

การพัฒนาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วโดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา



นายสมคิด เซาว์ช่างเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DEVELOPMENT OF BURNED NUCLEAR FUEL BURNUP MEASUREMENT TECHNIQUE
BASED ON GAMMA RAY SPECTROSCOPY

Mr. Somkit Chowchanglag



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วโดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา
โดย	นายสมคิด เชาว์ช่างเหล็ก
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. แสนสุข เวชการัญญ์)

สมคิด เชาวน์ช่างเหล็ก : การพัฒนาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว โดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา. (DEVELOPMENT OF BURNED NUCLEAR FUEL BURNUP MEASUREMENT TECHNIQUE BASED ON GAMMA RAY SPECTROSCOPY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพิชชา จันทโรยธา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, 76 หน้า.

ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรีเพื่อหาความแรงรังสีของซีเซียม-137 โดยใช้หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง และคำนวณกลับเป็นค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยทำการออกแบบท่อบังคับลำรังสีแกมมาลำแคบที่สามารถทำการวัดรังสีแกมมาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแท่งเชื้อเพลิงที่เก็บอยู่ในสระน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ได้ นอกจากนี้ได้ออกแบบกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีให้ตัดการรบกวนของรังสีแกมมาที่แผ่มาจากแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่ตำแหน่งอื่นๆ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ทำการทดสอบกับแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว 3 แท่ง คือ แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558, 8572 และ 8595 ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงที่คัดเลือกมาทดสอบนั้น มีข้อมูลการเดินเครื่องใช้ในการคำนวณค่าการเผาไหม้ ได้ค่าการเผาไหม้มากที่สุดของแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8572 ที่ 65.25% แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8595 จำนวนค่าการเผาไหม้ได้ 59.47% และแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 จำนวนค่าการเผาไหม้น้อยที่สุด 56.76% เมื่อนำผลจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าจากการคำนวณ ประมาณ 3 เท่า คาดว่าเป็นผลมาจากค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากการสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370580821 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: GAMMA SPECTROMETRY / COLLIMATOR / DETECTOR

SOMKIT CHOWCHANLAG: DEVELOPMENT OF BURNED NUCLEAR FUEL BURNUP MEASUREMENT TECHNIQUE BASED ON GAMMA RAY SPECTROSCOPY. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, 76 pp.

A technique was developed to measure gamma ray emission from burned nuclear fuel from the research reactor TRR-1/M1. The gamma spectrometry technique was utilized to determine the strength of gamma ray emission from Cs-137 using high-purity germanium detector, which can be back-calculated to determine the burnup of the 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 fuel in other locations. This developed apparatus was tested on 3 burned fuel rods numbers 8558, 8572 and 8595, as calculated burnup values were available from reactor operation records. Results of maximum burnup values for fuel rod numbers 8572, 8595 and 8558 were 65.25%, 59.47% and 56.76%, respectively. When compared with calculated values, these measurement results were approximately 3 times higher. The discrepancy was assumed to be from the error in efficiency calibration of the gamma ray measurement system.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆฝ่าย ดังนั้นจึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทโรยธา และ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คอยดูแล ชี้แนะ ส่งเสริม รวมทั้งให้หลักการและข้อคิดต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำงานวิจัย ตลอดมาจนกระทั่งจบโครงการ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์และ ดร. แสนสุข เวชชการณีย์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังได้ให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

กราบขอบพระคุณ คุณนรินทร์ คล้ายสุบรรณ คุณเจน อินนุ้มพันธุ์และเจ้าหน้าที่ ศูนย์เครื่องปฏิกรณ์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน)ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและติดตั้งเครื่องมือ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยอย่างมาก

กราบขอบขอบคุณ คุณวราวุธ ขจรฤทธิ์ คุณอดิศักดิ์ ปัญญาบุษ และเจ้าหน้าที่ ศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน)ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ เสนอแนะ และช่วยเหลือ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนงานวิจัย ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และสนับสนุนเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเสมอมาจนสามารถสำเร็จการศึกษาลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 หลักการ.....	6
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในประเทศไทย.....	6
2.1.1 ลักษณะแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Core).....	6
2.1.2 แท่งควบคุม (Control rods).....	7
2.1.3 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม (Fuel elements).....	8
2.2 การเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission).....	9
2.2.1 ผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Products) [7].....	10
2.2.2 ซีเซียม-137 (Caesium-137).....	13
2.2.3 กัมมันตภาพ (activity, A).....	14
2.2.4 การแผ่รังสีแกมมา (Gamma-Ray Emission).....	15
2.3 หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector).....	15
2.3.1 กลไกการทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ [8].....	16
2.3.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา [8].....	17
2.4 ผลการลดทอนของรังสีแกมมาเมื่อผ่านชั้นวัสดุ (Attenuation effects) [7].....	18

2.5 การคำนวณค่าการเผาไหม้ (Burnup monitor activity and determination) [2].....	22
2.5.1 การคำนวณค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วจากข้อมูลเดินเครื่องปฏิกรณ์.....	22
2.5.2 การคำนวณอัตราปริมาณรังสีของซีเซียม-137 จากการทดลอง	23
2.5.3 การคำนวณค่าการเผาไหม้จากอัตราปริมาณรังสีของซีเซียม-137.....	24
2.6 โพรไฟล์นิวตรอนข้ามแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ.....	27
3.1.1 การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมา.....	27
3.1.2 การออกแบบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ	27
3.1.3 การเลือกวัสดุและสร้างอุปกรณ์ของระบบวัดรังสีใต้น้ำ.....	32
3.2 การสอบเทียบหาประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา.....	32
3.2.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์	32
3.2.2 วิธีการสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา	33
3.3 การคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว.....	35
3.4 การวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ	36
3.5 การวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	38
4.1 ผลการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ	39
4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์บังคับลำรังสีและหาประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีแกมมา.....	41
4.2.1 ความแรงรังสีต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137ที่ใช้ทดสอบ	41
4.2.2 การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา	41
4.2.3 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบต่อบังคับลำรังสี	42
4.3 ผลการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว	43
4.4 ผลการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิง	46
4.5 การวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว.....	52
4.5.1 ผลการแปลงค่านับรังสีเป็นค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137	52
4.5.2 ผลการแปลงค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 เป็นค่าเผาไหม้เชื้อเพลิง	54

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.1.1 สรุปผลการออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและเครื่องมือวัดรังสีแกมมา	56
5.1.2 สรุปผลการสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา.....	56
5.1.3 สรุปผลการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ.....	57
5.1.4 การแปลผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว.....	58
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	59
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	67
ภาคผนวก ง.....	68
ภาคผนวก จ.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 Specifications of TRIGA-LEU fuel rods and cluster assembly [1].....	9
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพลังงานของไอโซโทปในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว [6]	12
ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัสดุต่าง ๆ ของรังสีแกมมาในหน่วย ซม. ² /กรัม..	20
ตารางที่ 4.1 ผลสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา	41
ตารางที่ 4.2 ปริมาณยูเรเนียม-235 เริ่มต้นในเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง.....	43
ตารางที่ 4.3 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558	43
ตารางที่ 4.4 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8572	44
ตารางที่ 4.5 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8595	45
ตารางที่ 4.6 ค่าวิเคราะห์ปริมาณซีเซียมและยูเรเนียมในเชื้อเพลิงใช้แล้วจากโปรแกรม MVP Code [11].....	45
ตารางที่ 4.7 ผลการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้น้ำ.....	46
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558	53
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8572	53
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8595	53
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558	54
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8572	54
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8595	55
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าเผาไหม้โดยเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว.....	55

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว.- 1/1.....	7
รูปที่ 2.2 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมจำลองขนาดเท่าของจริง	8
รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาแบ่งแยกนิวเคลียสหรือฟิชชัน [6].....	10
รูปที่ 2.4 ค่าผลลัพท์ฟิชชัน (fission yield) [3]	11
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู [6]	11
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีจาก ซีเซียม-137	13
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมหัววัดรังสีแบบ HPGe [8].....	16
รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังการจัดระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา.....	17
รูปที่ 2.9 การหาความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area)	18
รูปที่ 2.10 สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ.....	19
รูปที่ 2.11 รังสีแกมมาความเข้ม I_0 กระทบสสารหนา x และมีความเข้มหลังผ่านสสาร I	21
รูปที่ 2.12 แผนผังการคำนวณหาค่าความแรงรังสีรวมของซีเซียม-137 ในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว	23
รูปที่ 2.13 โพรไฟล์ความหนาแน่นของนิวตรอนซ้ำตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิง นิวเคลียร์.....	25
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว	27
รูปที่ 3.2 แผนภาพท่อนำรังสีพร้อมอุปกรณ์บังคับรังสีลำแคบในหน่วยมิลลิเมตร	28
รูปที่ 3.3 แผนภาพการออกแบบชุดรองรับหัววัดรังสีและอุปกรณ์จับยึดกับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ.....	29
รูปที่ 3.4 แผนภาพการออกแบบชุดวางแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำและกลไกการเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง.....	30
รูปที่ 3.5 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว	31
รูปที่ 3.6 แผนผังการจัดระบบการสอบเทียบที่บังก์ลำรังสี	32

รูปที่ 3.7 หัววัดรังสี HPGe ที่ใช้สอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา 34

รูปที่ 3.8 ต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ที่ใช้สอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา..... 34

รูปที่ 3.9 การเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้ในช่องเก็บแล้วได้น้ำของเครื่อง ปปว.-1/1 35

รูปที่ 3.10 ตำแหน่งวัดรังสีแกมมาบนแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว..... 36

รูปที่ 4.1 การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีที่สร้างขึ้น..... 39

รูปที่ 4.2 การทดสอบใช้งานแพลตฟอร์มกับแท่งเชื้อเพลิงจำลอง..... 40

รูปที่ 4.3 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาได้น้ำที่ออกแบบใช้ในงานวิจัยนี้ รูปซ้ายมือแสดงการจัดวางระบบวัดรังสีได้น้ำและรูปขวามือเป็นหัววัดรังสีชนิด HPGe 40

รูปที่ 4.4 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 1 (Upper End)..... 47

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 1 (Upper End)..... 47

รูปที่ 4.6 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 2 (Between 1&3)..... 48

รูปที่ 4.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 2 (Between 1&3)..... 48

รูปที่ 4.8 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 3 (Center) 49

รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 3 (Center) 49

รูปที่ 4.10 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 4 (Between 3&5)..... 50

รูปที่ 4.11 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 4 (Between 3&5)..... 50

รูปที่ 4.12 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 5 (Lower End)..... 51

รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 5 (Lower End)..... 51

รูปที่ 4.14 ค่าเฟคเตอร์การลดทอนของรังสีแกมมาในเนื้อเชื้อเพลิง [1].....	52
รูปที่ 5.1 ค่าความแรงรังสีแต่ละตำแหน่งบนแท่งเชื้อเพลิงจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว	57
รูปที่ 5.2 กราฟความไวของค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัด	59
รูปที่ 5.3 กราฟความไวของค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัดในระบบสเกล log log	60



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อทำการวิจัยเป็นครั้งแรกในพ.ศ. 2505 ปัจจุบันอยู่ในความรับผิดชอบของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีชื่อว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 หรือเรียกโดยย่อว่า เครื่องปว.-1/1 ตั้งอยู่ที่ เลขที่ 16 ถนน วิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร เครื่องปว.-1/1 นี้ใช้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ให้กับหน่วยงานต่าง ๆ มากกว่า 50 ปี เครื่องปฏิกรณ์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) โดยมีส่วนประกอบสำคัญ เช่น แกนเครื่องปฏิกรณ์ แท่งเชื้อเพลิงที่ทำด้วยยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ แท่งควบคุม และท่ออาบริ่งสี เป็นต้น ซึ่งสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1 อุปกรณ์ทั้งหมดจะแช่น้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นทั้งสารระบายความร้อน สารหน่วงนิวตรอนและเป็นวัสดุป้องกันอันตรายจากรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์จะต้องมีการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงหรือการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ตามระยะเวลาของการเดินเครื่อง โดยก่อนทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะทำการคำนวณปริมาณการใช้งานไปหรือที่เรียกว่าค่าเผาไหม้ (Burnup) ของเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้วบางส่วนจะถูกสับเปลี่ยนออกและเก็บรักษาไว้ในช่องเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้งานแล้วที่แช่อยู่ในน้ำลึกอย่างน้อย 3 เมตร จากผิวน้ำเพื่อระบายความร้อนที่ยังคงเหลืออยู่จากการแผ่รังสีของผลิตภัณฑ์ฟิชชันในแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้ น้ำยังถูกใช้เป็นตัวกำบังรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงที่แผ่สู่ปากบ่อด้วย ทั้งนี้บริเวณโดยรอบบ่อเครื่องปฏิกรณ์จะมีเครื่องสำรวจรังสีสำหรับเตือนหากมีค่าความเข้มรังสีมากเกินไปที่กำหนด

การตรวจหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์มีหลายวิธี หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าการเผาไหม้โดยอาศัยข้อมูลการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1 ของไทยได้ใช้โปรแกรม MVP ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงานที่กำกับดูแลเรื่องพลังงานนิวเคลียร์ของประเทศญี่ปุ่น (Japan Atomic Energy Agency, JAEA) แม้ว่าการตรวจสอบจากการคำนวณจะมีความแม่นยำขึ้นในปัจจุบัน แต่วิธีการตรวจสอบโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วเพื่อคำนวณกลับเป็นค่าการเผาไหม้ก็ยังเป็นทางเลือกสำคัญที่สามารถยืนยันว่าข้อมูลจากการคำนวณ

ถูกต้องซึ่งประเทศไทยยังไม่มีการใช้วิธีนี้มาก่อน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงที่สามารถพัฒนาต่อยอดให้สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้แล้วโดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้แล้วโดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อวัดค่าเผาไหม้โดยวิธีวัดรังสีแกมมาจาก แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว และนำไปทดสอบกับแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1
3. เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัด

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลของเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 และการวัดค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว
2. เลือกวิธีการวัดค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วให้เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1
3. เลือกอุปกรณ์ในการวัดค่าเผาไหม้ ออกแบบอุปกรณ์บังคับลำรังสี (Collimator) เพื่อใช้กับเครื่องมือวัดรังสี พร้อมทั้งคำนวณความหนาของวัสดุที่ใช้กำบังรังสี
4. ทำการสร้างอุปกรณ์วัดค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว
5. ทดสอบเก็บข้อมูลค่าที่วัดได้นำไปคำนวณแปรผลเป็นค่าการเผาไหม้ เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลคำนวณที่ได้มาจากโปรแกรมคำนวณทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์
6. ปรับปรุงชุดอุปกรณ์วัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงและองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อให้การวัดค่าการเผาไหม้ถูกต้อง แม่นยำขึ้น
7. สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในการประเมินค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 ที่สามารถตรวจสอบค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน
2. ได้ความรู้ในการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 ที่สามารถนำไปปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ในอนาคต

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปี ค.ศ.2000 T.K. Wang , J.J. Peir [1] ได้ทำการวิจัยเรื่อง An iterative approach for TRIGA fuel burn-up determination using nondestructive gamma-ray spectrometry เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ทริกา (TRIGA) โดยวิธีวัดรังสีแกมมา วัดคุณสมบัติของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาวิธีการสำหรับประเมินค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ โดยวิธีวัดรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสีที่เกิดจากการแตกตัวของยูเรเนียมในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นได้แก่ $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$, ^{132}I และ ^{140}La โดยวิธีรังสีแกมมานี้ไม่ต้องการประวัติการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิงแต่ใช้วิธีวัดความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นเป็นหลักซึ่งสามารถคำนวณกลับเป็นค่าการเผาไหม้ของยูเรเนียมในแท่งเชื้อเพลิงได้ และไอโซโทปรังสีจากการแตกตัวของยูเรเนียมในเชื้อเพลิงใช้แล้วที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวสามารถใช้วิธีเดียวกันในการหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งได้จากการวัดความแรงรังสีของ ^{137}Cs หรือวัดอัตราส่วน $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$ $^{106}\text{Ru} / ^{137}\text{Cs}$ แล้วคำนวณย้อนกลับเป็นค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงได้

1.6.2 ปี ค.ศ.1989 T.K. Wang , D.C. Hsu , C.H. Tseng [2] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Feasibility Studies on Iterative Methods of Fuel Burnup Estimation Using Gamma-ray Spectrometry เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วด้วยวิธีการวัดความแรงรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวที่เกิดในแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย แท่งเชื้อเพลิงที่ทำการวิเคราะห์เป็นแท่งเชื้อเพลิงแบบค่าความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 สูง (high enrichment material) จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Tsing Hua Open Pool Reactor; THOR) ได้วัดค่าความแรงรังสี (activity) ของผลผลิตฟิชชันแบบครึ่งชีวิตยาว

ด้วยเครื่องมือสแกนวัดความแรงรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องการข้อมูลย้อนหลังของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว วิธีการนี้ได้วัดค่าความแรงรังสีจาก ^{137}Cs หรืออัตราส่วนค่าความแรงรังสีของ $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$ หรือค่าความแรงรังสีของ ^{140}La ในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วและคำนวณย้อนกลับเป็นค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้ โดยค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าการเผาไหม้ที่ได้มาจากข้อมูลการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงเพื่อยืนยันข้อมูลที่ทำให้การทดลอง

1.6.3 ปี ค.ศ.1998 J.J. Peir, T.K. Wang , C.C Liu [3] ได้ทำการวิจัยเรื่อง TRIGA fuel enrichment verification based on the measurement of short-lived Fission Products ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการตรวจสอบปริมาณยูเรเนียม-235 (^{235}U) ในแท่งเชื้อเพลิงใหม่ของเครื่องปฏิกรณ์วิจัยทริกา (TRIGA) โดยใช้วิธีนำแท่งเชื้อเพลิงใหม่เข้าไปอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์แล้ววัดความแรงรังสีแกมมาจากผลผลิตฟิชชันที่มีครึ่งชีวิตสั้นได้แก่ $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$, ^{132}I และ ^{140}La โดยวิธีนี้จะหาปริมาณ ^{235}U ในแท่งเชื้อเพลิงจากการคำนวณย้อนกลับจากค่าความแรงรังสีที่วัดได้และวิธีนี้สามารถใช้ในการหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้เช่นกัน โดยไม่ต้องการข้อมูลย้อนหลังของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

1.6.4 ปี ค.ศ.2010 R. Khan , S. Karimzadeh , H. Bock [4] ได้ทำการวิจัยเรื่อง TRIGA fuel burn-up calculations and its confirmation เป็นการศึกษาแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ทริกา (TRIGA) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีของกรุงเวียนนา เกี่ยวกับความเข้มข้นของไอโซโทปซีเซียม-137 (^{137}Cs) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงโดยสามารถคำนวณและวัด ^{137}Cs ซึ่งเป็นไอโซโทปตัวบ่งชี้การเผาไหม้ได้ งานวิจัยนี้แสดงการคำนวณและวิธีการวัดวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาของไอโซโทป ^{137}Cs ด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานในเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยใช้อุปกรณ์วัดสแกนแบบพิเศษที่พัฒนาขึ้น ซึ่งช่วยสแกนแต่ละแท่งเชื้อเพลิงทุก 1 ซม. ตลอดของความยาวใช้งานของแท่งเชื้อเพลิง ระบบการวัดประกอบด้วยหัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ต่อระบบวัดตรง (on-line) กับโมดูลเครื่องคอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลและแปลงค่าที่ได้จากการวัดมาเป็นค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้งานแล้ว โดยมีค่าความเบี่ยงเบนระหว่างค่าจากการคำนวณและค่าจากการวัดอยู่ในช่วงจาก 0.82% ถึง 12.64%

1.6.5 ปี ค.ศ.1999 L.A.Terremoto , C.A. Zeituni , J.A. Perrotta , J.E.R. da Silva [5] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Gamma-ray spectroscopy on irradiated MTR fuel elements เป็นการศึกษาเพื่อหาข้อมูลการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้มีความถูกต้องซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงาน เศรษฐศาสตร์และความปลอดภัย ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยได้ โดยงานวิจัยนี้นำเสนอทฤษฎีเทคนิคและการทดลองที่นำไปใช้กับการตรวจสอบด้วยวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานโดยการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาในแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการตรวจสอบเป็นแบบเชื้อเพลิงที่มีค่าความเข้มข้นยูเรเนียม-235 สูง (MTR) ซึ่งใช้อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

IEA - R1 ของประเทศบราซิล โดยผลการวิเคราะห์ค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับผลการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ผ่านอุปกรณ์บังคับลำรังสี การทดลองดำเนินการวัดรังสีบริเวณสระน้ำของเครื่องปฏิกรณ์โดยระบบการวัดประกอบด้วยหัววัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) ร่วมกับอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมและเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องในไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ค่าที่วัดมีความถูกต้องแน่นอนก่อนทำการทดลองจึงได้ทำการสอบเทียบอุปกรณ์บังคับลำรังสี และเครื่องวัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ผลจากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ที่มีความแตกต่างกันสามสถานะคือ เวลาการระบายความร้อน ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเริ่มต้นและจำนวนแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ หลังจากเปรียบเทียบค่าทั้งสองมีความสอดคล้องกันภายใต้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

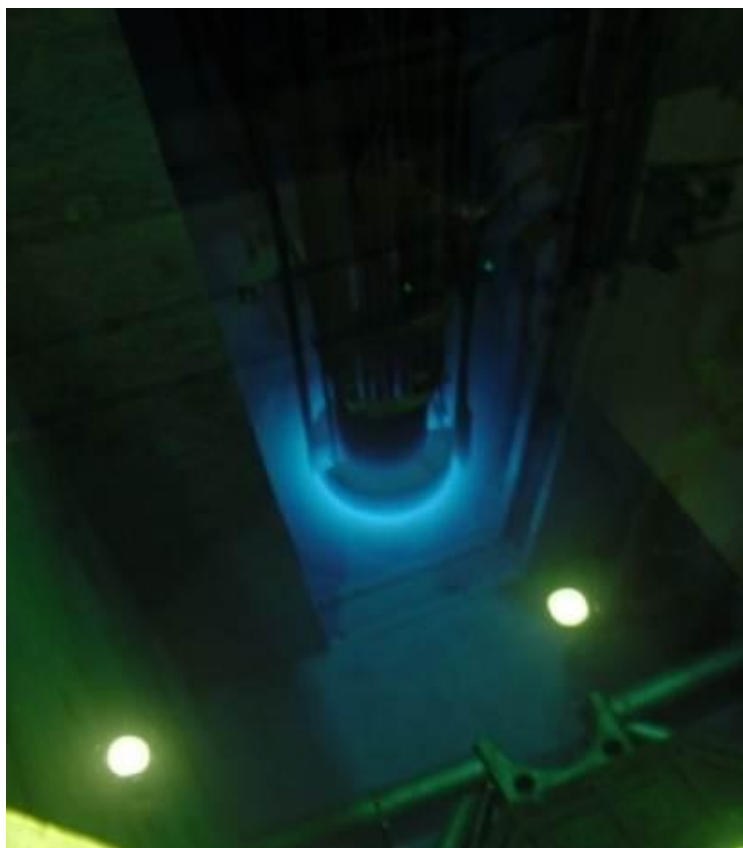
หลักการ

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อทำการวิจัยเป็นครั้งแรกโดยคณะรัฐมนตรีมีอนุมัติให้คณะกรรมการทำสัญญาว่าจ้างการก่อสร้างอาคารเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในพ.ศ. 2503 การก่อสร้างอาคารและการติดตั้งเครื่องและอุปกรณ์ได้ดำเนินมาเป็นลำดับ จนกระทั่งแล้วเสร็จและเดินเครื่องเข้าสู่ภาวะวิกฤติเป็นครั้งแรกเมื่อเวลา 18.32 น. ของวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2505 โดยมีชื่อทางการว่า "เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1" หรือชื่อย่อว่า "ปปว.-1" ต่อมาเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2520 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงแกนเครื่องปฏิกรณ์ใหม่จึงมีชื่อใหม่ว่า "เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1" ชื่อย่อว่า "ปปว.-1/1" หรือชื่อสากลว่า "Thai Research Reactor-1/Modification 1" ชื่อย่อสากลว่า TRR-1/M1 ปปว. - 1/1 เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทยในปัจจุบัน ใช้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ให้กับหน่วยงานต่างๆ มากกว่า 50 ปี เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทำงานเป็นระบบที่ประกอบขึ้นเพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) เช่น ระบบระบายความร้อน ระบบป้องกันอันตรายจากรังสี การผลิตนิวตรอนจากหลักการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันและการควบคุมปฏิกิริยานี้จึงเป็นที่มาของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

2.1.1 ลักษณะแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Core)

ลักษณะการจัดเชื้อเพลิงในแกนรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal array) แกนเครื่องปฏิกรณ์บรรจุอยู่ในถังอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 55 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร ภายในจะมีแท่งเชื้อเพลิงบรรจุอยู่ในลักษณะตั้งตรง ส่วนบนและล่างเป็นตัวสะท้อนนิวตรอนชนิดแกรไฟต์ (Graphite Reflector) โดยแกนปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบทั้งหมดจะแช่อยู่ในน้ำดังรูปที่ 2.1



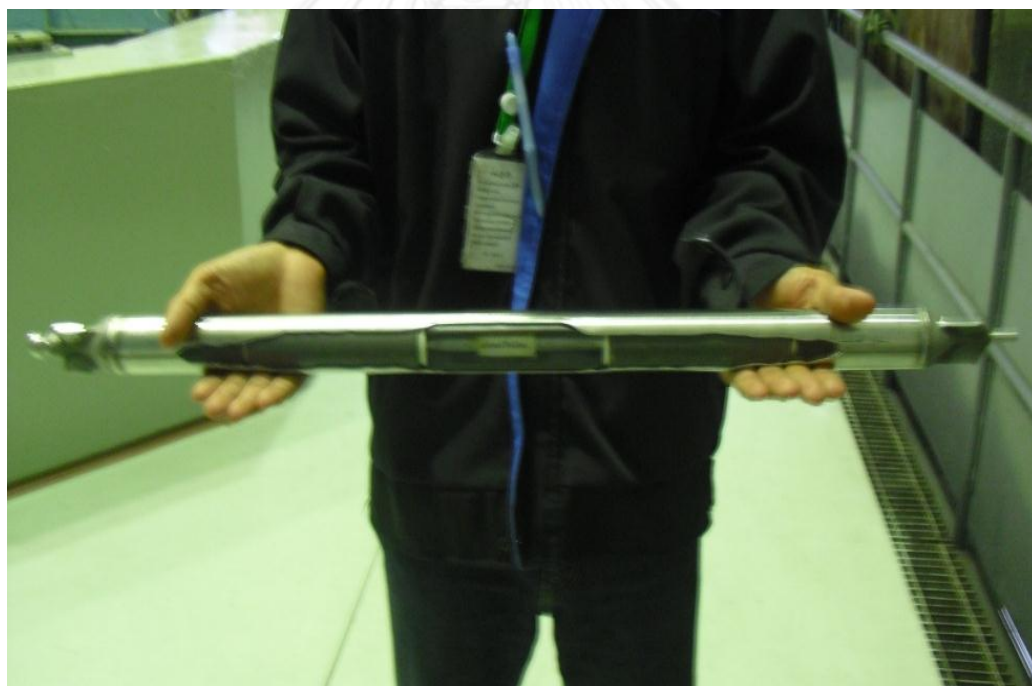
รูปที่ 2.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว.- 1/1

2.1.2 แท่งควบคุม (Control rods)

แท่งควบคุมทำหน้าที่ควบคุมอัตราการเกิดฟิชชันโดยสอดใส่เข้าไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ด้วยระยะทางต่าง ๆ กัน และด้วยการจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อดูดซับนิวตรอนไม่ให้มีจำนวนมากเกินไป มีลักษณะและขนาดคล้ายแท่งเชื้อเพลิงมีส่วนบนเป็นสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide, B_4C) เป็นตัวดูดจับนิวตรอนส่วนล่างเป็นเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (U-ZrH1.6) แท่งควบคุมชนิดนี้มี 4 แท่งและแท่งควบคุมชนิดสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ที่ไม่มีเนื้อเชื้อเพลิง (Transient) อีก 1 แท่ง

2.1.3 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม (Fuel elements)

เนื้อเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (Uranium-Zirconium hydride, U-ZrH_{1.6}) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.50 นิ้ว ยาวประมาณ 30 นิ้ว ดังรูปที่ 2.2 ส่วนบนและล่างเป็นแกรไฟต์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการยับยั้งปฏิกิริยาฟิชชันได้เมื่ออุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด (Prompt Negative Temperature Coefficient) ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของเชื้อเพลิงชนิดนี้จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ทำงานแบบทวีกำลังได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อเชื้อเพลิง เนื้อเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์คิดเป็นปริมาณยูเรเนียม-235 ประมาณ 5,888.25 กรัม ซึ่งเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.-1/1 จะใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด คือที่ความเข้มข้นของไอโซโทปยูเรเนียม-235 (²³⁵U) 8.5% และที่ความเข้มข้นของไอโซโทปยูเรเนียม-235 (²³⁵U) 20% ตามข้อมูลจำเพาะของแท่งเชื้อเพลิงที่แสดงในตารางที่ 2.1



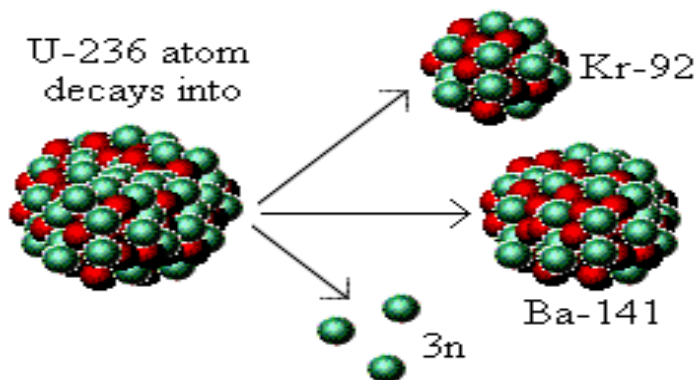
รูปที่ 2.2 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมจำลองขนาดเท่าของจริง

ตารางที่ 2.1 Specifications of TRIGA-LEU fuel rods and cluster assembly [1]

Sample	TRIGA-LEU	TRIGA-LEU
	8.5/20	20/20
Fuel composition	U-ZrH1.6	U-ZrH1.6-Er
Overall length	28.89 in (73.38 cm)	28.89 in (73.38 cm)
Outside clad diameter	1.476in (3.75 cm)	1.476 in (3.75 cm)
Fuel outside diameter	1.333 in (3.56 cm)	1.333 in (3.56 cm)
Fuel length	15 in (38.1 cm)	15 in (38.1 cm)
Weight of single rod	2.30 kg	2.50 kg
Weight of ²³⁵ U	38 g	108 g
²³⁵ U content	8.5 wt%	20.0 wt%
²³⁵ U enrichment	20%	20%
Er content	0.0 wt%	0.5 wt%
Cladding thickness	0.020 in (0.051 cm)	0.020 in (0.051 cm)
Lattice pitch in assembly	1.53 in (3.887 cm)	1.53 in (3.887 cm)
Volume fraction of Zr rod	0.021	0.021
Volume fraction of fuel	0.577	0.577
Volume fraction of clad	0.0363	0.0363
Volume fraction of water	0.3657	0.3657

2.2 การเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission)

ปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียสหรือฟิชชัน (nuclear fission) เกิดจากการระดมยิงอะตอมธาตุยูเรเนียมด้วยนิวตรอน ผลของปฏิกิริยาคือนิวเคลียสยูเรเนียม-235 ถูกแบ่งแยกออกเป็นนิวเคลียสของอะตอม 2 ชนิด ตามฟิชชันยิว (fission yield) เช่น คริปทอน-92 และ แบเรียม-141 ทั้งยังปล่อยพลังงานออกมา 200 MeV และให้นิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งนิวตรอนจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 กลายเป็นยูเรเนียม-236 แล้วเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสและปลดปล่อยนิวตรอนไปเป็นทอดกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

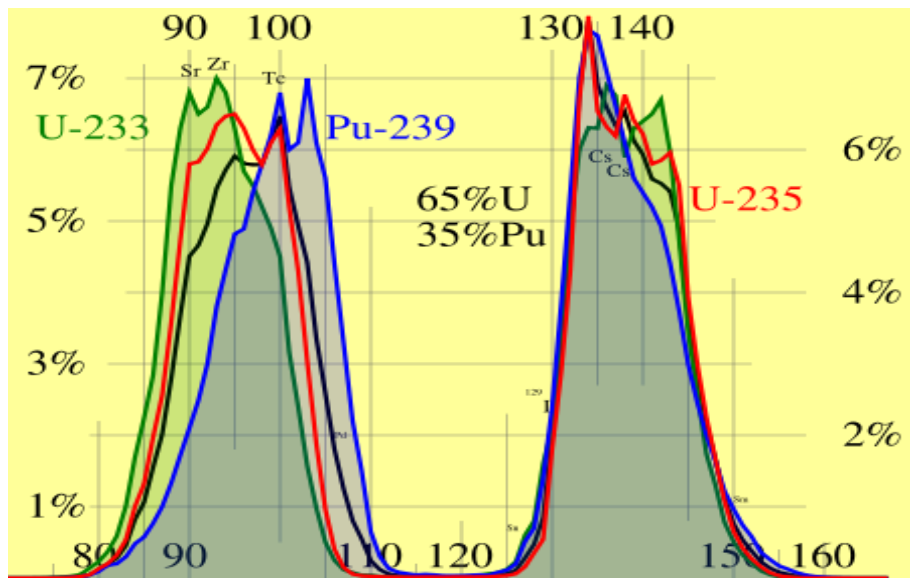


รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียสหรือฟิชชัน [6]

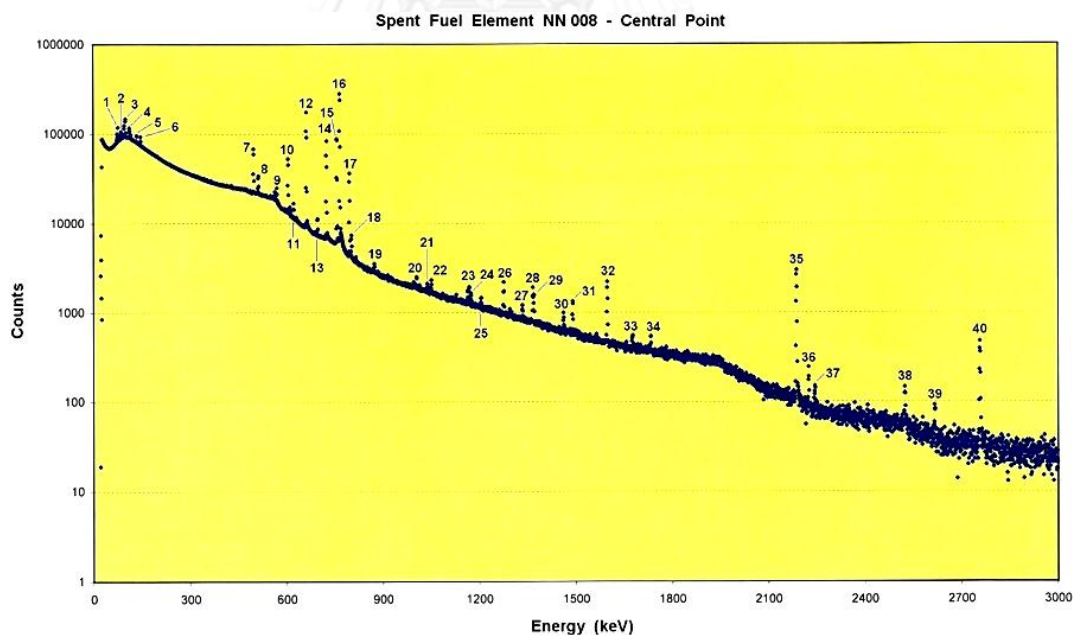
2.2.1 ผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Products) [7]

ผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Products) ที่ได้จากการแยกตัวของ $^{236}\text{U}^*$ อาจเป็นนิวไคลด์ต่าง ๆ ได้มากมาย ผลผลิตจากการแตกตัว (Fission fragment) มีได้มากกว่า 200 นิวไคลด์ ซึ่งมักจะมีเลขเชิงมวลอยู่ระหว่าง 72-161 และเป็นธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมระหว่าง $Z = 30$ (Zn) ถึง $Z = 65$ (Tb) ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ พวกที่มีเลขมวลน้อย ($A \sim 95$) และพวกที่มีมวลมาก ($A \sim 140$) โดยทั้ง 2 กลุ่มมีการสลายตัวต่อเนื่องให้ผลผลิตฟิชชันมากมายที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ และมีความสำคัญด้านรังสีวิทยา เช่น ^{137}Cs , ^{90}Sr และ ^{131}I ผลผลิตจากการแตกตัวมักเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีนิวตรอนในนิวเคลียสมาก ดังนั้นจึงสลายตัวให้อนุภาคบีตาอย่างต่อเนื่อง ได้นิวไคลด์ที่เป็นไอโซบาร์ หรือสลายตัวโดยการให้อนุภาคนิวตรอนออกมาโดยตรง โอกาสที่จะเกิดนิวไคลด์ใด ๆ จากปฏิกิริยาฟิชชันแสดงด้วยค่าผลลัพท์ฟิชชัน (fission yield) ซึ่งอาจมีค่าได้ตั้งแต่ 0-5% จนถึงประมาณ 7% ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พลังงานของผลผลิตจากการแตกตัวก็แยกเป็น 2 กลุ่มเช่นกันโดยกลุ่มที่มีมวลน้อยจะรับพลังงานไปมากกว่ากลุ่มที่มีมวลมาก

เนื่องจากผลผลิตฟิชชันเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากมายที่สลายตัวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นแม้ว่าหยุดเครื่องปฏิกรณ์ (shut down) แล้วก็ยังพบว่าเชื้อเพลิงนิวเคลียร์คงมีกัมมันตภาพรังสีและความร้อนสูงมาก เมื่อนำออกมาจากแกนปฏิกรณ์แล้วจำเป็นต้องแช่เก็บไว้ในสารระบายความร้อน เช่น น้ำ เพื่อลดความร้อนและรอให้กัมมันตภาพรังสีลดลงแล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วต่อไป ผลผลิตจากการแตกตัวและผลผลิตฟิชชันที่เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการสลายตัวให้ชนิดของรังสี พลังงาน และครึ่งชีวิตที่แตกต่างกันไปดังรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่วัดได้จากแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว



รูปที่ 2.4 ค่าผลลัพท์ฟิชชัน (fission yield) [3]



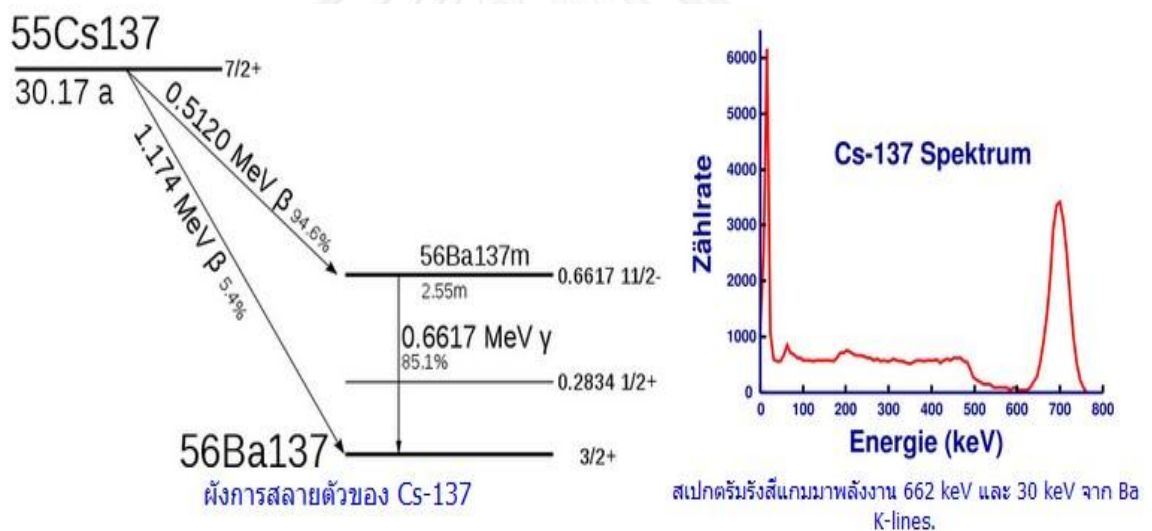
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู [6]

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพลังงานของไอโซโทปในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว [6]

Number	Energy (keV)	Radionuclide	Origin
1	74.969	-	Lead $K\alpha$
2	84.8	-	Lead $K\beta$
3	98.439	-	Uranium $K\alpha$
4	111.0	-	Uranium $K\beta$
5	133.5	^{144}Ce	Fission product
6	145.4	^{141}Ce	Fission product
7	497.1	^{103}Ru	Fission product
8	511.0	-	Annihilation e^-/e^+
9	569.3	^{134}Cs	Fission product
10	604.7	^{134}Cs	Fission product
11	621.9	^{106}Ru	Fission product
12	661.6	^{137}Cs	Fission product
13	696.5	^{144}Ce	Fission product
14	724.2	^{95}Zr	Fission product
15	756.7	^{95}Zr	Fission product
16	765.8	^{95}Nb	Fission product
17	795.8	^{134}Cs	Fission product
18	801.9	^{134}Cs	Fission product
19	873.2	^{154}Eu	Fission product
20	1004.8	^{154}Eu	Fission product
21	1038.6	^{134}Cs	Fission product
22	1050.3	^{106}Ru	Fission product
23	1167.9	^{134}Cs	Fission product
24	1173.2	^{60}Co	Activation product
25	1204.8	^{91}Y	Fission product
26	1274.5	^{154}Eu	Fission product
27	1332.5	^{60}Co	Activation product
28	1365.1	^{134}Cs	Fission product
29	1368.5	^{24}Na	Activation product
30	1460.8	^{40}K	Natural background
31	1489.2	^{144}Ce	Fission product
32	1596.5	^{140}Ba	Fission product
33	1674.7	-	SE ^{144}Ce 2185.7 keV
34	1731.9	-	DE ^{24}Na 2753.9 keV
35	2185.7	^{144}Ce	Fission product
36	2223.25	-	H (η , γ) D
37	2242.9	-	SE ^{24}Na 2753.9 keV
38	2521.7	^{140}Ba	Fission product
39	2614.6	^{208}Tl	Natural background
40	2753.9	^{24}Na	Activation product

2.2.2 ซีเซียม-137 (Caesium-137)

ซีเซียม-137 (^{137}Cs) [7] เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม ซึ่งเป็นผลผลิตจากการแตกตัวที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันมีสัดส่วน fission yield 6.337% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับไอโซโทปอื่นๆ ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30.17 ปี ประมาณ 95% สลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีบีตาแล้วกลายเป็นแบเรียม-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) ซึ่งเป็นไอโซโทปกึ่งเสถียร (metastable) หรือไอโซเมอร์ของแบเรียม-137 ($^{137\text{m}}\text{Ba}$, Ba-137m) ส่วนอีก 5% สลายตัวไปเป็นไอโซโทปเสถียรโดยตรง แบเรียม-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) สลายตัวให้รังสีแกมมา โดยมีครึ่งชีวิต 2.55 นาที ซีเซียม-137 ปริมาณ 1 กรัม มีกัมมันตภาพรังสี 3.215 เทราเบคเคอเรล (terabecquerel, TBq) โฟตอนจากไอโซโทปรังสีแบเรียม-137m มีพลังงาน 662 keV ดังรูปที่ 2.6 [7]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีจาก ซีเซียม-137

2.2.3 กัมมันตภาพ (activity, A)

กัมมันตภาพ (activity, A) [7] ของธาตุกัมมันตรังสี หมายถึง อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือจำนวนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา หน่วยของกัมมันตภาพ คือ เบกเกอร์ (Becquerel, Bq) หรือแบ็กเกอร์แรล เมื่อออกเสียงตามภาษาฝรั่งเศสเพื่อให้เกียรติกับแบ็กเกอร์แรล ผู้ค้นพบกัมมันตภาพรังสี ซึ่ง 1 Bq หมายถึง การสลายตัว 1 ครั้งต่อวินาที (disintegration per sec, dps) แต่หน่วยของกัมมันตภาพที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ คูรี (curie, Ci) ซึ่งกำหนดจากการสลายตัวของ ^{226}Ra หนัก 1 กรัม โดยมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} dps กัมมันตภาพเป็นส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A \propto N$$

$$A = \lambda N \quad (1)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

จากสมการ (2) เมื่อคูณตลอดด้วย λ จะได้

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

ดังนั้น

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$)

A_0 คือ กัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$)

N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ

A คือ กัมมันตภาพที่เวลา t ใดๆ

t คือ ระยะเวลาของการสลายตัว

λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

2.2.4 การแผ่รังสีแกมมา (Gamma-Ray Emission)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น ไม่มีมวล เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ในสุญญากาศ เป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถทะลุผ่านวัสดุได้ โดยความสามารถทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี และชนิดของวัสดุ เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวเป็นประจุได้จากการชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา หากได้รับรังสีในปริมาณมากอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

รังสีแกมมาส่วนมากจะมีการแผ่รังสี เมื่อเกิดการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาหรือปล่อยรังสีบีตา ก่อน แล้วธาตุที่เกิดหลังมีการแผ่รังสีแกมมา รังสีแกมมาสามารถตรวจวัดได้จากหัววัดรังสีแบบต่าง ๆ เช่น หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันนโซโซเดียมไอโอไดน์ (NaI) เป็นสารเปล่งแสงวาบ หรือหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดสารกึ่งตัวนำแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (High-purity germanium detector, HPGe) โดยคุณสมบัติของหัววัด หัววัดแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์จะแยกพลังงานได้ดีกว่าหัววัดโซเดียมไอโอไดน์ โดยทั่วไปรังสีแกมมาจากธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะมีพลังงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 keV ถึง 2.5 MeV ในการวัดรังสีแกมมาหัววัดทั้งสองชนิดจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น และในการวัดรังสีแกมมาที่พลังงานต่ำ (น้อยกว่า 100 keV) จะมีผลของการลดทอนในวัสดุตัวอย่างเองและผลจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ทำให้การวัดรังสีแกมมาในช่วงพลังงานดังกล่าวทำได้ยาก

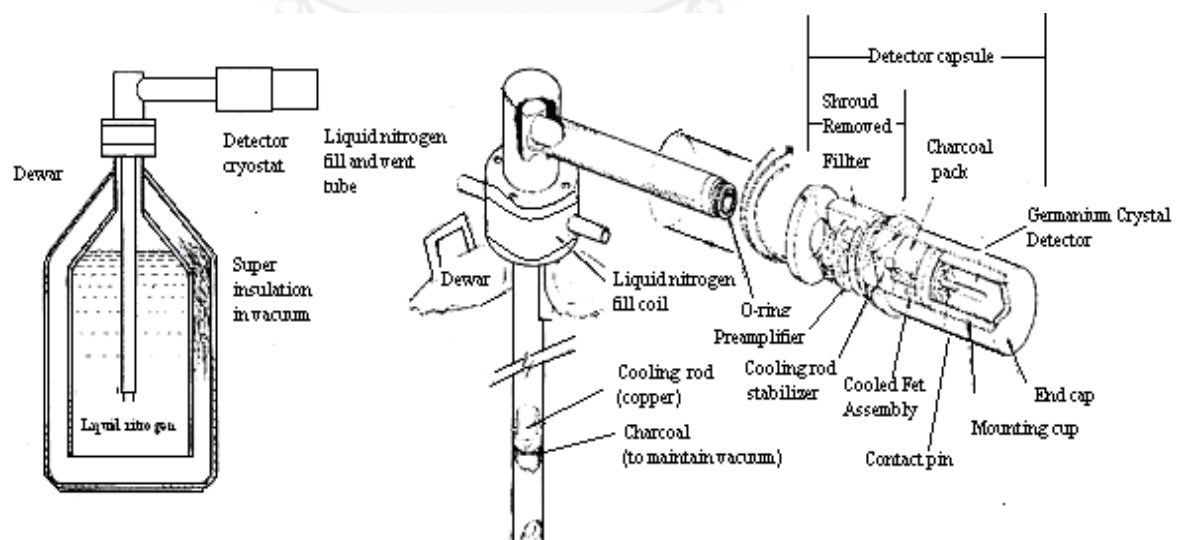
2.3 หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (High-purity germanium detector, HPGe) [8] ซึ่งข้อดีของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำคือมีความสามารถในการแยกแยะพลังงานสูงมีขนาดเล็กมี rise time ของการเกิดสัญญาณที่เร็วมาก (rise time หมายถึง ช่วงของเวลาที่สัญญาณมีขนาดจาก 10% - 90% ของค่า แอมพลิจูด) การตอบสนองมีการแปรเปลี่ยนเชิงเส้น กับ พลังงานที่ deposited ในหัววัด และไม่ขึ้นกับชนิดของรังสีไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก entrance window ของหัววัด

ข้อจำกัดในการใช้งานหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ คือ ราคาของหัววัดค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหัววัดรังสีชนิดอื่น และข้อจำกัดที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ความจำเป็นที่ต้องให้มีการทำงานของหัววัดที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส เป็นตัวลดอุณหภูมิ เหตุผลประการหนึ่งเป็นเพราะสารกึ่งตัวนำมีความสามารถในการนำกระแสได้สูง เมื่ออุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้นขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าที่เข้มข้นจ่ายให้แก่หัววัดจะมีขนาดสูงมากจนทำให้หัววัดเกิดความเสียหายอย่างแน่นอน

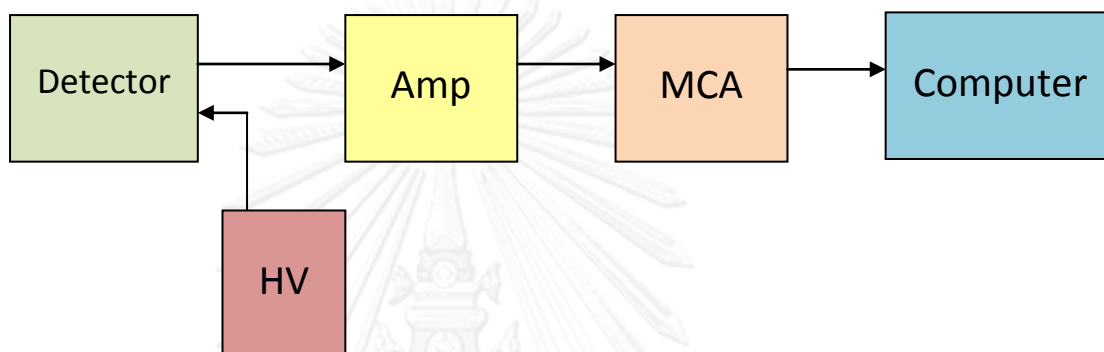
2.3.1 กลไกการทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ [8]

เมื่อนำสารเจือ (impurity) มาเติมลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ดังที่เรียกว่าการโด๊ป (doping) สารเจือที่เติมลงไปนี้จะแม้จะมีปริมาณน้อย แต่มีผลทำให้การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อนำสารเจือซึ่งเป็นธาตุในกลุ่ม 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส มาเติมลงในสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิคอน ทำให้ได้อิเล็กตรอนเป็นตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (majority carriers) เรียกสารกึ่งตัวนำนี้ว่าชนิดเอ็น (N-Type) แต่ถ้าเติมลงด้วยสารเจือซึ่งเป็นธาตุในกลุ่ม 3 ของตารางธาตุ เช่น ธาตุโบรอน ทำให้ได้โฮลเป็นตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ เรียกสารกึ่งตัวนำนี้ว่า ชนิดพี (P-Type) เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีมาชนกันเกิดรอยต่อที่เรียกว่า P-N junction อิเล็กตรอนจากผลึกชนิดเอ็นจะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลึกชนิดพี และโฮลจากผลึกชนิดพี จะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลึกชนิดเอ็น เกิดเป็นแนวขั้วไฟฟ้าบวกในผลึกชนิดเอ็น และแนวขั้วไฟฟ้าลบในผลึกชนิดพี โดยมีรอยต่ออยู่ตรงกลาง จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจากแนวขั้วบวกไปยังแนวขั้วลบ ตรงบริเวณระหว่างแนวขั้วไฟฟ้าจะไม่มีตัวนำประจุเหลืออยู่เลย เรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) บริเวณปลอดพาหะเป็นเสมือนตัวกลางกั้นในหัววัดรังสีชนิดบรรจุด้วยก๊าซเมื่อต่อขั้วศักย์ไฟฟ้าบวกเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และต่อขั้วลบเข้ากับด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกการต่อลักษณะนี้ว่า reverse bias จะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวกว้างขึ้น เมื่อรังสีตกกระทบในบริเวณปลอดพาหะ เกิดการถ่ายเทพลังงานได้เป็นคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล จำนวนมาก เกิดการเคลื่อนที่ประจุไปตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้า และเกิดมีกระแสไหลในวงจรที่ต่อครบ



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมหัววัดรังสีแบบ HPGe [8]

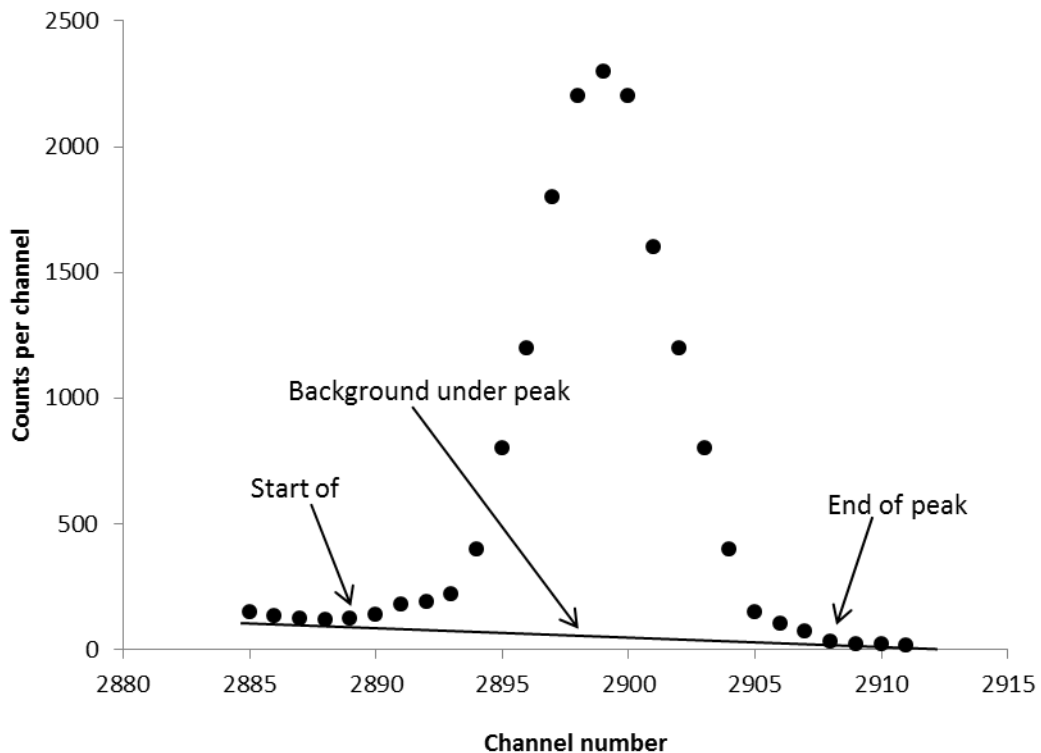
ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา โดยทั่วไปจะประกอบด้วย หัววัด และมัลติชัลแนลอนาไลเซอร์ โดยหัววัดจะต่ออยู่กับแอมพลิฟาย เพื่อขยายสัญญาณ และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจ่ายกระแสให้กับหัววัด ในแต่ละอันตรกิริยา พลังงานรังสีที่เข้ามาจะถ่ายทอดให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของหัววัดเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (MCA) และแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม



รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังการจัดระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา

2.3.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา [8]

สำหรับการหาความเข้มรังสีจากการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ทำได้โดยการวัดอัตราการนับสำหรับแต่ละนิวไคลด์ที่มีอยู่ในสเปกตรัม พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการคำนวณหาความเข้มรังสีก็คือ ความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area) เวลาที่ต้องการนับวัด (total live time) และเวลาที่ใช้จริง (total clock) ของแต่ละโฟโตพิกสำหรับนิวไคลด์ที่ต้องการหาความเข้มรังสีการเลือกโฟโตพิกขึ้นอยู่กับความเข้มรังสี ของนิวไคลด์นั้น ๆ เนื่องจาก มีโฟโตพิกของนิวไคลด์ตัวอื่น ๆ จากตัวอย่างปรากฏอยู่ในสเปกตรัมด้วย ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อน โดยปกติจะเลือกใช้ โฟโตพิกที่มีความเข้มสูงสุดเพราะโฟโตพิกที่มีความเข้มสูงสุดจะให้ความไวที่ดีกว่า ทำการหาพื้นที่ใต้พิก (total peak area) ที่สนใจโดยการรวมอัตราการนับของพิกในช่วงที่สนใจ และ ลบด้วยแบค-กราวด์ใต้พิกในช่วงเดียวกัน จะได้ความเข้มรังสีสุทธิ ซึ่งก็คือค่า อัตราการนับของนิวไคลด์ที่ต้องการ



รูปที่ 2.9 การหาความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area)

2.4 ผลการลดทอนของรังสีแกมมาเมื่อผ่านชั้นวัสดุ (Attenuation effects) [7]

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในสสารหรือตัวกลางใด ๆ บางส่วนของรังสีถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ บางส่วนจะกระเจิงไป และบางส่วนผ่านออกมาได้ ความเข้มของรังสีแกมมาลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อพิจารณารังสีแกมมาพลังงานเดี่ยว (Monoenergetic gamma rays) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง การสูญเสียความเข้มของรังสีในความหนา dx ของตัวกลางที่จุดใด ๆ เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น กับความหนาของตัวกลาง นั่นคือ

$$dI = -\mu I dx$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (4)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอน หน่วย โฟตอน/ซม- วินาที

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)
หน่วย ซม.⁻¹

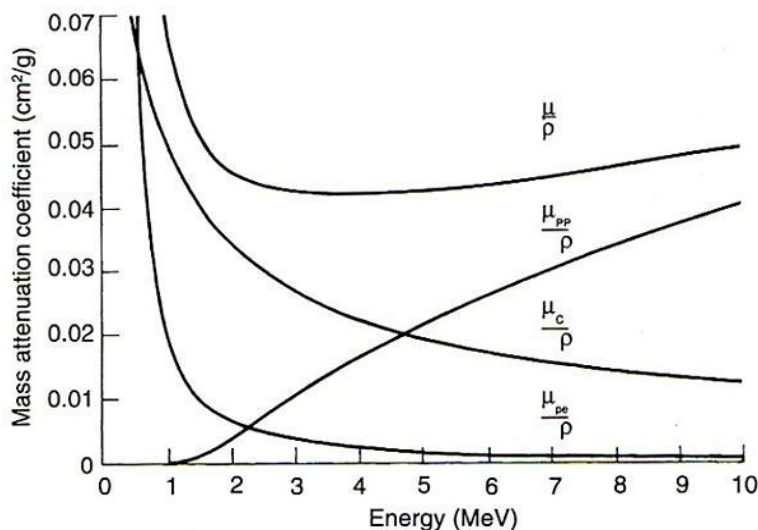
เมื่อรังสีแกมมากระทบตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 ประเภท อันได้แก่ การดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แพร่โปรดักชัน และการกระเจิงจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน ค่าที่ใช้ในสมการที่ 4 จึงเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากแต่ละอันตรกิริยา ดังสมการ

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_c + \mu_{pp} \quad (5)$$

เมื่อ μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม และ $\mu_{pe}, \mu_c, \mu_{pp}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น เนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก คอมป์ตัน และแพร่โปรดักชัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้ อาจกล่าวในพจน์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ซึ่งมีหน่วย $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} \quad (6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงมวลขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของสารที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยา ดังตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.10 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ ค่า μ_{pe}/ρ และ μ_c/ρ มีค่ามาก เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำ และลดลงเมื่อพลังงานมีค่ามากขึ้น ส่วน μ_{pp}/ρ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงาน และ μ/ρ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวม ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานประมาณ 3.5 MeV ตามรูปที่ 2.10 [9]



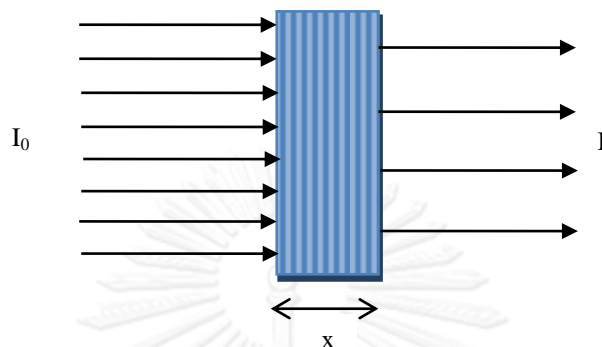
รูปที่ 2.10 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัสดุต่าง ๆ ของรังสีแกมมาในหน่วย ซม.²/กรัม

Material	Gamma-Ray Energy, MeV														
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.25	1.5	2	3	4	5
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0691	.0691	.0579	.0502
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0313	.0313	.0266	.0234
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.087	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0356	.0356	.0304	.0270
N	.15	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0357	.0357	.0306	.0273
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.087	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0359	.0359	.0309	.0276
Na	.151	.13	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0348	.0348	.0303	.0274
Mg	.16	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0360	.0360	.0315	.0286
Al	.161	.134	.12	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0353	.0353	.0310	.0282
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0367	.0367	.0323	.0296
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0358	.0358	.0316	.0290
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0371	.0371	.0328	.0302
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.7030	.0638	.0573	.0512	.0468	.0338	.0338	.0301	.0279
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0365	.0365	.0327	.0305
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0376	.0376	.0338	.0316
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0361	.0361	.0330	.0313
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.082	.0751	.0651	.0585	.0521	.0476	.0357	.0357	.0330	.0316
Mo	1.03	.389	.225	.13	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0365	.0365	.0349	.0344
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0510	.0459	.0367	.0367	.0355	.0355
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0370	.0370	.0360	.0361
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0405	.0405	.0402	.0409
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0414	.0414	.0411	.0418
Tl	5.16	1.8	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0420	.0420	.0416	.0423
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0421	.0421	.0420	.0426
U	10.6	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0445	.0445	.0440	.0446
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0636	.0567	.0517	.0357	.0357	.0307	.0274
Nal	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0367	.0367	.0351	.0347
H ₂ O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0396	.0396	.0339	.0301
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.087	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0363	.0363	.0317	.0287
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0384	.0384	.0329	.0292

ที่มา : Lamarsh, J.R. and Baratta, A.J. 2001. Introduction to nuclear engineering. [9]

ถ้า I_0 เป็นความเข้มเดิมของรังสีแกมมาพลังงานเดี่ยวที่เป็นลำขนานแคบ ๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนา x เซนติเมตร ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านตัวกลางออกมาได้ คือ I ดังรูปที่ 2.11 สามารถคำนวณหาค่า I ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 4 ได้ผลดังสมการที่ 7



รูปที่ 2.11 รังสีแกมมาความเข้ม I_0 กระทบสสารหนา x และมีความเข้มหลังผ่านสสาร I

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

เมื่อ

I_0 คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนก่อนผ่านสสาร

I คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนหลังผ่านสสารโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ

x คือ ความหนาของสสาร

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

จากค่า μ สามารถคำนวณค่า HVL (half value layer) และ TVL (tenth value layer) ซึ่งหมายถึง ความหนาของตัวกลางที่ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาลดลง $1/2$ เท่า และ $1/10$ เท่าของความเข้มเดิม ได้จากสมการ

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu} \quad (8)$$

$$\text{TVL} = \frac{2.3}{\mu} \quad (9)$$

2.5 การคำนวณค่าการเผาไหม้ (Burnup monitor activity and determination) [2]

2.5.1 การคำนวณค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว จากข้อมูลเดินเครื่องปฏิกรณ์

ค่าความแรงรังสีจากซีเซียม-137ที่ใช้เปรียบเทียบ (A_{cal}) กับค่าความแรงรังสีจากซีเซียม-137 จากการทดลอง (A_{exp}) ได้จากการคำนวณหาค่าความแรงรังสีแกมมาของซีเซียม-137 โดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่ เวลาสุทธิของการเดินเครื่องปฏิกรณ์ (*operation time, t_0*) มีหน่วยเป็นปี เวลาการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (*decay time, t_d*) มีหน่วยเป็นปี ค่านิวตรอนฟลักซ์ (Φ) โดยจะแปรผันตามกำลังในการเดินเครื่องปฏิกรณ์มีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ค่าจำนวนอะตอมของยูเรเนียม-235 (n_{U235}) จำนวนอะตอมจะได้มาจากน้ำหนักยูเรเนียมหน่วยกรัม ของเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง คูณกับค่าคงที่อะโวกาโดร์ (Avogadro's number, N_A) หารด้วยน้ำหนักอะตอม ค่าเปอร์เซ็นต์ฟิชชันยิวของซีเซียม-137 (y_{Cs137}) ค่าภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section) ของการเกิดฟิชชันของนิวตรอนกับยูเรเนียม-235 (σ_{U235}) มีหน่วยต่อตารางเซนติเมตร โดยค่านี้จะแปรผันตามอุณหภูมิของเชื้อเพลิงซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ $\sigma_f = 0.8862f(T)\sigma_{fo} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{0.5}$ [10] และค่าคงตัวของการสลายตัวของซีเซียม-137 (λ_{Cs137}) มีหน่วยต่อวินาที โดยค่าความหนาแน่นอะตอมของซีเซียม-137 (N_{Cs137}) หน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีการคำนวณตามสมการด้านล่าง

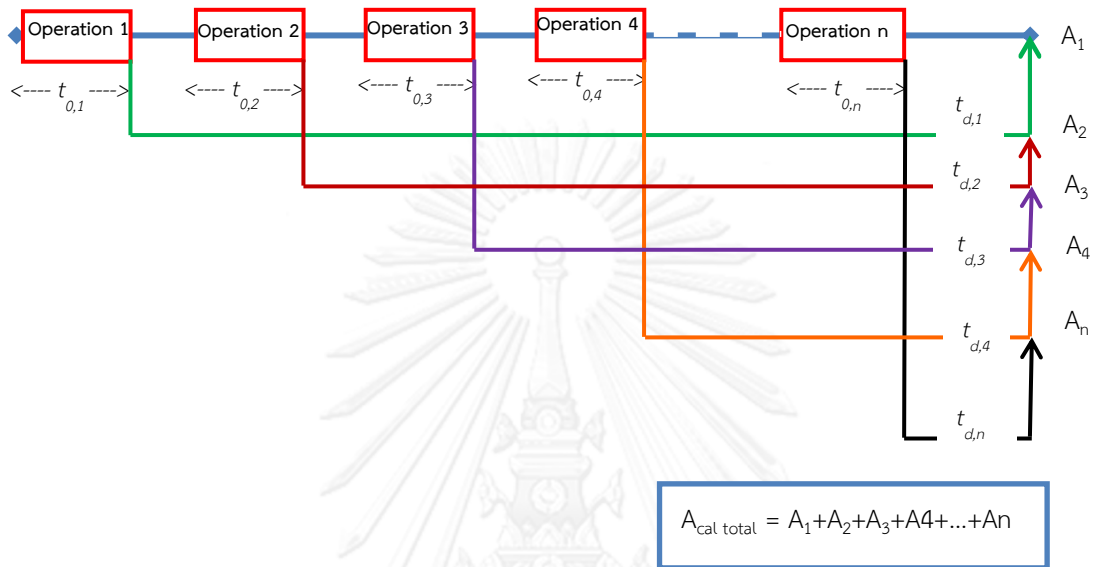
$$\frac{dN_{Cs137}}{dt} = (y_{Cs137} \times n_{U235} \times \sigma_{U235} \times \Phi) - (\lambda_{Cs137} N_{Cs137}) \quad (10)$$

$$N_{Cs137} = \left(\frac{y_{Cs137} \times n_{U235} \times \sigma_{U235} \times \Phi}{\lambda_{Cs137}} \right) (1 - e^{-\lambda_{Cs137} t_0}) (e^{-\lambda_{Cs137} t_d}) \quad (11)$$

$$A_{cal} = (y_{Cs137} \times n_{U235} \times \sigma_{U235} \times \Phi) (1 - e^{-\lambda_{Cs137} t_0}) (e^{-\lambda_{Cs137} t_d}) \quad (12)$$

โดยสมการที่ (11) ได้มาจากการหาอนุพันธ์ค่าความหนาแน่นอะตอมของซีเซียม-137 เทียบกับเวลาในสมการที่ (10) เมื่อนำสมการที่ (11) หารด้วยค่าคงตัวของการสลายตัวของซีเซียม-137 จะได้ค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 ณ เวลาที่สนใจดังในสมการที่ (12) หากมีการใช้งานแท่งเชื้อเพลิง

โดยการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์หลายครั้ง สามารถคำนวณค่าความแรงรังสีแต่ละคาบเวลาได้ และนำผลค่าความแรงรังสีที่คำนวณได้รวมกันจะได้ค่าความแรงรังสีทั้งหมดที่เหลือนในแท่งเชื้อเพลิงที่สนใจตั้งแผนผังการคำนวณในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนผังการคำนวณหาค่าความแรงรังสีรวมของซีเซียม-137 ในแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

2.5.2 การคำนวณอัตราปริมาณรังสีของซีเซียม-137 จากการทดลอง

การหาค่าการเผาไหม้จากอัตราปริมาณรังสีที่วัดจากอุปกรณ์วัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วตามสมการที่ 13 [2]

$$A_{exp} = \frac{c}{(\epsilon r f)} \quad (13)$$

เมื่อ

A_{exp} = อัตราปริมาณรังสีของ ^{137}Cs ที่ได้จากการทดลอง หน่วย dps, Bq

C = พื้นที่ใต้พีค (peak area) หน่วย cps

ϵ = ประสิทธิภาพสุทธิ (absolute efficiency) ของระบบวัดรังสี

r = สัดส่วนการให้รังสีแกมมาโดยจะพิจารณาจาก ^{137}Cs

f = ค่าการลดทอนในเนื้อเชื้อเพลิงของรังสีแกมมา ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

การคำนวณการลดทอนในวัสดุข้างต้น

โฟโต้พีค (photopeak) ของ ^{137}Cs ที่พลังงาน 662 keV

2.5.3 การคำนวณค่าการเผาไหม้จากอัตราปริมาณรังสีของซีเซียม-137

ในการคำนวณค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว หลังจากการคำนวณค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วจากข้อมูลเดินเครื่องปฏิกรณ์ (A_{cal}) ตามวิธีการในหัวข้อ 2.5.1 และคำนวณอัตราปริมาณรังสีของซีเซียม-137 จากการทดลอง (A_{exp}) ตามวิธีการในหัวข้อ 2.5.2 แล้วจึงคำนวณหาจำนวนอะตอมของซีเซียม-137 (N_{Cs137}) เมื่อค่าคงตัวของการสลายตัวของซีเซียม-137 (λ_{Cs137}) มีหน่วยต่อวินาที ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14)

$$A_{Cs137} = \lambda_{Cs137} N_{Cs137}$$

$$N_{Cs137} = \frac{A_{Cs137}}{\lambda_{Cs137}} \quad (14)$$

เมื่อได้จำนวนอะตอมของซีเซียม-137 (N_{Cs137}) และทราบค่าเปอร์เซ็นต์ฟิชชันยิวของซีเซียม-137 (γ_{Cs137}) แล้วสามารถคำนวณจำนวนอะตอมของยูเรเนียม-235 (N_{235}^f) ที่เกิดการฟิชชันได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (15)

$$N_{235}^f = \frac{N_{Cs137}}{\gamma_{Cs137}} \quad (15)$$

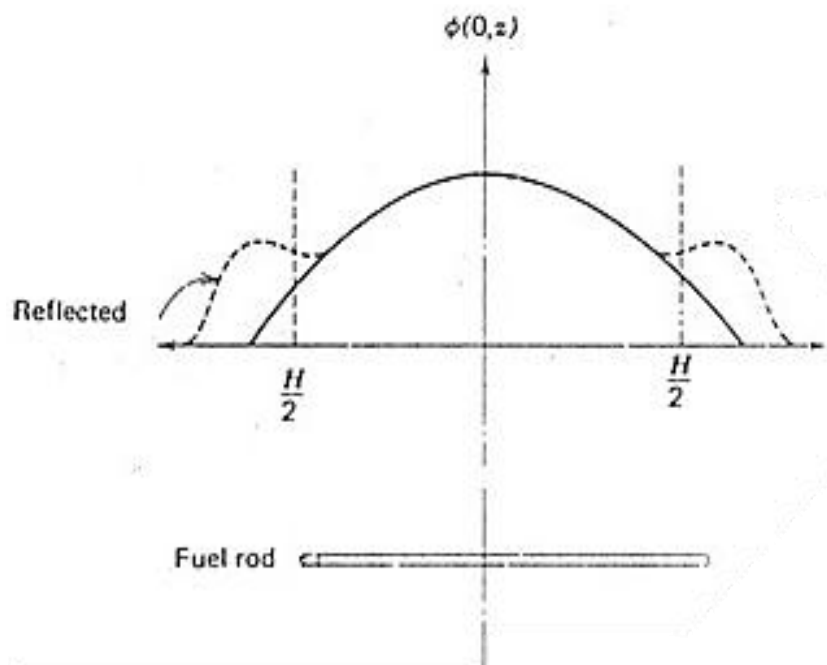
เมื่อทราบข้อมูลปริมาณยูเรเนียม-235 (N_{235}^0) และปริมาณยูเรเนียม - 238 (N_{238}^0) เริ่มต้นจากข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตแท่งเชื้อเพลิงและปริมาณของยูเรเนียม-235 (N_{235}^f) ที่เกิดการฟิชชันจึงทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้วได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (16) [2]

$$B(\%) = \frac{N_{235}^0 - N_{235}^f}{N_{235}^0 + N_{238}^0} \times 100\% = \frac{N_{235}^0 - N_{235}^f}{\frac{N_{235}^0}{0.93}} \times 100\% \quad (16)$$

เมื่อ $B(\%)$ = ค่าเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้
 N_{235}^0 = จำนวนอะตอมเริ่มต้นของยูเรเนียม - 235
 N_{235}^f = จำนวนอะตอมหลังการเผาไหม้ของยูเรเนียม - 235
 N_{238}^0 = จำนวนอะตอมเริ่มต้นของยูเรเนียม - 238

2.6 โพรไฟล์นิวตรอนข้ามแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

การเผาไหม้ไปของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เกิดขึ้นโดยอาศัย ปฏิกิริยาที่เหมาะสมหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ ความหนาแน่นของนิวตรอน (flux neutron) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชันโดยนิวตรอนเหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีพลังงานสูงซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ไม่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นิวตรอนเหล่านี้จึงจำเป็นต้องถูกลดทอนหรือหน่วงพลังงานลง (moderate) ให้อยู่ในย่านที่เรียกว่าเทอร์มอลนิวตรอนหรือนิวตรอนช้า โดยนิวตรอนช้าจะมีช่วงพลังงานที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป สารที่ทำหน้าที่ลดทอนพลังงานนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1 คือ น้ำ ในทางทฤษฎีลักษณะโพรไฟล์ของนิวตรอนช้าในแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิงจะเป็นรูปโคไซน์ฟังก์ชัน (cosine function) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งบริเวณช่วงกลางของแท่งเชื้อเพลิงจะมีความหนาแน่นของนิวตรอนช้ามากที่สุด ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้มากกว่าบริเวณหัวและท้ายของแท่งเชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณปลายทั้งสองของแท่งเชื้อเพลิงนิวตรอนมีโอกาสที่จะเล็ดลอดออกไปจากแกนปฏิกรณ์ได้มากที่สุดทำให้ความหนาแน่นของนิวตรอนในบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำลง



รูปที่ 2.13 โพรไฟล์ความหนาแน่นของนิวตรอนช้าตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคการวัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้แล้วโดยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา ใช้หลักการการวัดรังสีจากไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวของธาตุหนักหรือเรียกปฏิกิริยาเผาไหม้ในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และนำค่าวัดรังสีนั้นมาคำนวณย้อนกลับเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับวิธีทางการคำนวณที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเป็นการยืนยันข้อมูล โดยวิธีการวัดและวิธีการคำนวณค่าเผาไหม้จึงทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

- การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ
- การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา
- การคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว
- การวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ
- การวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว

3.1 การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ

3.1.1 การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมา

การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

1) ต้นกำเนิดรังสี คือ แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วที่ต้องการทราบความแรงรังสีจากซีเซียม-137 เพื่อแปลงผลเป็นค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง

2) หัววัดรังสี ในงานวิจัยนี้ ต้องการหัววัดรังสีที่มีความสามารถในการแยกแยะพลังงานจากไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาได้ดี

3) ระบบวิเคราะห์สัญญาณจากหัววัดรังสี จะใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ที่แสดงผลในคอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาได้

ระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้งานมีแผนผังการวัดดังแสดงใน รูปที่ 3.1



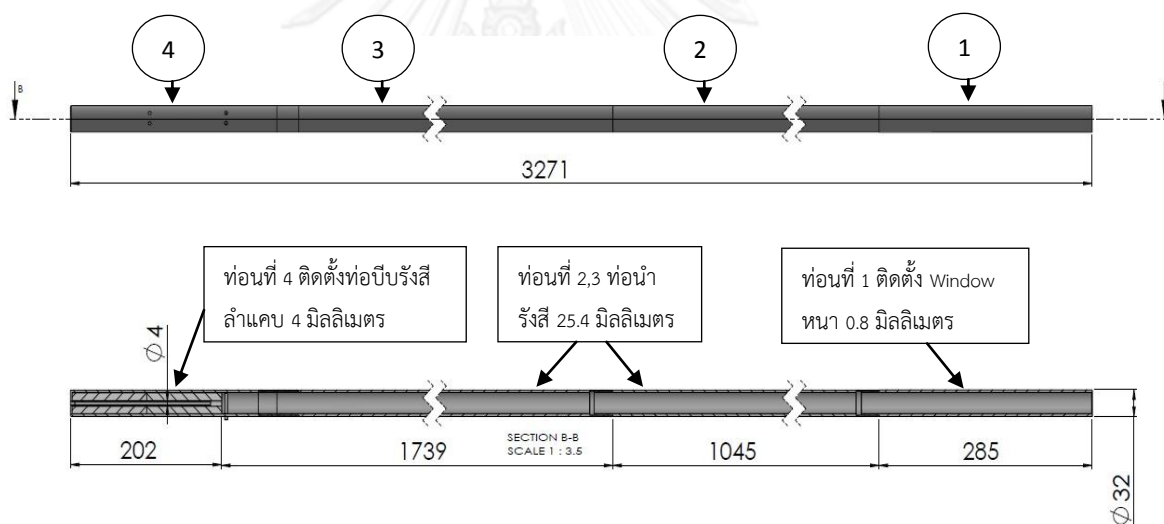
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

3.1.2 การออกแบบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ

การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องมือวัดรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใต้น้ำ ใช้โปรแกรมเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในขั้นตอนการเขียนแบบ โดยโปรแกรมเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ก่อนทำการสร้างชิ้นงานจริง โดยมีแนวทางการออกแบบส่วนประกอบต่างๆดังนี้

3.1.2.1 แนวทางการออกแบบท่อนำรังสีพร้อมอุปกรณ์บังคับรังสีลำแคบ

ท่อนำรังสีเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียม เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่แข็งแรง น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนเมื่อใช้งานใต้น้ำได้ดีและหาซื้อได้ง่าย โดยแบ่งท่อนำรังสีออกเป็นสี่ท่อนต่อกันด้วยเกลียวเพื่อสะดวกในการขนย้าย ท่อนแรกติดตั้งหน้าต่างรับรังสี ท่อนที่สองและสามเป็นท่อนำรังสี ท่อนที่สี่ติดตั้งคอลลิเมเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หน้าต่างรับรังสี ต้องเป็นวัสดุที่มีการลดทอนของรังสีที่น้อยมีความแข็งแรงและหาซื้อได้ง่าย โดยได้เลือกใช้อะลูมิเนียมที่ความหนา 0.8 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร อุปกรณ์บีบรังสีลำแคบในงานวิจัยนี้ใช้เพื่อคัดเลือกรังสีแกมมาที่มาจากแท่งเชื้อเพลิงแท่งที่ทำการวัดเท่านั้นที่จะผ่านเข้าสู่หัววัดรังสีโดยเลือกใช้วัสดุท่ออะลูมิเนียมกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร วัสดุกำบังรังสีส่วนเกินในท่อคอลลิเมเตอร์ วัสดุที่เลือกใช้ต้องมีเลอะตอมที่สูงเพื่อสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีและหาได้ง่ายในท้องตลาด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตะกั่วโดยหล่อขึ้นรูปให้สามารถประกอบเข้าด้านในของท่อคอลลิเมเตอร์ส่วนที่สี่ได้โดยส่วนประกอบของท่อบังคับลำรังสีแสดงดังรูปที่ 3.2



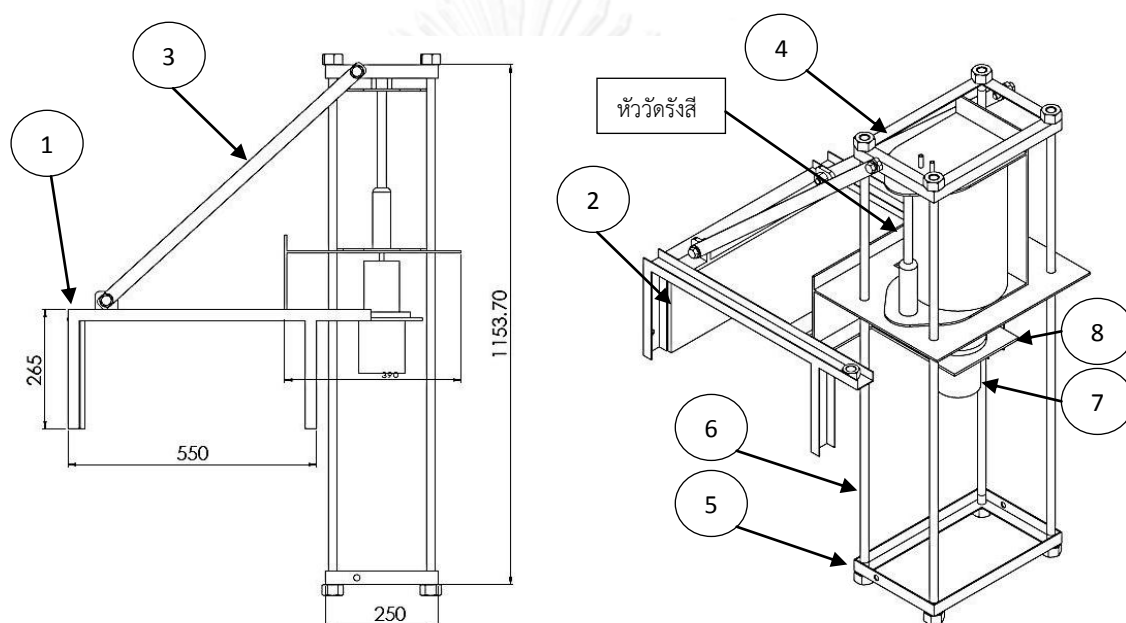
รูปที่ 3.2 แผนภาพท่อนำรังสีพร้อมอุปกรณ์บังคับรังสีลำแคบในหน่วยมิลลิเมตร

ส่วนประกอบท่อนำรังสีพร้อมอุปกรณ์บังคับรังสีลำแคบ

- 1) ท่อนำรังสีที่ติดตั้งหน้าต่างรับรังสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร หนา 0.8 มิลลิเมตร
- 2) ท่อนำรังสีส่วนล่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ยาว 1045 มิลลิเมตร
- 3) ท่อนำรังสีส่วนกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ยาว 1739 มิลลิเมตร
- 4) ท่อนำรังสีส่วนบนพร้อมติดตั้งอุปกรณ์บังคับรังสีลำแคบเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 202 มิลลิเมตร
- 5) ตะกั่ววางท่อคอลลิเมเตอร์น้ำหนัก 1 กิโลกรัม

3.1.2.2 แนวทางการออกแบบชุดรองรับหัววัดรังสีและจับยึดกับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ

การออกแบบฐานวางหัววัดรังสีต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักหัววัดรังสีและส่วนประกอบอื่นๆได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กแผ่นเชื่อมประกอบพร้อมทำสีกันสนิมซึ่งมีความแข็งแรงทนทานและมีขายทั่วไปในท้องตลาด โครงยึดฐานวางหัววัดรังสีเข้ากับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯใช้การออกแบบเป็นการบีบยึดโครงสร้างอุปกรณ์กับผนังบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อความสะดวกในการติดตั้งโดยไม่ทำความเสียหายกับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ



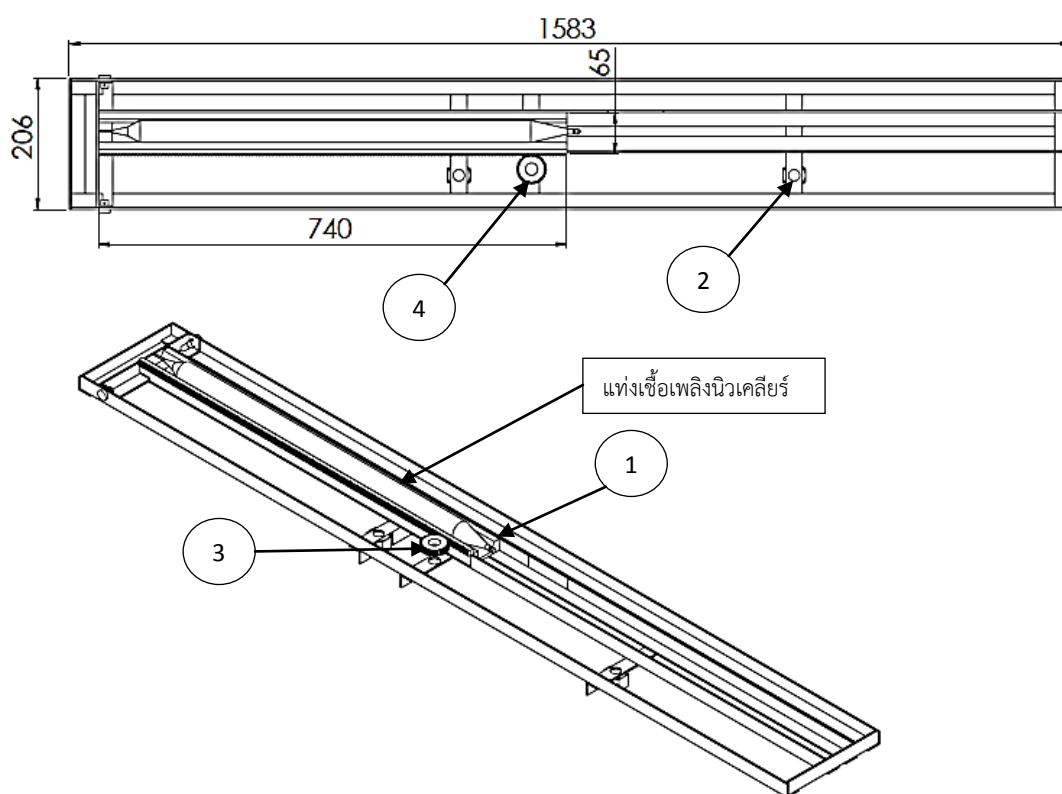
รูปที่ 3.3 แผนภาพการออกแบบชุดรองรับหัววัดรังสีและอุปกรณ์จับยึดกับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ

ส่วนประกอบชุดรองรับหัววัดรังสีและจับยึดกับบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ

- 1) ฐานวางหัววัดรังสี
- 2) โครงยึดบ่อเครื่องปฏิกรณ์
- 3) แผ่นประคองหัววัดรังสี
- 4) โครงยึดหัววัดรังสีด้านบน
- 5) โครงยึดหัววัดรังสีด้านล่าง
- 6) เสาประคองหัววัดรังสี
- 7) เบ้าตะกั่วครอบหัววัดรังสีกันรังสีจากสิ่งแวดล้อม
- 8) แผ่นจับยึดท่อบังคับลำรังสี

3.1.2.3 แนวทางการออกแบบชุดวางแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำและกลไกการเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง

ชุดวางแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักแท่งเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักประมาณ 3.54 กิโลกรัม ใต้ และต้องมีกลไกการยกการเปลี่ยนระนาบของแท่งเชื้อเพลิงจากแนวตั้งเป็นแนวนอนเพื่อให้ใช้งานสัมพันธ์กับอุปกรณ์เคลื่อนย้ายเชื้อเพลิงใต้น้ำที่มีอยู่เดิมแล้ว พร้อมถาดวางแท่งเชื้อเพลิงต้องสามารถเลื่อนแท่งเชื้อเพลิงเพื่อวัดรังสีตามระยะต่างๆที่กำหนดได้ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดต้องไม่เกิดการกัดกร่อนเมื่อใช้งานใต้น้ำ โดยในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่ใช้งานใต้น้ำจะใช้วัสดุอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 แผนภาพการออกแบบชุดวางแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำและกลไกการเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง

ส่วนประกอบชุดวางแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำและกลไกการเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง

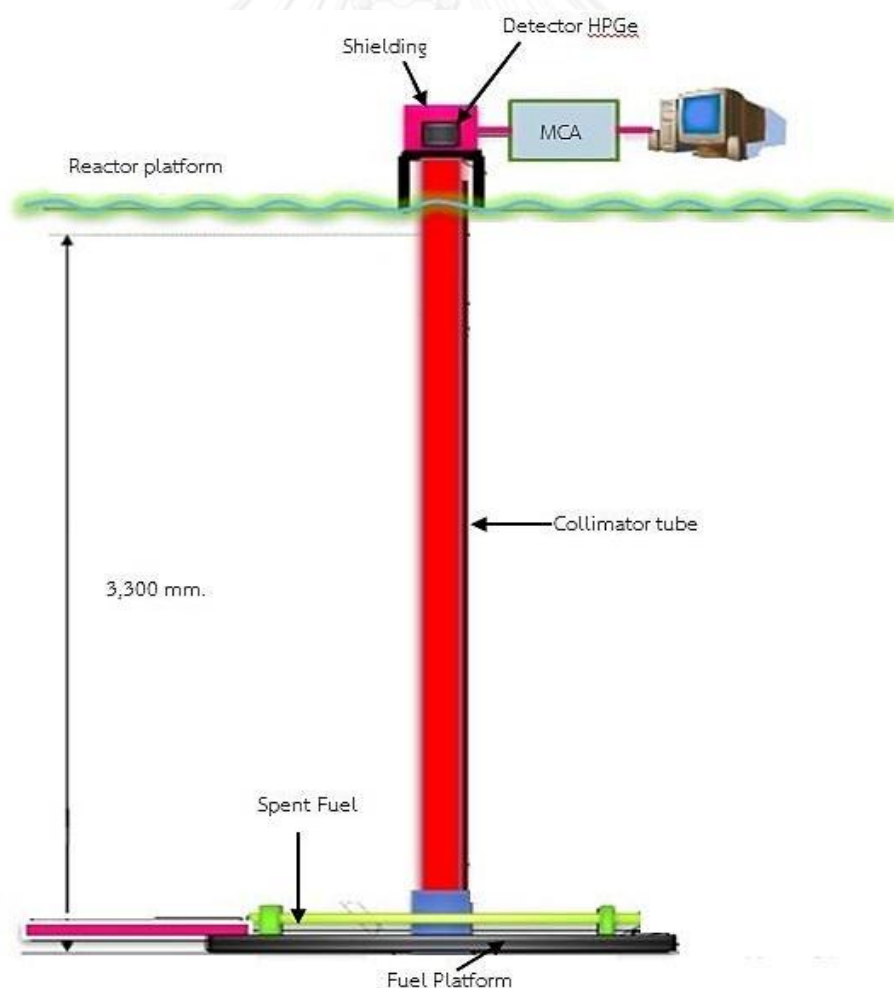
- 1) ถาดวางแท่งเชื้อเพลิงที่สามารถเลื่อนได้
- 2) เสายึดถาดวางแท่งเชื้อเพลิง
- 3) ชุดเฟืองขับถาดวางแท่งเชื้อเพลิง
- 4) แกนขับชุดเฟืองเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง
- 5) พวงมาลัยหมุนชุดเฟืองขับถาดเลื่อนแท่งเชื้อเพลิง

3.1.2.4 แนวทางการออกแบบระบบวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

ระบบวัดที่ใช้หัววัดรังสีที่มีความสามารถในการแยกแยะพลังงานได้ดี และใช้อุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องที่สามารถบันทึกค่าความแรงรังสีไอโซโทปรังสีที่มีพลังงานต่างๆในแง่เชื้อเพลิงใช้แล้วได้ โดยแสดงและบันทึกผลผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์

ส่วนประกอบของระบบวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

- 1) ระบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ที่ใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe, Canberra Model GC3021) ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 30%
- 2) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA) ของ Canberra รุ่น DSA 1000
- 3) คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูล
- 4) โปรแกรม Genie 2000 ของ Canberra



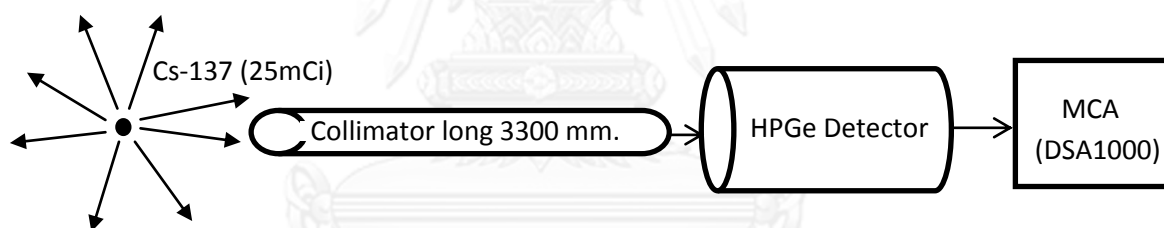
รูปที่ 3.5 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดค่าเผาไหม้แห่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

3.1.3 การเลือกวัสดุและสร้างอุปกรณ์ของระบบวัดรังสีใต้น้ำ

เมื่อทำการออกแบบระบบวัดและเขียนแบบอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบวัดรังสีใต้น้ำเรียบร้อยแล้ว จึงจัดหาวัสดุที่จะใช้ขึ้นรูปตามที่ออกแบบไว้ โดยวัสดุที่เลือกใช้ในส่วนของใช้งานใต้น้ำ จะใช้ลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักในการขึ้นรูปขึ้นงานเพราะสามารถทำการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับน้ำขณะใช้งาน ส่วนโครงสร้างที่ไม่สัมผัสกับน้ำ เช่น ส่วนโครงสร้างจะขึ้นรูปด้วยเหล็กและเคลือบสีป้องกันสนิม เพราะเหล็กมีความแข็งแรงและราคาถูกสามารถรับน้ำหนัก ชิ้นส่วนใต้น้ำและหัววัดรังสีได้

3.2 การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

การทดสอบท่อกออลิเมเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ในการทดสอบเหมือนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแหล่งเชื้อเพลิงในปอเครื่องปฏิกรณ์ฯ จริง เพื่อหาประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาโดยในการทดสอบจะต้องใช้ต้นกำเนิดรังสี ซีเซียม -137 ที่ทราบค่าความแรงรังสีและมีความแรงรังสีที่เหมาะสมที่จะแผ่รังสีผ่านอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ ซึ่งในการทดสอบท่อกออลิเมเตอร์ มีแผนผังและรายการวัสดุอุปกรณ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังการจัดระบบการสอบเทียบท่อบังคับลำรังสี

3.2.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ท่อท่อบังคับลำรังสี
- 2) ตะกั่วป้องกันรังสีจากสิ่งแวดล้อม
- 3) ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซีเซียม-137
- 4) อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ซึ่งในการทดลองใช้จับท่อบังคับลำรังสี
- 5) อุปกรณ์วางชิ้นงานแบบปรับระดับความสูงได้ ใช้วางต้นกำเนิดรังสี

6) หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe)

ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 30% ของ Canberra

7) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA) ของ Canberra รุ่น DSA 1000

8) คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูล

9) โปรแกรม Genie-2000 ของ Canberra

3.2.2 วิธีการสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

การจัดระบบการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีแกมมาของท่อนำรังสีที่มีระบบบังคับรังสีลำแคบหรือท่อคอลลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีร่วมกับระบบวิเคราะห์สเปกตรัมแบบหลายช่อง (MCA) ร่วมกับโปรแกรมแสดงผล ที่มีความสามารถในการแยกพลังงานรังสีแกมมาจากไอโซโทปที่สนใจได้

ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ความแรงรังสีเริ่มต้น 25 มิลลิวูรี เมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2545 เมื่อเวลาผ่านไปความแรงรังสีจะลดลงตามสมการที่ (9)

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

โดยขณะทำการทดสอบท่อคอลลิเมเตอร์ใช้งานต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวในวันที่ 26 ตุลาคม 2556 สามารถหาความแรงรังสีที่เหลืออยู่ได้ ต้นกำเนิดรังสีก่อนใช้งานจะบรรจุในกระปุกตะกั่วโดยจะมีฝาเปิดเมื่อใช้งาน โดยขณะทำการทดสอบจะเปิดฝากระปุกตะกั่วเพื่อให้รังสีแผ่เข้าสู่ท่อคอลลิเมเตอร์ ลำรังสีจะผ่านหน้าต่างอะลูมิเนียมที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร เข้าสู่ท่อนำรังสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.4 มิลลิเมตร ยาว 3300 มิลลิเมตร โดยส่วนปลายท่อนำรังสีจะติดตั้งท่อบังคับลำรังสีลำแคบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยเมื่อรังสีแกมมาผ่านท่อนี้จะสามารถตัดการรบกวนจากรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ ได้ และด้านปลายของท่อนำรังสีจะเป็นท่อเปิดขนาด 4 มิลลิเมตร เพื่อให้ลำรังสีเดินทางเข้าสู่หัววัดรังสีโดยมีตะกั่วกันรังสีจากสิ่งแวดล้อมอีกชั้นเพื่อป้องกันรังสีจากแหล่งกำเนิดอื่นเข้าสู่หัววัดรังสี

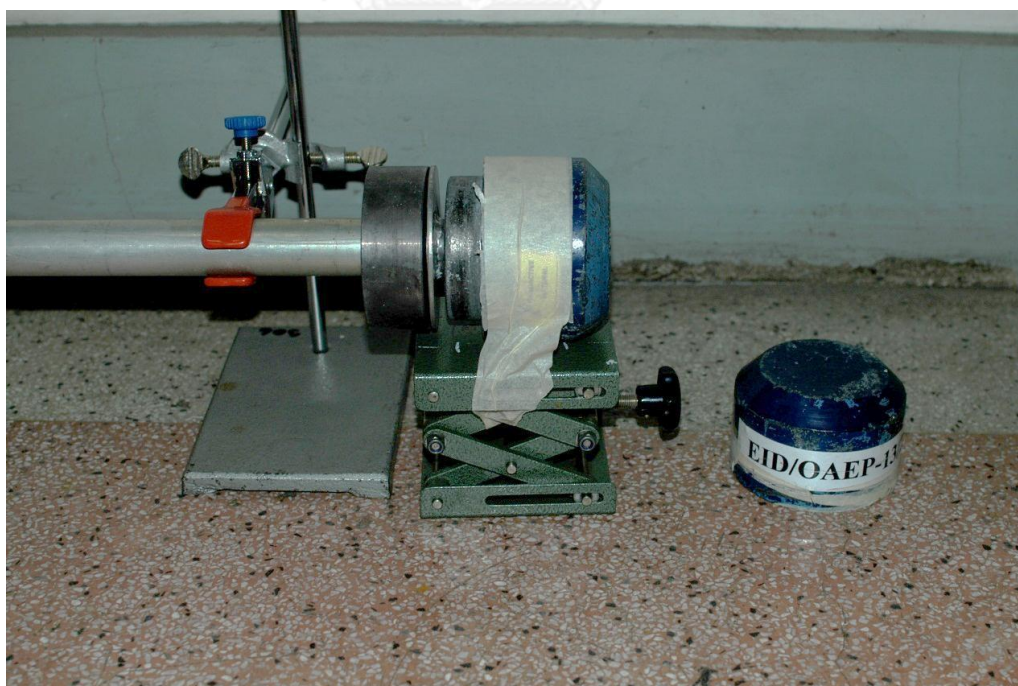
เมื่อระบบวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีวัดโฟตอนจากซีเซียม-137 ที่เหลือจากการรบกวนการคัดเลือกลำรังสีจะทำให้ทราบจำนวนนับของรังสีแกมมาที่วัดได้เป็น จำนวนโฟตอนต่อวินาที (cps) สามารถนำค่าที่ได้เทียบกับค่าการปลดปล่อยของต้นกำเนิดรังสีเป็นจำนวนโฟตอนที่ปลดปล่อย

ต่อวินาที (dps) จึงสามารถหาประสิทธิภาพของการวัดได้จากสมการ (10) และมีการจัดระบบการวัดตามรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ค่าวัดได้}}{\text{ค่าปลดปล่อยออก}} = \frac{\text{cps}}{\text{dps}} \times 100\% \quad (10)$$



รูปที่ 3.7 หัววัดรังสี HPGe ที่ใช้สอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

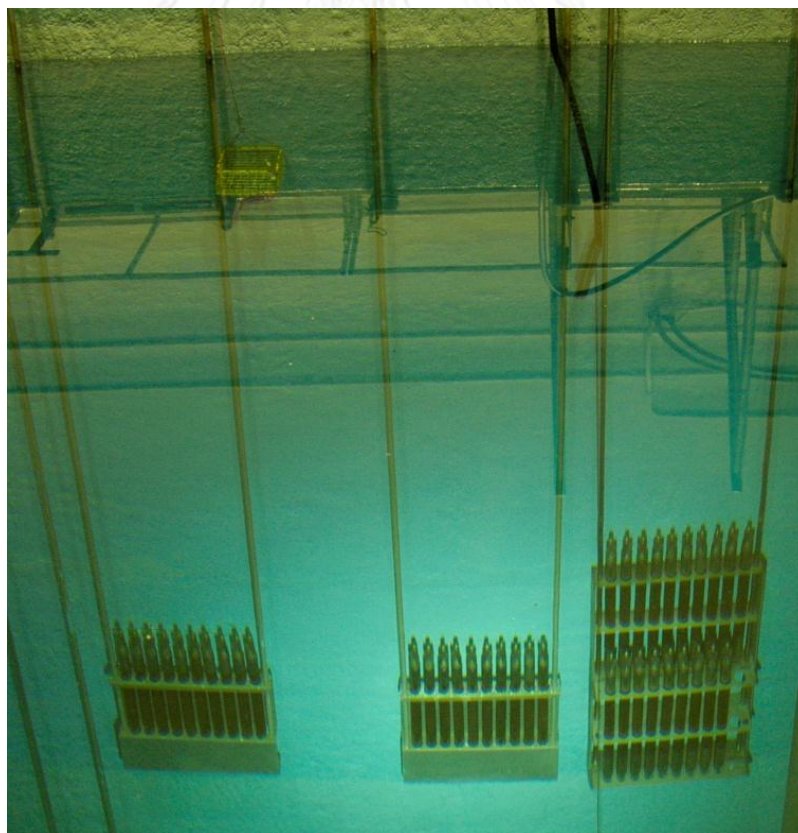


รูปที่ 3.8 ต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ที่ใช้สอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

3.3 การคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว

ในการทดลองจะทำการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงจำนวน 3 แท่ง โดยแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วของเครื่อง ปว.-1/1 ได้เก็บรักษาแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำความลึกอย่างน้อย 3 เมตร ในช่องเก็บเชื้อเพลิงตามรูปที่ 3.9 ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจะมีผลผลิตฟิชชันที่เกิดจากการแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียมหลายตัว ในการวิจัยนี้ได้เลือกวัดรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 เป็นไอโซโทปรังสีที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันสูง (fission yield) และมีค่าครึ่งชีวิตยาว 30.17 ปี และมีพลังงานของรังสีแกมมาค่อนข้างสูงจึงเหมาะสมที่จะถูกคัดเลือกมาใช้งาน ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 โดยแท่งเชื้อเพลิงที่คัดเลือกมาทำการทดลองจะต้องเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่มีข้อมูลดังนี้

- 1) ต้องมีข้อมูลปริมาณยูเรเนียม-235 เริ่มต้น
- 2) ต้องมีข้อมูลประวัติการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งเพื่อจะใช้ข้อมูลในการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการวัดรังสีของแท่งเชื้อเพลิง
- 3) มีค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละแท่งที่ทราบค่าจากการคำนวณโดยโปรแกรมทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์

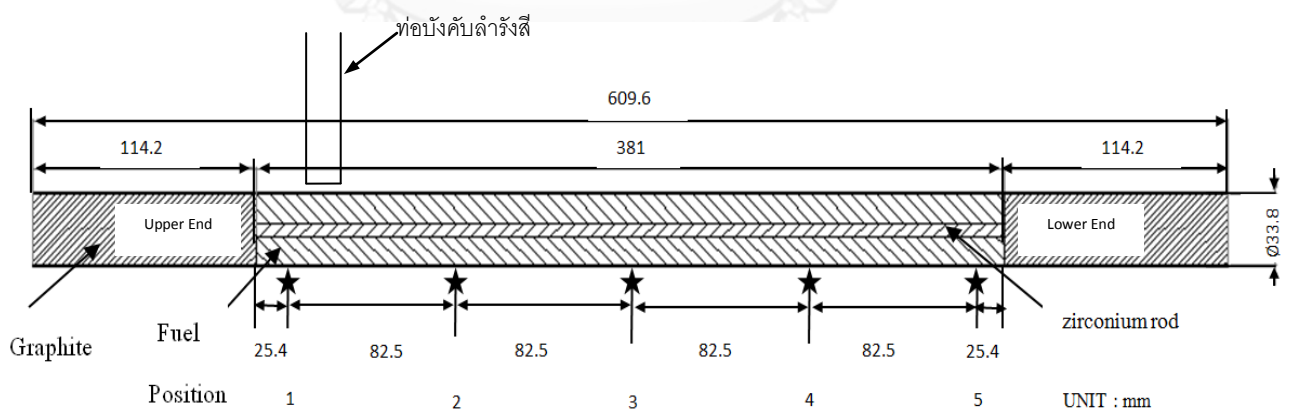


รูปที่ 3.9 การเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในช่องเก็บแล้วใต้น้ำของเครื่อง ปว.-1/1

3.4 การวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ

อุปกรณ์วัดค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงจะใช้วัดแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์วิจัย ปบว.1/1 ได้เฉพาะใต้น้ำในบ่อเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว เพราะแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจะมีรังสีจากการสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวในเชื้อเพลิงใช้แล้วที่แผ่รังสีมีความแรงแรงรังสีสูงจึงต้องทำการวัดรังสีแท่งเชื้อเพลิงที่อยู่ใต้น้ำและต้องมีระดับความลึกของน้ำอย่างน้อย 3 เมตร จึงจะป้องกันรังสีที่จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดอันตรายได้ โดยบริเวณขอบบ่อเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการทดลองจะมีอัตราการแผ่รังสีประมาณ 2-3 ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง ในการทดลองจะติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง ได้แก่ อุปกรณ์วางและจับยึดแท่งเชื้อเพลิง (platform), ชุดท่อนำรังสี (beam collimator), ระบบขับเคลื่อนชุดท่อนำรังสี เพื่อการวัดแต่ละจุดของแท่งเชื้อเพลิงและหัววัดรังสีแบบ coaxial high-purity germanium (HPGe) ซึ่งมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้า (preamplifier) ต่อรวมอยู่ในชุดหัววัด, ชุดประมวลผลสัญญาณจากหัววัดรังสีจะต่อสัญญาณจาก อุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าเข้าอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องและเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลพร้อมบันทึกข้อมูลที่อ่านได้จากการวัดรังสีของตำแหน่งต่างๆ บนแท่งเชื้อเพลิง

ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะจับยึดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่ฐานวางแท่งเชื้อเพลิง (platform) และชุดท่อนำรังสีจะยึดติดกับชุดขับเคลื่อน ทำหน้าที่สแกนแท่งเชื้อเพลิงแต่ละตำแหน่งห่างกัน 5 ช่วงของแท่งเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 3.10 หัววัดรังสีจะวัดและส่งข้อมูลเข้าอุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าเพื่อส่งสัญญาณต่อเข้าอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องและแสดงผลบันทึกผลที่คอมพิวเตอร์ โดยจะวิเคราะห์โพโตพีคของ ซีเซียม-137



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งวัดรังสีแกมมาจากบนแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

3.5 การวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว

เมื่อทำการทดลองวัดค่าวัดรังสีบนแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่ตำแหน่งต่างๆสามารถนำค่านับรังสีที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความแรงรังสีสุทธิของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว ตามสมการที่ (13) $A_{exp} = \frac{C}{(\epsilon \times r \times f)}$ เพื่อคำนวณอัตราปริมาณรังสีของ ซีเซียม-137 และคำนวณย้อนกลับหาปริมาณยูเรเนียม-235 ที่เกิดการแตกตัวไป ได้เป็นค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงจากการทดลอง โดยค่าเผาไหม้จากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการคำนวณค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง MVP Code [11] โดยการหาค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง ทั้งวิธีการคำนวณ และวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์นั้น ต้องการข้อมูลการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ย้อนหลังประกอบการวิเคราะห์ค่าการเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิง

บทที่ 4

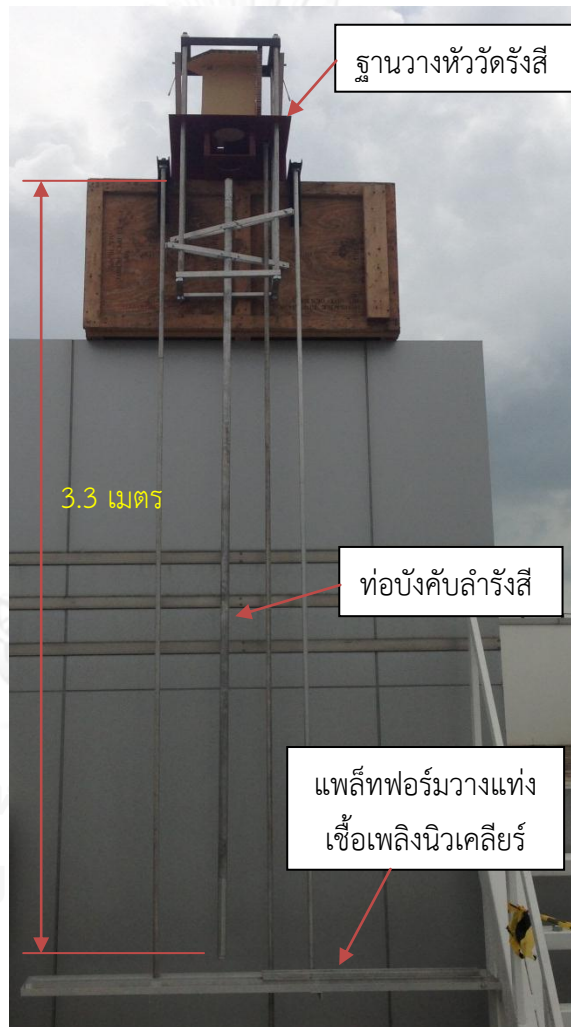
ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ

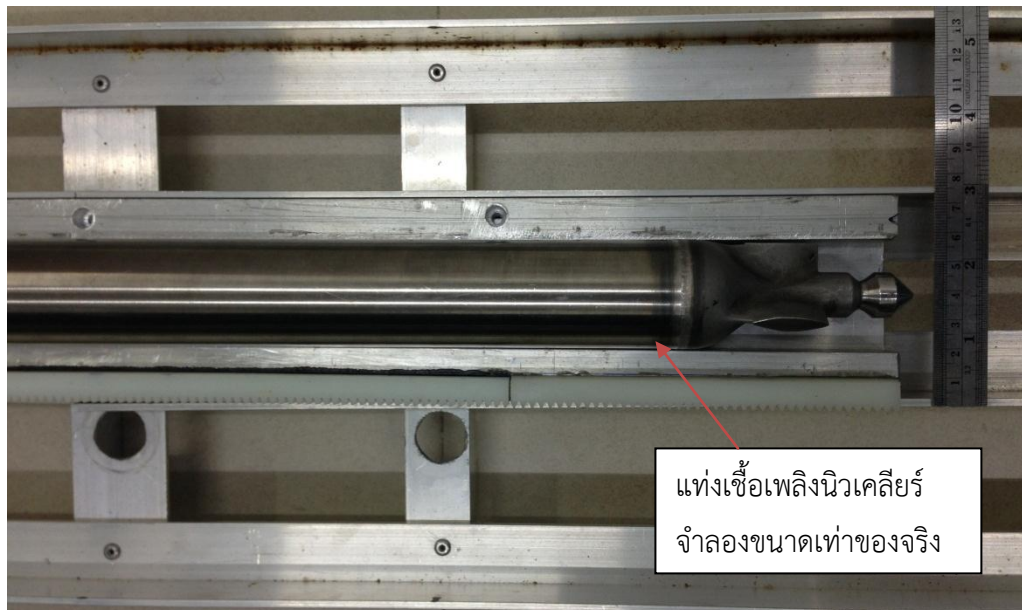
- ส่วนของผลการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำเพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่องมือที่สร้างขึ้นก่อนใช้งานวัดรังสีกับแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จริง
- ส่วนของผลการทดสอบท่อคอลลิเมเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีแกมมาของระบบวัดรังสีที่ใช้หัววัดรังสี HPGe และท่อบังคับลำรังสีที่สร้างขึ้น
- ส่วนของผลการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว โดยเชื้อเพลิงที่คัดเลือกมาทั้ง 3 แท่งมีข้อมูลที่สามารถนำไปใช้คำนวณผลเป็นค่าเผาไหม้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้น
- ส่วนของผลการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 จากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วได้
- ส่วนของการวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากข้อมูลการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง

4.1 ผลการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบและปรับแต่งขึ้นส่วนต่างๆให้ทำงานสัมพันธ์กัน ในการทดสอบอุปกรณ์นี้ได้ทดสอบในอากาศโดยติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ จำลองสภาวะใต้น้ำผลการทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น สามารถประกอบเข้ากันได้ แพลตฟอร์มวางแท่งเชื้อเพลิงสามารถวางแท่งเชื้อเพลิงเพื่อวัดรังสีได้ตามรูปที่ 4.2 และสามารถควบคุมระยะการเลื่อนของแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำที่สัมพันธ์กับการหมุนของวงล้อพวงมาลัยที่ควบคุมจากด้านบนน้ำได้ ดังรูปที่ 4.1



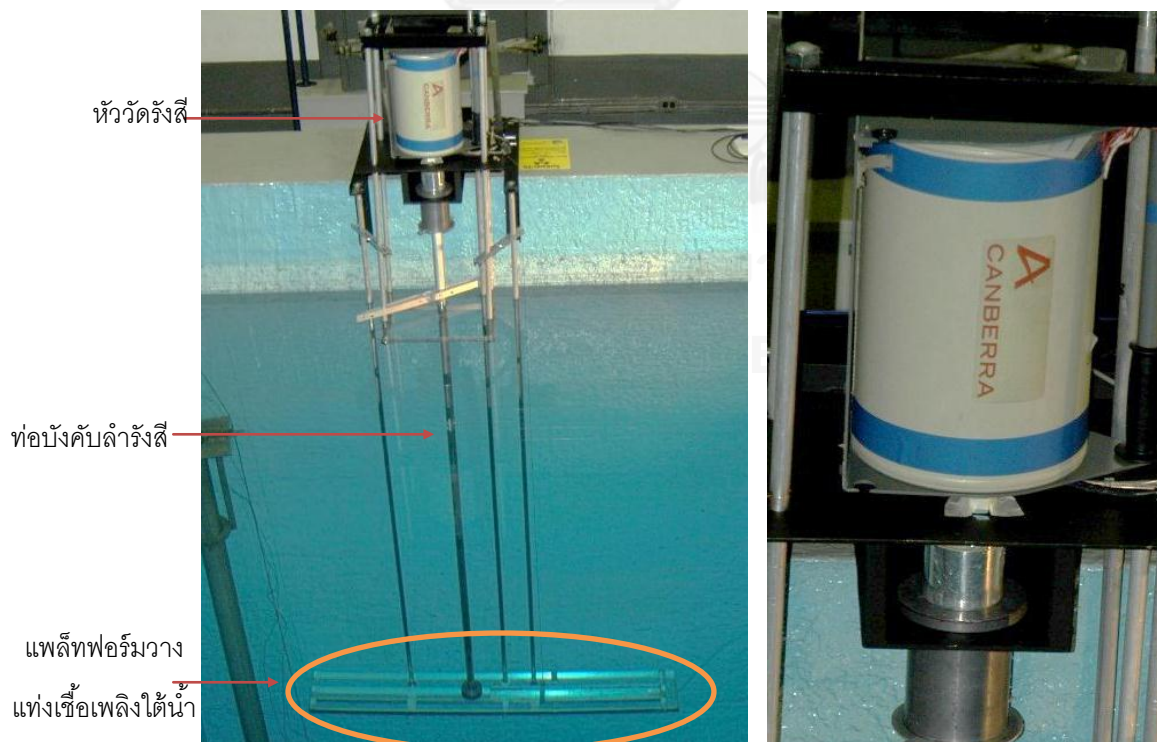
รูปที่ 4.1 การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีที่สร้างขึ้น



แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
จำลองขนาดเท่าของจริง

รูปที่ 4.2 การทดสอบใช้งานแท่งฟอรมกับแท่งเชื้อเพลิงจำลอง

การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีใต้น้ำที่สร้างขึ้นตามสภาวะจริงที่บ่อเครื่องปฏิกรณ์ การติดตั้ง
อุปกรณ์ทั้งหมดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาใต้น้ำที่ออกแบบใช้ในงานวิจัยนี้ รูปซ้ายมือแสดงการจัด
วางระบบวัดรังสีใต้น้ำและรูปขวามือเป็นหัววัดรังสีชนิด HPGe

4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์บังคับลำรังสีและหาประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีแกมมา

4.2.1 ความแรงรังสีต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137ที่ใช้ทดสอบ

วันที่ 1 มีนาคม 2545 ความแรงรังสีแกมมาของซีเซียม-137 เริ่มต้น 25 มิลลิวินาที ตามเอกสารแนบใบอนุญาตครอบครองต้นกำเนิดรังสี ซีเซียม-137 ความแรง 25 mCi ในภาคผนวก ก.

วันที่ 21 ตุลาคม 2556 หาความแรงรังสีแกมมาของซีเซียม-137 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก จ.3 เหลือความแรงรังสี 19.579 มิลลิวินาที

4.2.2 การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

การจัดระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ความแรง 19.579 มิลลิวินาที ใช้เวลานับรังสี 1000 วินาที และทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของซีเซียม-137 ที่พลังงาน 661.7 keV โดยจัดอุปกรณ์ที่บังคับลำรังสีที่สอบเทียบลักษณะต่างๆตามในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

การจัดรูปแบบ อุปกรณ์	การจัดอุปกรณ์ที่บังคับลำรังสี	ค่านับรังสีแกมมา Peak Area (cps)
1	รังสีผ่าน Window 0.8 มม.และท่อกลาง ความยาว 3300 มม.	557.46±0.72
2	รังสีผ่าน Window 0.8 มม.และท่อคอลลิเมเตอร์ ความยาว 3300 มม.	22.76±0.15
3	รังสีผ่าน Window 0.8 มม.ท่อคอลลิเมเตอร์ ความยาว 3300 มม.และใช้คอลลิเมเตอร์หน้าหัววัด	13.29±0.12
4	รังสีผ่าน Window 0.8 มม.ท่อคอลลิเมเตอร์ ความยาว 3300 มม.และใช้คอลลิเมเตอร์หน้าหัววัด	12.00±0.11
5	รังสีผ่าน Window 1.5 มม.ท่อคอลลิเมเตอร์ ความยาว 3300 มม.และใช้คอลลิเมเตอร์หน้าหัววัด	10.63±0.11
6	รังสีผ่าน Window 1.5 มม.ท่อคอลลิเมเตอร์ ความยาว 3300 มม.และใช้คอลลิเมเตอร์หน้าหัววัด	10.60±0.06

4.2.3 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบท่อบังคับลำรังสี

จากการสอบเทียบท่อบังคับลำรังสี ในแบบแรกเป็นการสอบเทียบท่อบังคับลำรังสีที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์บีบรังสีลำแคบ ผลการทดสอบ สามารถส่งผ่านรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีเข้าหัววัดรังสีได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับการวัดรังสีแท่งเชื้อเพลิงจริงได้เพราะจะมีรังสีจากบริเวณอื่นรบกวนการวัดได้ เมื่อเพิ่มอุปกรณ์บีบรังสีลำแคบในแบบที่สอง ผลการสอบเทียบ สามารถส่งผ่านรังสีได้น้อยลง เพราะลำรังสีจะผ่านได้เฉพาะท่อบีบลำรังสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เท่านั้น และในแบบที่สาม ได้เพิ่มตะกั่วรอบหัววัดรังสีเพื่อป้องกันรังสีจากสิ่งแวดล้อมโดยมีรูเปิดรับรังสีเฉพาะลำรังสีจากท่อบีบรังสีลำแคบ สามารถส่งผ่านรังสีจากต้นกำเนิดรังสีสู่หัววัดรังสีได้โดยมีการรบกวนของรังสีในสิ่งแวดล้อมน้อย เหมาะสมที่จะใช้ในการวัดรังสีแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว เมื่อเปลี่ยนความหนาของหน้าตากรับรังสีที่หนา 1.5 มิลลิเมตร ในแบบที่สี่และห้า ผลการทดสอบ มีค่านับรังสีที่ส่งผ่านได้น้อยกว่าหน้าตาขนาด 0.8 มิลลิเมตร จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

4.3 ผลการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว

ในการวัดค่าการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิง ได้ทำการคัดเลือกแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจำนวน 3 แท่ง ที่เก็บอยู่ในช่องเก็บแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยแท่งเชื้อเพลิงที่คัดเลือกมาทั้ง 3 แท่งนี้ เป็นเชื้อเพลิงที่มีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม (Enriched uranium) 20% ที่มีเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมอยู่ 8.5% โดยน้ำหนัก เป็นเชื้อเพลิงแบบค่าการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต่ำ (TRIGA-LEU 8.5/20) หมายเลขเชื้อเพลิง 8558, 8572 และ 8595 ซึ่งมีข้อมูลปริมาณยูเรเนียม-235 เริ่มต้น มีข้อมูลประวัติการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งตามตารางที่ 4.3-4.5 มีค่าเผาไหม้ที่ทราบค่าจากการคำนวณโดยโปรแกรม MVP Code ตามตารางที่ 4.2 และตำแหน่งของแท่งเชื้อเพลิงที่จัดในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ แสดงเป็นตัวอย่างของการจัดตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ หมายเลข 18 ตามภาคผนวก ค.

ตารางที่ 4.2 ปริมาณยูเรเนียม-235 เริ่มต้นในเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง

หมายเลขแท่งเชื้อเพลิง	Import date	U-235 (g)
Fuel No.8558	23/10/1977	37.74
Fuel No.8572	23/10/1977	38.29
Fuel No.8595	23/10/1977	38.26

ตารางที่ 4.3 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558

Core No./Action	Load	Discharge	Position
1	08/11/1977	10/03/1980	F21
2	10/03/1980	10/06/1982	F21
3	10/06/1982	06/03/1984	F21
4	06/03/1984	06/03/1985	F21
5	06/03/1985	23/04/1987	F21
6	23/04/1987	16/05/1988	F21
7	16/05/1988	12/12/1989	F21
8	12/12/1989	21/05/1990	F21
9	21/05/1990	09/09/1991	F21
Storage in reactor pool	09/09/1991	14/08/1992	Rack I-14
Storage in reactor pool	14/08/1992	19/08/1992	Rack III-1
10	19/08/1992	05/04/1995	F21
11	05/04/1995	18/03/1997	G23

12	18/03/1997	11/08/2000	G23
13	11/08/2000	28/02/2003	G23
14	28/02/2003	27/02/2005	G23
Storage in reactor pool	27/02/2005	20/03/2007	Rack I-5
16	20/03/2007	28/07/2008	F7
17	28/07/2008	22/02/2010	F7
18	08/03/2010	28/01/2011	F7
19	28/01/2011	08/02/2012	F7
Storage in reactor pool	03/03/2012	18/12/2013	Rack I-1

ตารางที่ 4.4 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8572

Core No./Action	Load	Discharge	Position
1	07/11/1977	06/03/1980	D18
2	06/03/1980	10/06/1982	D18
3	10/06/1982	06/03/1984	D18
4	06/03/1984	06/03/1985	D18
5	06/03/1985	23/04/1987	E17
6	23/04/1987	16/05/1988	E17
Storage in reactor pool	16/05/1988	19/11/1989	Rack I-5
Storage in reactor pool	19/11/1989	21/05/1990	Rack IV-4
9	21/05/1990	03/09/1991	C6
Storage in reactor pool	03/09/1991	11/08/1992	Rack G-14
10	11/08/1992	05/04/1995	C6
Storage in reactor pool	05/04/1995	05/08/2000	Rack I-6
Storage in reactor pool	05/08/2000	26/02/2003	Rack I-4
14	26/02/2003	27/02/2005	E9
15	27/02/2005	20/03/2007	F4
16	20/03/2007	28/07/2008	B6
17	28/07/2008	22/02/2010	F9
18	08/03/2010	28/01/2011	F9
19	28/01/2011	08/02/2012	F9
Storage in reactor pool	03/03/2012	18/12/2013	Rack I-11

ตารางที่ 4.5 ประวัติการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8595

Core No./Action	Load	Discharge	Position
1	07/11/1977	07/03/1980	E1
2	07/03/1980	10/06/1982	E1
3	10/06/1982	06/03/1984	E1
4	06/03/1984	06/03/1985	E1
5	06/03/1985	23/04/1987	C3
6	23/04/1987	16/05/1988	G4
7	16/05/1988	12/12/1989	G4
8	12/12/1989	21/05/1990	G4
9	21/05/1990	11/09/1991	G4
Storage in reactor pool	11/09/1991	20/08/1992	Rack I-12
10	20/08/1992	05/04/1995	G4
Storage in reactor pool	05/04/1995	05/08/2000	Rack II-3
13	05/08/2000	26/02/2003	B3
14	26/02/2003	26/02/2005	G29
Storage in reactor pool	26/02/2005	20/03/2007	Rack III-3
16	20/03/2007	28/07/2008	G6
17	28/07/2008	22/02/2010	F1
18	08/03/2010	28/01/2011	F1
19	28/01/2011	08/02/2012	F1
Storage in reactor pool	03/03/2012	18/12/2013	Rack II-3

ตารางที่ 4.6 ค่าวิเคราะห์ปริมาณซีเซียมและยูเรเนียมในเชื้อเพลิงใช้แล้วจากโปรแกรม MVP Code [11]

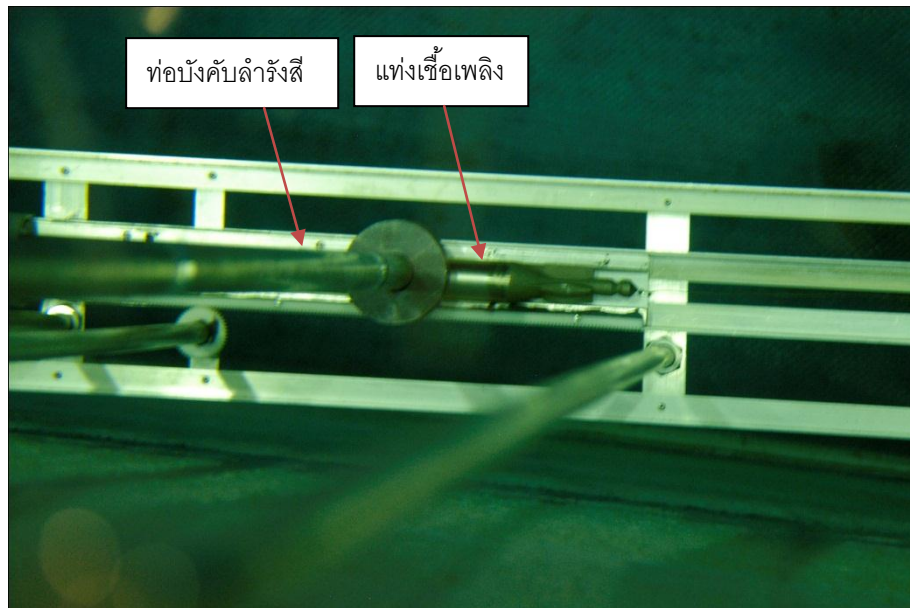
หมายเลขแท่ง เชื้อเพลิง	MVP CS137 (อะตอม)	MVP U235 (อะตอม)	ORIGINAL MVP U235 (อะตอม)	Burn-up (%)
Fuel No.8558	4.9536×10^{18}	1.6069×10^{20}	2.5655×10^{20}	37.3650
Fuel No.8572	4.7502×10^{18}	1.5483×10^{20}	2.5287×10^{20}	38.7709
Fuel No.8595	4.4863×10^{18}	1.5226×10^{20}	2.5635×10^{20}	40.6046

4.4 ผลการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิง

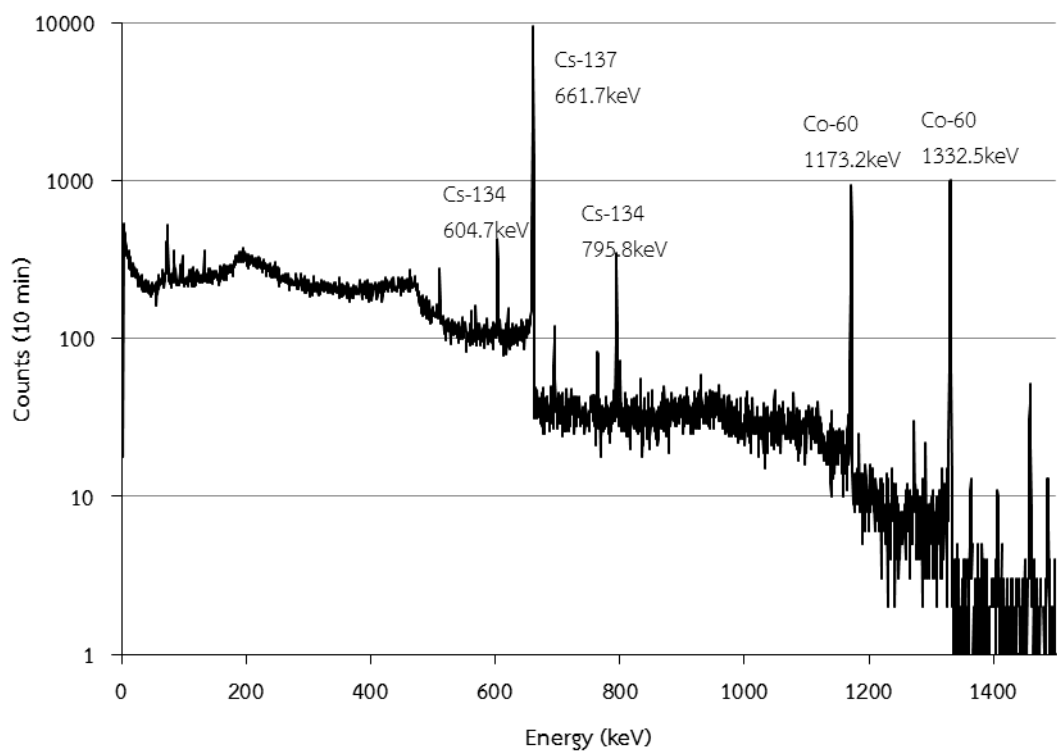
จากการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้ง 3 แท่ง เชื้อเพลิงหมายเลข 8558, 8572 และ 8595 ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นโดยแต่ละแท่งจะทำการวัดค่านับ 5 ตำแหน่ง ใช้เวลานับรังสีตำแหน่งละ 600 วินาที ที่ระยะห่างที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 3.10 พร้อมวัดความเข้มรังสีแกมมาพื้นหลัง (Background) ในสิ่งแวดล้อมรวม 3 บริเวณด้วยกัน และทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของซีเซียม-137 ที่พลังงาน 661.7 keV ได้ผลการวัดตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วใต้น้ำ

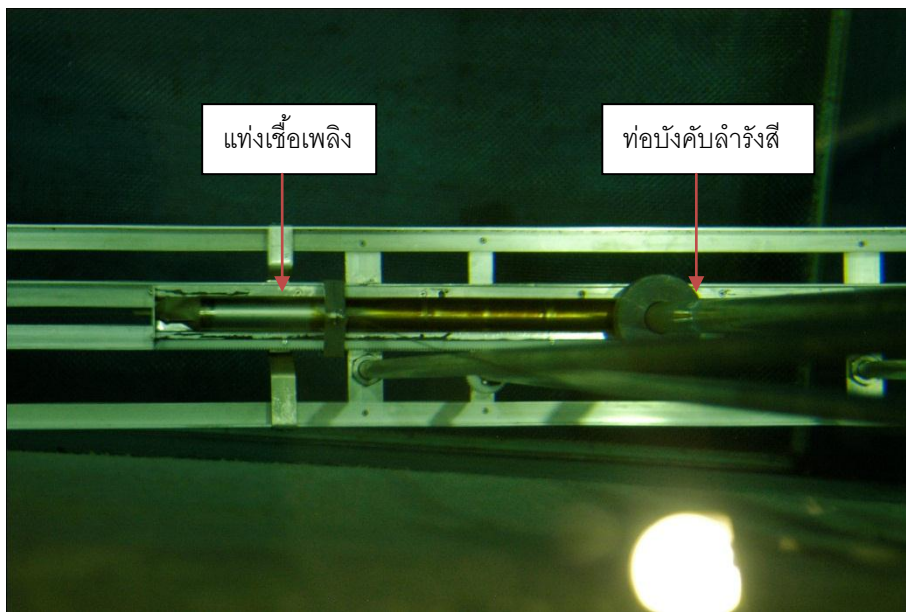
หมายเลข ตัวอย่าง	ตำแหน่ง	ค่านับรังสีแกมมา Peak Area (cps)
Background	1.Reactor pool(วัดปากบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ)	0.03±0.01
	2.Test Full Assembly (ไม่ได้วางเชื้อเพลิง)	0.00±0.00
	3.วัดนอกอาคารเครื่องปฏิกรณ์ฯ	0.00±0.00
Fuel No.8558	1.Upper End	43.51±0.29
	2.Between 1&3	61.11±0.34
	3.Center	86.73±0.42
	4. Between 3&5	88.42±0.42
	5.Lower End	74.67±0.38
Fuel No.8572	1.Upper End	41.53±0.29
	2.Between 1&3	91.57±0.42
	3.Center	106.32±0.46
	4. Between 3&5	96.12±0.43
	5.Lower End	80.19±0.39
Fuel No.8595	1.Upper End	42.39±0.28
	2.Between 1&3	77.66±0.39
	3.Center	94.26±0.42
	4. Between 3&5	81.64±0.40
	5.Lower End	70.62±0.37



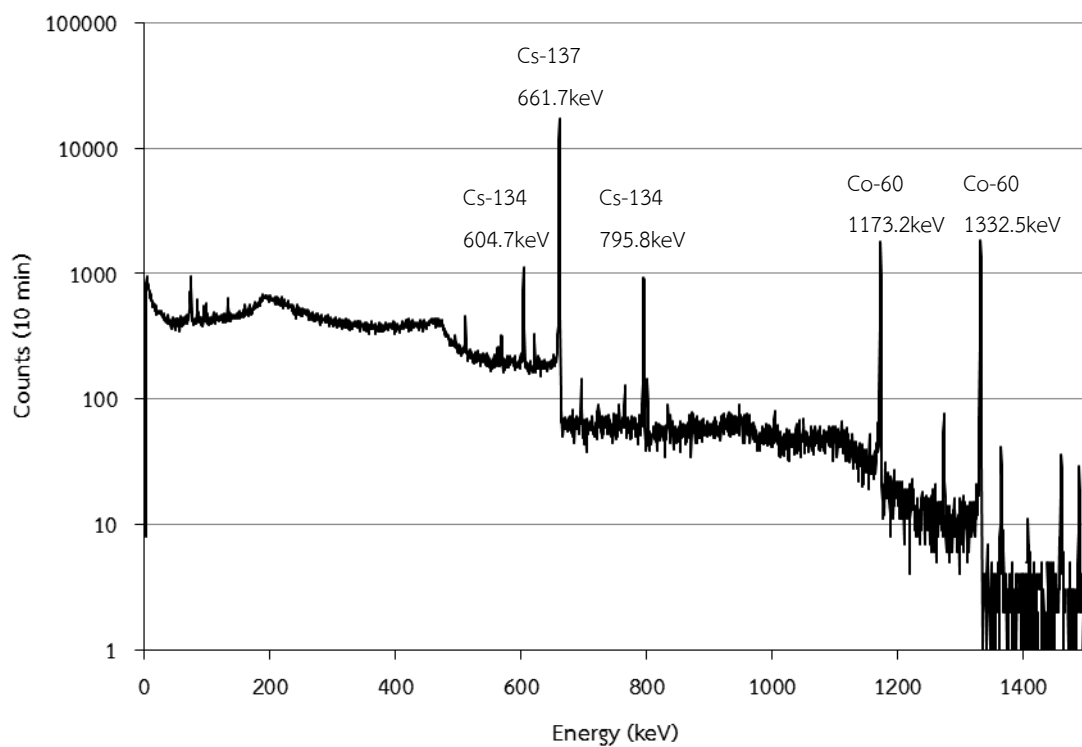
รูปที่ 4.4 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 1 (Upper End)



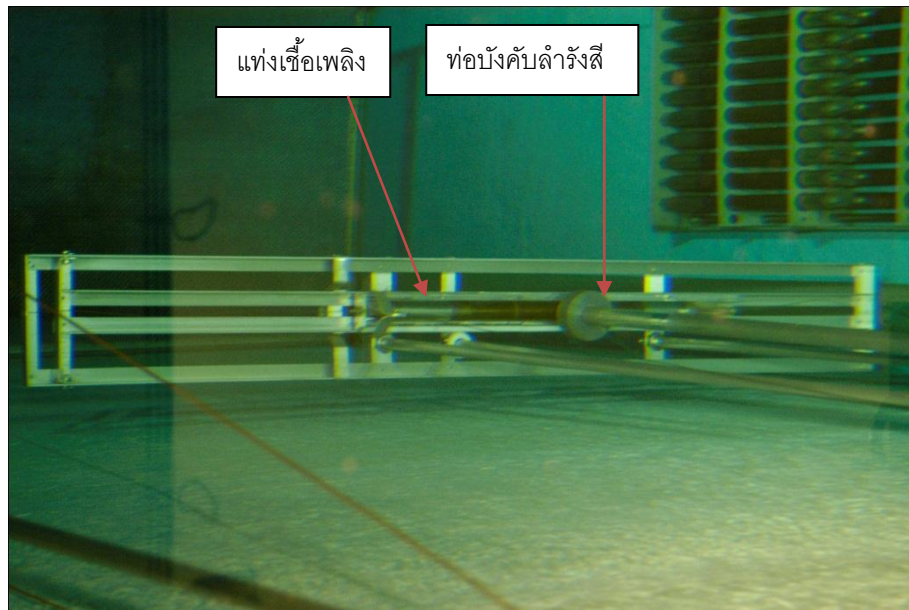
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 1 (Upper End)



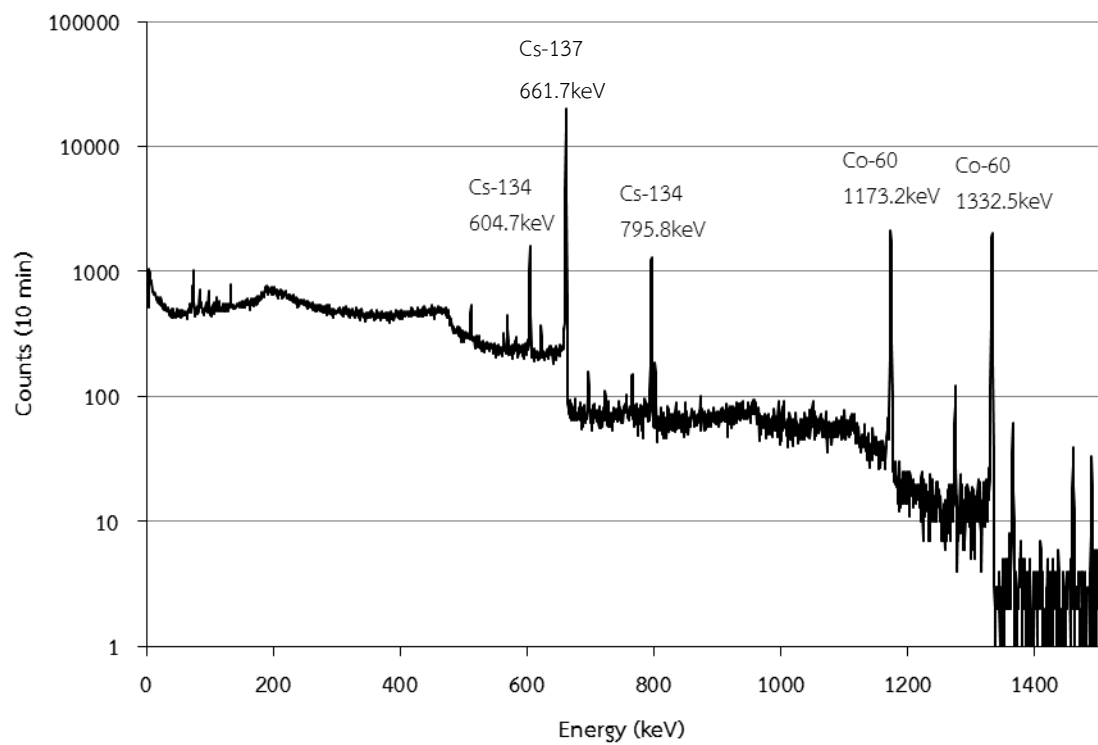
รูปที่ 4.6 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 2 (Between 1&3)



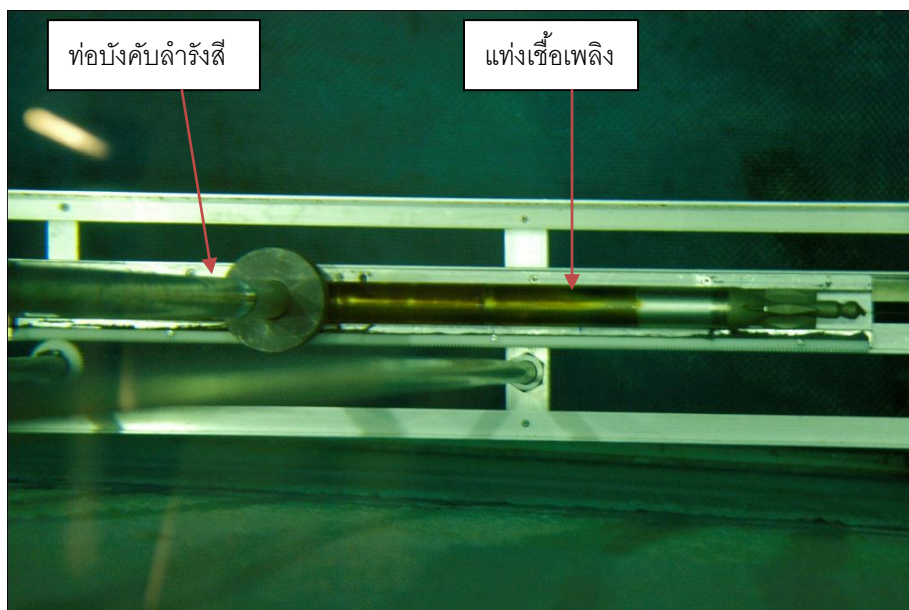
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 2 (Between 1&3)



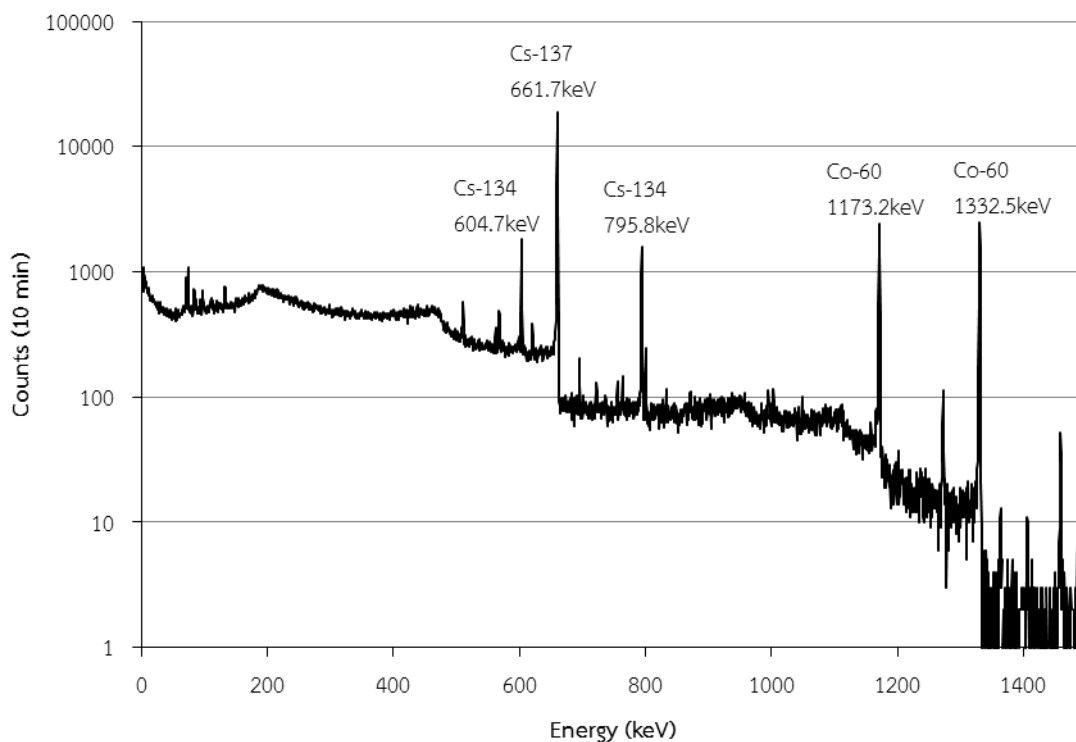
รูปที่ 4.8 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 3 (Center)



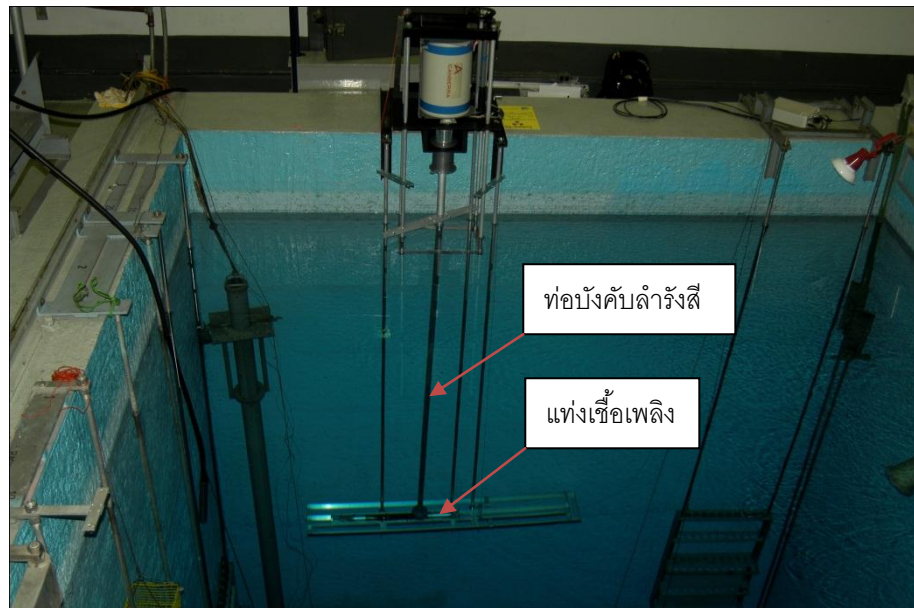
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 3 (Center)



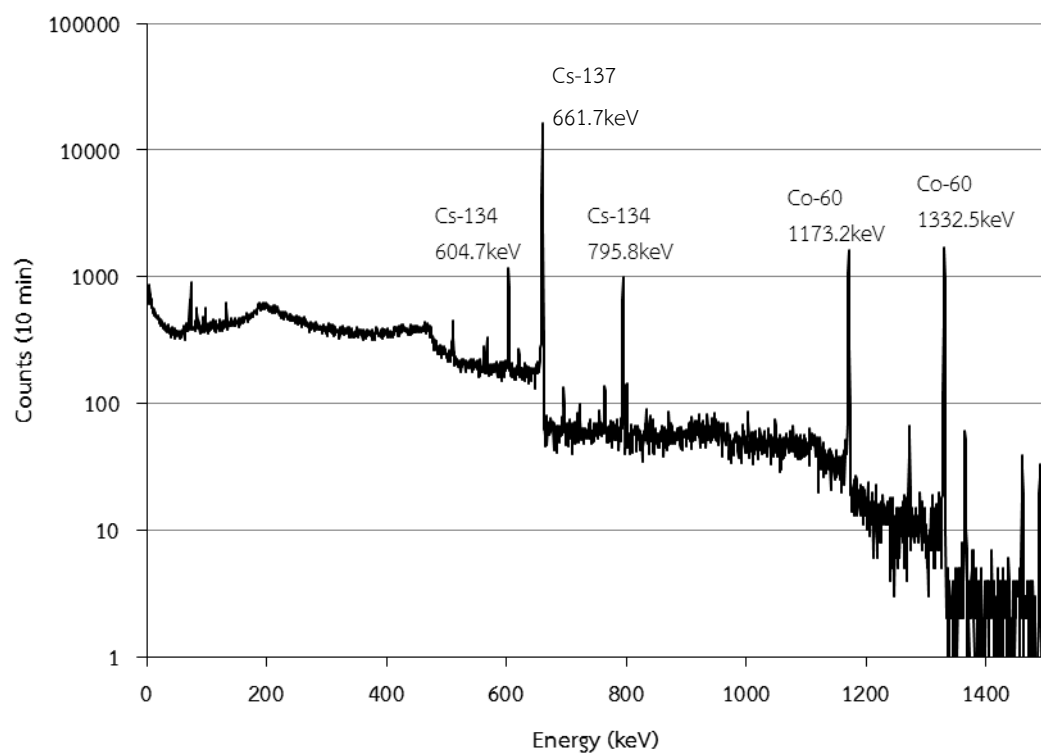
รูปที่ 4.10 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 4 (Between 3&5)



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 4 (Between 3&5)



รูปที่ 4.12 แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ขณะทำการวัดรังสีที่ตำแหน่ง 5 (Lower End)

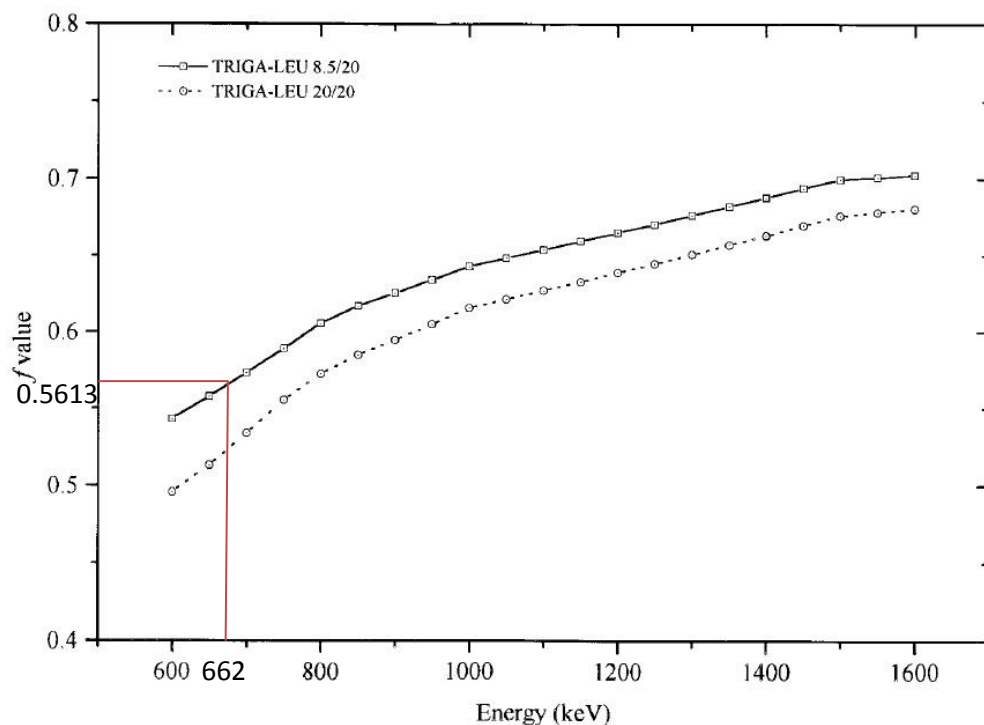


รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว
หมายเลข 8558 ที่ตำแหน่ง 5 (Lower End)

4.5 การวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว

4.5.1 ผลการแปลงค่านับรังสีเป็นค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137

การวัดค่าความแรงรังสีจากซีเซียม-137 นั้นเหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์ค่าเผาไหม้ในแท่งเชื้อเพลิงที่มีการใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์มาเป็นเวลานานเพราะเป็นไอโซโทปรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตยาว 30.17 ปี ซึ่งการวัดค่าความแรงรังสีจากซีเซียม-137 นี้ใช้อุปกรณ์การวัดรังสีแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำตามที่กล่าวในบทที่ 3 และจากสมการหาความแรงรังสีจากการทดลอง $A_{exp} = \frac{C}{(\epsilon \times r \times f)}$ เมื่อ C เป็นค่าพื้นที่ใต้กราฟของโฟโตพีคซีเซียม-137 มีพลังงาน (E) = 662 keV, ϵ คือประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ที่พลังงาน 662 keV จากการคำนวณในภาคผนวก จ.3 ได้ $\epsilon = 1.4667 \times 10^{-8}$, γ เป็นอัตราการแผ่รังสีแกมมาของซีเซียม-137 ซึ่งมีค่า $\gamma = 0.85$, f เป็นแฟคเตอร์การลดทอนของรังสีแกมมาในเนื้อเชื้อเพลิงซึ่งจะได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ค่าลดทอนในเนื้อเชื้อเพลิง (μ) ที่พลังงาน 662 keV โดยเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นของไอโซโทปยูเรเนียม-235 ต่ำ 8.5% (TRIGA-LEU 8.5/20) ใช้ฟังก์ชัน $f = 1.6 - 0.6 \cos \frac{\pi r}{2a}$ [1] โดยได้ค่า $f = 0.5613$ ที่พลังงาน 662 keV ตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่าแฟคเตอร์การลดทอนของรังสีแกมมาในเนื้อเชื้อเพลิง [1]

ในการคำนวณค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558,8572 และ 8595 ตามตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก จ.3 เมื่อคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆบนแท่งเชื้อเพลิงแล้วสามารถสรุปข้อมูลค่าความแรงรังสีได้ตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558

ตำแหน่ง	ค่านับรังสีแกมมา (s^{-1})	^{137}Cs activity (1.0×10^9 Bq)
1.Upper End	43.51±0.29	3.59
2.Between 1&3	61.11±0.34	5.04
3.Center	86.73±0.42	7.16
4. Between 3&5	88.42±0.42	7.30
5.Lower End	74.67±0.38	6.16

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8572

ตำแหน่ง	ค่านับรังสีแกมมา (s^{-1})	^{137}Cs activity (1.0×10^9 Bq)
1.Upper End	41.53±0.29	3.43
2.Between 1&3	91.57±0.42	7.56
3.Center	106.32±0.46	8.78
4. Between 3&5	96.12±0.43	7.93
5.Lower End	80.19±0.39	6.62

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8595

ตำแหน่ง	ค่านับรังสีแกมมา (s^{-1})	^{137}Cs activity (1.0×10^9 Bq)
1.Upper End	42.39±0.28	3.50
2.Between 1&3	77.66±0.39	6.41
3.Center	94.26±0.42	7.78
4. Between 3&5	81.64±0.40	6.74
5.Lower End	70.62±0.37	5.83

4.5.2 ผลการแปลงค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 เป็นค่าเผาไหม้เชื้อเพลิง

จากการคำนวณแปลงค่านั้รังสีเป็นความแรงรังสีนั้นสามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อคำนวณกลับเป็นปริมาณยูเรเนียม-235 ที่ใช้ไปได้ และนำไปเปรียบเทียบกับยูเรเนียม-235 ตั้งต้นจึงได้ค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดได้ ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แห่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8558

ตำแหน่ง	Burn up (Experiment)
1.Upper End	111.86
2.Between 1&3	157.11
3.Center	222.99
4. Between 3&5	227.33
5.Lower End	191.98
Average	182.25

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แห่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8572

ตำแหน่ง	Burn up (%) (Experiment)
1.Upper End	112.45
2.Between 1&3	247.94
3.Center	287.87
4. Between 3&5	260.26
5.Lower End	217.12
Average	225.13

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าเผาไหม้แห่งเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลข 8595

ตำแหน่ง	Burn up (%) (Experiment)
1.Upper End	111.35
2.Between 1&3	203.99
3.Center	247.57
4. Between 3&5	214.44
5.Lower End	185.47
Average	192.56

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าเผาไหม้โดยเฉลี่ยของแห่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

หมายเลขแห่งเชื้อเพลิง (No.)	Burn up (%) (MVP code)	Burn up (%) (Calculation)	Burn up (%) (Experiment)
8558	37.36	56.76	182.25
8572	38.77	65.25	225.13
8595	40.60	59.47	192.56

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการวิเคราะห์ค่านับรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วตลอดแนว ความยาวเชื้อเพลิงใช้แล้วหมายเลขแท่งเชื้อเพลิง 8558, 8572 และ 8595 เพื่อหาความแรงรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากซีเซียม-137 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสีที่สำคัญของกระบวนการแตกตัวในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และสามารถคำนวณกลับเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้วในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดโดยผลการวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและเครื่องมือวัดรังสีแกมมา

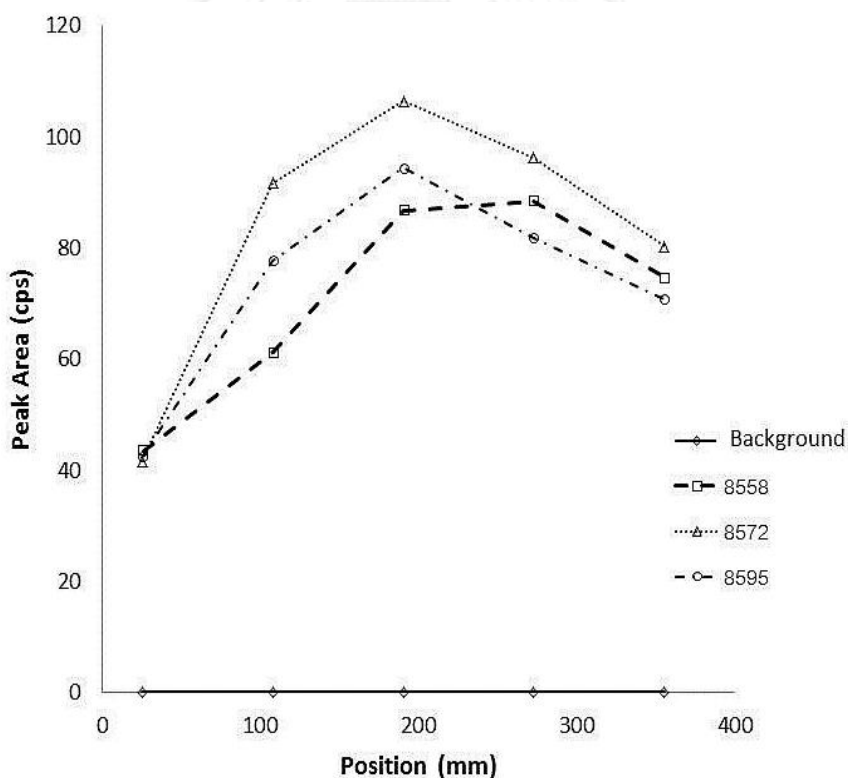
จากผลการทดสอบเครื่องมือวัดรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วใต้น้ำที่สร้างขึ้นได้นำติดตั้งและทดสอบระบบวัดรังสี โดยการทดสอบการเคลื่อนของระบบกลไกในอากาศและทดสอบใต้น้ำตามสภาวะจริงที่บ่อเครื่องปฏิกรณ์ โดยการทดสอบสามารถสรุปผลอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถติดตั้งและวัดรังสีพื้นหลังของบ่อเครื่องปฏิกรณ์ได้ มีความพร้อมสำหรับการทดลองวัดแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

5.1.2 สรุปผลการสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

จากค่าการสอบเทียบหาประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีของท่อบังคับลำรังสีที่มีขนาดของหน้าต่าง (window) ที่ความหนา 0.8 มิลลิเมตร และ ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ค่าส่งผ่านรังสีแกมมาของหน้าต่างขนาด 0.8 มิลลิเมตร รังสีแกมมาสามารถผ่านได้ดีกว่าหน้าต่างขนาด 1.5 มิลลิเมตร จึงเลือกท่อบังคับลำรังสีที่ติดตั้งหน้าต่างรับรังสีความหนา 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากมีส่งผ่านรังสีได้ดีและมีความแข็งแรงเพียงพอ โดยนับรังสี = 13.29 cps. ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี = 1.8346×10^{-8} หรือประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี = $1.8346 \times 10^{-6} \%$

5.1.3 สรุปผลการวัดรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มรังสีแกมมาจาก ซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว ทั้งสามแท่งสามารถวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีแต่ละตำแหน่งบนแท่งเชื้อเพลิงได้ดังนี้ตำแหน่งที่ 1 (Upper End) เป็นตำแหน่งบนสุดของเนื้อเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะมีความเข้มรังสีต่ำที่สุดเฉลี่ย 43 cps ตำแหน่งที่ 2 (Between 1&3) เป็นตำแหน่งต่ำลงไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ค่าความเข้มรังสีที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นมาจากตำแหน่งแรกมีค่าเฉลี่ย 75 cps ตำแหน่งที่ 3 (Center) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิงตำแหน่งนี้ค่าความเข้มรังสีสูงที่สุดเฉลี่ย 95 cps ตำแหน่งที่ 4 (Between 3&5) เป็นตำแหน่งค่อนข้างทางด้านปลายของแท่งเชื้อเพลิง ขณะใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะเป็นตำแหน่งค่อนข้างด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ค่าความเข้มรังสีที่ได้จะมีค่าเฉลี่ย 90 cps ตำแหน่งที่ 5 (Lower End) เป็นตำแหน่งปลายของแท่งเชื้อเพลิง หรือเป็นตำแหน่งด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ตำแหน่งนี้ค่าความเข้มรังสีมีค่าเฉลี่ย 75 cps โดยข้อมูลแต่ละจุดของเชื้อเพลิงทั้งสามแท่งจากตารางที่ 4.7 ได้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ค่าความเข้มรังสีแต่ละตำแหน่งบนแท่งเชื้อเพลิงจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

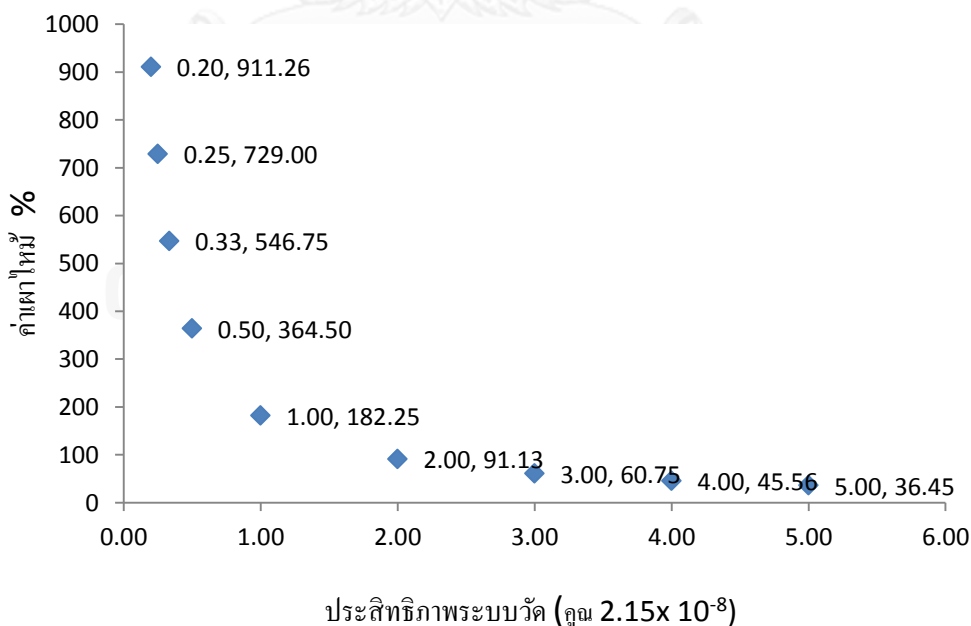
5.1.4 การแปลผลการวัดรังสีเป็นค่าเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว

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

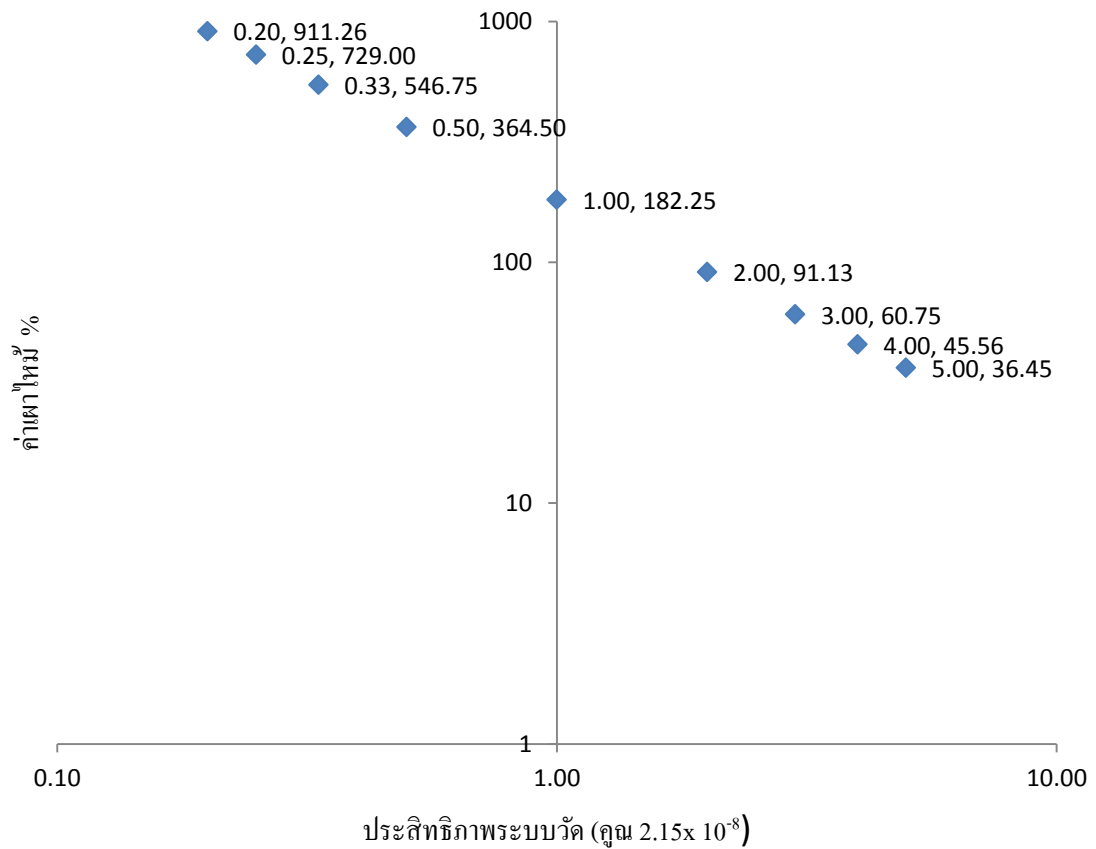
จากการทดลองวัดค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วตลอดแนวความยาวเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้งสามแท่งพบว่า บริเวณกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิงจะเป็นส่วนที่มีค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยูเรเนียม-235 มากที่สุด จึงวัดค่าความเข้มรังสีได้มากกว่าจุดอื่นเพราะขณะแท่งเชื้อเพลิงถูกใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ส่วนกลางจะมีความหนาแน่นของนิวตรอนช้อยู่มาก จึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้มากกว่าส่วนอื่น และบริเวณที่มีค่าการเผาไหม้ต่ำสุดเป็นส่วนปลายที่อยู่ด้านบนของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพราะบริเวณนี้มีโอกาสกระเจิงของนิวตรอนออกนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ มากกว่าส่วนอื่นทำให้ความหนาแน่นของนิวตรอนช้อย่น้อยจึงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้น้อยทำให้วัดค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ได้น้อยกว่าจุดอื่น เมื่อพิจารณาผลการทดลองของค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ตลอดแนวความยาวของแท่งเชื้อเพลิงพบว่ามีลักษณะเป็นรูปโคไซน์ฟังก์ชันตามทฤษฎี แต่ไม่สมมาตรโดยค่าความเข้มรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ส่วนด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงวัดได้น้อยกว่าส่วนเชื้อเพลิงด้านล่าง ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่าขณะใช้งานบริเวณด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ น้ำซึ่งเป็นสารลดทอนพลังงานของนิวตรอน มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำที่อยู่ด้านบนของแกนปฏิกรณ์ จึงทำให้ด้านล่างแท่งเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ได้มากกว่าด้านบนของแท่งเชื้อเพลิง

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว 3 แท่ง คือเชื้อเพลิงหมายเลข 8558, 8572 และแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8595 ด้วยวิธีการ 3 แบบ คือ จากผลการคำนวณค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม MVP Code จากผลการคำนวณค่าเผาไหม้โดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่อง และผลการทดลองวัดค่าเผาไหม้โดยใช้วิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี โดยได้เปรียบเทียบค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงแบบเฉลี่ยทั้งแท่งไว้ในตารางที่ 4.14 ซึ่งผลจากการคำนวณค่าเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้ง 3 วิธีให้ค่าแตกต่างกัน โดยผู้วิจัยมีความเห็นว่าค่าที่น่าจะถูกต้องและเชื่อถือได้ คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณเพราะใช้ข้อมูลจากการเดินเครื่องจริง ส่วนผลจากการใช้โปรแกรม MVP Code ให้ค่าต่ำสุดอาจเป็นเพราะใช้ค่าฟลักซ์นิวตรอนค่าเดียวในการคำนวณ ส่วนผลจากการทดลองด้วยวิธีวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม -137 ให้ค่าสูงที่สุดแต่เกิน 100% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองยังมีความคลาดเคลื่อนสูงโดยมีค่าสูงกว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่อง ประมาณ 3 เท่า ซึ่งคาดว่ามาจากความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบท่อบังคับลำรังสี ที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกับแท่งเชื้อเพลิงที่วัดจริงและมีขนาดยาวถึง 3.3 เมตร ทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีนี้จะมีผลต่อค่าเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในกราฟความไวของค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัด ที่ได้ทดลองพล็อตค่าประสิทธิภาพที่มากขึ้นและน้อยลงจากค่าที่สอบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟความไวของค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัด



รูปที่ 5.3 กราฟความไวของค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัดในระบบสเกล log log

จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพของระบบวัดจริงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองลดลงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยหากเปลี่ยนค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 3 เท่า พบว่าจะทำให้มีค่าการเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับค่าการเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงที่คำนวณจากข้อมูลการเดินเครื่อง อีกสาเหตุของค่าการเผาไหม้จากวิธีการทดลองที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ อาจเป็นผลจากการเกิดแตกตัวเป็นซีซีเนียม-137 จากปฏิกิริยาของนิวตรอนเร็ว เพราะค่าอัตราส่วน fission yield ของซีซีเนียม-137 ที่ใช้ในการคำนวณนี้เป็นค่าสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนเท่านั้น และค่าคลาดเคลื่อนอาจมาจากการแตกตัวของซีซีเนียมจากธาตุพลูโตเนียม-239 ที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงในขณะเดินเครื่องปฏิกรณ์ โดยพลูโตเนียม-239 จะเกิดขึ้นกับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณยูเรเนียม-238 ที่สูง ซึ่งเชื้อเพลิงที่นำมาทดลอง ของเครื่อง ปปว.-1/1 เป็นเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นของไอโซโทปยูเรเนียม-235 ต่ำ 8.5% และมีปริมาณยูเรเนียม-238 สูง จึงมีโอกาสเกิดการเผาไหม้จากพลูโตเนียม-239 ได้ [1] โดยพลูโตเนียม-239 เป็นนิวสตรอนิวเคลียร์พิเศษ ที่มีความเข้มงวดในการกำกับดูแลจึงไม่ได้ทำการสอบเทียบหาประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยของค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่องจริงและวิธีวัดสเปกตรัมแกมมาจากซีซีเอ็ม -137ของทั้ง 3 แท่ง ให้ผลอย่างเดียวกัน คือ แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8572 จะมีค่าเผาไหม้สูงที่สุด ค่าเผาไหม้ที่รองลงมาคือ แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8595 และแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 จะมีค่าเผาไหม้ที่น้อยที่สุด ในขณะที่ผลจากการใช้โปรแกรม MVP Code พบว่าเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าสูงที่สุดในเชื้อเพลิงหมายเลข 8595

5.3 ข้อเสนอแนะ

- (1) ควรพัฒนาระบบขับเคลื่อนแท่งเชื้อเพลิงได้นำให้สามารถเลื่อนแท่งเชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็วขึ้น และสามารถเคลื่อนที่ได้แม่นยำกว่าเดิม เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวัดเชื้อเพลิงในแต่ละแท่ง
- (2) ควรปรับปรุงแท่นวางหัววัดรังสี ให้รองรับการใช้งานร่วมกับหัววัดรังสี HPGe แบบถักเก็บไนโตรเจนเหลวขนาดใหญ่ได้ เพื่อให้ระบบวัดรังสีสามารถทำงานต่อเนื่องได้นานขึ้นโดยไม่ต้องปิดระบบเติมไนโตรเจนเหลว
- (3) ควรปรับปรุงอุปกรณ์จับยึดท่อคอลลิเมเตอร์ให้มีความเสถียรยิ่งขึ้นขณะทำการวัดรังสีได้นำเพื่อให้ผลการวัดรังสีมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ซึ่งการไม่เสถียรของท่อคอลลิเมเตอร์เพียงเล็กน้อยอาจมีผลต่อค่านับรังสีได้
- (4) ควรมีการศึกษาและวัดรังสีของแท่งเชื้อเพลิงที่เพ่งย้ายออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากค่านับรังสีของผลผลิตการกระบวนการเผาไหม้ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น

รายการอ้างอิง

1. Wang, T.-K. and J.-J. Peir, *An iterative approach for TRIGA fuel burn-up determination using nondestructive gamma-ray spectrometry*. Applied Radiation and Isotopes, 2000. **52**(1): p. 105-118.
2. Wang, T.-K., D.-C. Hsu, and C.-L. Tseng, *Feasibility studies on iterative methods of fuel burnup estimation using gamma-ray spectrometry*. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes, 1990. **41**(1): p. 41-47.
3. Peir, J.-J., T.-K. Wang, and C.-C. Liu. *TRIGA fuel enrichment verification based on the measurement of short-lived fission products*. Applied radiation and isotopes 1999 [cited 50 6]; 1085-1096].
4. Khan, R., S. Karimzadeh, and H. Böck, *TRIGA fuel burn-up calculations and its confirmation*. Nuclear Engineering and Design, 2010. **240**(5): p. 1043-1049.
5. Terremoto, L., et al., *Gamma-ray spectroscopy on irradiated MTR fuel elements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000. **450**(2): p. 495-514.
6. Mora, M.V., et al., *Nondestructive burnup measurements by gamma-ray spectroscopy on spent fuel elements of the RP-10 research reactor*. Progress in Nuclear Energy, 2011. **53**(4): p. 344-353.
7. นवलวี รุ่งชนเกียรติ, วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. 2002, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
8. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, การตรวจวัดรังสีนิวเคลียร์และอุปกรณ์วัดนิวเคลียร์. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering*. Third ed. 2001: Prentice-Hall, Inc.
10. El-Wakil, M., *Nuclear heat transport*. 1978, American Nuclear Society (La Grange Park, Ill.).
11. Keisuke OKUMURA, Yasunobu NAGAYA, and Takamasa MORI, *MVP-BURN: Burn-up Calculation Code Using A Continuous-energy Monte Carlo Code MVP*. 2005, Japan Atomic Energy Agency (JAEA): Japan.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

เอกสารแนบใบอนุญาตประกอบเครื่องต้นกำเนิดรังสี ซีเซียม-137 ความแรง 25 mCi

กรมพลังงานปรมาณูและรังสี
(โดยนายสมชาย คุ้มชูอรรถกุล)

เอกสารแนบขออนุญาต ๘ป-๒๒ สมทท ๕๙๙/๒๖๖๕๖
ผลิตภัณฑ์ประกอบหรือใช้ซึ่งวัสดุพลอยได้
สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ศูนย์บริการเทคโนโลยีนิวเคลียร์

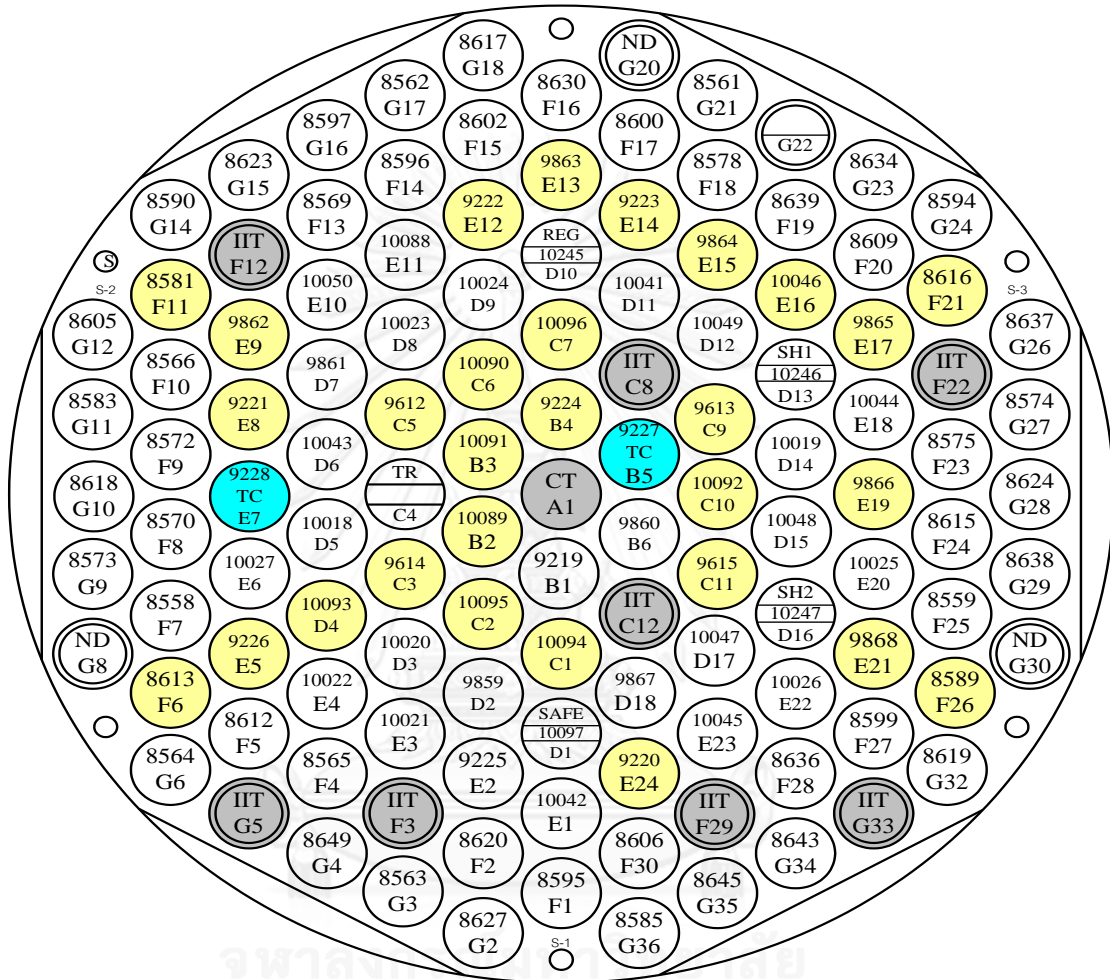
ชื่อผู้รับผิดชอบทางเทคนิค
นายสมาน อิงใสง หมายเลขโทรศัพท์ 0-3739-2901-6

รายละเอียดตัวต้นกำเนิดรังสี

รายการ	ธาตุ	สภาพ	การปิดผนึก	กลุ่ม	หมายเลข/รหัส	ปริมาณ	จำนวน	รวมปริมาณ	เมื่อวันที่	ผู้ผลิต	การใช้ประโยชน์
1	Am-241	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1	7,400 GBq	1	7,400 GBq	01/01/43	Amersham	Standard/calibration
2	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1/1	50,000 mCi	1	50,000 mCi	01/01/35	Ansto	Column Scan
3	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1/2	5,000 mCi	1	5,000 mCi	01/01/34	Amersham	Column Scan
4	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1/3	40,000 mCi	1	40,000 mCi	01/01/36	OAP-Reactor	Column Scan
5	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1/4	20,000 mCi	1	20,000 mCi	01/01/40	OAP-Reactor	Column Scan
6	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-1/5	10,000 mCi	1	10,000 mCi	01/01/40	Endress+Hauser	Column Scan
7	Am-241,Be	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	MM60803340	50,000 mCi	1	50,000 mCi	06/01/39	Boart longyear	Standard/calibration
8	Br-82	ของแข็ง,ของเหลว	unsealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-3	100,000 mCi	1	100,000 mCi	00/00/00	Force Institute	Standard/calibration
9	Am-241	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-5	7,400 GBq	1	7,400 GBq	01/01/43	Amersham	Standard/calibration
10	Am-241,Be	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	22259725NE	29,600 GBq	1	29,600 GBq	29/06/43	Aessa-IAEA	Standard/calibration
11	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	R015	2,000 GBq	1	2,000 GBq	20/03/45	Aessa-IAEA	Column Scan
12	Co-60	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-12/2	25,000 mCi	1	25,000 mCi	01/03/45	Aessa-IAEA	Column Scan
13	Cs-137	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-13/1	50,000 mCi	1	50,000 mCi	01/03/45	Aessa-IAEA	Standard/calibration
14	Cs-137	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-13/2	25,000 mCi	1	25,000 mCi	01/03/45	Aessa-IAEA	Standard/calibration
15	Sm-In-113m	ของแข็ง,ของเหลว	unsealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-14	4,100 GBq	1	4,100 GBq	01/09/45	Russian federation institute	Standard/calibration
16	Co-56	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	EID/OAEP-16	2,000 mCi	1	2,000 mCi	01/10/45	Igus.pr-IAEA	Standard/calibration
17	Am-241	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	9304LV	11,100 GBq	1	11,100 GBq	06/04/32	Mineral control Ltd.	Standard/calibration
18	Cs-137	ของแข็ง	sealed	กลุ่ม 2	9755GF	0,740 GBq	1	0,740 GBq	01/03/32	Mineral control Ltd.	Standard/calibration

ภาคผนวก ข.

ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์หมายเลข 18



CORE LOADING DIAGRAM NO. 18

NUMBER OF FUEL ELEMENT INCLUDE FFCR'S 107 RODS

BRIDGE POSITION THERMAL COLUMN, CENTER

DATE 5 MARCH 2010

FUEL ELEMENTS STORED IN RACKS

ตารางที่ ข.1 หมายเลขแท่งเชื้อเพลิงที่เก็บในช่องเก็บแท่งเชื้อเพลิงใต้น้ำ

I.D.	POS.	I.D.	POS.	I.D.	POS.	I.D.	POS.
8584	I-1	8642	II-1	8603	III-1	8601	IV-1
8608	I-2	8560	II-2	8579	III-2	8614	IV-2
8650	I-3	8568	II-3	8651	III-3	8580	IV-3
8625	I-4	8592	II-4	8652TC	III-4	8593	IV-4
8629	I-5	8640	II-5	8611	III-5	8622	IV-5
8610	I-6	8571	II-6	8631	III-6	8648	IV-6
8577	I-7	8588	II-7	8598	III-7	8576	IV-7
8644	I-8	8582	II-8	8647	III-8	8628	IV-8
8586	I-9	8604	II-9			8587	IV-9
8646	I-10	8607	II-10			8567	IV-10
8626	I-11						
8621	I-12	8632	I-16				
8591	I-13	8635	I-17				
8641	I-14						
8633	I-15						

*สัญลักษณ์ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ

CONTROL ROD

PNEUMATIC TRANSFERRED
IRRADIATION TUBE

CENTRAL THIMBLE



NEUTRON DETECTOR



IN CORE IRRADIATION TUBE



NEUTRON SOURCE



ภาคผนวก ค.

ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1

ตามแผนผังการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ หมายเลข 18
ขณะเดินเครื่องที่กำลัง 1200 กิโลวัตต์

ตารางที่ ค.1 ค่าวัด Relative Flux โดยใช้หลอดทองแดง

Irradiation Position	Thermal Neutron Flux	Epi-Thermal Neutron Flux	Cadmium Ratio R_{Cd}
CT	2.43E+13	1.25E+12	2.68
C 8	2.22E+13	1.19E+12	2.65
C 12	2.07E+13	1.19E+12	2.56
F 3	1.34E+13	5.84E+11	3.08
F 12	1.31E+13	6.04E+11	2.98
F 22	1.05E+13	5.40E+11	2.79
F 29	1.18E+13	5.71E+11	2.89
G 5	9.90E+12	3.60E+11	3.54
G 33	9.19E+12	3.02E+11	3.81
LS 11	6.38E+11	1.27E+10	4.97
LS 21	4.67E+11	9.93E+09	5.46
LS 31	4.62E+11	9.18E+09	5.80
LS 41	4.49E+11	9.97E+09	5.21

Core Position : Thermal Column

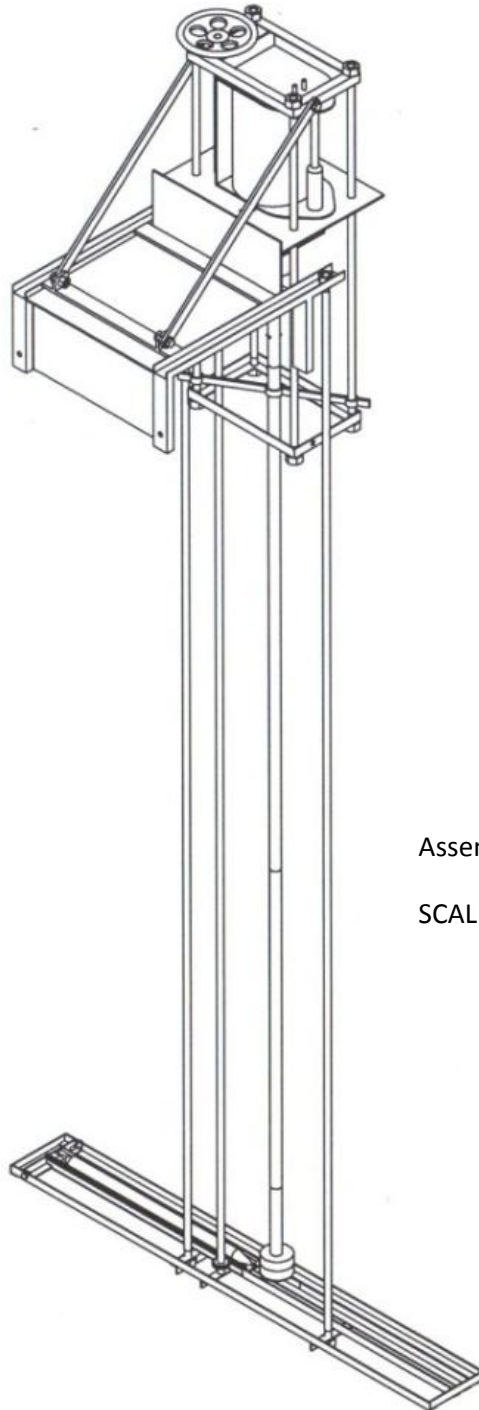
Lazy Susan : Middle

Without Wet Tube for Gems Irradiation

ภาคผนวก ง.

แบบประกอบอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ

แบบประกอบเครื่องมือวัดรังสีแกมมาใต้น้ำ



Assembly Scan Fuel

SCALE 1:80

ภาคผนวก จ.

ตัวอย่างการคำนวณ

จ.1 การคำนวณความมั่งงั่งสีในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

MVP code

ตารางข้อมูลจากโปรแกรม MVP code

หมายเลขแท่ง เชื้อเพลิง	MVP CS137 (อะตอม)	MVP U235 (อะตอม)	ORIGINAL MVP U235 (อะตอม)	Burn-up (%)
Fuel No.8558	4.9536×10^{18}	1.6069×10^{20}	2.5655×10^{20}	37.3650
Fuel No.8572	4.7502×10^{18}	1.5483×10^{20}	2.5287×10^{20}	38.7709
Fuel No.8595	4.4863×10^{18}	1.5226×10^{20}	2.5635×10^{20}	40.6046

จากโปรแกรม MVP แท่งเชื้อเพลิงใหม่หมายเลข 8558 มียูเรเนียม-235 เริ่มต้น

$$N_{U235} = 2.5655 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

จำนวนที่ยูเรเนียม - 235 เหลือถึงวันที่ 18 ธันวาคม 2556

$$N_{U235} = 1.609 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

คำนวณจำนวนยูเรเนียมจากการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ

$$N_{U235} = (2.5655 \times 10^{20}) - (1.609 \times 10^{20}) \text{ อะตอม}$$

$$N_{U235} = 0.9565 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

คำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าเผาไหม้เชื้อเพลิง

$$B(\%) = \left[\frac{0.9565 \times 10^{20}}{2.5655 \times 10^{20}} \right] \times 100$$

$$B(\%) = 37.365\%$$

จ.2 การคำนวณค่าความแรงรังสีและแปรผลเป็นค่าเผาไหม้ด้วยวิธีการคำนวณ

จากสมการที่ (12) สามารถคำนวณค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 ที่เหลือถึงวันที่ 18 ธันวาคม 2556 จากการใช้แท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ในการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ครั้งที่ 1 ได้ดังนี้

$$\text{จาก } A_{cal} = (y_{Cs137} \times n_{U235} \times \sigma_{U235} \times \phi)(1 - e^{-\lambda_{Cs137}t_0})(e^{-\lambda_{Cs137}t_d})$$

$$\text{เมื่อ } y_{Cs137} = 6.337\%$$

$$n_{U235} = 9.6709 \times 10^{22} \text{ อะตอม}$$

$$\sigma_{U235} = 3.26 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \text{ (ที่อุณหภูมิแท่งเชื้อเพลิง 360 องศาเซลเซียส)}$$

$$\phi = 1.05 \times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (ข้อมูลภาคผนวก ค.ขณะเดินเครื่องที่กำลัง 1200 กิโลวัตต์)}$$

$$\lambda_{Cs137} = \frac{0.693}{30.17} = 0.02297 \text{ (ค่าครึ่งชีวิตของซีเซียม-137 มีค่า 30.17 ปี)}$$

$$t_0 = 0.5393 \text{ ปี}$$

$$t_d = 33.8548 \text{ ปี}$$

$$\text{แทนค่าได้ } A_{cal} = 1.19 \times 10^{11} \text{ dps.}$$

ซึ่งค่าที่คำนวณได้เป็นค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 จากการเกิดฟิชชันหลังการเดินเครื่องในแกนที่ 1 ที่เหลือถึงวันที่ 18 ธันวาคม 2556 และแท่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ได้ถูกใช้งานในแกนเครื่องปฏิกรณ์ 18 ครั้งในตำแหน่งต่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ตามข้อมูลจากศูนย์เครื่องปฏิกรณ์สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ตารางที่ 4.3-4.5 เมื่อคำนวณค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 จากการเดินเครื่องทั้งหมดแล้ว ได้ค่าความแรงรังสีของซีเซียม-137 รวม 1.47×10^{12} dps.

การคำนวณจำนวนอะตอมของซีเซียม-137 จากสมการที่ (14)

$$N_{Cs137} = \frac{A_{Cs137}}{\lambda_{Cs137}}$$

$$\text{แทนค่า } N_{Cs137} = \frac{1.47 \times 10^{12}}{7.28 \times 10^{-10}}$$

$$N_{Cs137} = 2.018 \times 10^{21} \text{ อะตอม}$$

การคำนวณจำนวนอะตอมของยูเรเนียม-235 ที่เกิดการฟิชชันได้จากสมการที่ (15)

$$N_{235} = \frac{N_{Cs137}}{y_{Cs137}}$$

แทนค่า
$$N_{235} = \frac{2.018 \times 10^{21}}{0.06337}$$

$$N_{235} = 5.90 \times 10^{22} \text{ อะตอม}$$

จำนวนอะตอมยูเรเนียมที่เหลือในแท่งเชื้อเพลิง

$$N_{235}^f = 9.6709 \times 10^{22} - 5.90 \times 10^{22}$$

$$N_{235}^f = 3.7709 \times 10^{22}$$

การหาค่าเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้วได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (16)

$$B(\%) = \frac{N_{235}^0 - N_{235}^f}{\frac{N_{235}^0}{0.93}} \times 100\%$$

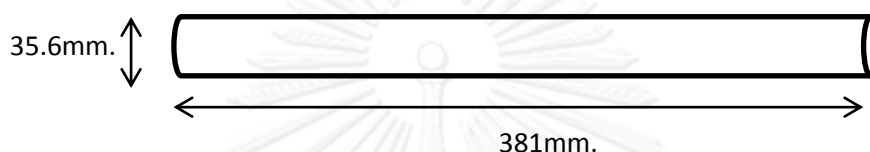
แทนค่า
$$B(\%) = \frac{9.6709 \times 10^{22} - 3.7709 \times 10^{22}}{\frac{9.6709 \times 10^{22}}{0.93}} \times 100\%$$

$$\underline{B(\%) = 56.76\%}$$

จ.3 การคำนวณแรงรังสีและแปรผลเป็นค่าเผาไหม้ด้วยวิธีการทดลอง

1) การคำนวณปริมาตรของเชื้อเพลิงเทียบกับปริมาตรจุดที่ทดลอง (Volume fraction)

- ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงในเชื้อเพลิงหนึ่งแท่ง



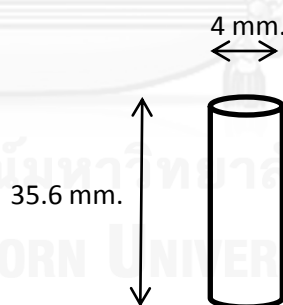
ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงในเชื้อเพลิงหนึ่งแท่ง (V) = $\pi r^2 L$

แทนค่า
$$V = \pi \times \left(\frac{35.6}{2}\right)^2 \times 381$$

ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงในเชื้อเพลิงหนึ่งแท่ง = $379,240.62 \text{ mm}^3$

- ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆของการวัดรังสีในการทดลอง

การวัดรังสีโดยท่อบังคับลำรังสี เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะจำกัดให้หัววัดรังสีสามารถวัดรังสีได้เฉพาะจุดที่กำลังวัดรังสีเท่านั้น โดยจุดที่ทำการทดลองจะมีปริมาตรดังนี้



ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงส่วนจุดที่ทดลอง (v) = $\pi r^2 L$

แทนค่า
$$v = \pi \times \left(\frac{4}{2}\right)^2 \times 35.6$$

ปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิงส่วนจุดที่ทดลอง = 447.36 mm^3

Volume fraction = $379,240.62 \text{ mm}^3 / 447.36 \text{ mm}^3$

Volume fraction = 847.73

2) ผลการทดสอบท่อคอลลิเมเตอร์ หาประสิทธิภาพการส่งผ่านรังสีแกมมา

ลักษณะของต้นกำเนิดรังสี ซีเซียม-137 ที่ใช้ทดสอบ

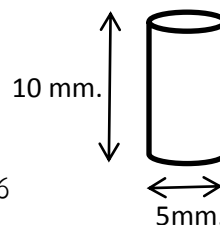
รูปทรงต้นกำเนิดรังสี : ทรงกระบอก

ประเภท : Standard / Calibration

ความแรงรังสี 25 mCi เมื่อวันที่ผลิต 1 มีนาคม 2545

หาความแรงรังสีแกมมาวันใช้งานวันที่ 21 ตุลาคม 2556

จากสมการหาความแรงรังสีแกมมาช่วงเวลาใดๆ (A_t)



$$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$$

เมื่อ $A_0 = 25 \text{ mCi}$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{30.17}$$

$$\lambda = 0.0229747$$

$$t = \text{จากวันที่ } 1/3/45 \text{ ถึง } 21/10/56$$

$$= 10 \text{ ปี } 233 \text{ วัน } = 10.638 \text{ ปี}$$

$$\text{แทนค่า } A_t = 25 e^{-(0.0229747) \times 10.638}$$

$$A_t = 25 e^{-0.2444}$$

ดังนั้น ความแรงรังสีของ Cs-137 ขณะวันที่ 21/10/56

$$A_t \equiv 19.579 \text{ mCi}$$

ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา

กรณีท่อยาว 3.3 เมตร มีอุปกรณ์ครบผ่านท่อ 4 มิลลิเมตร พร้อมตะกั่วกันรังสีและหน้าต่างรับรังสีหนา 1.5 มิลลิเมตร

$$\text{จากสูตรหาประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี} = \frac{\text{ค่าวัดได้}}{\text{ค่าปลดปล่อยออก}} = \frac{\text{cps}}{\text{dps}}$$

dps = การปลดปล่อยจากต้นกำเนิดรังสี

cps = การวัดได้ของระบบวัดรังสี

จากการทดลองได้ผลการนับรังสี = 10,625 โฟตอน ใช้เวลานับรังสี 1,000 วินาที

$$\frac{13286}{1,000} = 13.29 \pm 0.12 \text{ cps}$$

จากการคำนวณการปลดปล่อยโฟตอนของ ซีเซียม-137 ความแรง 19.579 mCi

จากความสัมพันธ์ $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$

ดังนั้น $19.579 \text{ mCi} = 0.019579 \text{ Ci}$

$$\begin{aligned} \text{แปลงเป็น dps} &= 0.019579 \times 3.7 \times 10^{10} \\ &= 7.24423 \times 10^8 \text{ dps} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{13.29}{7.24423 \times 10^8}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี} = 1.8346 \times 10^{-8}$$

3) การคำนวณแรงรังสีจากผลการทดลอง

ค่านับรังสีแห่งเชื้อเพลิงหมายเลข 8558 ตำแหน่ง Upper End = 43.51 cps.

คำนวณค่าความแรงรังสีสุทธิของซีเซียม-137 จากสมการที่ (13)

$$A_{\text{exp}} = \frac{C}{(\epsilon \times r \times f)}$$

$$C = 43.51 \text{ cps}$$

$$\epsilon = (1.8346 \pm 0.016) \times 10^{-8}$$

$$r = 0.85$$

$$f = 0.5613$$

แทนค่า

$$A_{\text{exp}} = \frac{43.51}{(1.8346 \times 10^{-8} \times 0.85 \times 0.5613)}$$

$$A_{\text{exp}} = 3.59 \times 10^9 \text{ dps}$$

คำนวณค่าความแรงรังสีในแท่งเชื้อเพลิง

$$A_{\text{exp,total}} = 3.59 \times 10^9 \times 847.73 \text{ dps}$$

$$A_{\text{exp,total}} = 2.90 \times 10^{12} \text{ dps.}$$

เมื่อไอโซโทปรังสีในเชื้อเพลิงจะเกิดจากการฟิชชันตามการเดินเครื่องปฏิกรณ์ จึงสามารถคำนวณจำนวนอะตอมเริ่มต้นของยูเรเนียม-235 ได้จากการเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความแรงรังสีรวมของซีเซียม-137 กับจำนวนอะตอมของยูเรเนียม-235 ที่เกิดการฟิชชันทั้งหมดในแท่งเชื้อเพลิง หมายเลข 8558 ในภาคผนวก จ.1 ได้ค่าอัตราส่วน 2.489879×10^{-11} จำนวนอะตอมของยูเรเนียม-235 ที่เกิดการฟิชชัน

$$N_{235} = \frac{N_{\text{Cs137}}}{\text{fraction}}$$

แทนค่า

$$N_{235} = \frac{2.90 \times 10^{12}}{2.489879 \times 10^{-11}}$$

$$N_{235} = 1.1647 \times 10^{23} \text{ อะตอม}$$

จำนวนอะตอมยูเรเนียมที่เหลือในแท่งเชื้อเพลิง

$$N_{235}^f = 9.6709 \times 10^{22} - 1.1647 \times 10^{23}$$

$$N_{235}^f = -1.9761 \times 10^{22} \text{ อะตอม}$$

การหาค่าเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใช้แล้วได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (16)

$$B(\%) = \frac{N_{235}^0 - N_{235}^f}{\frac{N_{235}^0}{0.93}} \times 100\%$$

แทนค่า

$$B(\%) = \frac{9.6709 \times 10^{22} + 1.9761 \times 10^{22}}{\frac{9.6709 \times 10^{22}}{0.93}} \times 100\%$$

ดังนั้นค่าเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิง $B(\%)$ หมายเลข 8558 ตำแหน่ง Upper End

$$\underline{B(\%) = 111.86\%}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมคิด เชาว์ช่างเหล็ก เกิดเมื่อวันที่ 2 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2550 ทำงานที่บริษัท วัฒนไพศาลเอ็นยีเนียริง จำกัด (VATANA PHAISAL ENGINEERING CO.,LTD.) เป็นเวลา 2 ปี จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY