

การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วย
ผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์*

Fabrication of advanced surrogate light water reactor fuel pellets composed of
metallic cerium powder and zirconium hydride

สุภา ศิรินาม**

บทคัดย่อ

พลังงานนิวเคลียร์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในปัจจุบัน และได้มีงานวิจัยเพื่อพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มากขึ้นตามลำดับ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบใหม่สำหรับใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา โดยประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์และได้ทำการวิเคราะห์โดยหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio) ในการหาค่า H/Zr ratio สามารถทำการวิเคราะห์ได้ 2 วิธีคือการคำนวณจากค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ ผลที่ได้คือเม็ดเชื้อเพลิงที่ทำการแพร่ไฮโดรเจนให้ค่า H/Zr ratio ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับให้ค่า H/Zr ratio สูงกว่าค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับเป็นค่าเฉลี่ยที่ผิว ส่วนค่าที่ได้จากเครื่อง TGA เป็นค่าเฉลี่ยทั้งเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

Abstract

Nowadays, nuclear power has been used much more widely, together with increasing research activities on nuclear fuel development. This study presents a nuclear fuel development research in Thailand. The objective 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) of surrogate fuel pellets was determined. 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 the reflective beta backscatter determination was higher than that from the TGA

*

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิตศึกษา เรื่อง การเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ โดยได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**

นิสิตหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: siri.supha@gmail.com อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุยพงศ์ วงศ์แสง ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: Doonyapong.W@chula.ac.th

calculation. This was because results from the reflective betabackscatter represented the surface average, while the value from the TGA calculation represented the average of the whole pellet.

1. บทนำ

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานไฟฟ้านอกเหนือจากถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ พลังน้ำ พลังลม พลังแสงอาทิตย์ และอื่นๆ เมื่อศึกษาประเภทของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแล้ว สามารถแบ่งประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูออกได้เป็น 3 ประเภทคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์ (เครื่องปฏิกรณ์กำลัง) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อผลิตเชื้อเพลิง และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งทั้งสามประเภทมีการออกแบบเพื่อการใช้งานที่ต่างกัน [1,2]

เชื้อเพลิงจัดเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์คือจากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน โดยเชื้อเพลิงที่เป็นที่รู้จักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเชิงพาณิชย์นั้น จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ ($UZrH$) [3, 4] เนื่องจากเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแต่ละชนิดนั้นมีองค์ประกอบที่ต่างกัน ทำให้มีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแล้วพบว่าข้อดีหลายอย่าง[5]คือโมเลกุลของไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอน (neutron moderator) จะแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมที่อยู่ในเชื้อเพลิง ส่งผลให้ปริมาณของตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนที่จะใช้ในถึงปฏิกรณ์มีน้อยลง จึงทำให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กลงด้วย ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ตัวลดทอนพลังงานนิวตรอนอยู่ด้านนอกเชื้อเพลิง และที่สำคัญเชื้อเพลิงแบบนี้จะมีสัมประสิทธิ์การเกิดฟิชชันลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือเป็นเชื้อเพลิงแบบ negative temperature coefficient of reactivity ทำให้เชื้อเพลิงแบบนี้มีความปลอดภัยสูง แต่เนื่องจากความไม่สะดวกหลายประการในการขออนุญาตใช้ยูเรเนียมในงานวิจัย จึงได้ใช้ซีเรียมแทนยูเรเนียม และได้มีการใช้ซีเรียมอย่างแพร่หลายในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม [6]

ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงและเพื่อการพัฒนาด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อเตรียมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองแบบก้าวหน้าสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาที่ประกอบด้วยผงโลหะซีเรียมและเซอร์โคเนียมไฮไดรด์

2.2 เพื่อหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่อยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ทำการสังเคราะห์ในเครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer หรือเครื่อง TGA ที่อุณหภูมิสูง

2.3 วิเคราะห์หาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมด้วยวิธีการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

3. วิธีการวิจัย

3.1 การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง[7, 8]

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

3.2 การทำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจำลอง (กระบวนการแพร่ไฮโดรเจน)

นำเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ทำการสตุเรียบร้อยแล้ว ไปทำกระบวนการแพร่ไฮโดรเจนโดยใช้เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer หรือ TGA โดยมีขั้นตอนดังนี้

