,  $A_{Ce}$ ) คือ 140.116

น้ำหนักของเซอร์โคเนียมก่อนเข้าเครื่อง TGA คือ  $W_i$

น้ำหนักของเซอร์โคเนียมหลังออกจากเครื่อง TGA คือ  $W_f$

ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นของเครื่อง TGA ก่อนทำการซึ่มไฮโดรเจน คือ  $mV_i$

ค่าความต่างศักย์สุดท้ายของเครื่อง TGA หลังสิ้นสุดการซึ่มไฮโดรเจน คือ  $mV_f$

ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม คือ R

ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง คือ weight

ปริมาณโมลของเซอร์โคเนียม คือ  $mol_{Zr}$

ค่าอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์กับน้ำหนัก (mV/mg) ของเครื่อง TGA เป็น 0.1

ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมของเซอร์โคเนียม แต่เม็ดเชื้อเพลิงจำลองไม่ได้มีเฉพาะเซอร์โคเนียมเพียงตัวเดียว ดังนั้นน้ำหนักที่ซึ่งได้จึงไม่ใช่ น้ำหนัก ( $W_i$ ) ที่จะใช้คิดหาอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม โดยน้ำหนักที่จะใช้ในการคำนวณต้องเป็นน้ำหนักเฉพาะเซอร์โคเนียมเท่านั้น ดังนั้นต้องนำน้ำหนักที่เป็นของซีเรียมออกซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$weight = mol_{Zr} \times A_{Zr} + 0.03 \times mol_{Zr} \times A_{Ce} \quad (4.1)$$

โดยที่ในหนึ่งเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีปริมาณซีเรียมต่อเซอร์โคเนียมเป็น 0.03:1 โดยโมล นั่นคือสามารถหาปริมาณน้ำหนักของเซอร์โคเนียมที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

$$W_i = \left( \frac{A_{Zr} + 0.03 \times A_{Ce}}{weight} \right) \times A_{Zr} \quad (4.2)$$

การหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมสามารถหาได้จาก

$$W_f = \left( \frac{W_i}{A_{Zr}} \right) \times R \times A_H + W_i \quad (4.3)$$

$$mV_f = (W_f - W_i) \times 1000 \times 0.1 + mV_i \quad (4.4)$$

จาก 4.3 และ 4.4 จะได้

$$R = \frac{(mV_f - mV_i) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H \times 100} \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.2 ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน และค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณ [ภาคผนวก ข]

	Weight (กรัม)	$mV_i$ (มิลลิโวลท์)	$mV_f$ (มิลลิโวลท์)	$W_i$ (กรัม)	R
CeZrH (เม็ดที่ 1)	4.55	1.41	3.15	4.38	0.4
CeZrH (เม็ดที่ 2)	4.51	1.53	2.75	4.29	0.3

อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้จากเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 และเม็ดที่ 2 โดยข้อมูลการบันทึกจากเครื่อง TGA เป็น 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 เพื่อให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือมากขึ้น ได้คำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมด้วยวิธีการคำนวณค่าเลขอะตอมเฉลี่ย โดยการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

#### 4.1.3.2 การคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมโดยการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ เป็นการนำหลักการของการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไป คือเดิมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะมีส่วนประกอบแค่ 2 ส่วนคือเซอร์โคเนียมและซีเรียม ซึ่งจะมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยค่าหนึ่ง แต่เมื่อทำการแพร่ไฮโดรเจน ทำให้มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้ามา ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไป โดยสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปจากเดิมนั้น เป็นผลเนื่องจากมีไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเป็นปริมาณเท่าใด และสามารถคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมได้ โดยค่าเลขอะตอมเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \left( \frac{WZ^2}{A} \right)_i}{\sum_i \left( \frac{WZ}{A} \right)_i} \quad (4.6)$$

จากการทดลองตามข้อ 3.3.2 บันทึกข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวด้านข้าง)

	ค่าจำนวนนับ (5 นาที)				weigh t(กรัม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
I (อากาศ)	1325	1315	1312	1317	-
I <sub>0</sub> (ตัวรอง)	1670	1657	1658	1661	-
CeZr	33508	33221	33319	33319	4.72
CeZrH (เม็ดที่ 1)	32501	32755	32554	32554	4.26
CeZrH (เม็ดที่ 2)	32803	32679	32760	32760	4.11

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวดัดขวาง)

	ค่าจำนวนนับ (5 นาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
I (อากาศ)	251	208	211	223
I <sub>0</sub> (ตัวรอง)	553	570	561	561
CeZr	12137	12090	12135	12121
CeZrH (เม็ดที่ 1)	11989	12021	11988	11999
CeZrH (เม็ดที่ 2)	12103	12021	12061	12062

ในส่วนของค่าจำนวนนับที่วัดได้ต้องมีการแก้ไขค่าให้ถูกต้อง นั่นคือต้องคำนึงถึงค่า dead time ของหัววัด ซึ่งหัววัดที่ใช้มีค่า dead time ประมาณ 200 ไมโครวินาที โดยพิจารณาการแก้ค่าจำนวนนับจากสูตร

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad (4.7)$$

โดยที่ n คือ ค่าจำนวนนับจริง (count/time)

m คือ ค่าจำนวนนับที่บันทึกได้ (count/time)

$\tau$  คือ dead time ~ 200  $\mu$ sec

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่า beta backscatter saturation factor หรือค่า G คือ ค่าที่เปรียบเทียบความเข้มของรังสีเบตาที่กระเจิง (scatter) จากตัวอย่างที่มีค่าเลขอะตอมต่างกัน โดยค่า G ที่ได้จะสามารถนำมาหาเลขอะตอมเฉลี่ยได้ ซึ่งค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และค่าจำนวนนับมีความสัมพันธ์ตาม Tittle's formula ดังสมการที่ 4.8

$$G = 1 - e^{-Z_{eff}/40} \quad (4.8)$$

$$\frac{G_I}{count_I} = \frac{G_{II}}{count_{II}} \quad (4.9)$$

ค่า G ที่ได้จากตัวที่เป็นตัวมาตรฐาน (standard sample) จะเป็นตัวที่ใช้หาค่า G ของตัวที่ไม่ทราบค่า โดยการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า G และค่าจำนวนนับที่ได้จากการทดลองของตัวมาตรฐาน กับอัตราส่วนค่า G และค่าจำนวนนับที่ได้จากการทดลองของตัวที่ไม่ทราบค่า ดังสมการที่ 4.9 โดยค่า G จะมีผลแปรตามค่าจำนวนนับ และสามารถนำค่า G มาคำนวณเพื่อหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย ( $Z_{eff}$ ) และหาปริมาณของไฮโดรเจนที่อยู่ภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมได้ เมื่อพิจารณาในการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยดังสมการที่ 4.6 จะได้

