Research and Development Journal
Volume 25 Issue 3 July-September 2014

Received 21 February 2014 Accepted 10 July 2014

DEVELOPMENT OF FUEL BURNUP MEASUREMENT SYSTEM FOR TRR-1/M1

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

The Engineering Institute of Thailand
under H.M. The King's Patronage

การพัฒนาระบบวัดค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วของเครื่อง ปปว.-1/1

DEVELOPMENT OF FUEL BURNUP MEASUREMENT SYSTEM FOR TRR-1/M1

สมคิด เชาว์ช่างเหล็ก[1], สุพิชชา จันทรโยธา[2], นเรศร์ จันทน์ขาว[2] และแสนสุข เวชชการัณย์[3]
[1]นิสิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[2]รองศาสตราจารย์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[3]วิศวกรนิวเคลียร์, สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรีเพื่อหาความแรงรังสีของซีเซียม -137 ซึ่งสามารถคำนวนกลับเป็นค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้ โดยทำการออกแบบท่อบังคับลำรังสีแกมมาลำแคบที่สามารถทำการวัดรังสีแกมมาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแท่งเชื้อเพลิงที่เก็บอยู่ในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ได้นอกจากนี้ยังสามารถลดทอนการรบกวนของรังสีแกมมาที่แผ่มาจากแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ฯ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำค่าที่ตรวจวัดได้ไปใช้วิเคราะห์ค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้

คำสำคัญ: แกมมาสเปกโตรเมตรี, อุปกรณ์บังคับลำรังสี, หัววัดรังสี

ABSTRACT

A technique was developed to measure gamma ray emission from burned nuclear fuel of research reactor TRR-1/M1. The gamma spectrometry technique was utilized to determine the strength of gamma ray emission from Cs-137, which can be back-calculated to determine the burnup of a burned fuel. A narrow-beam gamma-ray collimator was designed to allow for measurement of gamma ray at any position along the burned fuel rod in the reactor pool. Moreover, the collimator reduced the background gamma ray emission from the burned fuel. Measurement results of this instrument can be used to determine the burnup value of a burned nuclear fuel.

KEYWORDS: gamma spectrometry, collimator, detector

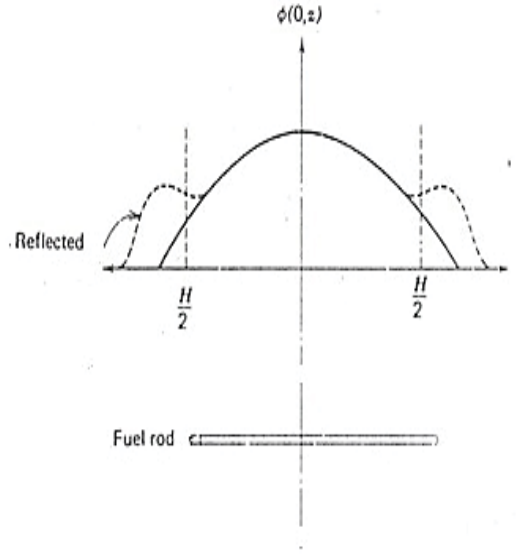
Somkit Chowchanglag[1], Supitcha Chanyotha[2], Nares Chankow[2] and Saensuk Wetchagarun[3]
[1]Graduate Student, Chulalongkorn University
[2]Associate Professor, Chulalongkorn University
[3]Nuclear Engineer, Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อทำการวิจัยเป็นครั้งแรกในพ.ศ. 2505 ปัจจุบันอยู่ในความรับผิดชอบของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีชื่อว่า เครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ตั้งอยู่ที่ เลขที่ 16 ถนน วิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร เครื่องปปว.-1/1 นี้ใช้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ให้กับหน่วยงานต่างๆ มากว่า 50 ปี เครื่องปฏิกรณ์ฯ เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction)โดยมีส่วนประกอบสำคัญ เช่น แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม แท่งควบคุม และท่ออาบรังสี เป็นต้น ซึ่งสำหรับเครื่องปปว.-1/1 อุปกรณ์ทั้งหมดจะแช่น้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นทั้งสารระบายความร้อน สารหน่วงนิวตรอนและเป็นวัสดุป้องกันอันตรายจากรังสีที่เกิดจารการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะต้องมีการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงหรือการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯตามระยะเวลาของการเดินเครื่อง ก่อนทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะทำการคำนวณปริมาณการใช้งานไป หรือที่เรียกว่าค่าเผาไหม้ (Burnup) ของเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง โดยแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้วบางส่วนถูกจะถูกสับเปลี่ยนออก และเก็บรักษาไว้ในช่องเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้งานแล้วที่แช่อยู่ใต้น้ำลึกอย่างน้อย 3 เมตรจากผิวน้ำ เพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีของผลิตผลฟิชชันที่ยังคงเหลืออยู่ในแท่งเชื้อเพลิงออก นอกจากนี้น้ำยังถูกใช้เป็นตัวกำบังรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงที่แผ่สู่ปากบ่อด้วย ทั้งนี้บริเวณโดยรอบบ่อเครื่อง ปฏิกรณ์ฯ จะมีเครื่องสำรวจรังสีสำหรับเตือนหากมีค่าความเข้มรังสีมากเกินค่าที่กำหนด

การตรวจหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีหลายวิธี หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าการเผาไหม้โดยอาศัยข้อมูลการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฯเป็นหลัก ซึ่งเครื่องปปว.-1/1 ของไทยได้ใช้โปรแกรม MVP ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงานที่กำกับดูแลเรื่องพลังงานนิวเคลียร์ของประเทศญี่ปุ่น (Japan Atomic Energy Agency, JAEA) แม้ว่าการตรวจสอบจากการคำนวณจะมีความแม่นยำขึ้นในปัจจุบัน แต่วิธีการตรวจสอบโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วเพื่อคำนวณกลับเป็นค่าการเผาไหม้ก็ยังเป็นทางเลือกสำคัญที่สามารถยืนยันว่าข้อมูลจากการคำนวณถูกต้องซึ่งประเทศไทยยังไม่มีการใช้วิธีนี้มาก่อน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงที่สามารถพัฒนาต่อยอดให้สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

การเผาไหม้ไปของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เกิดขึ้นโดยอาศัย ปัจจัยที่เหมาะสมหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ ความหนาแน่นของนิวตรอน (flux neutron) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชันโดยนิวตรอนเหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีพลังงานสูงซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ไม่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นิวตรอนเหล่านั้นจึงจำเป็นต้องถูกลดทอนหรือหน่วงพลังงานลง (moderate) ให้อยู่ในย่านที่เรียกว่าเทอร์มอลนิวตรอนหรือนิวตรอนช้า โดยนิวตรอนช้าจะมีช่วงพลังงานที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อๆ ไป สารที่ทำหน้าที่ลดทอนพลังงานนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 คือ น้ำ ในทางทฤษฎีลักษณะโปรไฟล์ของนิวตรอนช้าในแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิงจะเป็นรูปโคไซน์ฟังก์ชัน (cosine function) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งบริเวณช่วงกลางของแท่งเชื้อเพลิงจะมีความหนาแน่นของนิวตรอนช้ามากทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้มากกว่าบริเวณหัวและท้ายของแท่งเชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณปลายทั้งสองของแท่งเชื้อเพลิงนิวตรอนมีโอกาสที่จะเล็ดลอดออกไปจากแกนปฏิกรณ์ได้มากทำให้ความหนาแน่นของนิวตรอนในบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำลง



รูปที่ 1 โปรไฟล์ความหนาแน่นของนิวตรอนช้าตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

2. วิธีการทดลอง

2.1 การคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

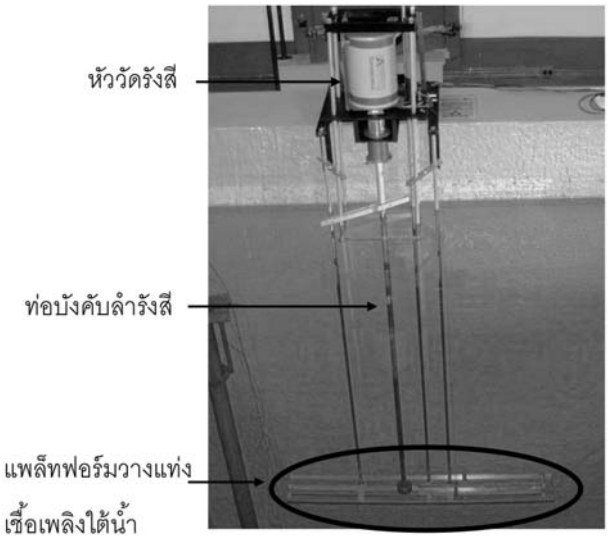
ทำการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงจำนวน 3 แท่ง โดยเป็นเชื้อเพลิงที่มีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม (Enriched uranium) 20% ที่มีเนื้อเชื้อพลิงยูเรเนียมอยู่ 8.5% โดยน้ำหนัก จัดเป็นเชื้อเพลิงแบบค่าการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต่ำ (TRIGA-LEU 8.5/20) แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจะมีผลิตผลฟิชชันที่เกิดจากการแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียมหลายตัว ในการวิจัยนี้ได้เลือกวัดรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสีที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันสูง (fission yield) และมีค่าครึ่งชีวิต 30.17 ปี และมีพลังงานของรังสีแกมมาค่อนข้างสูงจึงเหมาะสมที่จะถูกคัดเลือกมาใช้งาน ค่าความเข้มรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 ที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อไปได้

ในการวัดค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง ได้ทำการเคลื่อนย้ายแท่งเชื้อเพลิงจำนวน 3 แท่ง จากที่เก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯมาวางบนแพล็ตฟอร์มใต้น้ำ แท่งเชื้อเพลิงที่คัดเลือกมาทั้ง 3 แท่งนี้ เป็นเชื้อเพลิงลักษณะเดียวกัน คือ หมายเลขเชื้อเพลิง 8558, 8572 และ 8595 และมีค่าเผาไหม้ที่ทราบค่าจากการคำนวณโดยโปรแกรม MVP Code

2.2 เครื่องมือวัดรังสีแกมมา

เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มรังสีแกมมาที่แผ่มาจากซีเซียม-137 จากเนื้อเชื้อเพลิงใช้แล้ว ประกอบด้วย

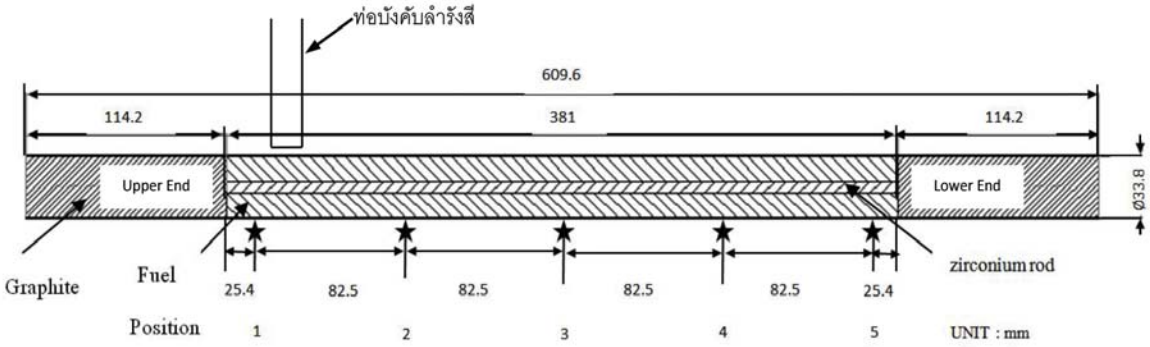
- ระบบแกมมาสเปคโตรเมตรี ที่ใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe, Canberra Model GC3021) และระบบประมวลผล
- ท่อบังคับลำรังสีที่ทำด้วยอะลูมิเนียมบุด้านในด้วยตะกั่ว มีความยาว 3,300 มิลลิเมตรเส้นผ่าศูนย์กลาง 31.4 มิลลิเมตร ทำให้รังสีมีลำแคบ ท่อบังคับลำรังสีออกแบบมาเพื่อบังคับลำรังสีแกมจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่วางบนแพล็ทฟอร์มใต้น้ำให้ผ่านในท่อขึ้นมาสู่หัววัดรังสีที่วางอยู่ที่ขอบบ่อ การใช้ท่อที่บุด้วยตะกั่วเพื่อกำบังรังสีแกมมาจากแหล่งอื่น เช่น รังสีแกมมาจากเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ โดยภายในท่อบังคับลำรังสีจะเป็นอากาศเพราะรังสีแกมมาจะเดินทางในอากาศได้ดีกว่าน้ำโดยการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาใต้น้ำที่ออกแบบใช้ในงานวิจัยนี้

2.3 การวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

ได้ทำการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558, 8572 และ 8595 ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นโดยแต่ละแท่งจะทำการวัดค่านับวัด 5 จุด ที่ระยะห่างที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ได้ทำการวัดความเข้มรังสีแกมมาพื้นหลัง (Background) ในสิ่งแวดล้อมรวม 3 บริเวณด้วยกัน



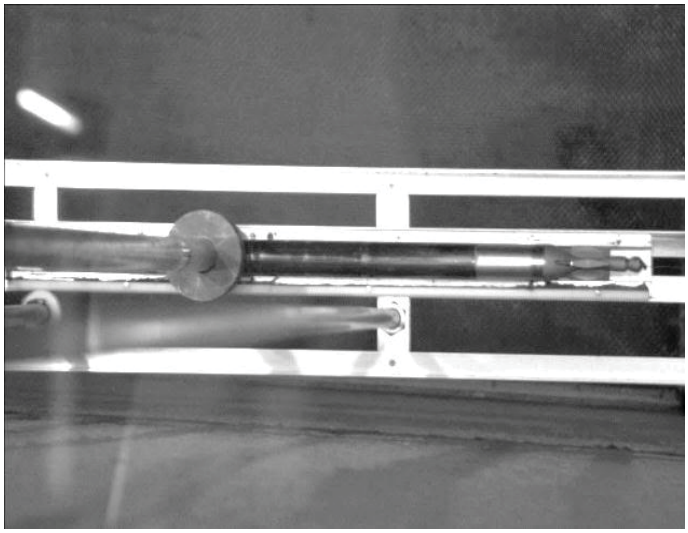
รูปที่ 3 ตำแหน่งจุดวัดรังสีแกมมาบนแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

3. ผลการทดลอง

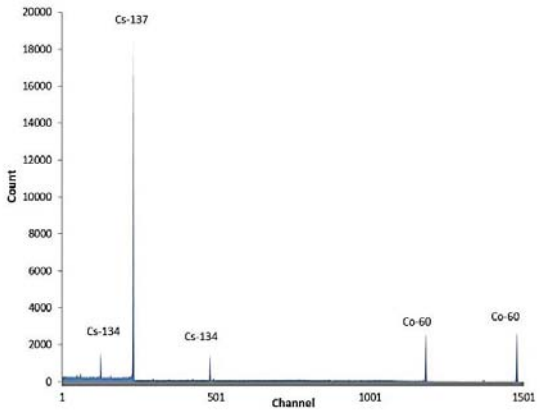
จากการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้ง 3 แท่ง และค่าความเข้มรังสีในสิ่งแวดล้อม (Background) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความแรงรังสีจากสเปกตรัมรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

หมายเลขตัวอย่าง	ตำแหน่ง	เวลา (sec)	ค่านับรังสีแกมมา			
			Energy (keV)	Peak Area(Count)	Peak Integral(Count)	Dead time(%)
Background	1.Reactor pool(วัดปากบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ)	600	661.7	17	83	0.17
	2.Test Full Assembly (ไม่ได้วางเชื้อเพลิง)	600	661.7	19	83	0.17
	3.วัดนอกอาคารเครื่องปฏิกรณ์ฯ	600	661.7	0	241	0.30
Fuel No.8558	1.Upper End	600	661.7	26105	28422	0.76
	2.Between 1&3	600	661.7	36665	39721	1.07
	3.Center	600	661.7	52040	57069	1.59
	4. Between 3&5	600	661.7	53053	58100	1.58
	5.Lower End	600	661.7	42369	45853	1.17
Fuel No.8572	1.Upper End	600	661.7	24919	27285	0.80
	2.Between 1&3	600	661.7	54943	60249	1.69
	3.Center	600	661.7	63792	69616	1.95
	4. Between 3&5	600	661.7	57674	62890	1.73
	5.Lower End	600	661.7	48113	52388	1.41
Fuel No.8595	1.Upper End	600	661.7	25436	27472	0.75
	2.Between 1&3	600	661.7	46598	50610	1.34
	3.Center	600	661.7	56555	61437	1.53
	4. Between 3&5	600	661.7	48986	53081	1.35
	5.Lower End	600	661.7	42369	45853	1.17



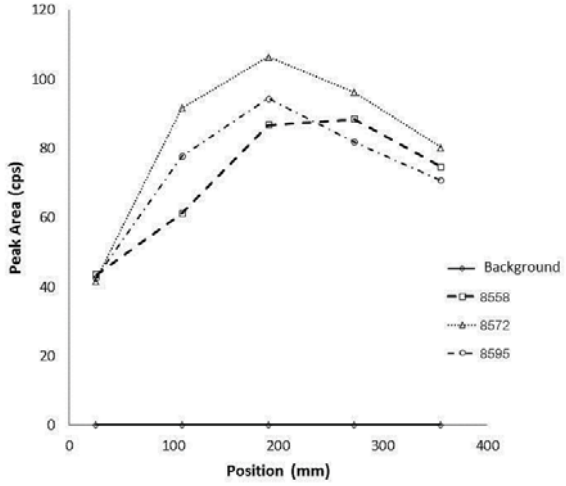
รูปที่ 4 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 3 (Center)



รูปที่ 5 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 3 (Center)

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้งสามแท่งสามารถวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีแต่ละตำแหน่งบนแท่งเชื้อเพลิงได้ดังนี้ตำแหน่งที่ 1 (Upper End) เป็นตำแหน่งบนสุดของเนื้อเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะมีความเข้มรังสีต่ำที่สุดเฉลี่ย 43 cps ตำแหน่งที่ 2 (Between 1&3) เป็นตำแหน่งต่ำลงไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ค่าความเข้มรังสีที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นมาจากตำแหน่งแรกมีค่าเฉลี่ย 75 cps ตำแหน่งที่ 3 (Center) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิง ตำแหน่งนี้ค่าความเข้มรังสีสูงที่สุดเฉลี่ย 95 cps ตำแหน่งที่ 4 (Between 3&5) เป็นตำแหน่งค่อนไปทางด้านปลายของแท่งเชื้อเพลิง ขณะใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะเป็นตำแหน่งค่อนไปทางด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ค่าความเข้มรังสีที่ได้จะมีค่าเฉลี่ย 90 cps ตำแหน่งที่ 5 (Lower End) เป็นตำแหน่งปลายของแท่งเชื้อเพลิง หรือเป็นตำแหน่งด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ตำแหน่งนี้ค่าความเข้มรังสีมีค่าเฉลี่ย 75 cps โดยข้อมูลแต่ละจุดของเชื้อเพลิงทั้งสามแท่งจากตารางที่ 2 ได้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 6 ด้านล่าง



รูปที่ 6 ค่าความแรงรังสีแต่ละจุดบนแท่งเชื้อเพลิงจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วตลอดแนวความยาวเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้งสามแท่งพบว่า บริเวณกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิงจะเป็นส่วนที่มีค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยูเรเนียม-235 มากที่สุด จึงวัดค่าความเข้มรังสีได้มากกว่าจุดอื่นเพราะขณะแท่งเชื้อเพลิงถูกใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ส่วนกลางจะมีความหนาแน่นของนิวตรอนช้าอยู่มากจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้มากกว่าส่วนอื่น และบริเวณที่มีค่าการเผาไหม้ต่ำสุดเป็นส่วนปลายที่อยู่ด้านบนของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพราะบริเวณนี้มีโอกาสกระเจิงของนิวตรอนออกนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ มากกว่าส่วนอื่นทำให้ความหนาแน่นของนิวตรอนช้าน้อยจึงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้น้อยทำให้วัดค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ได้น้อยกว่าจุดอื่น เมื่อพิจารณาผลการทดลองของค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ตลอดแนวความยาวของแท่งเชื้อเพลิงพบว่ามีลักษณะเป็นรูปโคไซน์ฟังก์ชันตามทฤษฎี แต่ไม่สมมาตรโดยค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ส่วนด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงวัดได้น้อยกว่าส่วนเชื้อเพลิงด้านล่าง ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่าขณะใช้งาน บริเวณด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ น้ำซึ่งเป็นสารลดทอนพลังงานของนิวตรอน มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำที่อยู่ด้านบนของแกนปฏิกรณ์ จึงทำให้ด้านล่างแท่งเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ได้มากกว่าด้านบนของแท่งเชื้อเพลิง

ค่าความแรงรังสีที่วัดได้จากซีเซียม-137 สามารถคำนวณกลับเป็นปริมาณซีเซียม-137 ที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้ และซีเซียม-137 มีค่าการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันที่ 85% สามารถคำนวณกลับเป็นปริมาณยูเรเนียมตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งเรียกค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนงานวิจัยจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สร้างเครื่องมือในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Khan, R., Karimzadeh, S. & Bock, H. (2010). TRIGA fuel burn-up calculations and its confirmation. *Nuclear Engineering and Design* 240, 1043-1049.

[2] Mora, M. V., Padilla, A. G., Palomino, J. L. C. & Terremoto, L. A. A. (2011). Nondestructive burnup measurements by gamma-ray spectroscopy on spent fuel elements of the RP-10 research reactor. *Progress in Nuclear Energy* 53, 344-353.

[3] Peir, J. J., Wang, T. K. & Liu, C. C. (1999). TRIGA fuel enrichment verification based on the measurement of short-lived Fission Products. *Applied Radiation and Isotopes* 50, 1085-1096.

[4] Terremoto, L. A. A., Zeituni, C. A., Perrotta J.A.R. & da Silva, J. E. R. (2000). Gamma-ray spectroscopy on irradiated MTR fuel elements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Researc* 50, 495-514.

[5] Wang, T. K., Hsu, D. C. & Tseng, C. L. (1990). Feasibility Studies on Iterative Methods of Fuel Burn-up Estimation Using Gamma-ray Spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 41, 41-47.

[6] Wang, T. K. & Peir, J. J. (2000). An iterative approach for TRIGA fuel burn-up determination using nondestructive gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 52, 105-118.