แขวนเม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่อง TGA ที่อยู่ในห้อง (chamber) ปิดห้องให้สนิทและดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-2} torr พร้อมกับใส่เตาเผา (furnace) ครอบ chamber โดยให้ช่องอยู่ตรงกลางของเครื่องเผาเปิดก๊าซอาร์กอนเข้าภายในห้องเพื่อขจัดก๊าซออกซิเจนที่ยังหลงเหลืออยู่ออกจาก chamber และเปิดให้เตาเผาเริ่มทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 750 °C และเมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วเปิดก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber และปรับค่าการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไฮโดรเจนเป็น 20:40 โดยก๊าซที่ปล่อยเข้าไปใน chamber ผ่านตัวกรองออกซิเจนและไอน้ำ (Oxy clear filter) เริ่มบันทึกค่าตั้งแต่เริ่มปล่อยไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber เมื่อค่าที่บันทึกได้โดยเครื่อง TGA เริ่มคงที่ ให้ทำการลดอุณหภูมิทุกๆ 25 °C ค่าที่บันทึกได้จะเริ่มเพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่อีกครั้ง ให้ทำซ้ำจนลดอุณหภูมิลงมาถึงประมาณ 500 °C ก็ทำการปิดเครื่องเผา ปิดการส่งก๊าซเข้า chamber ปิดการบันทึกค่า และรีบนำเตาเผาออกอย่างรวดเร็วซึ่งทำการเปรียบเทียบ 2 เม็ด โดยมีค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่ต่างกัน

3.3 การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม (H/Zr ratio)

การวิเคราะห์หาค่า H/Zr ratio จะวิเคราะห์จาก 2 ส่วน คือจากการคำนวณค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA และจากค่าน้ำหนักของรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับที่ได้จากการทดลอง



(ก)

(ข)

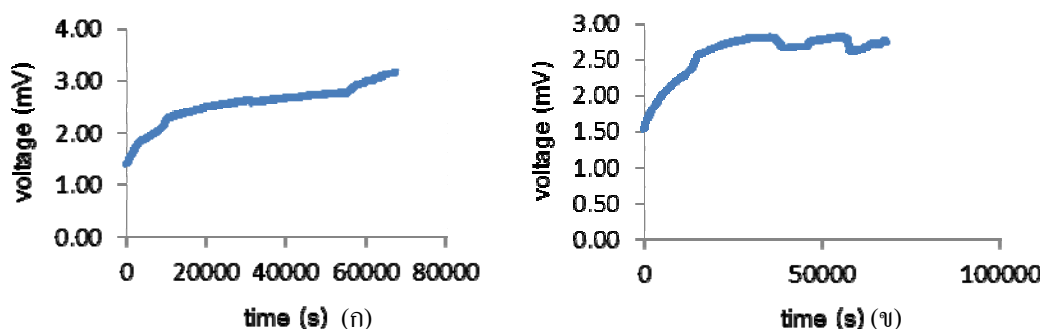
(ค)

ภาพที่ 1 เม็ดเชื้อเพลิงจำลองที่ได้จากการทดลอง (ก) เม็ดที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (ข) เม็ดที่ผ่านการเผาผลาญ และ (ค) เม็ดที่ผ่านการแพร่ไฮโดรเจน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการแพร่ไฮโดรเจนที่ได้จากเครื่อง TGA

ผลการทดลองที่ได้เป็นการบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเป็นการบันทึกจากตัวรับสัญญาณที่เชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีการเก็บข้อมูลเป็นคู่อันดับ แล้วนำมาแปลผลเป็นกราฟ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลาของการแพร่ไฮโดรเจนของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง CeZrH(x) เม็ดที่ 1 (ข) เม็ดที่ 2

ลักษณะของกราฟดังแสดงในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาประมาณหนึ่งในสี่ของการเก็บข้อมูล แต่หลังจากนั้นอัตราจะไม่ค่อยคงที่ และมีบางช่วงที่กราฟลดต่ำลง ซึ่งหมายถึงมีการแพร่ออกของไฮโดรเจน

4.2 การวิเคราะห์หาค่า H/Zr ratio

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

4.2.1 การคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากผลที่ได้จากเครื่อง TGA

การเก็บข้อมูลจากเครื่อง TGA จะเป็นการเก็บข้อมูลค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลา โดยค่าความต่างศักย์ที่บันทึกได้เป็นผลเนื่องมาจากค่าเทอร์คที่เปลี่ยนแปลง คือเมื่อมีไฮโดรเจนแพร่เข้าไปแทรกในเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีน้ำหนักมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเทอร์คและค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันถ้าไฮโดรเจนแพร่ออกจากเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะลดลง ส่งผลให้ค่าเทอร์คและค่าความต่างศักย์ลดลง

กำหนดค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม ดังนี้ [9]

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

น้ำหนักของเซอร์โคเนียมหลังจากออกจากเครื่อง TGA คือ W_f

ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นของเครื่อง TGA ก่อนทำการซึมไฮโดรเจนคือ mV_i

ค่าความต่างศักย์สุดท้ายของเครื่อง TGA หลังสิ้นสุดการซึมไฮโดรเจนคือ mV_f

ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมคือ R

ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง คือ $weight$

ปริมาณโมลของเซอร์โคเนียม คือ mol_{Zr}

ค่าอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์กับน้ำหนัก(mV/mg) ของเครื่อง TGA เป็น 0.1

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

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

การหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมสามารถหาได้จาก

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

$$mV_f = (W_{Zrf} - W_{Zri}) \times 1000 \times 0.1 + mV_i$$

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

ตารางที่ 1 ค่าน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำการแพร่ไฮโดรเจน และค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณ

	Weight (กรัม)	mV_i (มิลลิโวลต์)	mV_f (มิลลิโวลต์)	W_{Zri} (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

อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ของเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 และเม็ดที่ 2 โดยข้อมูลการบันทึกจากเครื่อง TGA เป็น 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 เพื่อให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือมากขึ้น ได้คำนวณหาอัตราส่วน

ไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมด้วยวิธีการคำนวณค่าเลขอะตอมเฉลี่ย โดยการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

4.2.2 การคำนวณหาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ

การวิเคราะห์ค่า H/Zr ratio โดยการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ เป็นการใช้หลักการของการหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไป คือเดิมเม็ดเชื้อเพลิงจำลองจะมีส่วนประกอบแค่ 2 ส่วนคือ เซอร์โคเนียมและซีเรียม ซึ่งจะมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยค่าหนึ่ง แต่เมื่อทำการแพร่ไฮโดรเจน ทำให้มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้ามา ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าเลขอะตอมที่เปลี่ยนไป โดยสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าเลขอะตอมเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปจากเดิมนั้น เป็นผลเนื่องจากมีไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเป็นปริมาณเท่าใด และสามารถคำนวณหาอัตราส่วน H/Zr ratio ได้ โดยค่าเลขอะตอมเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

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

จากการทดลองด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับสามารถบันทึกค่าจำนวนนับได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวด้านข้าง)

	ค่าจำนวนนับ (5 นาที)				weigh t(กรัม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
I (อากาศ)	1325	1315	1312	1317	-
I ₀ (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 3 ผลการทดลองจากการวัดด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับ (บริเวณผิวตัดขวาง)

	ค่าจำนวนนับ (5 นาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
I (อากาศ)	251	208	211	223
I ₀ (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

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

โดยที่ n คือ ค่าจำนวนนับจริง(count/time)
 m คือ ค่าจำนวนนับที่บันทึกได้(count/time)
 τ คือ dead time ~ 200 μsec

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

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

$$\frac{G_I}{count_I} = \frac{G_{II}}{count_{II}}$$

ค่า G ที่ได้จากตัวที่เป็นตัวมาตรฐาน (standard sample) จะเป็นตัวที่ใช้หาค่า G ของตัวที่ไม่ทราบค่า โดยการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลองของตัวมาตรฐาน กับอัตราส่วนค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลองของตัวที่ไม่ทราบค่า โดยค่านับวัดจะมีผลแปรตามค่า G และสามารถหาค่า G มาคำนวณเพื่อหาค่าเลขอะตอมเฉลี่ย (Z_{eff}) และหาปริมาณของไฮโดรเจนที่แพร่อยู่ภายในได้ 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

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

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

ดังนั้นสามารถสรุปค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้

	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

ตารางที่ 5 ค่า G ค่าเลขอะตอมเฉลี่ย และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้

(บริเวณผิวตัดขวาง)

	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 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับเป็น 1.8 และ 1.3 ตามลำดับ เมื่อทำการวัดตรงบริเวณผิวด้านข้าง และเป็น 0.7 และ 0.4 ตามลำดับ เมื่อทำการวัดตรงบริเวณผิวตัดขวาง ดังนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเม็ดที่ 2 ซึ่งแนวโน้มของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 2 ประเภทคือ จากการวิเคราะห์ด้วยผลการทดสอบจากเครื่อง TGA และการวิเคราะห์ด้วยผลการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับทั้ง 2 แบบเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เม็ดเชื้อเพลิงจำลองเม็ดที่ 1 มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมมากกว่าเม็ดที่ 2

5. สรุปและอภิปรายผล

จากหลักการของการแพร่เข้าของไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะค่อยๆ แพร่เข้าจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านในของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 550-800 °C โดยอุณหภูมิแต่ละค่าจะให้อัตรา (rate) การแพร่เข้าของไฮโดรเจนที่ต่างกันนั่นคือเมื่ออุณหภูมิภายใน chamber มีค่า 550 °C จะเริ่มทำการปล่อยไฮโดรเจนเข้า chamber จนอุณหภูมิสูงจนถึงค่าที่ตั้งไว้คือ 750 °C ในช่วงอุณหภูมินี้ (550-750 °C) อัตราการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง สังเกตจากกราฟในรูปที่ 4.1. และ 4.2 เมื่อ

เวลาผ่านไประยะหนึ่งการแพร่เข้าของไฮโดรเจนจะลดลงจนเกือบคงที่ (อัตราการแพร่เข้าเป็นศูนย์) ก็ทำการลดอุณหภูมิลงที่ละประมาณ 25°C โดยทำการลดอุณหภูมิเมื่อการแพร่เข้าของไฮโดรเจนคงที่โดยลดอุณหภูมิลงมาถึง 500°C ก็ทำการปิดเครื่อง

จากค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้ทั้ง 2 วิธีคือวิเคราะห์จากข้อมูลที่บันทึกโดยเครื่อง TGA และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับที่ทำการวัด 2 แบบ (วัดผิวข้างและวัดผิวดัดขวาง) ผลที่ได้คือเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองเมตซ์ที่ 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 และเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองเมตซ์ที่ 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 แนวโน้มของปริมาณไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ภายในเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองเมตซ์ที่ 1 มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่าเมตซ์ที่ 2 และค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะอภิปรายในลำดับต่อไป

ประเด็นที่สองเนื่องจากได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน ส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนตรงบริเวณที่ใกล้ผิวนอกมากกว่าตรงบริเวณที่อยู่ตรงกลางของเมตซ์เชื้อเพลิง ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่ไฮโดรเจนมีโอกาสที่จะแพร่เข้าได้น้อยกว่าตรงบริเวณใกล้ผิว และจากการคำนวณจากข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่อง TGA นั้น เป็นการบันทึกค่าทอรัลที่เปลี่ยนไป ซึ่งแปรผันตามน้ำหนักของตัวอย่างที่แขวน โดยน้ำหนักที่วัดได้เป็นน้ำหนักรวมของตัวอย่าง ทำให้เมื่อนำมาคำนวณจะได้ค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมโดยเฉลี่ยของทั้งเมตซ์เชื้อเพลิงจำลอง แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง โดยหลักการทดสอบจะให้รังสีเบตาตกกระทบที่ผิวของเมตซ์เชื้อเพลิงจำลอง แล้ววัดรังสีเบตากระเจิงกลับเข้าหัววัด จากการทดลองแหล่งกำเนิดรังสีเบตาที่ใช้คือ $\text{Sr}^{90}-\text{Y}^{90}$ มีพลังงานสูงสุดคือ 2.28 MeV ซึ่งมีระยะอิมตัลคือ 2.0 มิลลิเมตรเนื่องจากรังสีจะต้องกระทบวัตถุแล้วกระเจิงกลับมาที่หัววัด ดังนั้นระยะที่รังสีเคลื่อนที่ได้คือไม่เกินระยะทางครึ่งหนึ่งของระยะทางอิมตัลดังนั้นโอกาสที่รังสีจะตกกระทบแล้วกระเจิงจากเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองตรงบริเวณใกล้ผิว ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนมาก (วัดบริเวณด้านข้างของเมตซ์เชื้อเพลิงจำลอง) ก็จะสูงกว่าจะตกกระทบแล้วกระเจิงจากบริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปจากผิวด้านข้าง ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงเป็นค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเฉลี่ยตรงบริเวณที่ลึกจากผิวด้านข้างเข้าไปไม่เกินครึ่งหนึ่งของระยะอิมตัลคือประมาณ 1.0 มิลลิเมตร ดังนั้นค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่วัดบริเวณผิวด้านข้างจากการทดสอบด้วยรังสีเบตาแบบกระเจิงกลับจึงมากกว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง TGA แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดที่บริเวณผิวด้านข้างและตรงบริเวณผิวดัดขวางพบว่า ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่ผิวด้านข้างมีค่ามากกว่าผิวดัดขวาง เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วสำหรับผิวด้านข้าง และสำหรับตรงบริเวณผิวดัดขวางซึ่งเป็นตรงกลางของเมตซ์เชื้อเพลิงจำลองที่ไฮโดรเจนแพร่เข้าไปได้น้อย ทำให้ค่าที่วัดได้ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่ผิวข้างมาถึงตรงกลางน้อยกว่าบริเวณที่ลึกจากผิวข้างเข้าไปเพียง 1.0 มิลลิเมตรส่งผลให้ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้จากผิวดัดขวางมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากผิวด้านข้าง แต่เมื่อพิจารณาระหว่างค่าที่คำนวณได้จากผิวดัดขวาง และค่าที่คำนวณได้จากเครื่อง TGA พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่คำนวณได้จากทั้ง 2 แบบเป็นการหาค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเฉลี่ยทั้งเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงจำลอง

ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมที่คำนวณได้จากการหาเลขอะตอมเฉลี่ย เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ง่าย จากการพิจารณาสมการ
$$n = \frac{(Z_{Hr} + (0.08Z_{Ce})) - (Z_{Zr} + (0.08Z_{Ce}))Z_{eff}}{Z_H Z_{eff} - Z_{Hr}}$$
 สังเกตได้ว่าค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมไม่ขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของเซอร์โคเนียม แต่ขึ้นกับค่าเลขอะตอมเฉลี่ย ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีตัวมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าเลขอะตอมเฉลี่ยน้อย แสดงว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณไฮโดรเจนมาก นั่นคือค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมแปรผกผันกับค่าเลขอะตอมเฉลี่ย ค่า beta backscatter saturation factor หรือค่า G และค่านับวัดที่ได้จากการทดลอง

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กนกกรัศติยพันธ์. ความปลอดภัยของแท่งเชื้อเพลิงแบบ UZrH และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบ TRIGA.

[ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5103/nkc5103z.html> [2553, พฤศจิกายน 5]

กัลยา เกษียนสินธุ์. วัสดุศาสตร์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://e-learning.snru.ac.th/els/Kalaya/Ch6%20Sinter%20production.html> [2554, มกราคม 17]

ทงศักดิ์ ทวีศรี. ศาสตร์ของโลหะผง. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://course.eau.ac.th/course/Download/0152601/2%20sintering.pdf> [2554, มกราคม 17]

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ตารางธาตุ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ตารางธาตุ> [2554, มกราคม 31]

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]

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.oaep.go.th/images/news/20100512141431.pdf> [2553, ธันวาคม 10]

ภาษาต่างประเทศ

Olander D.R., Greenspan, E., Garkisch, H.D., and Petrovic, B. Uranium-zirconiumhydried fuel properties. Nuclear Engineering and Design 239(2009) 1408-1424.

Simnad M.T. The U-ZrH_x Alloy: Its Properties and Use in TRIGA Fuel. Nuclear Engineering and Design 64(1981) 403-422.

Kazuhiro Y., Shinsuke Y., and Masahiro K. Mechanical properties of (U,Ce)O₂. Journal of Alloys and Compounds 271-273(1998) 697-701.