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \left( \frac{WZ^2}{A} \right)_i}{\sum_i \left( \frac{WZ}{A} \right)_i} = \frac{\sum_i \left( \frac{mol \times A \times Z^2}{A} \right)_i}{\sum_i \left( \frac{mol \times A \times Z}{A} \right)_i} = \frac{\sum_i (mol \times Z^2)_i}{\sum_i (mol \times Z)_i} \quad (4.10)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนขององค์ประกอบแต่ละส่วน และเพื่อให้สามารถแก้สมการได้ จะกำหนดตัวแปรคือ จำนวนโมลที่ใช้ของเซอร์โคเนียมเป็น  $mol_Z$  จำนวนโมลที่ใช้ของซีเรียมเป็น  $0.03 \times mol_Z$  และจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ได้จากการทำการแพร่ไฮโดรเจนเป็น  $n \times mol_Z$  โดยที่ค่า n คือ จำนวนเท่าของ  $mol_Z$  ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมนั่นเอง

พิจารณาตามสมการที่ 4.10 จะได้

$$Z_{eff} = \frac{(mol_{Zr} \times Z_{Zr}^2) + (0.03 \times mol_{Zr} \times Z_{Ce}^2) + (n \times mol_{Zr} \times Z_H^2)}{(mol_{Zr} \times Z_{Zr}) + (0.03 \times mol_{Zr} \times Z_{Ce}) + (n \times mol_{Zr} \times Z_H)} \quad (4.11)$$

จาก 4.11 จะได้

$$n = \frac{(Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2)) - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}}{Z_H Z_{eff} - Z_H^2} \quad (4.12)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า G และค่าเลขอะตอมเฉลี่ยและค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองได้ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ (บริเวณผิวด้านข้าง) [ภาคผนวก ค]

	ค่าน้ำหนักเฉลี่ย	weight (กรัม)	G	$Z_{eff}$	n
CeZr	34076±185	4.72	0.639	40.75	-
CeZrH (เม็ดที่ 1)	33276±182	4.26	0.624	39.13	1.8
CeZrH (เม็ดที่ 2)	33491±183	4.11	0.628	39.55	1.3

ตารางที่ 4.6 ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ (บริเวณผิวตัดขวาง) [ภาคผนวก ค]

	ค่าจำนวนนับเฉลี่ย	G	$Z_{eff}$	n
CeZr	12220±111	0.639	40.75	-
CeZrH (เม็ดที่ 1)	12096±110	0.633	40.09	0.7
CeZrH (เม็ดที่ 2)	12169±110	0.636	40.42	0.4

อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 และเม็ดที่ 2 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ เป็น 1.8 และ 1.3 ตามลำดับ เมื่อทำการวัดตรงบริเวณผิวด้านข้าง และเป็น 0.7 และ 0.4 ตามลำดับ เมื่อทำการวัดตรงบริเวณผิวตัดขวาง ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 ซึ่งแนวโน้มของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 2 ประเภทคือ จากการวิเคราะห์ด้วยผลการทดสอบจากเครื่อง TGA และการวิเคราะห์ด้วยผลจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ทั้ง 2 แบบ เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมมากกว่าเม็ดที่ 2

#### 4.1.4 การคำนวณค่าความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$D = \frac{M}{V} \quad (4.13)$$

โดยที่ D คือความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm<sup>3</sup>)

M คือมวล (กรัม, g)

V คือปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร, cm<sup>3</sup>)

ตารางที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่คำนวณได้

	weight (กรัม)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
CeZr	4.72	0.97	4.86
CeZrH (เม็ดที่ 1)	4.26	0.71	5.92
CeZrH (เม็ดที่ 2)	4.11	0.81	5.08

ค่าความหนาแน่นที่ได้พบว่า เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ไม่ผ่านการทำการแพร่ไฮโดรเจนจะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านการทำการแพร่ไฮโดรเจน และ



เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมมากกว่าก็จะมีคความหนาแน่นมากกว่า เม็ดที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมน้อยกว่าและเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบและเห็นผลชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้สรุปค่าต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม และค่าความหนาแน่นที่ได้จากการวิเคราะห์

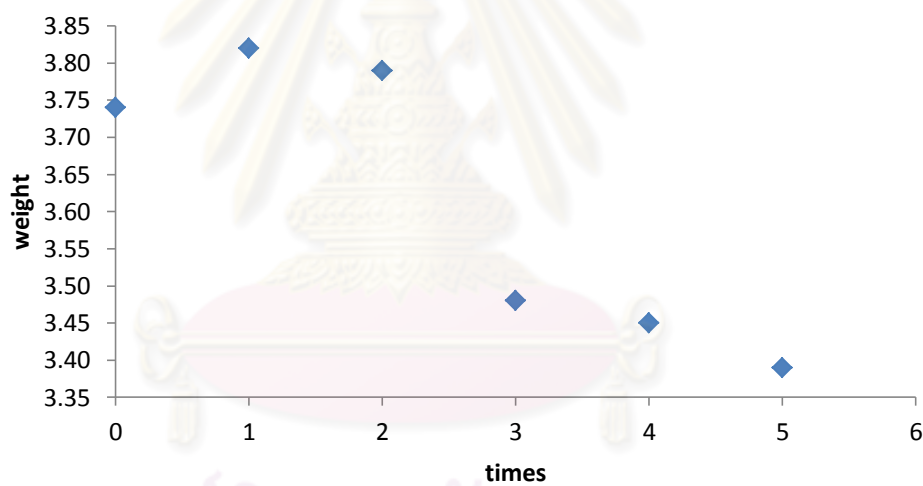
เม็ดเชื้อเพลิงจำลอง	อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม			ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
	beta backscatter		เครื่อง TGA	
	ผิวข้าง	ผิวตัดขวาง		
CeZrH (เม็ดที่ 1)	1.8	0.7	0.4	5.92
CeZrH (เม็ดที่ 2)	1.3	0.4	0.3	5.08

#### 4.1.5 การทดสอบ High temperature quench

จากการทดสอบโดยนำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนแล้วไปทดสอบ High temperature quench ซึ่งเผาเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C ในบรรยากาศ ก๊าซอาร์กอน แล้วปล่อยลงน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที เพื่อหาความสัมพันธ์ของมวลที่เปลี่ยนแปลงของ เม็ดเชื้อเพลิงจำลองหลังจากปล่อยลงน้ำกับจำนวนครั้งที่ทดสอบ High temperature quench ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับครั้งที่ทำการทดสอบ High temperature quench

ครั้งที่	Weight (กรัม)	% การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก
0	3.74	-
1	3.82	+2.14
2	3.79	-0.79
3	3.48	-8.18
4	3.45	-0.86
5	3.39	-1.74



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองกับครั้งที่ทำการทดสอบ High temperature quench

จากการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงจำลองมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นขณะที่ทำการเผาและปล่อยลงน้ำครั้งที่ 1 เท่านั้น แต่เมื่อทำการทดลองครั้งต่อไปพบว่า น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองลดลง และลดลงอย่างรวดเร็วขณะที่ทำการทดลองครั้งที่ 3 แสดงดังภาพที่ 4.3

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

##### 5.1.1 ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

จากหลักการของการแพร่เข้าของไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะค่อยๆ แพร่เข้าจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านในของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 550-800 °C โดยอุณหภูมิแต่ละค่าจะให้อัตรา (rate) การแพร่เข้าของไฮโดรเจนที่ต่างกัน นั่นคือเมื่ออุณหภูมิภายใน chamber มีค่า 550 °C จะเริ่มทำการปล่อยไฮโดรเจนเข้า chamber จนอุณหภูมิสูงจนถึงค่าที่ตั้งไว้คือ 750 °C ในช่วงอุณหภูมินี้ (550-750 °C) อัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง สังเกตจากกราฟในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะลดลงจนเกือบคงที่ (อัตราการแพร่เข้าเป็นศูนย์) ก็ทำการลดอุณหภูมิลงที่ประมาณ 25 °C โดยทำการลดอุณหภูมิเมื่อการแพร่เข้าของไฮโดรเจนคงที่ โดยลดอุณหภูมิลงมาถึง 500 °C ก็ทำการปิดเครื่อง

ในช่วงแรกที่เริ่มปล่อยไฮโดรเจนอัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนคงที่ที่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนเริ่มเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะบริเวณผิวด้านนอกของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเกิดออกไซด์กับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ภายใน chamber ทำให้เกิดชั้นออกไซด์เคลือบตรงบริเวณพื้นผิวด้านนอก ทำให้ไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าได้น้อยลงจนเกือบไม่สามารถแพร่เข้าภายในเม็ดเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากถูกกั้นด้วยชั้นออกไซด์ของเซอร์โคเนียม แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงทำให้ไฮโดรเจนแพร่เข้าได้ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามสมการของแวง-โอลันเดอร์ [22] (Wang-Olander equation) พบว่าอัตราการแพร่ของไฮโดรเจนที่ผิวจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง [ภาคผนวก ง] และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เม็ดเชื้อเพลิงร้อนขึ้นการแพร่ออกของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และการเกิดออกไซด์ก็จะเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นเมื่อต้องการให้อัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนสูงกว่าอัตราการแพร่ออกจึงใช้วิธีการลดอุณหภูมิลง

จากค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ทั้ง 2 วิธีคือวิเคราะห์จากข้อมูลที่บันทึกโดยเครื่อง TGA และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระจกกลับที่ทำการวัด 2 แบบ (วัดผิวข้างและวัดผิวดัดขวาง) ผลที่ได้คือเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีค่าเป็น 0.4 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{0.4}$ ), 1.8 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{1.8}$ ) และ 0.7 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{0.7}$ ) ตามลำดับ และเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 2 มีค่าเป็น 0.3 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{0.3}$ ), 1.3 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{1.3}$ ) และ 0.4 ( $\text{Ce}_{0.03}\text{ZrH}_{0.4}$ ) ตามลำดับ จากผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ 2 ประเด็นคือ แนวโน้มของปริมาณไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 และค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะอภิปรายในลำดับต่อไป

ประเด็นที่สองเนื่องจากได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน ส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนตรงบริเวณที่ใกล้ผิวนอกมากกว่าตรงบริเวณที่อยู่ตรงกลางของเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่ไฮโดรเจนมีโอกาสที่จะแพร่เข้าได้น้อยกว่าตรงบริเวณใกล้ผิว และจากการคำนวณจากข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA นั้น เป็นการบันทึกค่าทอร์คที่เปลี่ยนไป ซึ่งแปรผันตามน้ำหนักของตัวอย่างที่แขวน โดยน้ำหนักที่วัดได้เป็นน้ำหนักรวมของตัวอย่าง ทำให้เมื่อนำมาคำนวณจะได้ค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมโดยเฉลี่ยของทั้งเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดรังสีเบตาแบบกระจกกลับซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง โดยหลักการทดสอบจะให้รังสีเบตาตกกระทบที่ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง แล้ววัดรังสีเบตากระจกกลับเข้าหัววัด จากการทดลองแหล่งกำเนิดรังสีเบตาที่ใช้คือ  $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$  มีพลังงานสูงสุดคือ 2.28 MeV ซึ่งมีระยะอิมมิตัวคือ 2.0 มิลลิเมตร [ภาคผนวก จ] เนื่องจากรังสีจะต้องกระทบวัตถุแล้วกระจกกลับมาที่หัววัด ดังนั้นระยะที่รังสีเคลื่อนที่ได้คือไม่เกินระยะทางครึ่งหนึ่งของระยะทางอิมมิตัว ดังนั้นโอกาสที่รังสีจะตกกระทบแล้วกระจกจากเม็ดเชื้อเพลิงจำลองตรงบริเวณใกล้ผิว ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนมาก (วัดบริเวณด้านข้างของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง) ก็จะสูงกว่าจะตกกระทบแล้วกระจกจากบริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปจากผิวด้านข้าง ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงเป็นค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเฉลี่ยตรงบริเวณที่ลึกจากผิวด้านข้างเข้าไปไม่เกินครึ่งหนึ่งของระยะอิมมิตัว คือประมาณ 1.0 มิลลิเมตร ดังนั้นค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่วัดบริเวณผิวด้านข้างจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระจกกลับจึง

มากกว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง TGA แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดที่บริเวณผิวด้านข้างและตรงบริเวณผิวตัดขวางพบว่า ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่ผิวด้านข้างมีค่ามากกว่าผิวตัดขวาง เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วสำหรับผิวด้านข้าง และสำหรับตรงบริเวณผิวตัดขวางซึ่งเป็นตรงกลางของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ไฮโดรเจนแพร่เข้าไปได้น้อย ทำให้ค่าที่วัดได้ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่ผิวข้างมาถึงตรงกลางน้อยกว่าบริเวณที่ลึกจากผิวข้างเข้าไปเพียง 1.0 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้จากผิวตัดขวางมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากผิวด้านข้าง แต่เมื่อพิจารณาระหว่างค่าที่คำนวณได้จากผิวตัดขวาง และค่าที่คำนวณได้จากเครื่อง TGA พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่คำนวณได้จากทั้ง 2 แบบเป็นการหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเฉลี่ยทั้งเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้จากการหาเลขอะตอมเฉลี่ยเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำได้ง่าย จากการพิจารณาสมการ 
$$n = \frac{(Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2)) - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}}{Z_H Z_{eff} - Z_H^2}$$
 สังเกตได้ว่าค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมไม่ขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของเซอร์โคเนียม แต่ขึ้นกับค่าเลขอะตอมเฉลี่ย ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีตัวมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยน้อย แสดงว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณไฮโดรเจนมาก นั่นคือค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมแปรผกผันกับค่าเลขอะตอมเฉลี่ย ค่า beta backscatter saturation factor หรือค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลอง

### 5.1.2 ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

ความหนาแน่นที่วัดได้ของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองของ CeZr, CeZrH เม็ดที่ 1 และ CeZrH เม็ดที่ 2 คือ  $4.86 \text{ g/cm}^3$ ,  $5.92 \text{ g/cm}^3$  และ  $5.08 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ โดยเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านกระบวนการแพร่ไฮโดรเจนแล้วจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ยังไม่ผ่านการทำการแพร่ไฮโดรเจน และเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมมากกว่าก็จะมีค่าความหนาแน่นมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีไฮโดรเจนแพร่เข้าไปใน

ทำให้ค่ามวลโมเลกุลรวมของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นแปรผันตรงกับอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม

### 5.1.3 ผลการทดสอบ High temperature quench

การทดสอบ High temperature quench เป็นการทดสอบความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ความแข็งแรงในที่นี้หมายถึงการทนต่อการร่อนจากการเผาเชื้อเพลิงจำลองที่อุณหภูมิสูงแล้วปล่อยลงน้ำที่อุณหภูมิต่ำทันที ผลการทดลองที่ได้คือ น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะเพิ่มขึ้นในการทดลองครั้งที่ 1 และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อทดสอบเพิ่ม 3 ครั้ง สาเหตุที่น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเพิ่มขึ้นหลังจากที่ปล่อยลงน้ำครั้งแรก เนื่องจากขณะทำการทดลองเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเกิดออกไซด์จากสองส่วนคือเกิดขณะเผาที่อุณหภูมิสูงและขณะที่ปล่อยลงน้ำ ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากออกไซด์ที่เกิดขึ้น แต่เมื่อทดสอบครั้งต่อไปการเกิดออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะเผาก็ยังมี แต่ออกไซด์ที่อยู่ชั้นด้านนอกแตกและหลุดออกมา ทำให้น้ำหนักรวมของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองลดลงเนื่องมาจากการแตกออกของผิวของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีมากกว่าการเกิดออกไซด์ และเมื่อทำการทดลองต่อเนื่องการแตกของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองก็เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองลดลง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสรุปได้ว่าเม็ดเชื้อเพลิงจำลองค่อนข้างมีความแข็งแรง เนื่องจากเมื่อปล่อยลงน้ำครั้งแรกเม็ดเชื้อเพลิงจำลองไม่แตก ถึงแม้ว่าน้ำหนักจะเพิ่มเนื่องจากเกิดออกไซด์แต่ไม่เป็นอันตราย เพราะการที่จะเป็นอันตรายคือมีการแตกของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีกับระบบ และผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองกับเชื้อเพลิงแบบออกไซด์ [23]

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำการทดลองเกี่ยวกับการเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีข้อจำกัด และเงื่อนไขในการทำการทดลองหลายประการ เพื่อให้การทดลองมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงขอเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

### 5.2.1 การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

ในการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีส่วนผสมระหว่างซีเรียมกับเซอร์โคเนียมมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถผสมซีเรียมได้มากเนื่องจากขนาดของผงซีเรียมและเซอร์โคเนียมค่อนข้างแตกต่างกัน คือขนาดของผงเซอร์โคเนียมมีขนาดใหญ่กว่าผงซีเรียม ทำให้เมื่อทำการผสมผงซีเรียมในอัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 0.03 โดยโมล ทำให้เม็ดที่อัดได้เกิดการคลายตัวเมื่ออัดแล้วทิ้งไว้ไม่นาน ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้งานต่อได้ ดังนั้นในการทำการทดลองต่อไปควรให้ขนาดอนุภาคของส่วนผสมทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อให้สามารถผสมผงซีเรียมได้ในปริมาณที่สูงขึ้น

### 5.2.2 การเผาसानเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

ขณะที่ทำการเผาसानเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อให้ผงยึดติดเนื้อเดียวกันนั้น ต้องทำการเผาसानในสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนน้อย หรือต้องเผาसानในสภาวะที่มีก๊าซเฉื่อย (flow inert gas) ในที่นี้ทำการเผาसानในก๊าซอาร์กอน เพราะถ้าเผาसानในสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนจะทำให้เม็ดเกิดออกไซด์ ส่งผลให้เม็ดเกิดการแตกและกลายเป็นผงสีขาว โดยมีลักษณะร่วนซุย และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่มีจุดหลอมเหลวที่มากที่สุดไม่มากนัก แต่ถ้าเตาอบที่ใช้มีค่าอุณหภูมิที่ตั้งได้จำกัดหรือมีค่าน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะค่อนข้างมาก ก็สามารถทำการเพิ่มเวลาในการเผาसानให้มากขึ้นแทนได้

### 5.2.3 การทำการแพร่ไฮโดรเจน

ในการทำการระบวนการแพร่ไฮโดรเจนต้องให้แน่ใจว่า ภายใน chamber มีความดันสูงกว่าภายนอก แล้วจึงค่อยเปิดวาล์วเพื่อให้เกิดการไหลของก๊าซจากข้างในออกมา เพราะถ้าความดันภายในน้อยกว่าภายนอกขณะที่ทำการเปิดวาล์วจะทำให้อากาศภายนอกถูกดูดเข้าไปใน chamber ส่งผลให้มีปริมาณออกซิเจนอยู่ใน chamber สูง และทำให้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองเกิดออกไซด์เคลือบผิวด้านนอก ทำให้ไฮโดรเจนไม่สามารถแพร่เข้าสู่เม็ดเชื้อเพลิงจำลองได้

### 5.2.4 การหาเลขอะตอมเฉลี่ย

ในการทำการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยด้วยวิธีวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ขนาดและรูปร่างของเม็ดเชื้อเพลิงจำเป็นต้องเหมือนกันทุกประการ เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีขนาดเล็ก ทำให้การเลือกจุดหรือบริเวณที่ให้รังสีเบตาตกกระทบบนนั้นทำได้ยาก และในการตั้งระบบการวัดต้องให้ค่านับวัดที่ได้จากระบบขณะที่ยังไม่มีตัวอย่างน้อยกว่าร้อยละ 2-5 เมื่อทำการวัดตะกั่ว จึงจะสามารถใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นมาทำการทดสอบต่อได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าค่านับวัดที่ได้นั้นมาจากตัวอย่างไม่ใช่มาจากระบบ

ในการวิเคราะห์หาค่า  $G$  นั้น วัตถุที่จะสามารถวิเคราะห์ได้ต้องมีความหนาเกินจุดอิ่มตัวเท่านั้น เมื่อพิจารณาจาก  $E_m = 1.84R + 0.212$  โดยที่  $E_m$  คือพลังงานสูงสุดของรังสีเบตาที่ตกกระทบบัวัตถุ และ  $R$  คือระยะทางสูงสุดที่รังสีเบตาเคลื่อนที่ได้ มีหน่วยเป็น  $g/cm^2$  เนื่องจากรังสีเบตาเคลื่อนที่ไปและกลับ ดังนั้นจุดอิ่มตัวจะมีค่า  $R/2$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

- [1] Kazuhiro Y., Shinsuke Y., and Masahiro K. Mechanical properties of (U,Ce)O<sub>2</sub>. Journal of Alloys and Compounds 271-273(1998) 697-701.
- [2, 3] สุพัฒน์ ราชณรงค์. ฟิสิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426\(50\)/PH426-5.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426(50)/PH426-5.pdf) [2554, มกราคม 12]
- [4] สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.oaep.go.th/images/news/20100512141431.pdf> [2553, ธันวาคม 10]
- [5, 6] กนกรัตน์ ตียพันธ์. ความปลอดภัยของแท่งเชื้อเพลิงแบบ UZrH และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5103/nkc5103z.html> [2553, พฤศจิกายน 5]
- [7, 11, 12, 13] ทนงค์ดี ทวีศรี. ศาสตร์ของโลหะผง. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://course.eau.ac.th/course/Download/0152601/2%20sintering.pdf> [2554, มกราคม 17]
- [8, 9, 10] Olander D.R., Greenspan E., Garkisch H.D., and Petrovic B. Uranium-zirconium hydride fuel properties. Nuclear Engineering and Design 239(2009) 1408-1424.
- [14] กัลยา เกษียณสินธุ์. วัสดุศาสตร์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://e-learning.snru.ac.th/els/Kalaya/Ch6%20Sinter%20production.html> [2554, มกราคม 17]
- [15] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ฟิสิกส์ 2. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.electron.rmutphysics.com/physics/charud/scibook/electronic-physics2/PDF/chap15.pdf> [2554, มกราคม 31]

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [16] Simnad M.T. The U-ZrH<sub>x</sub> Alloy: Its Properties and Use in TRIGA Fuel. Nuclear Engineering and Design 64(1981) 403-422.
- [17] Olander D.R., and Marowen Ng. Hydride fuel behavior in LWRs. Journal of Nuclear Materials 346(2005) 98-108.
- [18, 23] Zoltán H., Et al. Quenching of high temperature VVER fuel after long term oxidation in hydrogen rich steam. Annals of Nuclear Energy 37 (2010) 71–82.
- [19, 20] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ตารางธาตุ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ตารางธาตุ> [2554, มกราคม 31]
- [21] Mohandas K.S. and Fray D.J. Electrochemical Deoxidation of Solid Zirconium Dioxide in Molten Calcium Chloride. Metallurgical and Material Transactions B 40B(2009) 685-699.
- [22] Wang W.E., Olander D.R., and Am J. Thermodynamics of the Zr-H System. Ceram. Soc. 78 (1995)3323-3328.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การคำนวณหาค่าน้ำหนักซีเรียมเพื่อใช้ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

จากการทดลอง เนื่องจากขนาดของเครื่องอัดไฮดรอลิกเป็นตัวจำกัดขนาดแม่พิมพ์ และได้ออกแบบแม่พิมพ์ให้มีขนาดของเม็ดหลังการอัดแล้วได้เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และสูง 1 เซนติเมตร ดังนั้นขนาดของแม่พิมพ์ที่จะรองรับกับปริมาณของเซอร์โคเนียมและซีเรียมจึงมีจำกัด ซึ่งจำเป็นต้องผสมอัตราส่วนเซอร์โคเนียมกับซีเรียมให้พอดีกับการอัดให้ได้หนึ่งเม็ดพอดีกับการอัดแต่ละครั้ง โดยสามารถคำนวณปริมาณส่วนผสมได้ดังนี้

ใช้เซอร์โคเนียม 5 กรัม คิดเป็น  $5/91.224=0.05$  mol

ใช้ซีเรียมคิดเป็น 0.03 เท่าของเซอร์โคเนียมนั่นคือใช้ซีเรียม

$0.03 \times 0.05 = 1.5 \times 10^{-3}$  mol ซึ่งคิดเป็น  $1.5 \times 10^{-3} \times 140.116 = 0.23$  กรัม

ดังนั้นในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจำลองหนึ่งเม็ดมีส่วนผสมของเซอร์โคเนียม 5 กรัม และซีเรียม 0.23 กรัม รวมเป็น 5.23 กรัม

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของซีเรียมและเซอร์โคเนียมตามอัตราส่วนที่กำหนด

อัตราส่วน	น้ำหนัก (g)
ผงโลหะซีเรียม (Ce) : ผงโลหะเซอร์โคเนียม (Zr)	ผงโลหะซีเรียม (Ce) : ผงโลหะเซอร์โคเนียม (Zr)
0.01 : 1	0.08 : 5
0.02 : 1	0.15 : 5
0.03 : 1	0.23 : 5
0.04 : 1	0.31 : 5



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาค่าน้ำหนักเซอร์โคเนียมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากเครื่อง TGA

พิจารณาการคำนวณค่าอัตราส่วน H/Zr ด้วยการคำนวณจากเครื่อง TGA ดังนี้

จาก

$$W_f = \left(\frac{W_i}{A_{Zr}}\right) \times R \times A_H + W_i \quad (ข.1)$$

และ

$$mV_f = (W_f - W_i) \times 1000 \times 0.1 + mV_i \quad (ข.2)$$

จาก ข.1 จะได้

$$R = \frac{(W_f - W_i) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H} \quad (ข.3)$$

จาก ข.2 จะได้

$$W_f = \frac{(mV_f - mV_i)}{1000 \times 0.1} + W_i \quad (ข.4)$$

แทน ข.4 ใน ข.3

$$R = \frac{\left(\left(\frac{mV_f - mV_i}{1000} + W_i\right) - W_i\right) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H}$$

$$R = \frac{\left(\frac{(mV_f - mV_i) + 100W_i}{1000} - W_i\right) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H}$$

$$R = \frac{(mV_f - mV_i + 100W_i - 100W_i) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H \times 100}$$

ดังนั้น

$$R = \frac{(mV_f - mV_i) \times A_{Zr}}{W_i \times A_H \times 100} \quad (1.5)$$

พิจารณาน้ำหนักก่อนทำการแพร่ไฮโดรเจน

$$weight = mol_{Zr} \times A_{Zr} + 0.03 \times mol_{Zr} \times A_{Ce} \quad (1.6)$$

แทนค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 คือ 4.55 กรัม ในสมการ ข.6 จะ

ได้

$$4.55 = mol_{Zr} \times 91.224 + 0.03 \times mol_{Zr} \times 140.116$$

$$mol_{Zr} = 0.048$$

ดังนั้นเซอร์โคเนียม 0.048 โมล คิดเป็น  $0.048 \times 91.224 = 4.38$  กรัม

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ ข.5 เมื่อพิจารณาเม็ดที่ 1 คือ  $mV_f = 3.15$ ,  $mV_i = 1.41$ ,  $A_{Zr} = 91.224$ ,  $W_i = 4.38$ ,  $A_H = 1.0079$

ดังนั้นจะได้

$$R = \frac{(3.15 - 1.41) \times 91.224}{4.38 \times 1.0079 \times 100}$$

$$R = 0.36 \approx 0.4$$



ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น 0.4

แทนค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 2 คือ 4.51 กรัม ในสมการ ข.6 จะได้

$$4.51 = mol_{Zr} \times 91.224 + 0.03 \times mol_{Zr} \times 140.116$$

$$mol_{Zr} = 0.047$$

ดังนั้นเซอร์โคเนียม 0.047 โมล คิดเป็น  $0.047 \times 91.224 = 4.29$  กรัม

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ ข.5 เมื่อพิจารณาเม็ดที่ 2 คือคือ  $mV_i = 2.75$ ,  $mV_i = 1.53$ ,  $A_{Zr} = 91.224$ ,  $W_i = 4.29$ ,  $A_H = 1.0079$

ดังนั้นจะได้

$$R = \frac{(2.75 - 1.53) \times 91.224}{4.29 \times 1.0079 \times 100}$$

$$R = 0.26 \approx 0.3$$

ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 2 มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น 0.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาสัดส่วนของไฮโดรเจนที่อยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

การพิจารณาหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ จำเป็นต้องทราบค่า beta backscatter saturation factor หรือค่า G เพื่อจะนำค่า G ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมต่อไป พิจารณาค่า G ดังสมการ

$$\frac{G_{CeZr}}{Count_{CeZr}} = \frac{G_{CeZrHI}}{Count_{CeZrHI}} \quad (ค.1)$$

$$G = 1 - e^{-Z_{eff}/40} \quad (ค.2)$$

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \left(\frac{WZ^2}{A}\right)_i}{\sum_i \left(\frac{WZ}{A}\right)_i} = \frac{\sum_i \left(\frac{mol \times A \times Z^2}{A}\right)_i}{\sum_i \left(\frac{mol \times A \times Z}{A}\right)_i} = \frac{\sum_i (mol \times Z^2)_i}{\sum_i (mol \times Z)_i} \quad (ค.3)$$

### พิจารณาค่าที่ได้จากการผิวด้านข้าง

พิจารณาตัวที่เป็นตัวมาตรฐานคือของ CeZr มีค่านับวัดรังสีเป็น 34076 และมีส่วนประกอบคือซีเรียมและเซอร์โคเนียม เมื่อพิจารณา โดยเม็ด CeZr มีน้ำหนัก 4.72 กรัม เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (ข.6) จะได้ค่า  $mol_{Zr} = 0.05$  และ  $mol_{Ce} = 1.5 \times 10^{-3}$  และแทนค่าที่ได้ในสมการ ค.3 จะได้ค่าเลขอะตอมเฉลี่ยเป็น 40.75 และนำค่าเลขอะตอมเฉลี่ยแทนในสมการที่ ค.2 จะได้ค่า G เป็น 0.639 ดังนั้นนำค่า G ที่เป็นของตัวมาตรฐานมาใช้ในการหาค่า G ของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดอื่น

พิจารณาหาค่า  $G$  ของ CeZrH เม็ดที่ 1 ที่มีค่านับวัดรังสีเป็น 33276

$$\frac{0.639}{34076} = \frac{G_{\text{CeZrHI}}}{33276}$$

$$G_{\text{CeZrHI}} = 0.624$$

ดังนั้น CeZrH เม็ดที่ 1 มีค่า  $G$  เป็น 0.624

พิจารณาหาค่า  $G$  ของ CeZrH เม็ดที่ 2 ที่มีค่านับวัดรังสีเป็น 33491

$$\frac{0.639}{34076} = \frac{G_{\text{CeZrHII}}}{33491}$$

$$G_{\text{CeZrHII}} = 0.628$$

ดังนั้น CeZrH เม็ดที่ 2 มีค่า  $G$  เป็น 0.628

พิจารณาหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย  $Z_{\text{eff}}$  ของ CeZrH เม็ดที่ 1 จาก

$$0.624 = 1 - e^{-Z_{\text{eff}}/40}$$

$$Z_{\text{effI}} = 39.13$$

พิจารณาหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย  $Z_{\text{eff}}$  ของ CeZrH เม็ดที่ 2 จาก

$$0.628 = 1 - e^{-Z_{\text{eff}}/40}$$

$$Z_{\text{effII}} = 39.55$$

ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองซีเรียมเซอร์โคเนียมที่นำมาวิเคราะห์จะมีส่วนประกอบเซอร์โคเนียมต่อซีเรียมต่อไฮโดรเจนเป็น 1:0.03:n โดยโมล ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์จากสูตรหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และแทนค่าในสมการที่ ค.3 จะได้ตั้งสมการข้างล่างโดยกำหนดค่าโมลของเซอร์โคเนียมเป็น  $mol_{Zr}$

$$Z_{eff} = \frac{(mol_{Zr} \times Z_{Zr}^2) + (0.03 \times mol_{Zr} \times Z_{Ce}^2) + (n \times mol_{Zr} \times Z_H^2)}{(mol_{Zr} \times Z_{Zr}) + (0.03 \times mol_{Zr} \times Z_{Ce}) + (n \times mol_{Zr} \times Z_H)}$$

$$Z_{eff} = \frac{(Z_{Zr}^2 + (0.03 \times Z_{Ce}^2))mol_{Zr} + (n \times mol_{Zr} \times Z_H^2)}{(Z_{Zr} + (0.03 \times Z_{Ce}))mol_{Zr} + (n \times mol_{Zr} \times Z_H)}$$

$$\begin{aligned} Z_{eff}((Z_{Zr} + (0.03 \times Z_{Ce}))mol_{Zr} + (n \times mol_{Zr} \times Z_H)) \\ = (Z_{Zr}^2 + (0.03 \times Z_{Ce}^2))mol_{Zr} + (n \times mol_{Zr} \times Z_H^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}mol_{Zr} + nZ_HZ_{eff}mol_{Zr} \\ = (Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2))mol_{Zr} + nZ_H^2mol_{Zr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} nZ_HZ_{eff}mol_{Zr} - nZ_H^2mol_{Zr} \\ = (Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2))mol_{Zr} - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}mol_{Zr} \end{aligned}$$

$$n(Z_HZ_{eff} - Z_H^2)mol_{Zr} = [(Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2)) - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}]mol_{Zr}$$

$$n = \frac{[(Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2)) - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}]mol_{Zr}}{(Z_HZ_{eff} - Z_H^2)mol_{Zr}}$$

$$n = \frac{(Z_{Zr}^2 + (0.03Z_{Ce}^2)) - (Z_{Zr} + (0.03Z_{Ce}))Z_{eff}}{Z_HZ_{eff} - Z_H^2}$$

แทนค่า  $Z_{Zr} = 40$ ,  $Z_{Ce} = 58$  และ  $Z_H = 1$  จะได้

$$n = \frac{(40^2 + (0.03 \times 58^2)) - (40 + (0.03 \times 58))Z_{eff}}{Z_{eff} - 1}$$

$$n = \frac{1700.92 - 41.74 \times Z_{eff}}{Z_{eff} - 1} \quad (ค.4)$$

พิจารณาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ของ CeZrH เม็ดที่ 1 โดย  
แทนค่า  $Z_{eff} = 39.13$  ในสมการที่ ค.4 จะได้

$$n = \frac{1700.92 - 41.74 \times 39.13}{39.13 - 1}$$

$$n = 1.8$$

ดังนั้นอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของ CeZrH เม็ดที่ 1 เป็น 1.8

พิจารณาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ของ CeZrH เม็ดที่ 2 โดย  
แทนค่า  $Z_{eff} = 39.55$  ในสมการที่ ค.4 จะได้

$$n = \frac{1700.92 - 41.74 \times 39.55}{39.55 - 1}$$

$$n = 1.3$$

ดังนั้นอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของ CeZrH เม็ดที่ 2 เป็น 1.3

### พิจารณาค่าที่ได้จากการผิวดัดขวาง

ค่าเลขอะตอมเฉลี่ยของตัวที่เป็นมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้จากผิวด้านข้าง เพราะเป็นเม็ดเดียวกันคือมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยเป็น 40.75 และค่า G เป็น 0.639 โดยมีค่าจำนวนนับรังสีเป็น 12220 ดังนั้นนำค่า G ที่เป็นของตัวมาตรฐานมาใช้ในการหาค่า G ของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดอื่น

พิจารณาค่า G ของ CeZrH เม็ดที่ 1 ที่มีค่านับวัดรังสีเป็น 12096

$$\frac{0.639}{12220} = \frac{G_{CeZrHI}}{12096}$$

$$G_{CeZrHI} = 0.633$$

ดังนั้น CeZrH เม็ดที่ 1 มีค่า G เป็น 0.633

พิจารณาค่า G ของ CeZrH เม็ดที่ 2 ที่มีค่านับวัดรังสีเป็น 12169

$$\frac{0.639}{12220} = \frac{G_{CeZrHII}}{12169}$$

$$G_{CeZrHII} = 0.636$$

ดังนั้น CeZrH เม็ดที่ 2 มีค่า G เป็น 0.636

พิจารณาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย  $Z_{eff}$  ของ CeZrH เม็ดที่ 1 จาก

$$0.633 = 1 - e^{-Z_{eff}/40}$$

$$Z_{effI} = 40.09$$

พิจารณาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย  $Z_{\text{eff}}$  ของ CeZrH เม็ดที่ 2 จาก

$$0.636 = 1 - e^{-Z_{\text{eff}}/40}$$

$$Z_{\text{effII}} = 40.42$$

พิจารณาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ของ CeZrH เม็ดที่ 1 โดย  
แทนค่า  $Z_{\text{eff}} = 40.09$  ในสมการที่ ค.4 จะได้

$$n = \frac{1700.92 - 41.74 \times 40.09}{40.09 - 1}$$

$$n = 0.7$$

ดังนั้นอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของ CeZrH เม็ดที่ 1 เป็น 0.7

พิจารณาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ของ CeZrH เม็ดที่ 2 โดย  
แทนค่า  $Z_{\text{eff}} = 40.42$  ในสมการที่ ค.4 จะได้

$$n = \frac{1700.92 - 41.74 \times 40.42}{40.42 - 1}$$

$$n = 0.4$$

ดังนั้นอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของ CeZrH เม็ดที่ 2 เป็น 0.4





ภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ความสัมพันธ์ตามสมการแวง-โอลันเดอร์ (Wang-Olander equation)

แวง-โอลันเดอร์ ได้ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อัตราการแพร่ของไฮโดรเจนจากผิวนอกสู่ตรงกลางของชิ้นงาน และอุณหภูมิดังนี้

$$\ln p = 2 \ln \left( \frac{C}{2-C} \right) + 8.01 + 5.21 \times C - \frac{2.0 \times 10^4}{T} \quad (\text{ง.1})$$

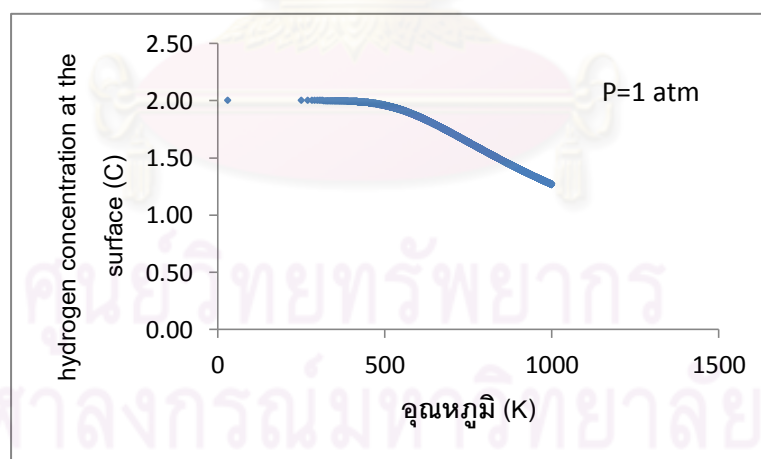
โดยที่

C คือ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมของเชื้อเพลิง (H/Zr ratio)

P คือ ความดันของไฮโดรเจน (atm)

T คือ อุณหภูมิ (K)

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังสมการที่ ง.1 มาทำเป็นกราฟเพื่อให้ชัดเจนมากขึ้นแสดงดังภาพ



ภาพที่ ง.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการของแวง-โอลันเดอร์



ภาคผนวก จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การคำนวณหาค่าระยะอิมิตัวของรังสีเบตา

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีรังสีเบตาทั้ง 2 ประเภทคือ การส่งผ่าน และการกระเจิงกลับ จำเป็นต้องตระหนักถึงระยะอิมิตัว เนื่องจากรังสีเบตาที่เคลื่อนที่เข้าไปกระทบวัสดุ ถ้ารังสีมีพลังงานน้อยก็จะมีพิสัยในการเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุน้อยกว่ารังสีเบตาที่มีพลังงานสูงกว่า ดังนั้นเพื่อให้เกิดการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพรูป ต้องคำนึงถึงค่าระยะอิมิตัวก่อนที่จะทำการทดลองทุกครั้ง โดยระยะอิมิตัวหาได้จาก

$$E_m = 1.84R + 0.212 \quad (จ.1)$$

ซึ่งรังสีเบตาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีต้นกำเนิดเป็น  $Sr^{90}-Y^{90}$  โดยมีพลังงานสูงสุด 2.28 MeV เมื่อแทนค่าในสมการที่ จ.1 จะได้ค่าระยะอิมิตัวเป็น

$$2.28 = 1.84R + 0.212$$

$$R = 1.12 \text{ g/cm}^2$$

เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH ทั้ง 2 เม็ดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันคือ ประมาณ  $5.50 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นค่าระยะอิมิตัวหาได้จาก

$$\frac{R}{D} = \frac{1.12 \text{ g/cm}^2}{5.50 \text{ g/cm}^3} = 0.20 \text{ cm}$$

นั่นคือรังสีเบตาจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางสูงสุดเพียง 2.0 มิลลิเมตร แต่การทดลองแบบรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับเป็นการเคลื่อนที่ไปและกลับของรังสีเบตา ดังนั้นความลึกของเม็ดเชื้อเพลิงที่รังสีเบตาเคลื่อนที่เข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงได้คือครึ่งหนึ่งของระยะอิมิตัวคือ 1.0 มิลลิเมตร

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุภา ศิรินาม เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (ฟิสิกส์) จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549 และเข้าทำงานในตำแหน่ง Project Staff ที่บริษัทแอลฟาโปรเซสซิ่ง เป็นระยะเวลา 1 ปี แล้วเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย