

การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้า สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา ที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์

Fabrication of Advanced Surrogate Light Water Reactor Fuel Pellets Composed of Metallic Cerium Powder and Zirconium Hydride

สุภา ศิรินาม¹ และ พศ.ดร.อุลลยพงศ์ วงศ์แสง²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบใหม่สำหรับใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา โดยประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ โดยทำการผลิตและวิเคราะห์หาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio) โดยวิธีที่ใช้ 2 วิธีคือการคำนวณจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ผลที่ได้คือเม็ดเชื้อเพลิงที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนให้ค่า H/Zr ratio ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับให้ค่า H/Zr ratio สูงกว่าค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA เนื่องจากการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับเป็นค่าเฉลี่ยที่ผิว ส่วนค่าที่ได้จากเครื่อง TGA เป็นค่าเฉลี่ยทั้งเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

คำสำคัญ: เม็ดเชื้อเพลิงจำลอง, อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม, การทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

Abstract

This paper 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. The hydrogen-to-zirconium ratio (H/Zr ratio) was determined using two methods. 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

¹ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม.10330

E-mail: siri.supha@gmail.com

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: Doonyapong.W@chula.ac.th

because results from reflective beta backscatter represented the surface average, while the value from TGA calculation represented the average of the whole pellet.

Keyword: surrogate fuel pellets, hydrogen-to-zirconium ratio, reflective beta back scatter

ความนำ

เชื้อเพลิงจัดเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยเชื้อเพลิงที่เป็นที่รู้จักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์นั้น จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ ($UZrH$) เนื่องจากเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแต่ละชนิดนั้นมีองค์ประกอบที่ต่างกัน ทำให้มีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู วิจัยแล้วพบว่าข้อดีหลายอย่างคือ โมเลกุลของไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอน (neutron moderator) จะแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมที่อยู่ในเชื้อเพลิง ส่งผลให้ปริมาณของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนที่จะใช้ในถึงปฏิกรณ์มีน้อยลง จึงทำให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กลงด้วย ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนอยู่ด้านนอกเชื้อเพลิง และที่สำคัญเชื้อเพลิงแบบนี้จะมีสัมประสิทธิ์การเกิดฟิชชันลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือเป็นเชื้อเพลิงแบบ negative temperature coefficient of reactivity ทำให้เชื้อเพลิงแบบนี้มีความปลอดภัย แต่เนื่องจากความไม่สะดวกหลายประการในการขออนุญาตใช้ยูเรเนียมในงานวิจัย จึงได้ใช้ซีเรียมแทนยูเรเนียม และได้มีการใช้ซีเรียมอย่างแพร่หลายในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม

ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเม็ดเชื้อเพลิง และเพื่อการพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ TGA ที่อุณหภูมิสูงและหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่เตรียมได้

ระเบียบวิธีการวิจัย

1. การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

นำผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมผสมเข้าด้วยกัน โดยมีตัวผสมคือแอลกอฮอล์แข็ง นำส่วนผสมทั้งสามคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยมีอัตราส่วนของซีเรียมต่อเซอร์โคเนียมเป็น 0.03:1 โดยโมล ซึ่งเชื้อเพลิงหนึ่งเม็ดประกอบด้วยผงโลหะเซอร์โคเนียม 5 กรัม และผงโลหะซีเรียม 0.23 กรัม และอัดที่ความดันประมาณ 3,200 -3,400 psi และนำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่อัดได้ไปทำการสตุ (Sintering) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและทำให้ผงโลหะทั้งสองหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

2. การทำเชื้อเพลิงไฮไดรด์จำลอง (กระบวนการแพร่ไฮโดรเจน)

นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ทำการสตุเรียบร้อยแล้วไปทำกระบวนการแพร่ไฮโดรเจนโดยใช้เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer หรือ TGA โดยมีขั้นตอนดังนี้

แขวนเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่อง TGA ที่อยู่ภายในห้อง (chamber) ปิดช่องให้สนิทและดูดอากาศออกให้อยู่ในสถานะสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-2} torr พร้อมกับใส่เตาเผา (furnace) ครอบ chamber โดยให้ช่องอยู่ตรงกลางของเครื่องเผา เปิดก๊าซอาร์กอนเข้าภายในช่องเพื่อขัดก๊าซออกซิเจน

ที่ยังหลงเหลืออยู่ออกจาก chamber และเปิดให้เตาเผาเริ่มทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 750 °C และเมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วเปิดก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber และปรับค่าการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไฮโดรเจนเป็น 20:40 โดยก๊าซที่ปล่อยเข้าไปใน chamber ผ่านตัวกรองออกซิเจนและไอน้ำ (Oxy clear filter) เริ่มบันทึกค่าตั้งแต่เริ่มปล่อยไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber เมื่อค่าที่บันทึกได้โดยเครื่อง TGA เริ่มคงที่ ให้ทำการลดอุณหภูมิทุก ๆ 25 °C ค่าที่บันทึกได้จะเริ่มเพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่อีกครั้ง ให้ทำซ้ำจนลดอุณหภูมิลงมาถึงประมาณ 500 °C ก็ทำการปิดเครื่องเผา ปิดการส่งก๊าซเข้า chamber ปิดการบันทึกค่า และรีบนํเตาเผาออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำการเปรียบเทียบ 2 เม็ด โดยมีค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่ต่างกัน

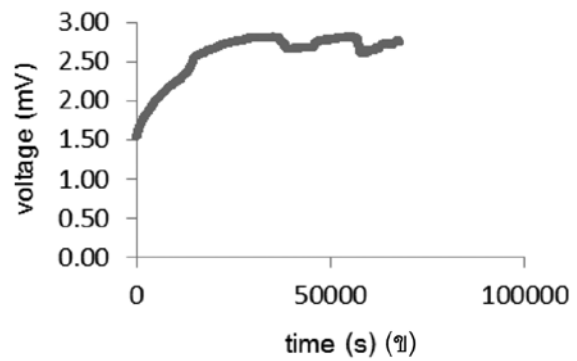
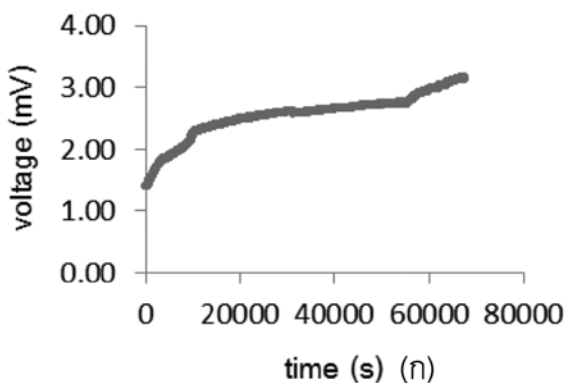
3. การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio)

การวิเคราะห์หาค่า H/Zr ratio จะวิเคราะห์จาก 2 ส่วน คือจากการคำนวณค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และจากค่านับวัดของรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับที่ได้จากการทดลอง

ผลการวิจัย

1. ผลการแพร่ไฮโดรเจนที่ได้จากเครื่อง TGA

ผลการทดลองที่ได้เป็นการบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเป็นการบันทึกจากตัวรับสัญญาณที่เชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีการเก็บข้อมูลเป็นคู่อันดับ แล้วนำมาแปลผลเป็นกราฟ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการทำการแพร่ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH (g) เม็ดที่ 1 (ข) เม็ดที่ 2

ลักษณะของกราฟดังแสดงในภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่าอัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาประมาณหนึ่งในสี่ของการเก็บข้อมูล แต่หลังจากนั้นอัตราจะไม่ค่อยคงที่ และมีบางช่วงที่กราฟลดต่ำลง ซึ่งหมายถึงมีการแพร่ออกของไฮโดรเจน

2. การวิเคราะห์หาค่า H/Zr ratio

การคำนวณค่า H/Zr ratio จะทำการคำนวณ 2 วิธี คือ การคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากเครื่อง TGA และการคำนวณจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

2.1 การคำนวณหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากผลที่ได้จากเครื่อง TGA

ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมของเซอร์โคเนียม แต่เม็ดเชื้อเพลิงจำลองไม่ได้มีเฉพาะเซอร์โคเนียมเพียงตัวเดียว ดังนั้นน้ำหนักที่ชั่งได้จึงไม่ใช่ น้ำหนักที่จะใช้คิดหา H/Zr ratio ซึ่งน้ำหนักที่จะใช้ในการคำนวณต้องเป็นน้ำหนักเฉพาะเซอร์โคเนียมเท่านั้น ดังนั้นต้องนำน้ำหนักที่เป็นของซีเรียมออกซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$weight = mol_{Zr} \times A_{Zr} + 0.03 \times mol_{Zr} \times A_{Ce}$$

โดยที่ในหนึ่งเม็ดเชื้อเพลิงจำลองมีปริมาณซีเรียมต่อเซอร์โคเนียมเป็น 0.03:1 โดยโมล นั่นคือสามารถหาปริมาณน้ำหนักของเซอร์โคเนียมที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

$$W_{Zr} = \left(\frac{A_{Zr} + 0.03 \times A_{Ce}}{\text{weight}} \right) \times A_{Zr}$$

การหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมสามารถหาได้จาก

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

$$mV_f = (W_{Zr} - W_{Zr_i}) \times 1000 \times 0.1 + mV_i$$

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

ตารางที่ 1

ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน และค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณ

	weight (กรัม)	mV _i (มิลลิโวลต์)	mV _f (มิลลิโวลต์)	W _{Zr} (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

2.2 การคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

การวิเคราะห์ค่า H/Zr ratio โดยการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ เป็นการใช้หลักการของการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไป คือเดิมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะมีส่วนประกอบแค่ 2 ส่วนคือเซอร์โคเนียมและซีเรียมซึ่งจะมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยค่าหนึ่ง แต่เมื่อทำการแพร่ไฮโดรเจน ทำให้มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้ามาทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าเลขอะตอมที่เปลี่ยนไป โดยสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปจากเดิมนั้น เป็นผลเนื่องจากมีไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเป็นปริมาณเท่าใด และสามารถคำนวณหาอัตราส่วน H/Zr ratio ได้ โดยค่าเลขอะตอมเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$Z_{eff} = \frac{\sum i \left(\frac{WZ^2}{A} \right) i}{\sum i \left(\frac{WZ}{A} \right) i}$$

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่า Beta backscatter saturation factor หรือค่า G คือ ค่าที่เปรียบเทียบความเข้มของรังสีเบตาที่กระเจิง (scatter) จากตัวอย่างที่มีค่าเลขอะตอมต่างกัน โดยค่า G ที่ได้จะสามารถนำมาหาเลขอะตอมเฉลี่ยได้ ซึ่งค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และค่านับวัดมีความสัมพันธ์ดังสมการ

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

$$\frac{G_i}{count_i} = \frac{G_{||}}{count_{||}}$$

ค่า G ที่ได้จากตัวที่เป็นตัวมาตรฐาน (standard sample) จะเป็นตัวที่ใช้หาค่า G ของตัวที่ไม่ทราบค่า โดยการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลองของตัวมาตรฐานกับอัตราส่วนค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลองของตัวที่ไม่ทราบค่า โดยค่านับวัดจะมีผลแปรตามค่า G และสามารถนำค่า G มาคำนวณเพื่อหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย (Z_{eff}) และหาปริมาณของไฮโดรเจนที่แพร่อยู่ในได้ ซึ่งจะสามารถคำนวณหา H/Zr ratio ได้ เมื่อพิจารณาในการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยดังสมการ

$$Z_{eff} = \frac{\sum i \left(\frac{WZ^2}{A} \right) i}{\sum i \left(\frac{WZ}{A} \right) i} = \frac{\sum i \left(\frac{mol \times A \times Z^2}{A} \right) i}{\sum i \left(\frac{mol \times A \times Z}{A} \right) i} = \frac{\sum i (mol \times Z^2) i}{\sum i (mol \times Z) i}$$

เมื่อพิจารณาในส่วนขององค์ประกอบแต่ละส่วน และเพื่อให้สามารถแก้สมการได้จะกำหนดตัวแปรคือ จำนวนโมลที่ใช้ของเซอร์โคเนียมเป็น mol_{Zr} จำนวนโมลที่ใช้ของซีเรียมเป็น $0.03 \times mol_{Zr}$ และจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ได้จากการทำการแพร่ไฮโดรเจนเป็น $n \times mol_{Zr}$ โดยที่ค่า n คือจำนวนเท่าของ mol_{Zr} ซึ่งก็คือค่า H/Zr ratio ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

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

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

ดังนั้นสามารถสรุปค่าต่างๆ ที่คำนวณได้
ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจน
ต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้

	ค่านับวัดเฉลี่ย	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

การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม
ที่คำนวณได้ทั้ง 2 วิธีคือวิเคราะห์จากข้อมูลที่บันทึก
โดยเครื่อง TGA และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการ
ทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ผลที่ได้คือ
เม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีค่าเป็น 0.4 ($Ce_{0.03}ZrH_{0.4}$)
และ 1.8 ($Ce_{0.03}ZrH_{1.8}$) ตามลำดับ และเม็ดเชื้อเพลิง
จำลองเม็ดที่ 2 มีค่าเป็น 0.3 ($Ce_{0.03}ZrH_{0.3}$) และ 1.3
($Ce_{0.03}ZrH_{1.3}$) ตามลำดับ จากผลที่ได้จากการทดลอง
สามารถสรุปได้ 2 ประเด็นคือ แนวโน้มของปริมาณ
ไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ภายในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเป็นไป

ในทิศทางเดียวกัน คือเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1
มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 และค่าที่ได้จาก
ทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะอธิบายได้คือ เนื่องจาก
ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน ส่งผล
ให้มีปริมาณไฮโดรเจนตรงบริเวณที่ใกล้ผิวนอกมากกว่า
ตรงบริเวณที่อยู่ตรงกลางของเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งบริเวณ
ดังกล่าวเป็นส่วนที่ไฮโดรเจนมีโอกาสที่จะแพร่เข้าได้
น้อยกว่าตรงบริเวณใกล้ผิว และจากการคำนวณจาก
ข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA นั้น เป็นการบันทึก
ค่าทอร์คที่เปลี่ยนไป ซึ่งแปรผันตามน้ำหนักของตัวอย่าง
ที่ห้อย โดยน้ำหนักที่วัดได้เป็นน้ำหนักรวมของตัวอย่าง
ทำให้เมื่อนำมาคำนวณจะได้ค่า H/Zr ratio โดยเฉลี่ย
ของทั้งเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้
จากเทคนิคการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับซึ่งวิธีนี้
เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง โดยหลักการทดสอบจะให้
รังสีเบตาตกกระทบที่ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง แล้ว
วัดรังสีเบตากระเจิงกลับเข้าหัววัด ดังนั้นรังสีที่กระเจิง
กลับมามากกระทบหัววัดเป็นรังสีที่เข้าไปไม่เกินระยะทาง
ครึ่งหนึ่งของระยะทางอิมิตตัวของพลังงานของรังสีเบตา
ที่ได้จากแหล่งกำเนิด $Sr^{90}-Y^{90}$ คือ 1.4 มิลลิเมตร ดังนั้น
โอกาสที่รังสีจะตกกระทบแล้วกระเจิงจากเม็ดเชื้อเพลิง
จำลองตรงบริเวณใกล้ผิว ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนมาก
ก็จะสูงกว่าจะตกกระทบแล้วกระเจิงจากบริเวณที่อยู่ลึก
เข้าไปจากผิว ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงเป็นค่า H/Zr
ratio ตรงบริเวณที่ลึกเข้าไปไม่เกินครึ่งหนึ่งของระยะ
อิมิตตัว ดังนั้นค่า H/Zr ratio ที่ได้จากการทดสอบด้วย
รังสีเบตาแบบกระเจิงกลับจึงมากกว่าผลการวิเคราะห์
ที่ได้จากเครื่อง TGA



เอกสารอ้างอิง

- Olander, D. et al. (2009). Uranium-zirconium hydried fuel properties. *Nuclear Engineering and Design* 239, 1408-1424.
- Donald, R, Olander and Marowen, Ng. (2005). Hydride fuel behavior in LWRs. *Journal of Nuclear Materials* 346, 98-108.
- Kakiuchi, K. et al. (2001). Thermal properties of hydride fuel 45% U-ZrH_{1.6}. *Journal of Nuclear Materials* 294, 28-31.
- Tsuchiya, B. et al. (2001). Thermophysical properties of zirconium hydride and uranium-zirconium hydride. *Journal of Nuclear Materials* 289, 329-333.
- นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2545. *วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.

