

การพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน

นางสาวโสภาวดี บริบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

DEVELOPMENT OF STANDARDLESS NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

Miss Sopawadee Boriboon

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน
	แบบไม่ใช้สารมาตรฐาน
โดย	นางสาวโสภาวดี บริบูรณ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
 (รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 (อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวาณิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
 (ดร.สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์)

..... กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
 (รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

โสภาวดี บริบูรณ์ : การพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้
 สารมาตรฐาน . (DEVELOPMENT OF STANDARDLESS NEUTRON ACTIVATION
 ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.พงษ์แพทย์ เพ็งวานิชย์ , อ. ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.สิรินาฏ เลหาะโรจนพันธ์ 93 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุที่มีในข้าวเพื่อให้การ
 วิเคราะห์ข้าวมีความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และเป็นพื้นฐานในการวัดธาตุในข้าวที่มีปริมาณ
 มากๆ ในอนาคต โดยได้ทำการตรวจวิเคราะห์ข้าว 3 ตัวอย่าง คือ ข้าวมาตรฐาน ข้าวกล้อง และ
 ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการการวิเคราะห์ข้าวครั้งนี้คือ นิวตรอนแอกติเวชัน ทั้งแบบใช้
 สารมาตรฐานและแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน แต่เนื่องจากว่า การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอน
 แอกติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน มีข้อจำกัดทางด้านสารมาตรฐานที่นำมาใช้เปรียบเทียบ
 เนื่องจากสารมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบจะต้องมีรูปร่างและขนาดที่เหมือนกับตัวอย่างที่
 ต้องการวิเคราะห์ เพื่อให้มีค่าความเข้มของรังสีเท่ากันทุกจุด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความยุ่งยากในการ
 เตรียม เพื่อแก้ปัญหาในจุดนี้ จึงมีการพัฒนาการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอนแบบไม่ต้องใช้สาร
 มาตรฐานขึ้น ทำให้สามารถลดข้อจำกัดในการเตรียมสารมาตรฐานที่เกิดขึ้นได้ และสามารถ
 ทราบผลทั้งทางด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้จากการวัดเพียงครั้งเดียว ทำให้
 เกิดความสะดวกมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการทำวิจัยนี้จะเป็นการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ซึ่งถูก
 พัฒนาโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ มาช่วยในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์
 ต่างๆในสมการที่ใช้เกี่ยวกับการคำนวณเรื่องการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอนแบบไม่ต้องใช้สาร
 มาตรฐาน ทำให้สามารถทำการตัดค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการทำวิจัยมากขึ้น โปรแกรม
 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้คือ โปรแกรม เคซีโร ไอเออีเอ เบสิก พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการ
 วิเคราะห์ธาตุแบบ ไม่ใช้สารมาตรฐาน เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าที่ได้จาก วิธีการวิเคราะห์
 ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบ และมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพ
 ของวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานในการวิเคราะห์ข้าว

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170506221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : k_0 METHOD / COMPARATIVE METHOD / INAA / RICE / NEUTRON
TECHNIQUE / ELEMENT ANALYSIS

SOPAWADEE BORIBOON : DEVELOPMENT OF STANDARDLESS NEUTRON
ACTIVATION ANALYSIS. ADVISOR : PHONGPHAETH PENGVANICH, Ph.D.,
CO-ADVISOR : SIRINART LAOHAROJANAPHAND, Ph.D., 93 pp.

This research aims to develop a method for analyzing elemental content of rice that is less time consuming than the conventional method and will be capable of analyzing large quantity of rice. The samples studied in this research are standard rice, brown rice, and black jasmine rice. Neutron activation analysis based on comparative method and neutron activation analysis based on standardless method have been applied. However, the neutron activation analysis based on the comparative method requires standard that has the same shape and size as the sample, which can be complicated and time consuming to prepare. To eliminate these issues, the NAA based on standardless method has been developed. This method can both qualitatively and quantitatively analyze elemental content of a sample in a single measurement, which eliminates the need to prepare standard. This research used, the k_0 IAEA Basic program developed by International Atomic Energy Agency (IAEA) to calculate and analyze various parameters needed for the standardless method. The results of the two methods are comparable which demonstrates the use of standardless method for analyzing rice's elemental content.

Department : Nuclear Technology.....

Student's Signature

Field of Study : Nuclear Technology.....

Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือของ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งได้ตรวจทาน แก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) ที่สนับสนุนโปรแกรม k0-IAEA basic ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ Dr. Ho Manh Dung จาก UNIVERSITY OF NATURAL SCIENCES VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY, HO CHI MINH CITY (UNS-HCM) VIETNAM ที่ช่วยในการให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม k0-IAEA basic ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณวันชัย ธรรมวานิช, คุณวิเชียร รตนธงชัย สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรพจน์ เพิ่มน้ำทิพย์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ช่วยสอนการใช้เครื่องมือการวิจัยพร้อมทั้งเทคนิคต่างๆ และคำแนะนำตลอดการทำงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณสุรคม ทองแถม ณ อยุธยา ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำวิจัย และเพื่อนๆ ทุกคน ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านด้วยความรักและห่วงใย จนกระทั่งการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรนี้ได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3. ขอบเขตของการทำวิจัย.....	3
1.4. ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ทฤษฎี.....	7
2.1. นิเวตรอน.....	7
2.1.1. คุณสมบัติบางประการของนิเวตรอน.....	7
2.1.2. ชนิดของนิเวตรอน.....	9
2.1.3. ต้นกำเนิดรังสีนิเวตรอน.....	10
2.1.4. อันตรกิริยาระหว่างนิเวตรอนกับสสาร.....	12
2.2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในประเทศไทย.....	19
2.2.1. อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย.....	20
2.2.2. ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย.....	20
2.2.3. ป้อนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	21
2.2.4. ประตูกู้มน้ำ.....	22

บทที่	หน้า
2.2.5. สะพานเครื่องปฏิกรณ์.....	23
2.2.6. ลักษณะแกนเครื่องปฏิกรณ์.....	23
2.2.7. แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม.....	24
2.2.8. แท่งควบคุม.....	25
2.2.9. สารหน่วงความเร็วนิวตรอน.....	25
2.2.10. ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	26
2.2.11. การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์.....	26
2.2.12. การควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่.....	26
2.2.13. นิวตรอนฟลักซ์.....	26
2.3. หัววัดรังสีแกมมา.....	27
2.3.1. ระบบวัดรังสี.....	28
2.3.2. การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน.....	29
2.3.3. วิธีการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบใช้ สารมาตรฐาน.....	31
2.3.4. วิธีการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบไม่ใช้สาร มาตรฐาน.....	35
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	42
3.1. วัสดุและอุปกรณ์.....	48
3.2. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	61
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	61
4.1. ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Cs-137.....	62
4.2. ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Eu-152.....	69
4.3. ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Au-198.....	71
4.4. ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จากตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิด.....	83
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1. ข้อเสนอสรุปและวิจารณ์.....	83

บทที่	หน้า
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลังงานจลน์ของนิวตรอน.....	9
3.1 ขนาดและวัสดุที่ใช้ทำหัววัด.....	49
3.2 ขนาดของภาชนะบรรจุสาร.....	52
3.3 ลักษณะทางกายภาพของชุดตัวอย่าง.....	53
3.4 เวลาที่ใช้ในการบรรจุสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง.....	54
3.5 เวลาที่ใช้ในการวัดรังสีแกมมา.....	55
3.6 เวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน.....	56
4.1 ปริมาณธาตุที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน.....	73
4.2 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุ โดยโปรแกรม k_0 และค่าใน Certification ของข้าวมาตรฐาน.....	75
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดย โปรแกรม k_0 และปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดย วิธี Comparative ของข้าวกล้อง.....	77
4.4 ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม k_0 ของ ข้าวกล้อง.....	78
4.5 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดย โปรแกรม k_0 และปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดย วิธี Comparative ของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล.....	80
4.6 ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม k_0 ของ ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล.....	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การทดลองที่ค้นพบนิวตรอนของแชดวิก	8
2.2 เครื่องผลิตนิวตรอน	10
2.3 การกระเจิงแบบยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอน	13
2.4 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอน	14
2.5 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน	14
2.6 ปฏิริยาการแตกตัวของนิวตรอน	15
2.7 ปฏิริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ	16
2.8 ค่าภาคตัดขวางการเกิดปฏิริยาของนิวตรอนในแต่ละพลังงาน	17
2.9 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	19
2.10 อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	20
2.11 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1.....	21
2.12 ประตูกั้นน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในไทย	22
2.13 สะพานเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	23
2.14 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม.....	24
2.15 การเปรียบเทียบขนาดแท่งควบคุมและแท่งเชื้อเพลิง.....	25
2.16 ภาคตัดขวางของหัววัดรังสีแบบ Coaxial HPGE.....	27
2.17 ระบบวัดรังสีแกมมา.....	29
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีและเวลาในการอาบรังสี, เวลาในการปลดปล่อยรังสี และเวลาในการนับวัดรังสี.....	34
2.19 รูปร่างลักษณะของพีคและค่าตัวแปรต่างๆ.....	39
3.1 หัววัดรังสีที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.2 ภาชนะบรรจุสาร.....	42
3.3 Standard Reference Material 1568a.....	43
3.4 ขี้าวกล้าง	44
3.5 ขี้าวหอมมะลีสีนิด	44

ภาพที่	หน้า
3.6 ซีซีเอ็ม -137.....	45
3.7 ยูโรเปียม-152.....	46
3.8 ตัวเปรียบเทียบ (Comparator).....	46
3.9 ส่วนประกอบของหัววัด.....	50
3.10 ส่วนประกอบของภาชนะบรรจุสาร.....	51
3.11 สกูลไฟล์ของ Serial Data Base ที่ใช้ในโปรแกรม k_0	57
3.12 สกูลไฟล์ของค่าพลังงานที่ใช้ในโปรแกรม k_0	58
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงานของ ซีซีเอ็ม-137.....	60
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงานของ ยูเรเนียม-152.....	61
4.3 กราฟการปรับเทียบค่าพลังงานของโปรแกรม k_0	62
4.4 กราฟการปรับเทียบค่าพลังงานของโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	62
4.5 กราฟการปรับเทียบรูปร่างลักษณะพีคของโปรแกรม k_0	63
4.6 กราฟการปรับเทียบรูปร่างลักษณะพีคของโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	64
4.7 กราฟการปรับเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโปรแกรม k_0	64
4.8 กราฟการปรับเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	65
4.9 Full Energy peak ของโปรแกรม k_0	66
4.10 Peak to total ratio ของโปรแกรม k_0	66
4.11 Single escape peak ของโปรแกรม k_0	67
4.12 Double escape peak ของโปรแกรม k_0	67
4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทองในโปรแกรม k_0	68
4.14 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทองในโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score	68
4.15 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทองในโปรแกรม k_0 เมื่อปรับเทียบค่า ประสิทธิภาพของหัววัดแล้ว.....	69
4.16 ค่าฟลักซ์นิวตรอนของ Au-198 (IRMM-530) ในโปรแกรม k_0	70
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงานของข้าวมาตรฐาน.....	71
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงานของข้าวกล้อง	71
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงานของข้าวหอม มะลิสีน้ำตาล.....	72

ภาพที่		หน้า
4.20	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานที่ได้จากโปรแกรม k_0	74
4.21	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานในจากโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	74
4.22	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานในจากโปรแกรม k_0 ที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพแล้ว.....	75
4.23	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวกล้องที่ได้จากโปรแกรม k_0	76
4.24	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวกล้องในจากโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	76
4.25	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวกล้องในจากโปรแกรม k_0 ที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพแล้ว.....	77
4.26	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่ได้จากโปรแกรม k_0	79
4.27	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลในจากโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score.....	79
4.28	สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลในจากโปรแกรม k_0 ที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพแล้ว.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ข้าวโดยทั่วไปมีธาตุปริมาณน้อยที่เป็นองค์ประกอบอยู่หลายธาตุ เช่น โซเดียม แมกนีเซียม โปแทสเซียม เป็นต้น ซึ่งอัตราส่วนของปริมาณธาตุที่มีในข้าวแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของภูมิประเทศขึ้นอยู่กับ สภาพภูมิประเทศและสภาพของดินที่ใช้ปลูก ด้วยสาเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มีการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในข้าวขึ้น เพราะคนไทยบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก และข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่ใช้ส่งออกไปขายต่างประเทศอีกด้วย

การวิเคราะห์ธาตุทางนิวเคลียร์โดยทั่วไปจะมีหลายวิธี เช่น วิธีการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence technique) เป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวก รวดเร็ว ให้ความแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) และยังสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหรือทำการวิเคราะห์ ณ พื้นที่ภายนอกห้องปฏิบัติการ แต่ถ้าตัวอย่างมีปริมาณมาก ๆ การวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะเป็นการวิเคราะห์เพียงแค่ว่าบริเวณผิวของตัวอย่างเท่านั้น และผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็ไม่สามารถเป็นค่าเฉลี่ยตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมดที่ดีพอ อาจต้องทำการสุ่มวัดหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น และวิธีวิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์อีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่าง อีกทั้งเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ธาตุในข้าว คือ การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation technique) เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเช่นกัน ค่อนข้างให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำสูง แต่มักทำการวิเคราะห์โดยการสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และมีข้อจำกัดสำหรับไอโซโทปครึ่งชีวิตยาว (Half-life) หรือมีภาคตัดขวาง (Cross section) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนต่ำ ทำให้จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์กับต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีความเข้มรังสีสูง ๆ เพื่อให้ได้ความแรงรังสีของไอโซโทปครึ่งชีวิตที่เกิดขึ้นสูงซึ่งจะทำให้ความไวในการวิเคราะห์ (Analytical sensitivity) สูงพอสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อย

การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน คือการนำเอาสารตัวอย่างที่ไม่มีรังสีไปอบรังสีนิวตรอน ซึ่งเมื่ออะตอมในสารตัวอย่างรับนิวตรอนเข้าไป จะกลายเป็นไอโซโทปครึ่งชีวิตที่ไม่เสถียร

และปลดปล่อยรังสีออกมาในรูปของรังสีแกมมา ปฏิริยาที่เปลี่ยนจากนิวตรอนเป็นรังสีแกมมา เป็นปฏิริยาพื้นฐานทางนิวเคลียร์ ซึ่งเรียกว่าปฏิริยา (n, γ) โดยนิวตรอนที่ใช้ในการทำปฏิริยา ส่วนใหญ่จะเป็นเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) ส่วนรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจะมีพลังงาน เฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของไอโซโทป ดังนั้น หากทำการวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูก ปลดปล่อยออกมา จะสามารถระบุได้ว่าสารตัวอย่างประกอบด้วยไอโซโทปหรือธาตุชนิดใดบ้าง นอกจากนี้ ความเข้มข้นหรือค่ากัมมันตภาพรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะแปรผันตามปริมาณของ ไอโซโทปนั้น ๆ ที่มีในสารตัวอย่าง ซึ่งในขณะเดียวกันขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของสารตัวอย่างและ เวลาในการอบรังสีนิวตรอน โอกาสในการเกิดปฏิริยานี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน จำนวนนิวตรอนที่เข้าทำปฏิริยา และจำนวนอะตอมของสารตัวอย่าง กล่าวคือ หากมีจำนวน นิวตรอนที่เข้ามาทำปฏิริยามาก โอกาสในการเกิดปฏิริยาก็คงมากตามไปด้วย และหากจำนวน อะตอมของสารตัวอย่างมีค่ามาก ก็มีโอกาสนในการเกิดปฏิริยามากขึ้นเช่นกัน

ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอนที่ปฏิบัติกันเป็นในประเทศไทยจะใช้วิธีที่เรียกว่า วิธีการเปรียบเทียบ (Comparative method) ซึ่งใช้สารมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบในการหาค่า ความเข้มข้นหรือค่ากัมมันตภาพรังสี โดยนำตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนไป อบรังสีพร้อมกันกับตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้น (หรือ กัมมันตภาพรังสี) ของธาตุใด ๆ ในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ต่อค่าความเข้มข้นของธาตุชนิด เดียวกันในสารมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของสารมาตรฐานและจำนวนอะตอมของ ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับเวลาในการอบรังสี อย่างไรก็ตาม การ วิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน มีข้อจำกัดทางด้านสารมาตรฐานที่นำมาใช้ เปรียบเทียบ เนื่องจากสารมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบจะต้องมีรูปร่างและขนาดที่เหมือนกับ ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อให้มีค่าความเข้มข้นของรังสีเท่ากันทุกจุด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความ ยุ่งยากในการเตรียม เพื่อแก้ปัญหาในจุดนี้ จึงมีการพัฒนาการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอนแบบไม่ ต้องใช้สารมาตรฐาน (Standardless method) ขึ้น ทำให้สามารถลดข้อจำกัดในการเตรียมสาร มาตรฐานที่เกิดขึ้นได้ และสามารถทราบผลทั้งทางด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ได้จากการวัดเพียงครั้งเดียว ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งในการทำวิจัยนี้จะเป็นการนำ โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกพัฒนาโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) มาช่วยในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการ ที่ใช้เกี่ยวกับการคำนวณเรื่องการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอนแบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน ทำให้

สามารถตัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อสะดวกต่อการทำวิจัยมากขึ้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้คือ โปรแกรม k0 IAEA Basic

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้น สามารถพัฒนานำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตได้ เช่น การวัดสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ การวัดสารเจือปนที่มีในข้าว การวัดปริมาณธาตุธาตุที่มีในวัตถุโบราณหรือวัตถุที่ไม่ต้องการทำลายต่อไป ซึ่งวิธีนี้เป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศ เช่น งานวิจัยของประเทศอินเดียในปี ค.ศ. 2003 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยเทคนิค Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) ซึ่งทำโดยการนำสารตัวอย่างมาตรฐานไปวางไว้ในตัวอย่างที่เราสนใจและทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบกันโดยที่ตัวอย่างจะมีขนาดใหญ่ คือ Silica ประมาณ 0.5 Kg และ น้ำ ประมาณ 0.5 ลิตร งานวิจัยของ M.Rossbach, M.A. Bacchi, Xilei Lin. ในปี ค.ศ. 2007 เป็นการทดลองใช้โปรแกรมใหม่ คือ โปรแกรม k_0 -IAEA มาวิเคราะห์ปริมาณธาตุในดิน และในปี ค.ศ. 2008 M.J.J. Koster-Ammerlaan, M.A. Bacchi, P.Bode, E.A. De Nadai Fernandes. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิเทอร์มัลนิวตรอน ฟลักซ์ของประเทศต่าง ๆ เช่น เนเธอร์แลนด์ บราซิล มาเลเซีย และประเทศไทย ซึ่งวัดโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนระหว่างอีพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์และเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน (Standardless Method)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน
- 1.3.2 ปรับเทียบเครื่องมือวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา
- 1.3.3 วิเคราะห์ธาตุในสารมาตรฐานอ้างอิง (Standard reference material, SRM) ด้วยเทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน
- 1.3.4 วิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างข้าว ด้วยเทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน
- 1.4.3 Calibrate เครื่องมือวัดในระยะต่าง ๆ
- 1.4.4 วิเคราะห์ธาตุในสารมาตรฐานอ้างอิงด้วยเทคนิค INAA แบบใช้สารมาตรฐาน
- 1.4.5 วิเคราะห์ธาตุในสารมาตรฐานอ้างอิงด้วยเทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน
- 1.4.6 นำผลที่ได้มาทำการแก้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผล
- 1.4.7 เปรียบเทียบค่าที่ได้ระหว่างแบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐานและแบบใช้สารมาตรฐาน
- 1.4.8 สรุปผลงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิค INAA แบบไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการตรวจสอบส่วนประกอบหรือสารเจือปน และความยุ่งยากในการจัดหาสารมาตรฐาน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1.6.1 ปี ค.ศ. 2009 S. Laoharajanaphand, A. Busanmongkol, S. Chaiyasith, V. Permnamtip, M. Parengam, และ S. Srianujata. [1] ได้เสนองานวิจัยใน Radioanal Nucl Chem เกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในข้าว โดยใช้ NIST SRM1568a เป็นตัวเปรียบเทียบ และได้ทำการวัดแบบ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน 3 ครั้ง จึงได้จำนวนธาตุตามต้องการ
- 1.6.2 ปี ค.ศ. 2002 K.Sudarshan, A.G.C. Nair, A. Goswami. [2] ได้เสนองานวิจัยใน Radiochemistry Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai, India ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างที่ไม่คงที่ในเรื่อง รูปร่างและขนาด ได้มีการทำ efficiency calibration และหาค่า gamma attenuation

ในตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่างคือ IAEA RM's SL-3 และ Soil-7 ทำการวัดในปริมาณ 2-3 มิลลิกรัม ซึ่งผลที่ได้ออกมาคือมีความคล้ายกับในทางทฤษฎี

- 1.6.3 ปี ค.ศ. 2003 A.G.C. Nair, R.Acharya, K.Sudarshan, S.Gangotra, A.V.R.Reddy, S.B.Manohar, A. Goswami. [3] ได้เสนองานวิจัยใน Radiochemistry Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai, India ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยเทคนิค INAA ซึ่งทำโดยการนำสารตัวอย่างมาตรฐานไปวางไว้ในตัวอย่างที่เราสนใจและทำการวัด เพื่อเปรียบเทียบกันโดยที่ตัวอย่างจะมีขนาดใหญ่ คือ Silica ประมาณ 0.5 Kg และ น้ำ ประมาณ 0.5 ลิตร ซึ่งผลที่ได้ออกมาคือมีความคล้ายกับในทางทฤษฎี
- 1.6.4 ปี ค.ศ. 2004 R.Acharya, A.G.C. Nair, A.V.R.Reddy, A. Goswami. [4] ได้เสนองานวิจัยใน Radiochemistry Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai, India ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยเทคนิค INAA ซึ่งตัวอย่างที่ใช้เป็น Zircaloy-2 และ Zircaloy-4 ที่เป็น Cladding ในแท่งเชื้อเพลิงที่ โรงไฟฟ้าแบบ BWR และ PHWR ในประเทศอินเดีย ซึ่งผลที่ได้ออกมาคือมีความคล้ายกับในทางทฤษฎี
- 1.6.5 ปี ค.ศ. 2008 M.J.J. Koster-Ammerlaan, M.A. Bacchi, P.Bode, E.A. De Nadai Fernandes. [5] ได้เสนองานวิจัยใน Applied Radiation and Isotopes เรื่อง A new monitor for routine thermal and epithermal neutron fluence rate monitoring in k_0 INAA ซึ่งเป็นการวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ของประเทศต่าง ๆ เช่น เนเธอร์แลนด์ บราซิล มาเลเซีย และประเทศไทย ซึ่งวัดโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนระหว่าง อีพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์และเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งผลที่ได้เป็นที่ยอมรับ
- 1.6.6 ปี ค.ศ. 2007 M.Rossbach, M.A. Bacchi, Xilei Lin. [6] ได้เสนองานวิจัยใน Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry เรื่อง k_0 -IAEA program ซึ่ง

เป็นการทดลองใช้โปรแกรมใหม่ คือ โปรแกรม k_0 -IAEA มาวิเคราะห์ปริมาณธาตุในดิน ซึ่งผลที่ได้คือ ค่ามีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย

- 1.6.7 ปี ค.ศ. 2006 Matthias Rossbach, Menno Blaauw. [7] ได้เสนอผลงานวิจัยใน Nuclear Instruments and Method in Physics Research เรื่อง Progress in the k_0 -IAEA program ซึ่งเป็นการพัฒนาโปรแกรม k_0

บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎี

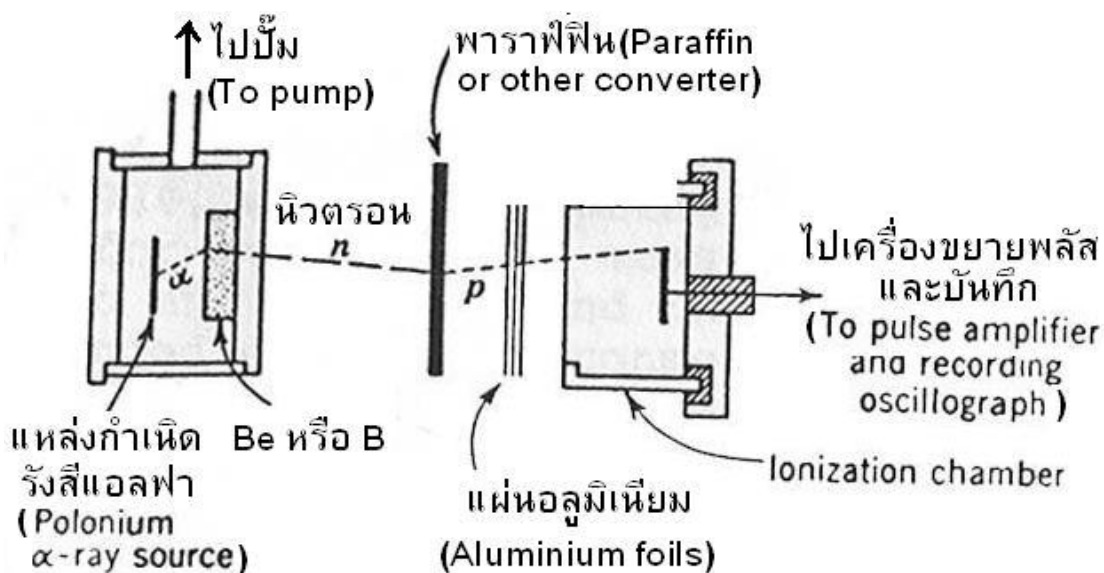
2.1 นิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่รวมตัวอยู่ในนิวเคลียสของอะตอม โดยมีแรงนิวเคลียร์ (Nuclear force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูงมาก ตามปกติในธรรมชาตินิวเคลียสมักจะอยู่ในสภาวะเสถียร แต่ในบางสภาวะถ้ามีสิ่งรบกวนหรือถูกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส นิวตรอนก็จะสามารถหลุดออกมาจากนิวเคลียสได้ นิวตรอนที่หลุดออกมาจะเรียกว่า นิวตรอนอิสระ ซึ่งมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างไปจากอนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียส ดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ทำให้อำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถผ่านอะตอมตัวกลางได้ เนื่องจากไม่มีแรงคูลอมป์ (Coulomb force) ขัดขวางระหว่างเดินทาง นิวตรอนมีมวล (Mass) $939.573 \text{ MeV}/c^2$ หรือ 1.008665 amu หรือ 1.6749×10^{-27} กิโลกรัม มีสปินหรือโมเมนต์เชิงมุมเท่ากับ $1/2\hbar$ และโมเมนต์แม่เหล็ก เท่ากับ -1.9135 นิวตรอนมีค่าครึ่งชีวิต 10.6 นาที โดยสลายตัวให้โปรตอน อิเล็กตรอน และแอนตินิวตริโน นิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย 1_0n ถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษในปี พ.ศ. 2475 เพื่ออธิบายคุณสมบัติของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการชนแผ่นเบริลเลียม (Be) ด้วยอนุภาคแอลฟา (${}^4_2\text{He}$) ซึ่งได้จากธาตุพอลโลเนียม (Po)

จากนั้น ทดลองยิงอนุภาคแอลฟาให้ชนแผ่นเบริลเลียมซ้ำ โดยเปลี่ยนเบริลเลียมเป็นธาตุอื่น เช่น โบรอน (B), ไนโตรเจน (N), ออกซิเจน (O), อาร์กอน (Ar) ฯลฯ ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นภาพที่แสดงลักษณะการทดลองของแชดวิก ในการค้นพบนิวตรอน



ภาพที่ 2.1 การทดลองที่ค้นพบนิวตรอนของเชดวิก

ที่มา : Neutron Interaction [Online]. Available from : [http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426\(50\)/PH426-1.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426(50)/PH426-1.pdf) [17]

จากการทดลองพบว่า เมื่อระดมยิงเบริลเลียม (Be) ด้วยอนุภาคแอลฟา (${}^4_2\text{He}$) จะตรวจพบ ${}^1_0\text{n}$ ดังสมการ



นอกจากนั้น เขายังทำการทดลองกับโบรอน (B)



และเขายังทำการทดลองกับไนโตรเจน (N) , ออกซิเจน (O) , อาร์กอน (Ar) ฯลฯ ทุกครั้งที่เขาทำการทดลอง เขาจะตรวจพบ ${}^1_0\text{n}$ ทุกครั้ง ซึ่งต่อมาพบว่านิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary particles) ชนิดหนึ่ง ประกอบกับโปรตอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่จุดศูนย์กลางของอะตอม หรืออาจเรียกนิวตรอนและโปรตอนว่า นิวคลีออน โดยมีอิเล็กตรอนอยู่ล้อมรอบ

2.1.2 ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ แต่สามารถเลือกช่วงของพลังงานในการใช้งานได้ ด้วยการลดพลังงานลงจากพลังงานตั้งต้น โดยให้ชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสมบัติการกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เรียกว่า การหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Activation rate) จะแปรผันตามความเข้มข้น หรือฟลักซ์ของนิวตรอน (Neutron flux) จำนวนนิวเคลียสของธาตุ (Target nuclide) และภาคตัดขวาง (Cross section) ซึ่งเป็นสมบัติในการเกิดปฏิกิริยา ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุ โดยเป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละนิวไคลด์ มีหน่วยเป็น บาร์น (barn) หรือ 10^{-24} cm^2

โดยทั่วไปการแยกประเภทของนิวตรอนจะแยกตามลักษณะของค่าพลังงานของนิวตรอน ซึ่งจะสามารถแบ่งนิวตรอนออกได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ขนาดพลังงานจลน์ของนิวตรอนสามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิด ดังนี้

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงานของนิวตรอน
โคลด์นิวตรอน (Cold neutron)	<0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 – 0.1 eV
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0.1 – 1 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	1 – 1,000 eV
นิวตรอนระดับกลาง (Intermediate neutron)	1 keV– 0.1 MeV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	0.1 – 20 MeV

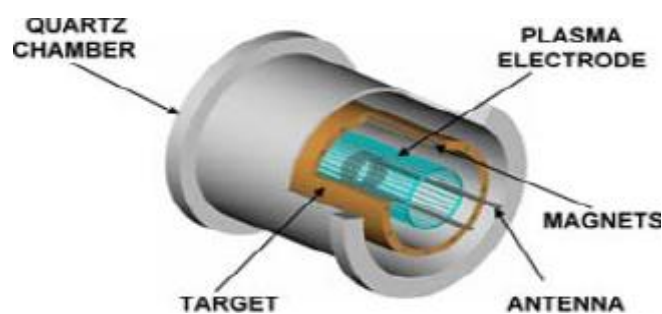
ที่มา : Neutron energy [Online]. Available from: <http://km.oaep.go.th/vlibrary> [18]

2.1.3 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron source)

ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มักนิยมใช้งานในการผลิตรังสีนิวตรอนโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.1.3.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle accelerator)

เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ทำได้โดยการเร่งให้อนุภาคของธาตุชนิดหนึ่ง เช่น โปรตอน, ดิวเทอเรียม หรือฮีเลียม ให้มีพลังงานสูงและไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่ง เช่น ทริเทียม แล้วเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันขึ้น (Fusion reaction) ซึ่งนิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องผลิตนิวตรอน (Neutron generator) ดังที่แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 เครื่องผลิตนิวตรอน

ที่มา : Neutron generator [Online]. Available from :

<http://www.core.org.cn/OcwWeb/Nuclear-Engineering/22-106Spring-2005/CourseHome/index.htm> [19]

2.1.3.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

(1) ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา (Alpha emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาที่เรียกว่า แอลฟา-นิวตรอน (α, n) โดยมีไอโซโทปที่สลายตัวให้รังสีแอลฟา เช่น ^{239}Pu , ^{241}Am และ ^{238}U ผสมกับเป้าที่เป็นธาตุเบาบางชนิดที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนต่ำ เช่น ^9Be ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มข้นนิวตรอนในช่วง $10^5 - 10^7$ นิวตรอนต่อคูรีต่อวินาที

(2) ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้รังสีแกมมา (Photonuclear source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ, n) โดยการผสมธาตุเบาที่มีค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวต่ำ เช่น เบริลเลียม กับไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา (Gamma emitter source) ที่มีพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ขึ้นไป นิวตรอนที่ได้มักจะมีพลังงานต่ำจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้งาน

(3) ไอโซโทปชนิดที่มีการแตกตัวของนิวเคลียส (Spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสีบางชนิด ซึ่งสามารถแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมา นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ย 2.14 MeV เช่น ^{252}Cf

2.1.3.3 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor)

เป็นต้นกำเนิดที่เกิดเนื่องจากการแตกตัวของไอโซโทปของธาตุหนัก เช่น ^{235}U เมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอน 1 ตัว จากนั้นนิวตรอนเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) พลังงานของนิวตรอนที่ได้มีค่าเฉลี่ย ประมาณ 2.5 MeV ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียสมีดังนี้

- (1) ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source)
- (2) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel)
- (3) ตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน (moderator)
- (4) ตัวสะท้อนนิวตรอน (reflector)
- (5) สารหล่อเย็น (coolant)
- (6) แท่งควบคุมปฏิกิริยา (control rod)

(7) วัสดุกำบังรังสี (shielding)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สามารถแบ่งได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้เกณฑ์อะไรเป็นหลัก ถ้าแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานจะมีอยู่ 2 แบบดังนี้

(1) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง (Nuclear power reactor) มุ่งไปในการผลิตพลังงานความร้อนที่มีปริมาณสูงมาก และถ่ายเทความร้อนนั้นให้อยู่ในรูปของพลังงานกลเพื่อนำไปใช้ในการหมุนกังหันไอน้ำเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือหมุนใบพัดเพื่อขับเคลื่อนเรือดำน้ำ และเรือเดินสมุทรขนาดใหญ่ เป็นต้น

(2) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (Nuclear research reactor) ใช้ในการศึกษาค้นคว้าและทดลองเพื่อใช้ประโยชน์ ของพลังงานนิวเคลียร์และการผลิตไอโซโทปรังสี

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ กำลัง มีลักษณะที่ต่างไปจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังต้องการนำความร้อนที่เกิดขึ้นมาใช้งาน เช่น หมุนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยต้องการเอาอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นมาใช้งานวิเคราะห์วิจัยและผลิตไอโซโทปรังสี โดยที่ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายทิ้ง เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังโดยทั่วไปมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยเป็นอย่างมาก เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติมีขนาดกำลังความร้อนเพียง 2 เมกะวัตต์ ซึ่งเล็กกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยทั่วไป ที่มีขนาดกำลังความร้อนประมาณ 3000 เมกะวัตต์ ความร้อนน้อยกว่าถึง 1500 เท่า

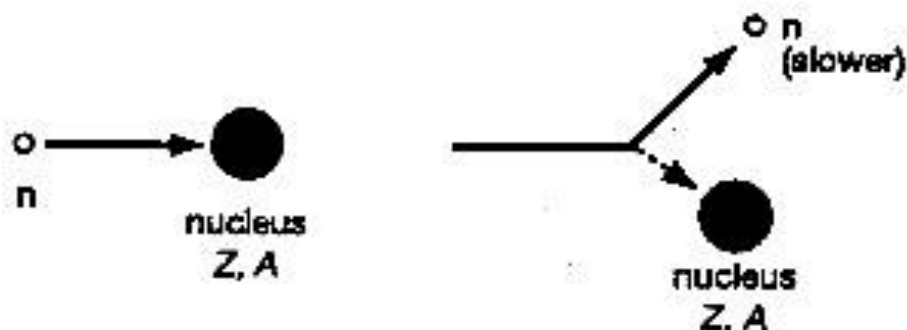
2.1.4 อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอน สามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้หลายแบบขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของสสาร ซึ่งในการ ชนของนิวตรอนกับสสารจะเป็นการชน กับนิวเคลียสของอะตอม โดยจะเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เป็นการชนที่มีการแลกเปลี่ยนเฉพาะโมเมนตัมเท่านั้น โดยที่เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของสสารซึ่ง นิวเคลียสที่ถูกชนอยู่ในภาวะปกติ (Ground state) นิวตรอนจะ กระเจิงออกมา โดยที่มีพลังงานจลน์รวมจลน์ของนิวเคลียสและนิวตรอนเท่าเดิม (พลังงานจลน์ก่อนชน และหลังชนเท่ากัน) แต่ทิศทางเคลื่อนที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในภาพที่ 2.3 อันตรกิริยาแบบนี้

บางที่เรียกว่า การกระเจิงแบบโพเทนเชียล (Potential scattering) สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n,n)



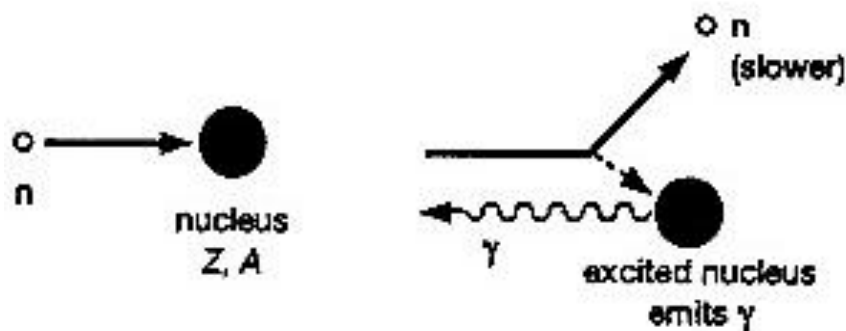
ภาพที่ 2.3 การกระเจิงแบบยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอน

ที่มา : Neutron Interaction [Online]. Available from :

http://www.petrolog.net/webhelp/Logging_Tools/cnl/cnl.html [20]

2.1.4.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของสสาร ซึ่งอยู่ในภาวะปกติ หลังจากชนแล้ว นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็น Compound nucleus นิวเคลียสที่ถูกชนจะเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) แล้วสลายตัวลงสู่สภาวะพื้น เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ทำให้พลังงานจลน์รวมก่อนชนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือ พลังงานจลน์ของระบบหลังชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา เป็นปฏิกิริยาดูดกลืนพลังงาน ทำให้ค่า Q มีค่าเป็นลบ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งการเกิดอันตรกิริยาเช่นนี้นิวตรอนต้องมีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ ส่วนนิวตรอนจะกระเจิงออกมา โดยมีพลังงานลดลง และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเช่นกัน สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, n')



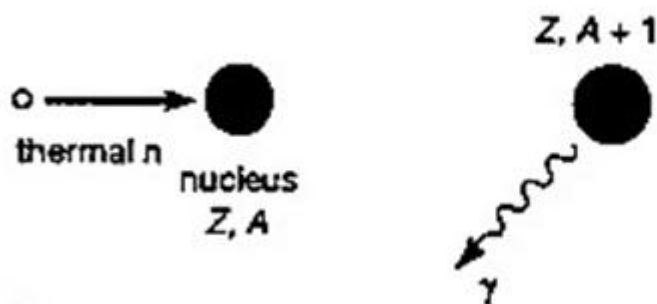
ภาพที่ 2.4 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอน

ที่มา : Neutron Interaction [Online]. Available from :

http://www.petrolog.net/webhelp/Logging_Tools/cnl/cnl.html [20]

2.1.4.3 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture)

เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของสสารแล้วถูกจับไว้ นิวเคลียสที่ถูกชนจะจับนิวตรอนไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 แล้วให้รังสีแกมมาออกมา หรือเรียกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Neutron captured gamma-rays) เพราะเมื่อรับนิวตรอนแล้วทำให้นิวเคลียสอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นแล้วปล่อย รังสีแกมมาออกมาก็ตัวก็ได้ เป็นอันตรกิริยาคายพลังงาน ค่า Q จะเป็นบวก สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,γ) อันตรกิริยานี้อาจถูกเรียกว่า อันตรกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) หรือเรดิเอทีฟแคปเจอร์ (Radiative capture) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



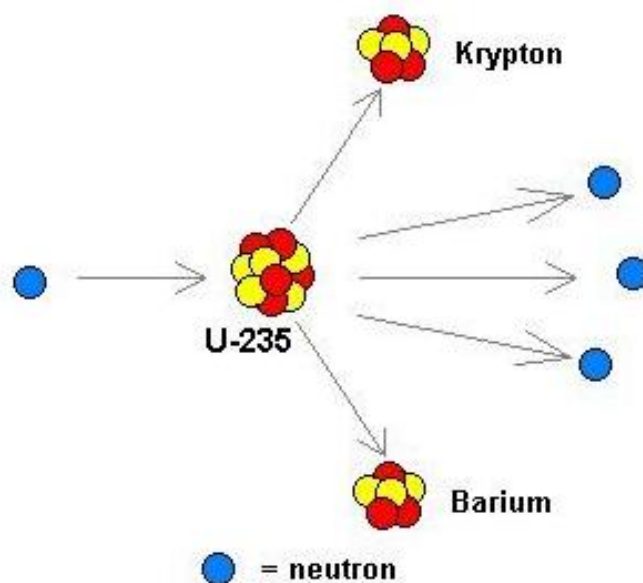
ภาพที่ 2.5 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน

ที่มา : Neutron Interaction [Online]. Available from :

http://www.petrolog.net/webhelp/Logging_Tools/cnl/cnl.html [20]

2.1.4.4 ปฏิกริยาการแตกตัว (Fission reaction)

เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม -235, ยูเรเนียม -238 และพลโตเนียม -239 เป็นต้น ซึ่ง นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนัก แล้วนิวเคลียสรวมจะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม หรือที่เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (Fission product) พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว หลุดออกมาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.6 อันตรกริยาแบบนี้สำคัญมากในการเกิดพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกริยาแบบนี้ คือ (n, f)



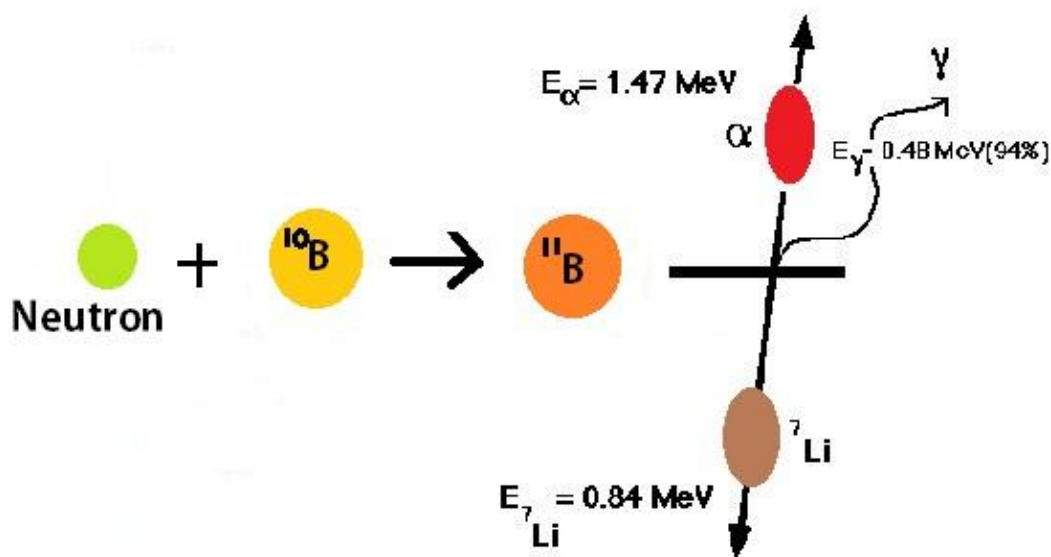
ภาพที่ 2.6 ปฏิกริยาการแตกตัวของนิวตรอน

ที่มา : Fission reaction [Online]. Available from : <http://www.green-planet-solar-energy.com/nuclear-fission.html> [21]

2.1.4.5 ปฏิกริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charged particle emission)

เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด แล้วนิวตรอนรวมกับนิวเคลียสของธาตุนั้น จากนั้นนิวเคลียสรวมจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา และอนุภาคโปรตอน ส่วนนิวเคลียสของธาตุเดิมนั้นกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ สัญลักษณ์ที่ใช้เขียนแทน ได้แก่ สัญลักษณ์ (n, α) และ (n, p) ตามลำดับ ตัวอย่างของ

ปฏิกิริยาแบบนี้คือ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งมีความสำคัญมากในเรื่องการวัดนิวตรอนและการกำบังนิวตรอน



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ

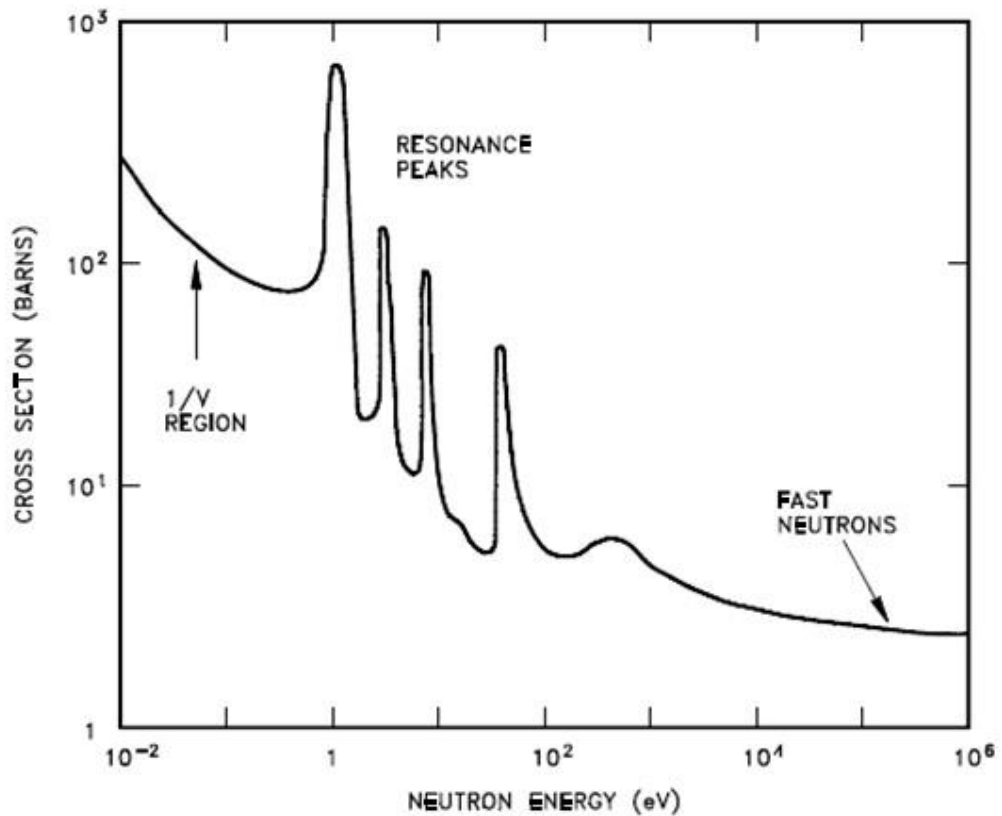
2.1.4.6 ปฏิกิริยาการเกิดนิวตรอน (Neutron producing reaction)

เมื่อนิวเคลียสจับกัมมันตนิวตรอนเข้าไปแล้ว ทำให้เกิดนิวตรอนใหม่ออกมา โดยมีจำนวนปริมาณนิวตรอนมากกว่าเดิม โดยปกติแล้วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง มักเป็นปฏิกิริยาแบบดูดกลืนความร้อน และนิวเคลียสที่ถูกชนควรควรเป็นพวกที่นิวตรอนเกาะกันอยู่หลวม ๆ เพื่อที่จะให้นิวตรอนนั้นหลุดออกมาได้ง่าย ๆ เช่น ไฮโดรเจน และสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $(n, 2n)$ หรือ $(n, 3n)$

2.1.4.7 ปฏิกิริยาผลิตไอโซโทปที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัว

ไอโซโทปบางชนิด เมื่อจับนิวตรอนแล้วทำให้เกิดธาตุใหม่ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแบ่งตัวต่อไป โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร สามารถแสดงเป็นปริมาณในรูปของความน่าจะเป็น เรียกว่า ภาคตัดขวาง ของการเกิดปฏิกิริยา (Cross-section) มีค่าเป็นพื้นที่ และมีหน่วยเฉพาะ เรียกว่า บาร์น (Barn) โดย 1 บาร์น มีค่า 10^{-24} ตารางเซนติเมตร ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละไอโซโทปของธาตุจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพลังงาน

หรือความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาด้วย ซึ่งค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนนั้นจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับค่าพลังงาน ดังที่แสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอนในแต่ละพลังงาน

ที่มา : Neutron cross section [Online]. Available from :

http://knowledgepublications.com/doe/doe_nuclear_physics_detail.htm [22]

เมื่อนิวตรอนผ่านเข้าไปในวัตถุตัวอย่าง อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสารจะทำให้ความเข้มของนิวตรอนลดลงตามระยะทางดังสมการ (2.3)

$$-\frac{d\phi}{dx} = \phi\sigma N \quad (2.3)$$

เมื่อ ϕ เป็นความเข้มของนิวตรอน หรือ จำนวนอนุภาคของนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ($n/cm^2 \cdot s$) ที่ระยะ x

- x เป็นระยะทางในวัตถุตัวอย่าง (cm)
 σ เป็นภาคตัดขวางเชิงจุลภาค (Microscopic cross-section, cm^2)
 N เป็น จำนวนนิวไคลด์ต่อปริมาตรของธาตุในวัตถุตัวอย่าง (cm^{-3})

จากสมการที่ 2.3 สามารถเขียนในรูปของสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลได้ ดังสมการ (2.4)

$$\phi = \phi_0 e^{-N\sigma x} \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ_0 เป็นความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบบนวัตถุตัวอย่าง ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)

ผลคูณของ $N\sigma$ เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross-section) ใช้สัญลักษณ์ Σ_m เป็นค่าแสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัตถุขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับวัตถุที่มีความหนา ρ (g/cm^3) จะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ดังสมการที่ (2.5)

$$\Sigma_m = \mu/\rho \quad (2.5)$$

Σ_m เป็นค่าแสดงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัตถุขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อหน่วยความหนาแน่น

2.2 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในประเทศไทย (Nuclear reactor)

ประเทศไทยเริ่มมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อทำการวิจัยเป็นครั้งแรก โดยคณะรัฐมนตรีมี อนุมัติให้ทำสัญญาว่าจ้างการก่อสร้างอาคารเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูใน พ.ศ.2503 การก่อสร้าง อาคารและการติดตั้งเครื่องและอุปกรณ์ได้ดำเนินมาเป็นลำดับ จนกระทั่งแล้วเสร็จและเดินเครื่อง เข้าสู่ภาวะวิกฤติเป็นครั้งแรกเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2505 โดยมีชื่อทางการว่า เครื่องปฏิกรณ์ ปรมาณูวิจัย-1 หรือชื่อย่อว่า ปปว.-1 ต่อมาเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2520 ได้ทำการเปลี่ยนแปลง แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยใหม่ จึงมีชื่อใหม่ว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 ชื่อย่อว่า ปปว.-1/1 หรือชื่อสากลว่า Thai Research Reactor-1/Modification 1 ชื่อย่อสากลว่า TRR-1/M1



ภาพที่ 2.9 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ที่มา : Neutron Radiography [Online]. Available from:

http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/nr.htm [23]

ปปว.-1/1 เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทยในปัจจุบัน ใช้สนับสนุน งานวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ให้กับหน่วยงานต่าง ๆ มากกว่า 30 ปี เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เป็นระบบที่ประกอบขึ้นเพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ประกอบด้วยระบบย่อยหลายระบบ เช่น ระบบระบายความร้อน ระบบป้องกันอันตรายจากรังสี

เป็นต้น การผลิตนิวตรอนเพื่อใช้ในการวิจัยจึงเป็นที่มาของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear research reactor)

2.2.1 อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย

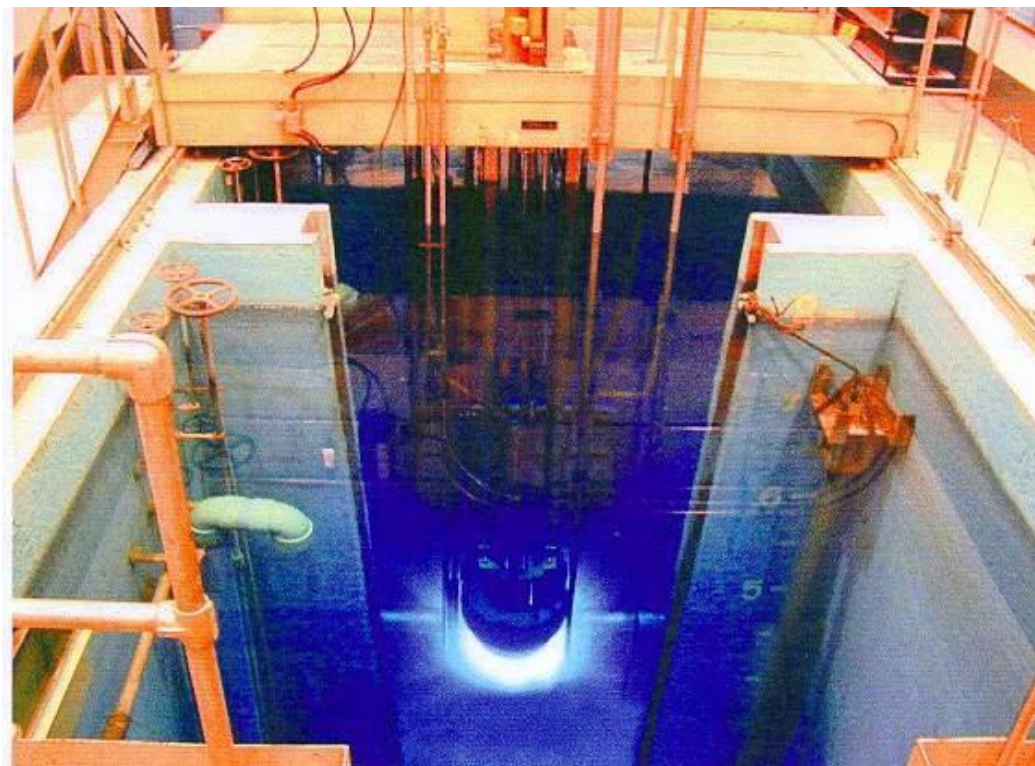
เป็นอาคาร 5 ชั้นขนาดกว้าง 22 เมตร ยาว 26 เมตร และสูง 26 เมตร ภายในอาคารบรรจุ ปอดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย อยู่ภายใน พื้นที่บางส่วนของอาคารใช้เป็นห้องปฏิบัติการของ นักวิทยาศาสตร์เพื่อใช้ปฏิบัติงานวิจัยต่าง ๆ ที่ต้องใช้ประโยชน์จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย



ภาพที่ 2.10 อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในประเทศไทย

2.2.2 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย

เครื่องปฏิกรณ์ ปรมาณูวิจัยของไทยในปัจจุบันเป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบขนาด กำลังสม่ำเสมอ (Steady state) 2 เมกกะวัตต์ (ความร้อน) สามารถทำงานแบบทวีกำลัง ได้ถึง ประมาณ 2,000 เมกกะวัตต์ในระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 10.5 มิลลิวินาที (หนึ่งมิลลิวินาทีเท่ากับ หนึ่งส่วนพันวินาที) ผู้สร้างคือบริษัท General Atomics แห่งประเทศสหรัฐอเมริกาใช้ชื่อทางการค้า ว่า TRIGA Mark III



ภาพที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1
ที่มา : Reactor [Online]. Available from:
http://www.tint.or.th/reactor/what_is_TRR1M1.html [24]

2.2.3 บ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Reactor pool)

บ่อเครื่องปฏิกรณ์ ปรมาณู แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ผนังด้านข้างของบ่อจะมีท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ซึ่งเป็นท่อของระบบระบายความร้อนฝั่งทะเลผ่านด้านข้างของบ่อ

ผนังบ่อเป็นผนังคอนกรีตชนิดความหนาสูง (High density concrete) ที่มีความหนาแน่น 3.5 gm/cm^3 ส่วนบนสุดของบ่อหนา 1.5 ฟุต และเพิ่มความหนาเป็นชั้น ๆ ชั้นละ 1 ฟุต ตามระดับความสูง ที่ระดับชั้นล่างสุดจะหนามากที่สุดคือ 4.5 ฟุต หรือ 1.35 เมตร

บ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีขนาด โดยประมาณ กว้าง 3.5 เมตร x ยาว 12 เมตร x ลึก 8.5 เมตร ภายในบ่อสามารถจุน้ำได้ประมาณ 64,800 แกลลอน (หรือประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร)

2.2.4 ประตูกั้นน้ำ

ประตูกั้นน้ำทำด้วยอะลูมิเนียม มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ขอบของประตูน้ำจะเป็นยางรูปตัว J เพื่อทำหน้าที่กั้นน้ำลงไปในห้องประตูของบ่อเครื่องปฏิกรณ์ ดังภาพที่ 2.12



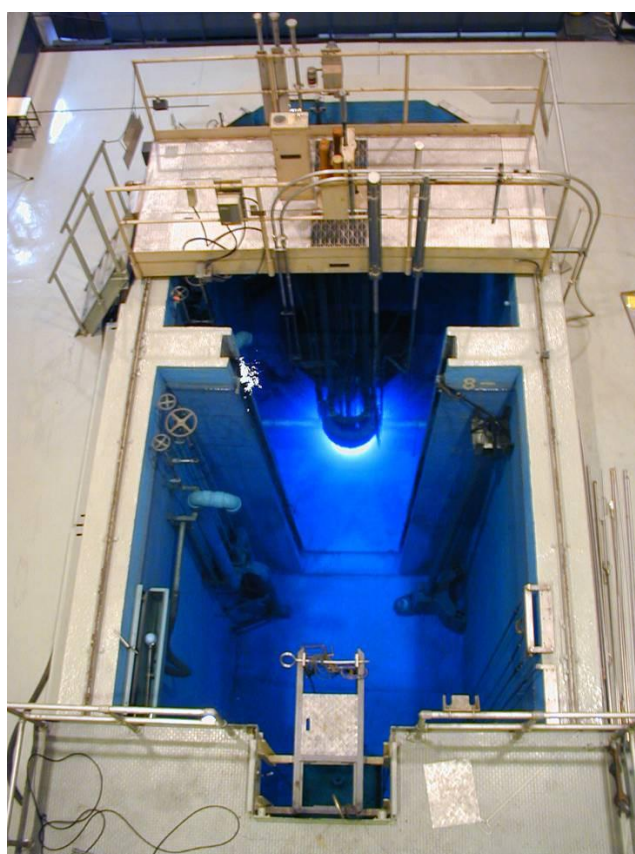
ภาพที่ 2.12 ประตูกั้นน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปรว1/1)

ที่มา : Reactor [Online]. Available from:

http://www.tint.or.th/reactor/what_is_TRR1M1.html

2.2.5 สะพานเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Bridge)

สะพานเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Bridge) ดังภาพที่ 2.13 จะเป็นตัวยึดโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ และประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนซึ่งใช้ไฟฟ้า โดยสะพานเครื่องปฏิกรณ์สามารถเคลื่อนที่ได้และความเร็วในการเคลื่อนที่สามารถปรับได้จาก 0-6 ฟุตต่อนาที และเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่ง Thermal Column ในระยะประมาณ 2 ฟุต ความเร็วของการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนเป็น 1 ฟุตต่อนาที โดยอัตโนมัติ



ภาพที่ 2.13 สะพานเครื่องปฏิกรณ์

ที่มา : Reactor [Online]. Available from:

http://www.tint.or.th/reactor/what_is_TRR1M1.html [24]

2.2.6 ลักษณะแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Core)

การจัดเชื้อเพลิงในแกนจะมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal array) แกนเครื่อง

ปฏิกรณ์จะบรรจุอยู่ในถังอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 55 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร ภายในจะมีแท่งเชื้อเพลิงบรรจุอยู่ในลักษณะตั้งตรง ส่วนบนและล่างของแท่งเชื้อเพลิงเป็น Graphite Reflector แกนปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบทั้งหมดจะอยู่ในน้ำ

2.2.7 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม (Fuel elements)

เนื้อเชื้อเพลิงเป็น U-ZrH (Uranium-Zirconiumhydride) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 นิ้ว ยาวประมาณ 30 นิ้ว ส่วนบนและล่างเป็นแกรไฟต์ เชื้อเพลิงชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการยับยั้งปฏิกิริยาฟิชชันได้เมื่ออุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด (Prompt Negative Temperature Coefficient) จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีความปลอดภัยสูงมาก สามารถทำงานแบบทวิกำลังได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อแท่งเชื้อเพลิง เชื้อเพลิง U-ZrH มีความสามารถในการหน่วงนิวตรอนความเร็วสูงตั้งแต่เริ่มเกิดในเนื้อเชื้อเพลิง ในบางครั้งจึงเรียกเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า Fuel-Moderator Element เนื้อเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์คิดเป็นปริมาณยูเรเนียม 235 ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะไม่เกินร้อยละ 20 หนักประมาณ 6702.571 กรัม



ภาพที่ 2.14 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม

ที่มา : Reactor [Online]. Available from:

http://www.tint.or.th/reactor/what_is_TRR1M1.html [24]

2.2.8 แท่งควบคุม (Control rods)

มีลักษณะและขนาดคล้ายแท่งเชื้อเพลิงแต่มีบางส่วนเป็น Boron Carbide (B_4C) ซึ่งใช้เป็นตัวดูดจับนิวตรอนและส่วนกลางจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิง U-ZrH แท่งควบคุมชนิดนี้มีจำนวน 4 แท่ง และแท่งควบคุมชนิด Transient ซึ่งไม่มีเนื้อเชื้อเพลิงอีก 1 แท่ง



ภาพที่ 2.15 เปรียบเทียบขนาดแท่งควบคุมและแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปว.-1/1

ที่มา : Reactor [Online]. Available from:

http://www.tint.or.th/reactor/what_is_TRR1M1.html [24]

2.2.9 สารหน่วงความเร็วนิวตรอน (Moderator)

เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้เป็น U-ZrH ดังนั้นนิวตรอนความเร็วสูงจะถูกหน่วงความเร็วตั้งแต่เริ่มเกิดในเนื้อเชื้อเพลิงในบางครั้งจึงเรียกเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า Fuel-Moderator Element ส่วนสารหน่วงความเร็วถัดออกมาคือ น้ำบริสุทธิ์ที่มีความนำไฟฟ้าไม่เกิน 2 ไมโครโอห์มต่อเซนติเมตร

(ปกติน้ำประปาจะมีความนำไฟฟ้าประมาณ 200 ไมโครโอมต่อเซนติเมตร) ซึ่งน้ำนี้เป็นทั้งตัว
 หน่วงความเร็วและตัวระบายความร้อน (Coolant)

2.2.10 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนของเครื่องปว- 1/1 เป็น Am-Be (Americium Beryllium) มีความแรงแรง
 รังสี 3 คูรี มีครึ่งชีวิต 458 ปี ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนนี้ใช้เป็นตัวจุดชนวนปฏิกิริยา Fission เพื่อให้
 เกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ หลังจากเกิดปฏิกิริยา ลูกโซ่แล้วต้นกำเนิดนิวตรอนก็ไม่มี ความจำเป็นต้อง
 ใช้แต่ยังคงติดตั้งอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์

2.2.11 การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ปฏิกิริยาลูกโซ่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ เกิดขึ้นได้เนื่องจากนิวเคลียส (Nucleus) ของวัสดุ
 นิวเคลียร์พิเศษ (Special Nuclear Material) เช่น พลูโตเนียม -239 ยูเรเนียม-235 (เครื่อง
 ปว-1/1 ใช้ยูเรเนียม-235) ดูดจับเอานิวตรอนที่มีพลังงานเหมาะสม ทำให้นิวเคลียสแตกตัวแล้ว
 ปล่อนิวตรอนเพิ่มขึ้นไปอีก 2-3 ตัว และพลังงานจำนวนหนึ่ง นิวตรอนที่ถูกปล่อยออกมานี้มี
 โอกาสถูกจับโดยนิวไคลด์ (Nuclei) ตัวอื่น ๆ อีก ดังนั้นปฏิกิริยาก็จะเกิดซ้ำอีกทำให้จำนวน
 นิวตรอนเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อย ๆ ปฏิกิริยาเช่นนี้จะรักษาสภาพตัวมันเอง (Self-sustaining) เมื่อ
 จำนวนนิวตรอนที่ปล่อยออกมาในเวลาหนึ่ง ๆ เท่ากับหรือใกล้เคียงกับจำนวนนิวตรอนที่หายไป
 จากการถูกจับเข้าไปในวัสดุที่ไม่สามารถแตกตัวได้ (Non-fissioning material) หรือโดยการหนี
 ออกไปจากระบบ

2.2.12 การควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่

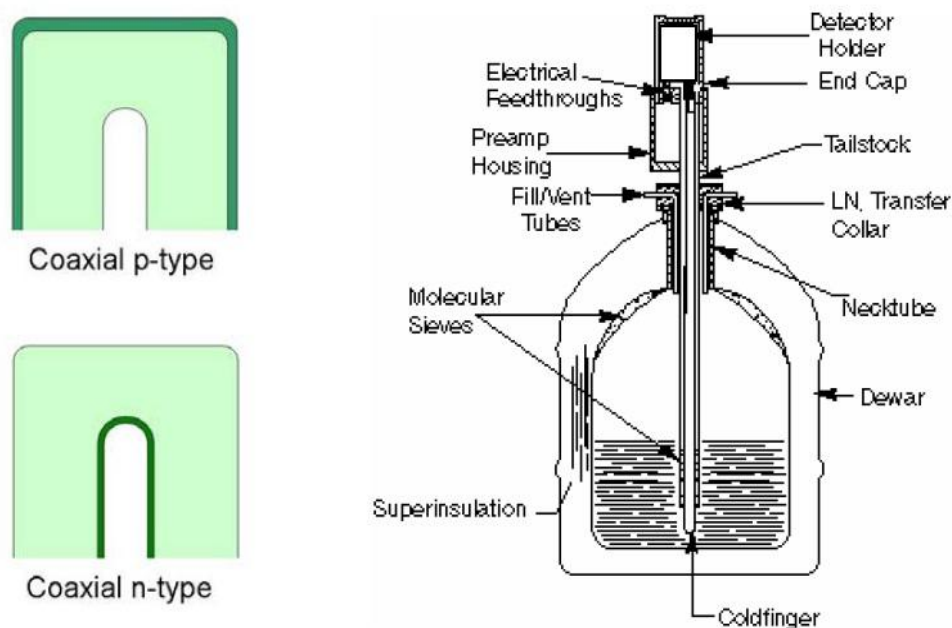
ถ้าหากปล่อยให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดขึ้นในแกนเครื่องปฏิกรณ์ต่อไปเรื่อย ๆ จำนวนนิว
 ตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาก็เพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ เช่นเดียวกัน ดังนั้นพลังงาน
 ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาก็จะสะสมขึ้นในแกนเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นจนทำให้แกนเครื่องปฏิกรณ์
 ปรมาณูร้อนขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมปฏิกิริยาให้คงที่ในระดับกำลังที่เหมาะสม โดยการใส่ตัว
 ดูดจับนิวตรอน (Neutron absorber) ทำเป็นแท่งใส่เข้าไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปรมาณู เรียกว่า
 แท่งควบคุม (Control Rod) ในการควบคุมถ้าต้องการเพิ่มปฏิกิริยาก็ดึงแท่งควบคุมขึ้นจากแกน
 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ถ้าต้องการลดหรือดับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ก็ปล่อยแท่งควบคุมลงไปจน
 สุด

2.2.13 นิวตรอนฟลักซ์

หลังจากเกิดปฏิกิริยาถูกใช้ขึ้นในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว-1/1 ปริมาณความหนาแน่นของนิวตรอนจะมีมากที่สุดตรงใจกลางแกนปฏิกรณ์ฯ (Central Thimble; CT) นิวตรอนฟลักซ์คือ การวัดปริมาณนิวตรอนที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.3 หัววัดรังสีแกมมา

ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียม ที่มีความบริสุทธิ์สูง High purity germanium detector (HPGe) ซึ่งเป็นหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ HPGe ทำขึ้นจากผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอก ที่ผิวด้านนอกแพร่ (Diffusion) ด้วยลิเทียมส่วนด้านในปลูกไอออน (Ion implantation) ของโบรอน เรียกว่าหัววัดรังสีชนิดพี (P-type) หรือเป็นผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอก ซึ่งแพร่ด้วยลิเทียมไว้ที่ผิวด้านใน ส่วนด้านนอกปลูกไอออน (ion implantation) ของโบรอน เรียกว่า หัววัดรังสีชนิดเอ็น (N-type) ลักษณะของหัววัดรังสีแบบ HPGe แสดงอยู่ในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ภาคตัดขวางของหัววัดรังสีแบบ Coaxial HPGe

ที่มา : การวัดรังสีแกมมาแบบแยกพลังงาน(Gamma ray Spectrometry). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/labs/kmitt_gamma%20spect-2.pdf [16]

2.3.1 ระบบวัดรังสี

ระบบวัดรังสีโดยทั่วไป ดังที่แสดงในภาพที่ 2.15 จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Power Supply)

ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถปรับค่าได้ และมีเสถียรภาพในการรักษาระดับของศักย์ไฟฟ้าทางเอาต์พุตให้คงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อมหรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าในสาย 220 โวลต์ สำหรับหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถปรับค่าได้ ระหว่าง 0-5000 โวลต์ และให้กระแสได้ ระหว่าง 0-100 แอมแปร์

2.3.1.2 ภาคขยายส่วนหน้า (Preamplifier)

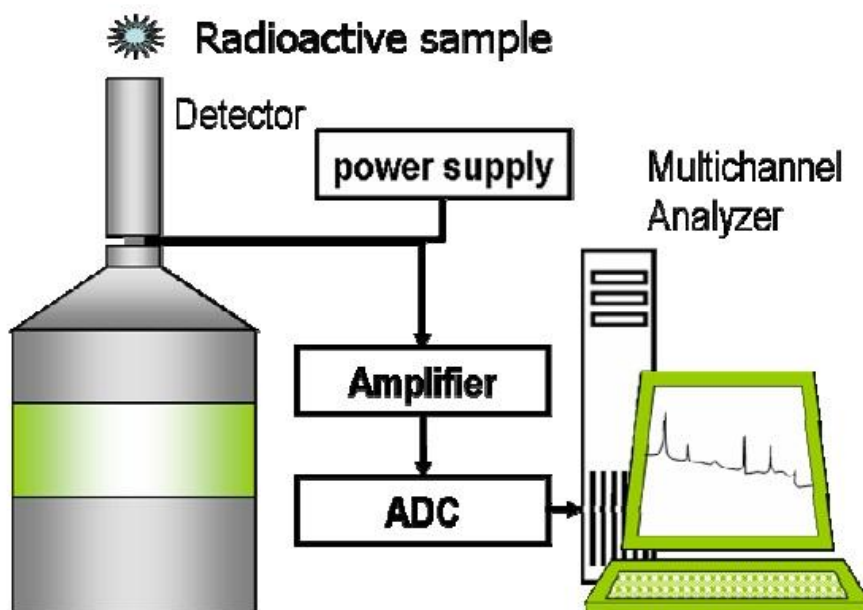
แบบที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบที่เรียกว่า Charge Sensitive Preamplifier ซึ่งจะทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสี แล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งมีขนาดที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุ

2.3.1.3 ภาคขยายหลัก (Amplifier)

เป็นส่วนที่รับสัญญาณพัลส์จากภาคขยายส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งรูปของสัญญาณ พร้อมกับขยายขนาดของสัญญาณ ให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ความสูง ขนาดของการขยายสัญญาณ (Voltage gain) สามารถปรับได้ในช่วงกว้างด้วยการปรับหยาบ ๆ เป็นขั้น มีการปรับละเอียด เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูงของสัญญาณให้เป็น Unipolar และ Bipolar รูปร่างของสัญญาณทั้งสองนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่า Shaping time constant

2.3.1.4 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer หรือ MCA)

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนนับของรังสี ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ซึ่งตกกระทบหัววัดได้ โดยอัตโนมัติ เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่อินพุตของ Analog to Digital Converter หรือ ADC ความสูงของสัญญาณจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจะเป็นตัวระบุตำแหน่ง (Address) การเก็บข้อมูลในหน่วยความจำ สัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปยัง Channel address register ซึ่งจะทำหน้าที่เลือกแอดเดรสหรือตำแหน่งในหน่วยความจำที่ได้รับมา เพื่อให้ภาคบันทึกข้อมูล (Data register) ทำการบันทึกจำนวนครั้งของสัญญาณที่เกิดขึ้นครั้งละ 1 หน่วยนับ โดยบวก (ADD) เข้ากับข้อมูลที่มีอยู่ในหน่วยความจำ และจะถูกส่งออกไปแสดงผลบนจอภาพ



ภาพที่ 2.17 ระบบวัดรังสีแกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดสารกึ่งตัวนำ
ที่มา : การวัดรังสีแกมมาแบบแยกพลังงาน(Gamma ray Spectrometry). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/labs/kmitt_gamma%20spect-2.pdf [16]

2.3.2 การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

การวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน (NAA) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1936 เป็นเทคนิคที่อาศัยการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสอะตอมตัวกลางในวัสดุที่เราสนใจศึกษา นิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.4

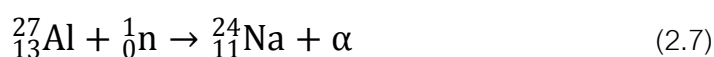
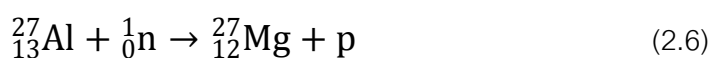
การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และค่อนข้างให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำสูง การวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน NAA สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

โดยปกติมีการใช้การวิเคราะห์นิวตรอนอย่างกว้างขวางในวิทยาศาสตร์ทางธรณีวิทยา , การแพทย์และการเกษตรดิน การศึกษาวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์ธาตุโดยการอาบรังสีนิวตรอนเป็นเทคนิคทางกายภาพทางนิวเคลียร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิดโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีก่อน นอกจากนี้การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

มีความสามารถในการตรวจสอบ ธาตุที่ความเข้มข้นต่ำ เกือบ 70% ของ ธาตุในตารางธาตุ ที่การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันสามารถวิเคราะห์ได้

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุ และปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยการทำให้ไอโซโทปเสถียร กลายเป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งจะสลายตัวกลับเป็นไอโซโทปเสถียร โดยการปลดปล่อยรังสีที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละไอโซโทปออกมา ตัวอย่างที่อาบนิวตรอน (Neutron irradiation) จะทำให้นิวเคลียสของธาตุในตัวอย่างดูดกลืนนิวตรอน แล้วกลายเป็นสารกัมมันตรังสี เรียกว่า นิวไคลด์รังสี (Radionuclide) หรือไอโซโทปรังสี (Radioisotope) ซึ่งมีการสลายตัว โดยปลดปล่อยรังสีอัลฟา รังสีบีตา หรือรังสีแกมมา ที่มีพลังงานของรังสี และครึ่งชีวิตของไอโซโทปที่เป็นค่าจำเพาะ ในการอาบนิวตรอน ปฏิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างนิวเคลียสของธาตุ กับนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ หรือเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) เรียกว่า ปฏิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture gamma ray) ซึ่งนิวเคลียสจะดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ใช้สัญลักษณ์ของปฏิริยาเป็น (n, γ)

นิวตรอนพลังงานสูงหรือฟาสต์นิวตรอน (Fast neutron) เมื่อทำปฏิริยาแล้ว นิวเคลียสจะปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา เรียกว่า ปฏิริยา (n, α) หรือปลดปล่อยโปรตอน เรียกว่าปฏิริยา (n, p) ตัวอย่างได้แก่ปฏิริยา $^{27}_{13}\text{Al} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{27}_{12}\text{Mg} + \text{p}$ และปฏิริยา $^{27}_{13}\text{Al} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + \alpha$



เมื่อตัวอย่างได้รับนิวตรอน อัตราการเกิดปฏิริยา (Activation rate: A) จะแปรผันตามความเข้มหรือฟลักซ์ของนิวตรอน (neutron flux: f) จำนวนนิวเคลียสของธาตุ (Target nuclide: N) และค่าภาคตัดขวาง (Cross section: σ) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิริยา ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุ โดยเป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละนิวไคลด์ มีหน่วยเป็น บาร์น (barn) หรือ 10^{-24} cm^2 ซึ่งการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีนิวตรอนมี 2 วิธี คือ

2.3.3 วิธีการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน (Comparative Method)

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน โดยทั่วไปจะทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ที่ทราบชนิดและปริมาณธาตุ เมื่ออาบนิวตรอนสารตัวอย่างในลักษณะเดียวกับสารมาตรฐาน จะทำให้คำนวณปริมาณธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสีตามสมการ

$$N_{\text{sample}} = \frac{N_{\text{std}} A_{\text{sample}}}{A_{\text{std}}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	N_{sample}	=	ปริมาณธาตุในตัวอย่าง
	N_{std}	=	ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน
	A_{sample}	=	กัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง
	A_{std}	=	กัมมันตภาพรังสีของสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์ธาตุโดยการอาบรังสีนิวตรอนโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากตัวอย่างมาตรฐานและตัวอย่างมีความเหมือนกัน ทั้งตำแหน่งในการอาบรังสีและเวลาในการอาบรังสี

การวิเคราะห์ธาตุโดยการอาบรังสีนิวตรอนโดย ใช้สารมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบ เป็นการวิเคราะห์ธาตุหลังจากที่ทำการอาบรังสีแล้ว การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$R = N_0 \phi \sigma \quad (2.8)$$

โดยที่

- R คืออัตราการเกิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
 N_0 คือจำนวนอะตอมทั้งหมดของนิวไคลด์เดิมก่อนเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี (หน่วยอะตอม)
 ϕ คือความเข้มนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์ (หน่วย $n/(cm^2 \cdot s)$)
 σ เป็นภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนของนิวไคลด์นั้น (หน่วยบาริน)

โดยที่อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ เวลา t จะเป็นไปตามสมการที่ 2.9

$$D_t = \lambda N_t \quad (2.9)$$

โดยที่

λ คือค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (หน่วย s^{-1})

$$\text{โดย } \lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$$

$T_{\frac{1}{2}}$ คือค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น (หน่วยวินาที)

N_t คือจำนวนอะตอมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ณ เวลา t (หน่วยอะตอม)

t คือช่วงเวลาที่ใช้อาบรังสี (หน่วยวินาที)

ถ้าอัตราการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าคงที่แล้ว สามารถคำนวณอัตราการเพิ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี $\left(\frac{dN_t}{dt}\right)$ ได้จาก ผลต่างระหว่างอัตราการเกิด (R) กับอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (D_t) ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{dN_t}{dt} = N_0 \phi \sigma - \lambda N_t \quad (2.10)$$

จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.10 จะได้

$$\lambda N_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.11)$$

ดังนั้นค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ดังสมการที่ 2.12

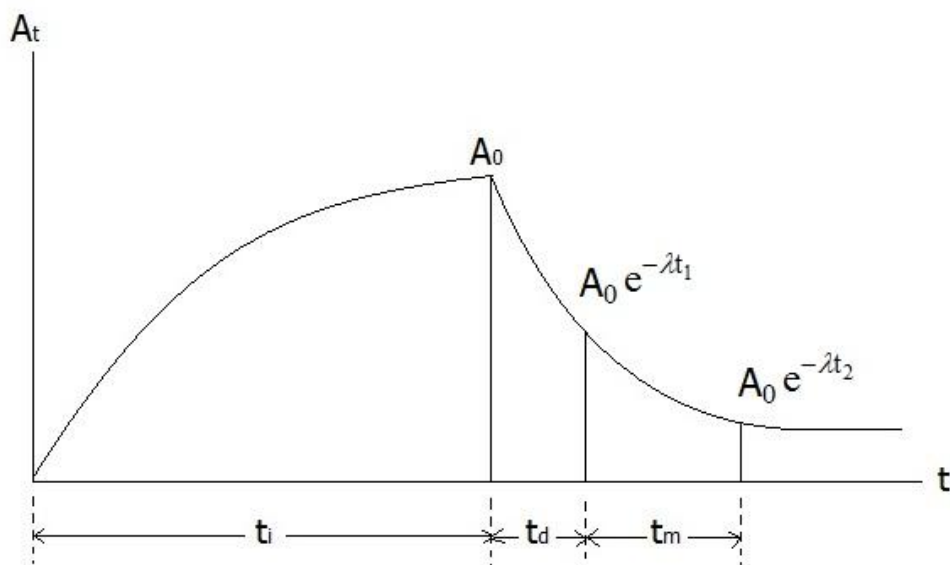
$$A_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) (e^{-\lambda t_d}) \quad (2.12)$$

โดยที่

A_t คือค่าความแรงรังสีเริ่มต้น (หน่วยแบคเคอเรล)

t_d คือเวลาในการปลดปล่อย (หน่วยวินาที)

เมื่อทำการนับวัดรังสีแล้ว ความแรงรังสีในแต่ละช่วงเวลาจะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีและเวลาในการอาบรังสี, เวลาในการปลดปล่อยรังสี และเวลาในการนับวัดรังสี

จากกราฟที่ 2.18 เป็นกราฟของค่าความแรงรังสี ณ เวลาต่างกันโดยที่ ความแรงรังสีขณะนับวัดรังสีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$\text{Total counts } N = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{-\lambda t_m} \quad (2.13)$$

$$A_t = A_0 (1 - e^{-\lambda (t_1 - t_2)}) \quad (2.14)$$

โดยที่

A_0 คือความแรงรังสีเริ่มต้น (หน่วยแบคเคอเรล)

t_m คือเวลาในการนับวัด จากรูป 2.18 จะได้ว่า $t_m = t_2 - t_1$ (หน่วยวินาที)

2.3.4 วิธีการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless Method)

เนื่องจากมีความยุ่งยากในการเตรียมสารมาตรฐาน ที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบ วิธีการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless) จึงถูกคิดค้นขึ้นเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีนิวตรอนมีความสะดวกมากยิ่งขึ้นและลดปัญหาในการหาสารมาตรฐานเพื่อมาทำการเปรียบเทียบ วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับการฉายรังสีร่วมของตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ (Comparator) เช่น ทอง เพื่อใช้หานิวตรอนฟลักซ์ และใช้ค่าที่ประกอบด้วยค่าคงที่ทางนิวเคลียร์หรือที่เรียกว่า k_0 พื้นที่ของรังสีแกมมาของธาตุแต่ละตัวอย่างจะถูกเปรียบเทียบกับทอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม k0-IAEA ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) วิธี k_0 คือ วิธีการใช้ตัวเปรียบเทียบ (Comparator) เพียงหนึ่งตัวสำหรับ การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน หรือ INAA ซึ่งในวิธี k_0 นี้ ตัว Comparator เปรียบได้กับ ตัววัดค่าฟลักซ์ (Flux-monitor) อัตราการเกิดอะตอมกัมมันตรังสีจากอะตอมที่เสถียร (Stable atoms) ซึ่งสามารถวัดได้จากเครื่องวัดรังสีแกมมา ถูกวัดโดยการเปรียบเทียบกับการแผ่รังสีของทอง (ในที่นี้จะใช้ทองเป็น k_0 -constant) โดยที่อัตราการสร้างอะตอมนั้นขึ้นอยู่กับ เครื่องอบรังสี (Irradiation facility) และเครื่องวัดรังสีแกมมา

(Detector) ที่ใช้ ดังนั้นแล้ววิธี k_0 นี้เป็นวิธีที่ช่วยคำนวณค่าต่าง ๆ ของ เครื่องอาบรังสี และ หัววัด โดยที่ค่าคงที่ k_0 นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$k_0 = \frac{M_c \theta_a \sigma_a \gamma_a}{M_a \theta_c \sigma_c \gamma_c} \quad (2.15)$$

โดยที่

M_c	คือมวลของ Comparator (หน่วย g.mol ⁻¹)
M_a	คือมวลของสารที่ต้องการวัด (หน่วย g.mol ⁻¹)
σ_c	คือค่าภาคตัวขวางเทอร์มัลนิวตรอนของ Comparator (หน่วย m ²)
σ_a	คือค่าภาคตัวขวางเทอร์มัลนิวตรอนของสารที่ต้องการวัด (หน่วย m ²)
θ_c	คือปริมาณของไอโซโทปที่มีในธรรมชาติที่เราสนใจของ Comparator
θ_a	คือปริมาณของไอโซโทปที่มีในธรรมชาติที่เราสนใจของสารที่ต้องการวัด
γ_c	คือค่าค่าความแรงรังสีแกมมาที่มีในธรรมชาติของตัว Comparator
γ_a	คือค่าค่าความแรงรังสีแกมมาที่มีในธรรมชาติของสารที่ต้องการวัด

ค่าคงที่ต่าง ๆ แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดและมีส่วนสำคัญในการคำนวณความเข้มข้นในโปรแกรม k_0 -INAA ซึ่งสามารถหาค่าเหล่านี้ได้ในเอกสารอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยที่ค่าคงที่ของ k_0 จะถูกวัดโดยสถาบันหรือองค์กรต่าง ๆ เช่น Institute for Nuclear Sciences ใน Gent, KFKI institute ใน Budapest, และ Riso ในประเทศเดนมาร์ค เป็นต้น

เพื่อหาค่าคงที่เหล่านี้ สามารถทำหลังจากที่ได้มีการกำหนดเครื่องอาบรังสี (Irradiation facility) และเครื่องวัด (Detector) แล้ว สารตัวอย่างทุกตัวจะต้องมีการอาบรังสีคู่กับทอง (ใช้เป็น Comparator) เท่านั้น แทนการใช้สารมาตรฐานอื่น ๆ กับสารตัวอย่าง โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนในการเตรียมสารมาตรฐานจะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนในค่าคงที่ของ k_0 นั้นจะส่งผลกระทบต่อผลการวัดทุกอย่าง ถึงแม้ว่าในกรณีทั่วไปนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยมาก แต่มีการตกลงกันว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าคงที่จะต้องไม่เกิน 3.5%

สารตัวอย่างหรือ Comparator (ทอง) อาจจะมีรูปร่าง, ค่าการดูดกลืนรังสีนิวตรอน, และค่าการดูดกลืนรังสีแกมมาที่ต่างกัน ดังนั้นการแก้ไข (ปรับค่า) ความแตกต่างเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในกระบวนการของ k_0 -method

เครื่องอาบรังสี (Irradiation facility) นั้นจะมีลักษณะตามตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดนิวตรอนฟลักซ์ เช่น f , α และ T ในส่วนเครื่องวัด (Detector) จะมีลักษณะตามพีคของค่าประสิทธิภาพของหัววัด ในการแสดงถึงลักษณะของเครื่องอาบรังสี (Irradiation facility) ในวิธี k_0 นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ตัว ดังนี้

- (1) ตัวแปรที่ 1 คืออัตราการแผ่รังสี (n , gamma)
- (2) ตัวแปรที่ 2 คืออัตราส่วนระหว่างค่าเทอร์มัลและอีพิเทอร์มัล (ค่า f) ซึ่งถ้าค่า Thermalization ยิ่งมากจะยิ่งทำให้ค่า f สูงตามไปด้วย
- (3) ตัวแปรที่ 3 คืออัลฟา (α) ซึ่งเป็นตัวแสดงความคลาดเคลื่อน
- (4) ตัวแปรสุดท้ายคือ อุณหภูมิการกระจายความเร็วของ Maxwell-Boltzmann ซึ่งเป็นตัวที่บอกถึง ค่าความร้อนของ นิวตรอนสเปกตรัม

การเลือกตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ในเทคนิค k_0 เราสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า Fast flux และ Thermal flux นั้นเป็นส่วนที่สัมพันธ์กันและกันในการฉายรังสี (ค่าทั้ง 2 ตัวสามารถเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยในแต่ละวันและแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาด้วย แต่การเปลี่ยนแปลงจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน) แต่สำหรับค่า f และ α จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในการฉายรังสี และจะมีค่าคงที่ในทุก ๆ วัน ดังนั้นควรจะมีการวัดค่า f , α และอัตราส่วนระหว่างนิวตรอนเร็วกับเทอร์มัลนิวตรอน (Fast-to-thermal ratio) นาน ๆ ครั้ง แต่ค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (Thermal flux) จะต้องมีการวัดทุกครั้งกับสารเปรียบเทียบและตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์

การเปรียบเทียบที่ดี ที่ใช้อธิบายลักษณะจะต้องมีหลายธาตุ เช่น Au, Zr, Lu และ Fe แต่ในการวัดค่า Thermal flux อย่างเดียวนั้นสามารถใช้สารอะไรก็ได้ที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสี แต่ว่า Au, Zr, และ Fe จะเป็นที่ยอมรับที่สุด

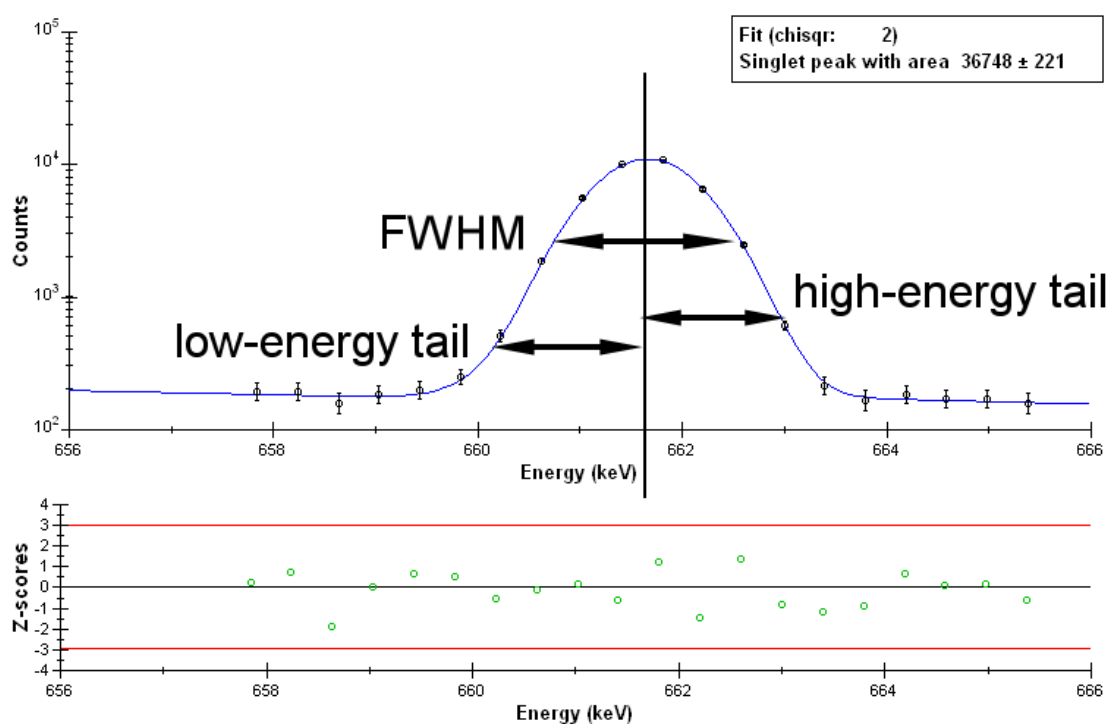
ในเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยนิวตรอนแอคติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน หรือ k_0 นั้น กระบวนการสำคัญที่สุดคือ กระบวนการปรับเทียบค่าของหัววัดรังสี ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

(1) การคำนวณ (Efficiency Conversion) เป็นส่วนที่สำคัญของ k_0 -method คือการแปลงค่าพีคของประสิทธิภาพหัววัด (Efficiency curve) ที่วัดได้ ให้สามารถอ่านค่าได้ในกราฟรูปแบบอื่น ๆ ในอดีตเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำ เพราะว่า เราไม่สามารถหาค่าพีคของประสิทธิภาพหัววัดจากสเปกตรัมรังสีแกมมา (Gamma-ray spectra) ที่วัดได้จากตำแหน่งที่ใกล้กับหัววัด เพราะว่าเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ดังนั้นการปรับเทียบในการวัดจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำในระยะเวลาที่ห่างจะหัววัด ถึงแม้ว่าในขณะนี้เราสามารถวัดค่าพีคของประสิทธิภาพหัววัด ได้ในตำแหน่งต่าง ๆ แล้วก็ตาม การปรับเทียบยังมีความจำเป็นอยู่ เนื่องจากต้นกำเนิดทั่วไปจะเป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด แต่ว่าตัวอย่างของ INAA นั้นไม่ใช่

(2) การปรับเทียบค่าประสิทธิภาพของหัววัด (Efficiency Calibrations) กราฟประสิทธิภาพของหัววัดเกิดจากการวัดค่าสเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นหลังจากแปลค่า (Interpreted) ตัวอย่างที่มีการปรับเทียบแล้ว (Calibration) ถ้าสารรังสีที่ใช้ในการปรับเทียบเป็นสารรังสี (Radionuclide) ที่ให้ค่าพลังงานรังสีแกมมาเพียงแค่พลังงานเดียว (เช่น Cs-137, Sn-113, Mn-54 หรือ Hg-203) จะทำให้ได้กราฟอัตราส่วนของ Peak to total ratio (p/t) แต่ถ้าไม่ใช่สารรังสีที่มี (Source) เป็นอย่างอื่น กราฟ full-energy peak efficiency จะปรับ (Fitted) ให้เข้ากับสเปกตรัมแทน อย่างไรก็ตามกราฟ p/t จะต้องมีการวัดก่อนกราฟของสารตัวอย่าง เพราะกราฟ p/t จะแตกต่างกันตามระยะของตัวอย่างถึงหัววัด (sample-detector distance) ซึ่งในแต่ละหัววัด ที่ระยะห่างหนึ่งระยะจะมีกราฟประสิทธิภาพได้เพียงอันเดียว การจะเขียนกราฟใหม่ทับกราฟที่ได้จากการวัดก่อนหน้าจะทำได้โดยการยกเลิก (Disable) กราฟก่อนหน้าก่อนแล้วเท่านั้น ถ้าหัววัดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น ระยะในการวัดเปลี่ยนไป ควรจะต้องมีการตั้งชื่อหัววัดใหม่และทำขั้นตอนต่าง ๆ เปรียบ เสมือนหัววัดใหม่ทุกประการ ถ้าเป็นไปได้ควรจะวัดค่ากราฟประสิทธิภาพที่ใช้ในทุกตำแหน่ง เพราะเมื่อทำการแปลค่า (Interpret) สเปกตรัมประสิทธิภาพของหัววัด ซึ่งค่ากราฟประสิทธิภาพที่มีระยะห่างตรงกันหรือใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับหัววัดที่สุดจะถูกนำมาใช้โดยอัตโนมัติ และทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำสูงสุดในการประชุมครั้งแรก ๆ เกี่ยวกับ k_0 _IAEA ได้มีการพูดคุยกันเกี่ยวกับวิธีการปรับเทียบประสิทธิภาพของหัววัดใน k_0 _IAEA ซึ่งได้มีการตัดสินใจว่าจะเลือกใช้วิธีที่เสนอมานี้

ร่วมกัน จาก De Felice at al. และ Delft โดยที่วิธีของ De Felice at al. จะใช้ Cs-137 ในการวัด Peak-to-total curve ทั้งหมด และวิธีของ Delft จะใช้สำหรับหาค่า Efficiency curve fit หลังจากที่เรารู้ peak-to-total แล้ว ขั้นตอนนี้คาดหวังว่าจะมีความเสถียรและสามารถนำมาใช้ได้กับระบบอื่นได้ทั้งหมด หรือเกือบทุกตัวที่มีการใช้ใน INAA

(3) รูปร่างลักษณะของพีคและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (Peak shape and the parameters) ซึ่งค่า พีค นั้นแสดงโดย Gaussian function ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะแบ่งเป็น พื้นที่ใต้พีค แล ความกว้างของกราฟ ซึ่งความกว้างของกราฟนั้นแสดงในรูปของ FWHM (มีขนาด 2.355 เท่าของ standard deviation of the function) ดังนั้นแล้ว จะมีปลาย 2 ด้าน คือ ปลายด้านพลังงานต่ำ (Low-energy tail) และ ปลายด้านพลังงานสูง (High-energy tail) โดยที่ปลายด้านพลังงานต่ำ (แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของการเก็บค่าผลึกของหัววัด (representing imperfect charge collection the detector crystal) นั้นแสดงเพียง 1 ค่า ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จากส่วนกลางพีค (centroid of the Gaussian) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ส่วนปลายเริ่มต้น ส่วนปลายนั้นมีการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential function) ทำให้สามารถเชื่อมต่อได้อย่างแนบเนียนกับ Gaussian ส่วนปลายด้านพลังงานสูง (High-energy tail) แสดงถึงการรวมตัวกัน ซึ่งแสดงเพียง 1 ค่าเช่นกัน คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จากส่วนกลางพีค (centroid of the Gaussian) ที่เป็นตำแหน่งที่ส่วนปลายเริ่มต้นขึ้น ส่วนปลายด้านพลังงานสูงนั้นมีการลดลงแบบ Exponential function ทำให้สามารถเชื่อมต่อได้อย่างแนบเนียนกับ Gaussian พื้นที่ใต้จุดพีคที่มีความต่อเนื่องกันทำให้ออกมาเป็นรูปโค้ง (Parabolic) ดังที่เห็นในภาพที่ 2.19 เป็นรูปตัวอย่างของ Peak shape และ ค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 2.19 รูปร่างลักษณะของพีคและค่าตัวแปรต่าง ๆ

ที่มา : IAEA-Vienna Austria, TU Delft The Netherlands. The k_0 -IAEA program manual for version 5.00.

การกระจายไปข้างหน้า (Forward scattering) ในสสารระหว่างผลึกของห้วงวัด กับสารตัวอย่างอาจทำให้เกิดสิ่งที่เรียกว่า Compton step ซึ่งก็คือรูปร่าง (Shape) ของความผิดพลาดของฟังก์ชัน (Error function) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษตามความกว้างและความสูงของ Gaussian หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า ฟังก์ชันของพื้นที่ใต้กราฟพีค (function of the peak area)

พีคแบบ Single และ Double escape อาจจะให้ค่า Compton steps เป็นลบ เนื่องด้วยการเสียพลังงานเล็กน้อยของโปรตรอนที่หลุดมาจากผลึกของห้วงวัด อย่างไรก็ตามค่า พีคทุกตัวควรจะมีค่า Compton steps เป็นบวกหรือศูนย์

การหาพื้นที่ใต้พีคและพลังงาน นั้นสามารถหาได้จากการวัดค่าช่องพลังงาน (Channel content) โดยการหาตำแหน่งที่แท้จริงและพื้นที่ของสสาร (Component) ที่ multiplet ในสเปกตรัมจริงเช่นเดียวกับ INAA โปรแกรมจะต้องรู้ความกว้างและขนาดอื่น ๆ ของพื้นที่ใต้พีค ดังนั้นแล้วจะต้องมี การปรับเทียบรูปร่างลักษณะของกราฟ (Shape calibration) ให้ถูกต้องก่อนสำหรับการทำอัตราการนับวัดของแบคกราวด์ (Background count rate), ก่อนที่จะทำการแปรค่า

(Interpreted) เป็นรูปของฟลักซ์ของนิวตรอน (Neutron Fluxes) หรือการหาความเข้มข้นของธาตุ (Element concentration) ดังนั้นแล้วกราฟของค่าแบคกราวด์ (Background spectrum) ที่อยู่ในรูปของค่าพลังงานพีค (Peak energy) และพื้นที่ใต้พีคจะต้องมีก่อน เพื่อใช้ในการแก้ไขให้ถูกต้อง

การปรับเทียบหัววัดของโปรแกรม k_0 สามารถสรุปได้ง่าย ๆ คือ ขั้นตอนแรกต้องทำการปรับเทียบค่าพลังงานของหัววัดก่อน (Energy Calibration) หลังจากนั้นทำการปรับเทียบรูปร่างลักษณะของพีค (Shape calibration) และสุดท้ายให้ทำการปรับเทียบค่าสเปกตรัมของแบคกราวด์ (Background spectrum) โดยที่ค่าทั้งหมดนี้จะถูกเก็บไว้ใน Permanent Database โดยจะถูกตั้งชื่อตามหัววัด

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีนิวตรอนนั้น มีวัสดุ, อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่ใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ใช้กำลังในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1200 กิโลวัตต์ โดยการทดลองนี้ใช้ท่ออบรังสีภายนอกแกน A4 ซึ่งมีฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนประมาณ 5.15×10^{10} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (วัดเมื่อ พ.ศ.2553)

3.1.2 หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (HPGe)

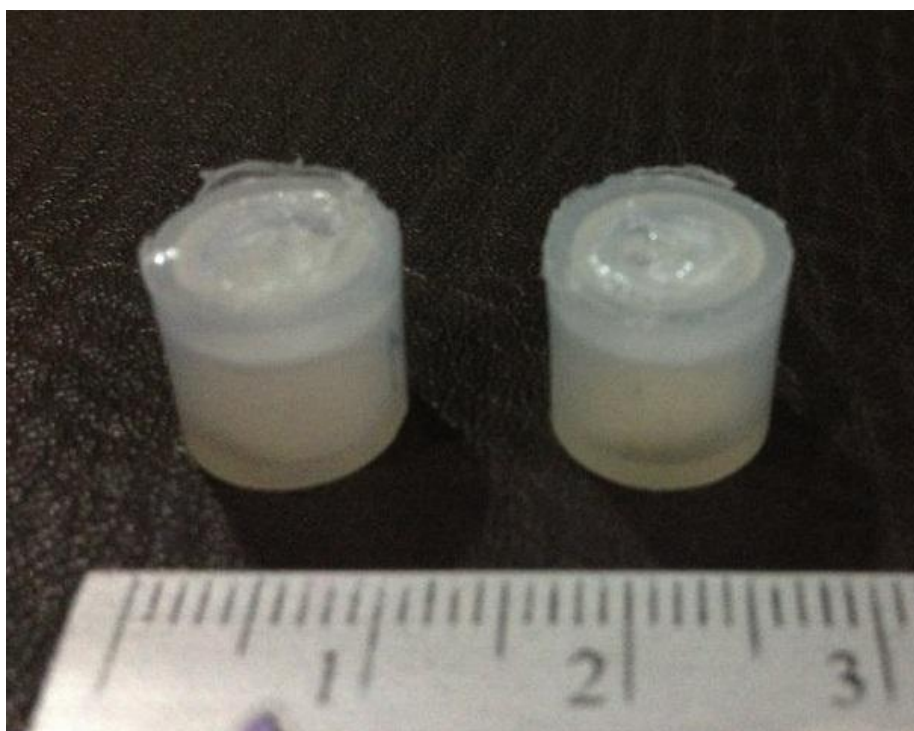
หัววัดรังสีที่ใช้ คือ หัววัดรังสีที่อาคารปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ของบริษัท ORTEC ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 หัววัดรังสีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3 ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้แคปซูลขนาด 10 มิลลิเมตรเป็นตัวบรรจุสาร ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ภาชนะบรรจุสาร

3.1.4 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างที่นำมาเพื่อวิเคราะห์ธาตุทั้งหมด 3 ชนิด คือ

(1) ข้าวมาตรฐาน ตัวอย่างข้าวมาตรฐานที่ใช้คือ Standard Reference Material 1568a (SRM 1568a) ของ National Institute of Standards & Technology (NIST) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 มีลักษณะเป็นผง ซึ่งประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม โบรมีน แมกนีเซียม เป็นต้น ดังที่แนบมาในภาคผนวก ข.



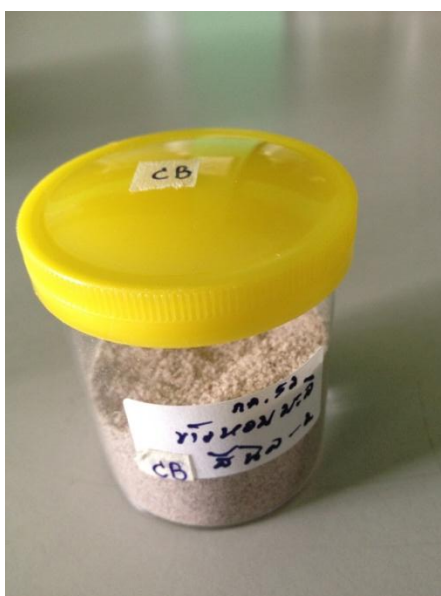
ภาพที่ 3.3 Standard Reference Material 1568a (SRM 1568a)

(2) ข้าวกล้อง เป็นข้าวกล้องที่ได้มาจากตลาดในกรุงเทพฯ และ
ปริมาตรพล นำมาบดให้ละเอียดเพื่อให้มีลักษณะเหมือนกับสารมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วย ธาตุ
หลัก ๆ ของข้าว เช่น โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ข้าวกล็อง

(3) ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล เป็นข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่ได้มาจากตลาดในกรุงเทพฯ และปริมณฑล นำมาบดให้ละเอียดเพื่อให้มีลักษณะเหมือนกับสารมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ ของข้าว เช่น โซเดียม แมกนีเซียม โปแทสเซียม เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล

3.1.5 ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการปรับเทียบห้วงวัด

ในการวิจัยครั้งนี้ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการปรับเทียบห้วงวัดมีทั้งหมด 2 ชนิด คือ

- (1) Cs-137 ซีเซียมที่ใช้เป็นซีเซียมที่มีค่าความแรงรังสี 3989 แบคเคอเรล ณ. วันที่ 1 มกราคม 2551 Source Number คือ 1278-20-1 ของบริษัท An Eckert & Ziegler ดังที่แสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ซีเซียม-137

- (2) Eu-152 ยูโรเปียมที่ใช้เป็นยูโรเปียมที่มีค่าความแรงรังสี 39590 แบคเคอเรล ณ. วันที่ 15 มิถุนายน 2548 Source Number คือ 1103-87-1 ของบริษัท An Eckert & Ziegler ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ยูโรเปียม-152

3.1.6 ตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (Comparator)

ตัวที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเทียบหรือตัว Comparator นั้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ทอง (Au) เป็น Comparator ซึ่งอยู่ในลักษณะเป็นเส้นลวดอะลูมิเนียม ที่มีทองผสมอยู่ 0.1% ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ตัวเปรียบเทียบเทียบ (Comparator)

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis หรือ NAA) เป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้นิวตรอนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดเป็นสารกัมมันตภาพรังสีแล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ซึ่งรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมา นั้นจะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้เรารู้ว่าในตัวอย่างประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ซึ่งการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน (Comparative method) และการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless method)

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้นิวตรอนแบบ ไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless method) ซึ่งวิธีนี้แตกต่างจาก วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐาน คือวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานมีความจำเป็นต้องใช้สารมาตรฐาน โดยที่สารมาตรฐานที่ใช้ต้องมีลักษณะเหมือนกับสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา มาเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบในการหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง แต่วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐาน แต่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (Comparator) แทนการใช้สารมาตรฐาน ซึ่งตัว Comparator นี้ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเหมือนกับสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ดังนั้นจึงมีความสะดวกสบายในการเตรียมมากกว่าสารมาตรฐาน แต่การทำวิธีนี้ต้องทุกอย่างให้คงที่ที่สุด ไม่ว่าจะเป็นค่าฟลักซ์นิวตรอน ณ ตำแหน่งที่อาบรังสี ค่าประสิทธิภาพของหัววัด ณ ตำแหน่งที่วัด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องที่สุด

ในการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน (Comparative method) และการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless method) เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งวิธีทำการวิจัยได้อธิบายในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 ดังต่อไปนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแบบ ใช้สารมาตรฐาน (Comparative Method)

มีวิธีในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

- (1) ศึกษาการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน และฝึกฝนการวิเคราะห์ธาตุที่ในข้าว
- (2) นำตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิด ไปอบรังสีนิวตรอน ที่ห้องภายนอกแกน A4 ซึ่งมีค่าฟลักซ์นิวตรอนประมาณ 5.15×10^{10} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (วัดเมื่อ พ.ศ. 2553) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- (3) นำตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิด ออกจากห้องอบรังสีนิวตรอน แล้วปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลาประมาณ 14 ชั่วโมง
- (4) ทำการนับวัดตัวอย่างดังกล่าว ซึ่งวัดห่างจากหัววัด 8 เซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (5) นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าปริมาณของธาตุ โดยใช้ข้าวมาตรฐานเป็น ตัวเปรียบเทียบมาตรฐาน ดังสมการที่ 2.7

3.2.2 การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้นิวตรอนแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless Method)

- (1) นำตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิดและตัว Comparator ไปอบรังสีนิวตรอน ที่ห้องภายนอกแกน A4 ซึ่งมีค่าฟลักซ์นิวตรอนประมาณ 5.15×10^{10} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (วัดเมื่อ พ.ศ.2553) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- (2) จากนั้นนำตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิด และตัว Comparator ที่อบรังสีนิวตรอนแล้ว ปล่อยให้ปลดปล่อยพลังงาน เป็นเวลาประมาณ 14 ชั่วโมง
- (3) ทำการนับวัดตัวอย่างและตัว Comparator ดังกล่าว ซึ่งวัดห่างจากหัววัด 8 เซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (4) นำ Peak ที่ได้จากการวัดค่าพลังงานของตัวอย่างมาใส่โปรแกรม k0 ซึ่งก่อนใช้โปรแกรมต้องทำการ เพิ่มค่าข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้ ค่าพื้นฐานในคำสั่ง Permanent database โดยที่ในคำสั่งนี้จะเป็นการใส่ค่าพื้นฐานต่าง ๆ ลงไปในโปรแกรม เช่น ค่าต่าง ๆ ของหัววัด, ค่าฟลักซ์นิวตรอน, ส่วนประกอบของสิ่งที่ใช้บรรจุตัวอย่าง ตำแหน่ง ขนาดและรูปร่างของมัน, ตำแหน่งที่ใช้ในการวัด, วัสดุที่ใช้ทำตำแหน่ง ดังที่แสดงในหัวข้อที่ 3.2.2.1

3.2.2.1 Edit Permanent database

การแก้ไขข้อมูลพื้นฐานถาวรนั้น จะมีการแก้ไขค่าต่าง ๆ ดังนี้

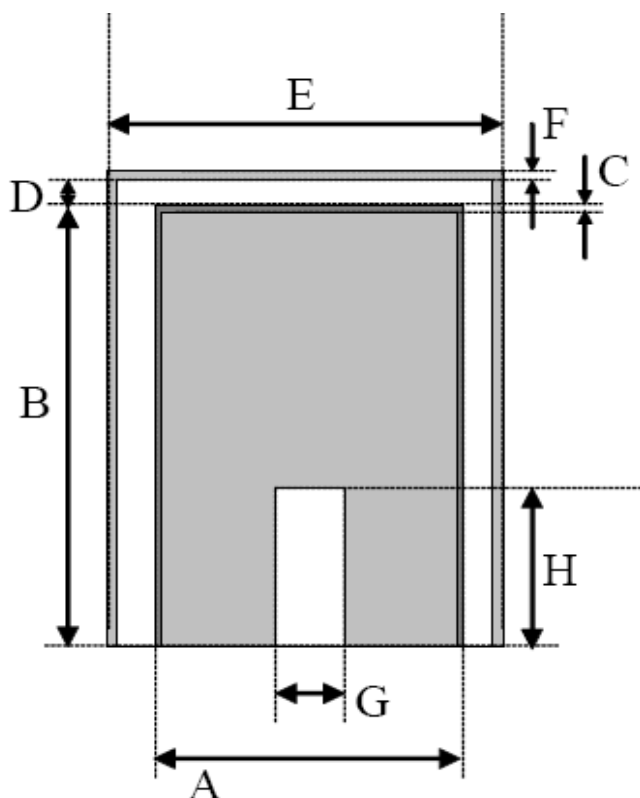
(1) Certificates ในคำสั่งนี้จะเป็นการใส่ค่าจริงที่มีใน Certification ที่สามารถนำไปเป็นตัวเปรียบเทียบมาตรฐานได้ ในการวิจัยได้ใส่ค่าไปทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ Cs-137 (Radionuclides), Eu-152 (Radionuclides), Au-Al (Chemical elements) ซึ่งในคำสั่งนี้ทุกค่าที่ใส่ไปต้องนำมาจาก Certification ทั้งสิ้น

(2) Detectors ในคำสั่งนี้ต้องใส่ค่าองค์ประกอบของหัววัด ทั้งประเภท ขนาด และวัสดุที่ใช้ทำหัววัด ดัง ภาพที่ 3.9 เป็นรูปที่แสดงถึงขนาดของส่วนประกอบของหัววัดรังสี ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ได้ใส่ค่า ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดและวัสดุที่ใช้ทำหัววัด

ประเภทของหัววัด	Coaxial	Well-type	หัววัดในการวิจัย (Coaxial)
A	Crystal diameter	Crystal diameter	59 mm
B	Crystal length	Crystal length	94 mm
C	Dead layer thickness	Not used	0
D	End cap to crystal	Not used	3 mm
E	Top cover diameter	Not used	67.6 mm
F	Top cover thickness	Cover thickness	1.3 mm
G	Core diameter	Well diameter	9.5 mm
H	Core height	Well depht	55.8 mm

*ค่าทุกค่าเป็นค่าที่ได้มาจาก Certification ของหัววัด, Material Al-metal



ภาพที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของหัววัด

ที่มา The k_0 -IAEA program manual for version 5.00 [Online]. Available from :

<http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/K0-IAEA.html> [8]

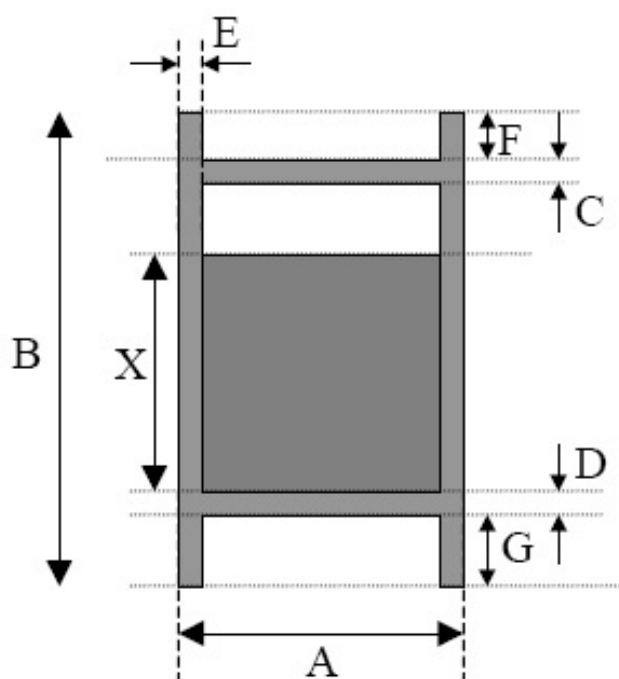
(3) Elements ในคำสั่งนี้จะเป็นการเลือกธาตุที่สนใจ ในการวิจัยได้ใส่ค่าเข้าไปทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ Cs-137 โดยที่ธาตุที่สนใจคือ Cs-137, Eu-152 โดยที่ธาตุที่สนใจคือ Eu-152, Rice โดยธาตุที่เราสนใจคือ Na-24 K-42 และ Mn-56

(4) Facilities คำสั่งนี้ต้องใส่ค่าของฟลักซ์ต่าง ๆ คือ ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน, ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว และฟลักซ์ของอีพิเทอร์มัลนิวตรอน รวมไปถึงอุณหภูมิที่ใช้ในขณะทำการทดลอง ซึ่งค่าฟลักซ์ต่าง ๆ ที่ใส่ลงไปเป็นค่าที่ฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์นั้น ๆ โดยที่ในการทดลองนี้ได้ใส่ค่าฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน คือ 5.15×10^{10} n/cm²s, ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว คือ 4.45×10^{10} n/cm²s, ฟลักซ์ของอีพิเทอร์มัลนิวตรอน คือ 1.83×10^9 n/cm²s และค่าอุณหภูมิ คือ 310 เคลวิน

(5) Matrices คำสั่งนี้เป็นการใส่ค่าความหนาแน่น ค่าองค์ประกอบของสิ่งนั้น ๆ เช่น ในกระดาษประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยที่มี คาร์บอน : ไฮโดรเจน เป็นอัตราส่วน 140000 : 860000 , ใน Ni-metal ประกอบไปด้วย Ni 1000000 mg/kg เพียงอย่าง

เดียว ซึ่งในการวิจัยได้เพิ่มลงไป 3 กลุ่มคือ Cs-137, Eu-152 และข้าว โดยที่ Cs-137 และ Eu-152 มีเฉพาะตัวมันเป็นเองเพียงอย่างเดียวเป็นองค์ประกอบ ส่วนข้าวนั้นประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน, คาร์บอน, และออกซิเจน โดยอัตราส่วนระหว่าง ไฮโดรเจน : คาร์บอน : ออกซิเจน เป็น 73677.89 : 439004.4 : 487317.7 ค่าเหล่านี้ได้มาจากการคำนวณจากสูตรมาตรฐานของข้าว $C_6H_{10}O_5$

(6) Recipients คำสั่งนี้เป็นค่าใส่ค่าระยะต่าง ๆ ของตัวรองรับสารตัวอย่าง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้แคปซูลขนาด 10 มิลลิเมตรเป็นภาชนะบรรจุสาร ดังภาพ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของภาชนะบรรจุสาร

ที่มา The k_0 -IAEA program manual for version 5.00 [Online]. Available from :

<http://www-naweb.iaea.org/naweb/napc/iachem/K0-IAEA.html> [8]

จากภาพที่ 3.10 เป็นรูปที่แสดงถึงขนาดของส่วนประกอบของภาชนะบรรจุสาร ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ใส่ค่า ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดของภาชนะบรรจุสาร

ตำแหน่งที่	ตำแหน่ง	ค่าที่ใส่ในตาราง (มิลลิเมตร)
A	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก	10
B	ความสูงด้านนอก	10
C	ความหนาของฝาปิดด้านบน	0.5
D	ความหนาด้านล่าง	0.5
E	ความหนาข้างข้าง	0.5
F	ช่องว่างข้างบน	1
G	ความสูงของตัวฐานด้านล่าง	0
X	ความสูงของตัวอย่างเมื่อบรรจุในที่บรรจุแล้ว	4

3.2.2.2 เมื่อเพิ่มค่า Permanent Database แล้ว จากนั้นต้องเพิ่มค่าในคำสั่ง Series database ซึ่งการจะเพิ่มค่าในคำสั่งนี้ได้จะต้องทำหลังจาก สร้างชุดของตัวอย่างก่อน โดยใช้คำสั่ง File/New จากนั้นใช้คำสั่ง Edit/Series database แล้วเพิ่มชุดตัวอย่างเข้าไป รวมถึงไปถึง ข้อมูลต่าง ๆ ของชุดตัวอย่าง เช่น ข้อมูลการบรรจุ, ข้อมูลการอบรังสี, ข้อมูลการวัด ซึ่งชุดตัวอย่าง ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้สร้างขึ้นมาทั้งหมด 8 ชุดตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

(1) กลุ่มที่ 1 ใช้สำหรับการปรับเทียบค่าต่าง ๆ ของหัววัด ซึ่งประกอบด้วย ตัวอย่างทั้งหมด 4 ตัวคือ

ตัวอย่างที่ 1 : Background เพื่อใช้ในการปรับเทียบค่า Background

ตัวอย่างที่ 2 : Eu-152 เพื่อใช้ในการปรับเทียบค่าพลังงานของหัววัด

ตัวอย่างที่ 3 : Cs-137 เพื่อใช้ในการหาค่า Peak to total ratio

ตัวอย่างที่ 4 : Eu-152 เพื่อใช้ในการปรับเทียบค่าประสิทธิภาพของหัววัด

(2) กลุ่มที่ 2 ใช้สำหรับหาค่า Flux parameter มี 1 ตัว คือ

ตัวอย่างที่ 5 : Au-AI เพื่อใช้เป็นตัว Comparator ในการหาค่าฟลักซ์ของ เครื่องปฏิกรณ์ในขณะวัด

(3) กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มตัวอย่างที่เราต้องการวิเคราะห์ธาตุ ในการวิจัยครั้งนี้ มี ทั้งหมด 3 ตัว คือ

ตัวอย่างที่ 6 : ตัวอย่างข้าวมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ 7 : ตัวอย่างที่เป็นข้าวกล้อง

ตัวอย่างที่ 8 : ตัวอย่างที่เป็นข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล

3.2.2.3 Edit series database การเพิ่มค่าในคำสั่งนี้ จะมีการเพิ่มค่าต่าง ๆ ตามชุดของตัวอย่างดังนี้

(1) Sample เป็นการเพิ่มชุดตัวอย่าง ในการวิจัยนี้ได้เพิ่มชุดตัวอย่าง 3 กลุ่ม ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งแต่ละชุดจะต้องบอกประเภทของตัวอย่าง คือ ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างที่จัดอยู่ในประเภท Source หรือสารกัมมันตภาพรังสี, ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างที่จัดอยู่ในประเภทตัวเปรียบเทียบหรือ Comparator และตัวอย่างกลุ่มที่ 3 เป็นตัวอย่างที่จัดอยู่ในประเภท Ordinary นอกจากนี้จะต้องระบุประเภทของตัวอย่างแล้วยังต้องระบุข้อมูลของแต่ละตัวอย่าง ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง และอัตราส่วนความแห้งและชื้นของตัวอย่างอีกด้วย ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของชุดตัวอย่าง

ชุดตัวอย่างที่	ชุดตัวอย่าง	Sample type	Matrix type	Geometry	Dry/Wet ratio
1	Background	Source	-	-	1
2	Eu-152	Source	Eu-152	Slab	1
3	Cs-137	Source	Cs-137	Slab	1
4	Eu-152	Comparator	Eu-152	Slab	1
5	Au-Al	Comparator	Al metal	Wire	1
6	Rice Flour	Ordinary	Rice	Powder/Liquid	1
7	ข้าวกล้อง	Ordinary	Rice	Powder/Liquid	1
8	ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล	Ordinary	Rice	Powder/Liquid	1

(2) Packaging เป็นการเพิ่มข้อมูลของการบรรจุสารตัวอย่าง เช่น วันเวลาในการบรรจุสาร วันเวลาในการเลิกบรรจุสาร ความสูงของสารที่ถูกรับบรรจุในตัวอย่างบรรจุสาร น้ำหนักของสาร, ตัวบรรจุสารและ ประเภทของตัวบรรจุสาร (ตัวบรรจุสารที่เลือกใช้จะเลือกจากที่เราเพิ่มเข้าไปใน Permanent database) ในการวิจัยได้ใส่ข้อมูลของชุดสารทั้ง 8 ชุด ดังนี้

ตาราง 3.4 เวลาในการบรรจุสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง

ชุดตัวอย่างที่	Packaging condition	Packaging time	Unpackaging time	Height (mm)	Mass sample (mg)
1	Blank	-	-	-	-
2	Aluminum	15 มิ.ย.2005 Time (12.00)	1 ก.ค. 2011 Time (10.53)	3.18	1133
3	Aluminium	1 ม.ค. 2008 Time (00.00)	1 ก.ค. 2011 Time (09.51)	3.18	1133
4	Aluminum	15 มิ.ย.2005 Time (12.00)	1 ก.ค. 2011 Time (10.53)	3.18	1133
5	Capsule	11 ส.ค.2010 Time (09.00)	1 ก.ค. 2011 Time (11.59)	10	10
6	Capsule	4 ม.ค.2011 Time (09.00)	1 ก.ค. 2011 Time (14.21)	10	100
7	Capsule	4 ม.ค.2011 Time (09.00)	1 ก.ค. 2011 Time (15.25)	10	100
8	Capsule	4 ม.ค.2011 Time (09.00)	1 ก.ค. 2011 Time (16.31)	10	100

(3) Measurement จะเป็นคำสั่งเกี่ยวกับการวัด ต้องใส่ข้อมูลเกี่ยวกับการวัดลงไป เช่น ชนิดของหัววัด (หัววัดที่เลือกใช้จะเลือกจากที่เราเพิ่มเข้าไปในPermanent database) , เวลาที่เริ่มมีการวัด, เวลาที่หยุดวัด, ระยะห่างจากตัวอย่างถึงหัววัด, ลักษณะการวางตัวอย่าง และค่า Dead time ของหัววัด ในการวิจัยได้ใส่ข้อมูลของชุดสารทั้ง 8 ชุด ดังนี้

ตารางที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการวัดรังสีแกมมา

ชุดตัวอย่างที่	Detector	Start time	Stop time	Distance (mm)	Dead Time (%)
1	Detector1	4 มี.ค. 2011 Time (10.00)	4 มี.ค. 2011 Time (10.10)	80	0
2	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (10.53)	1 ก.ค. 2011 Time (11.53)	80	2.73
3	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (09.51)	1 ก.ค. 2011 Time (10.51)	80	0.5
4	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (10.53)	1 ก.ค. 2011 Time (11.53)	80	2.73
5	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (11.59)	1 ก.ค. 2011 Time (12.59)	80	9.41
6	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (14.21)	1 ก.ค. 2011 Time (15.21)	80	0.77
7	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (15.25)	1 ก.ค. 2011 Time (16.25)	80	0.83
8	Detector1	1 ก.ค. 2011 Time (16.31)	1 ก.ค. 2011 Time (17.31)	80	0.80

(4) Activation คำสั่งนี้เป็นคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการอาบรังสีนิวตรอน ต้องใส่ข้อมูลเกี่ยวกับการอาบรังสีนิวตรอนลงไป เช่นท่อนิวตรอนที่ใช้ในการอาบรังสี, เวลาที่เริ่มมีการอาบรังสีนิวตรอน, เวลาที่หยุดอาบรังสี (ท่อนิวตรอนที่ใช้จะเลือกใช้จะเลือกจากที่เราเพิ่มเข้าไปใน Permanent database)

ตารางที่ 3.6 เวลาในการอาบรังสีนิวตรอน

ชุดตัวอย่างที่	Channel/Position	Start time	Stop time
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	-	-	-
5	ท่อ A	30 มิ.ย. 2011 Time (15.30)	30 มิ.ย. 2011 Time (20.30)
6	ท่อ A	30 มิ.ย. 2011 Time (15.30)	30 มิ.ย. 2011 Time (20.30)
7	ท่อ A	30 มิ.ย. 2011 Time (15.30)	30 มิ.ย. 2011 Time (20.30)
8	ท่อ A	30 มิ.ย. 2011 Time (15.30)	30 มิ.ย. 2011 Time (20.30)

3.2.2.4 เมื่อเพิ่มค่า Series Database เรียบร้อยแล้ว จากนั้นโปรแกรมจะขึ้น บล็อกไดอะแกรมให้เพิ่มกราฟที่สอดคล้องกับชุดตัวอย่าง กราฟที่ได้มาจากการทดลอง โดยที่ในแต่ละชุดตัวอย่างโปรแกรมจะให้เพิ่มกราฟ 2 อัน ซึ่งสกุลไฟล์จะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่ใช้ วัดค่ารังสี ดังที่แสดงต่อไปนี้

Description	Read internally by k0_IAEA	
Aptec spectrum files		*.ap0
Aptec v4.3 spectrum files		*.a43
Canberra S100 files		*.mca
Canberra binary spectrum files		*.cnf
Canberra text spectrum files	yes	*.lis
IAEA spectrum files	yes	*.k0s
Nuclear Data Accuspec		*.nda
Nucleus PCA		*.spm
Ortec integer spectrum files	yes	*.chn
Ortec spectrum files	yes	*.spc
Sampo spectrum files	yes	*.spe
Silena EMCAPlus		*.sip
Silena		*.sil

ภาพที่ 3.11 สกุลไฟล์ของค่า Serial Database

ที่มา : The k₀-IAEA program manual for version 5.00 [Online]. Available from :
<http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/K0-IAEA.html> [8]

จากภาพที่ 3.11 แสดงถึงการ Input File Formats ของโปรแกรม k0 จะสามารถอ่านไฟล์ของสเปกตรัมที่เพิ่มเข้ามาได้ก็ต่อเมื่อไฟล์นั้นมีสกุลไฟล์เป็น .lis, .k0s, .chn, .spc และ .spe แต่สำหรับไฟล์อื่น ๆ จะต้องมีการแปลงไฟล์ของ SPEDAC Software ให้เป็นไฟล์ที่อ่านได้จาก k0 ซึ่งไฟล์ที่ถูกแปลงแล้วถูกเก็บไว้ใน โฟลเดอร์ k0_iaea ในการเรียกใช้ของโปรแกรม จะเรียกใช้ทั้งไฟล์เดิมและไฟล์ที่แปลงแล้วพร้อมกัน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้สกุลไฟล์ .chn เพราะในการวัดค่าพลังงานของรังสีแกมมา ได้วัด จากโปรแกรม GammaVission version 5.10 ของบริษัท ORTEC

Description	Read internally by k0_IAEA	
k0_IAEA	yes	*.k0p
Canberra text spectrum analysis file	yes	*.rpt
SAMPO peak analysis file	yes	*.ptf
GAMMAVISION text peak analysis file	yes	*.gvt
MAESTRO text peak analysis file	yes	*.omt

ภาพที่ 3.12 สกุลไฟล์ของพีคพลังงาน

ที่มา: The k_0 -IAEA program manual for version 5.00 [Online]. Available from :

<http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/K0-IAEA.html> [8]

จากภาพที่ 3.12 แสดงถึงการ Input File ของพีคพลังงาน สำหรับพีคของพลังงานและพื้นที่ ไฟล์ที่สามารถเพิ่มเข้าไปในโปรแกรมได้จะต้องมีสกุลไฟล์ขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่ใช้ และต้องเป็นโปรแกรมที่ k0 รองรับ ซึ่งการ input file ในข้อนี้จะเพิ่มหลังจาก เพิ่มไฟล์ในภาพที่ 3.11 เรียบร้อยแล้ว สกุลไฟล์และโปรแกรมที่ k0 รองรับ ดังนี้ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สกุลไฟล์ .rpt จากโปรแกรม GammaVision version 5.10 ของบริษัท ORTEC

3.2.2.5 เมื่อทำการ input file เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการปรับเทียบค่าต่าง ๆ ของห้วงวัด จากนั้นทำการหาค่า Flux Parameter และ Interpret ตัวอย่างทั้ง 3 อย่าง ซึ่งค่าต่าง ๆ สามารถเรียกดูได้จาก คำสั่ง View

3.2.2.6 คำสั่ง View menu เมื่อกดปุ่มมองจะมีการโชว์มุมมองที่มีการอัปเดตอยู่เสมอขึ้นอยู่กับสถานการณ์ปัจจุบันของตัวอย่าง โดยที่เมนูมุมมองนี้จะไม่แสดงผลต่อเมนูแก้ไข (Edit Menu) คำสั่งในเมนูมุมมองจะแสดง ดังนี้

- History : ใช้แสดงประวัติของตัวอย่างที่เราสนใจ เช่น เวลาการบรรจุ เวลาการฉายรังสี เวลาการวัด และฟังก์ชันที่ใช้ในการฉายรังสี
- Raw spectra : ใช้แสดงสเปกตรัมของตัวอย่างที่สนใจโดยที่ยังไม่ทำการวิเคราะห์
- Curves for the spectra : จะปรากฏเมนูให้เลือกขึ้นสำหรับ curves ที่สามารถใช้ได้

- Peak fit views : จะปรากฏเมนูให้เลือกขึ้นสำหรับมุมมองที่ใช้ได้ โดยจะถูก fit พื้นที่ในสเปกตรัม
- Efficiency curves for the spectra : แสดง curves ประสิทธิภาพของสเปกตรัมของตัวอย่างที่เราสนใจ
- Flux parameter to view : เลือกพารามิเตอร์ฟลักซ์ที่จะต้องมีการแสดงออกมาในการ plot ของพารามิเตอร์ฟลักซ์
- Map of flux parameter : แสดงการ plot ของ flux parameter map ที่เกี่ยวข้องสำหรับตัวอย่างปัจจุบัน
- Graphical results : แสดงผลแปลความหมายในรูปแบบเชิงกราฟ (เป็นการทำงานที่ใช้ได้กับชนิดตัวอย่างทั้งหมด)
- Fitted efficiency curve : แสดงผลการแปลความหมายในรูปแบบของ curves ประสิทธิภาพที่ถูก fit แล้ว (เป็นการทำงานที่ใช้ได้กับชนิดตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบเท่านั้น)
- Numerical results : ผลเชิงตัวเลข จะแสดงผลการแปลความหมายเป็นตัวหนังสือ
- Select spectrum of interest : เป็นการเลือกดูสเปกตรัมที่เราสนใจ ผลที่ได้ออกมาจะเป็นกราฟ
- Options for plot/views : จะปรากฏตัวเลือกเพื่อกำหนดว่ากราฟที่ออกมาจะแสดงอย่างไร และตำแหน่งพีคที่แสดงเป็นอย่างไร (ช่องของพลังงาน)
- Zoom in mode : เมื่อเลือกจะสามารถขยายขนาดสเปกตรัมได้โดยปุ่มเมาส์ด้านซ้าย
- Zoom out mode : เมื่อเลือกจะสามารถลดขนาดสเปกตรัมได้โดยปุ่มเมาส์ด้านซ้าย
- Toolbar : ใช้แสดงหรือซ่อนแถบเครื่องมือ
- Status Bar : แถบสถานะ ใช้แสดงหรือซ่อนแถบสถานะ

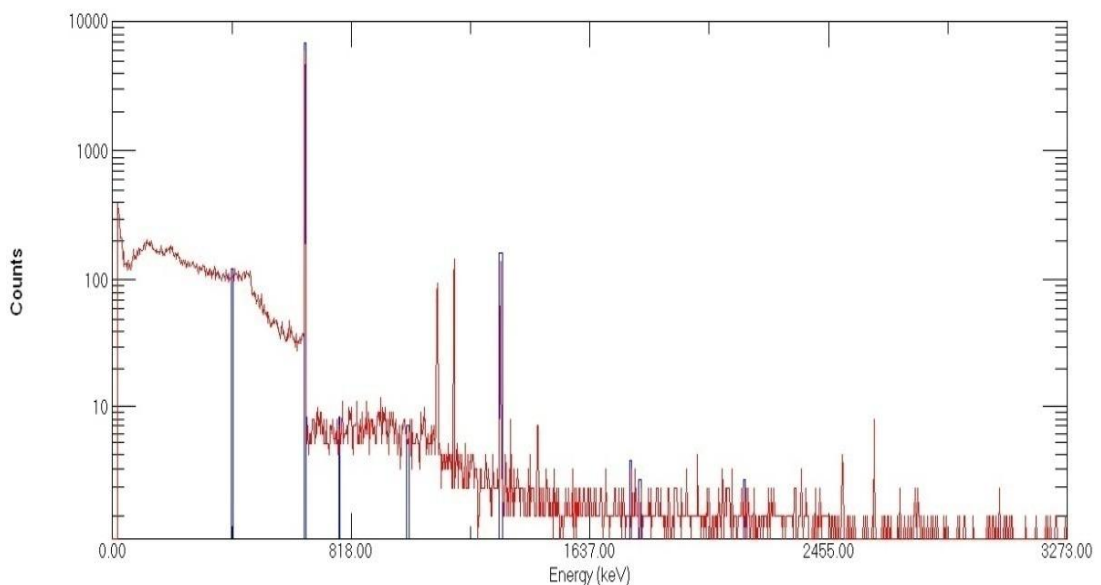
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานและวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานซึ่งแต่ละการทดลอง ได้ใช้ผลจากการวัดรังสีแกมมาครั้งเดียวกัน จากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง คือ ข้าวมาตรฐาน ข้าวกล้อง และข้าวหอมมะลิสีนิล ซึ่งได้ใช้ Cs-137 และ Eu-152 ในการเปรียบเทียบค่าพลังงานและค่าประสิทธิภาพของหัววัด และใช้ค่า Au-198 เป็นตัวเปรียบเทียบ (Comparator) โดยแต่ละสารตัวอย่างได้ถูกวัดด้วยหัววัดรังสี HPGe ซึ่งใช้เวลาในการนับวัด 1 ชั่วโมง

4.1 ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Cs-137

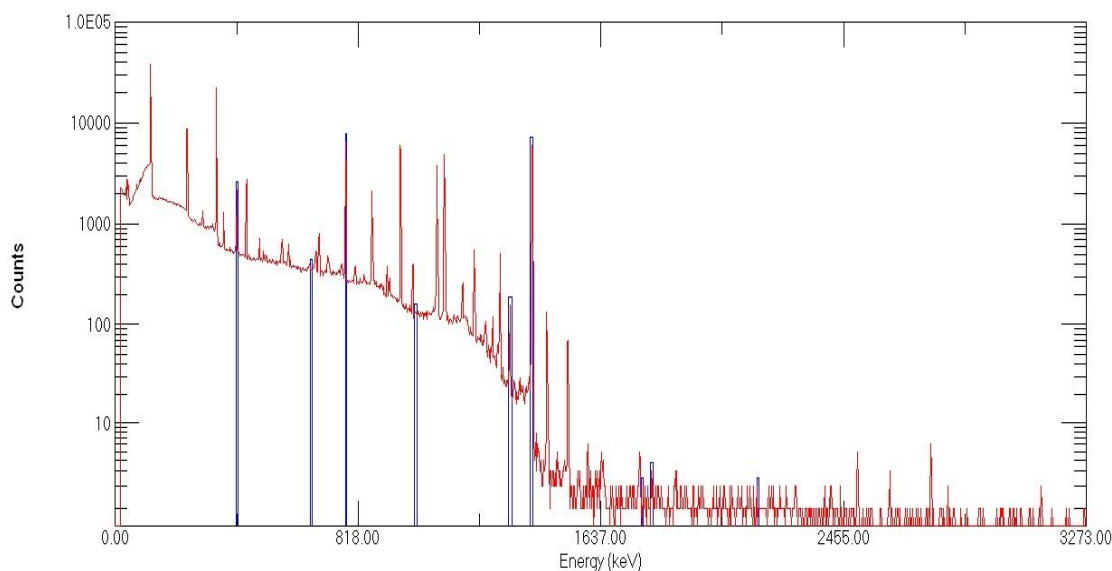
สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการวัดค่ารังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาจาก Cs-137 ดังภาพที่ 4.1 โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีแกมมาและค่าพลังงาน ซึ่งกราฟนี้จะถูกนำไปใช้เมื่อวิเคราะห์ธาตุโดยโปรแกรม k_0 โดยโปรแกรมจะเปลี่ยนจากสเปกตรัมรังสีแกมมาให้เป็นค่า z-score ดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 จากนั้นนำไปใช้ในการหาค่า Peak to total ratio



ภาพที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน ของ Cs-137

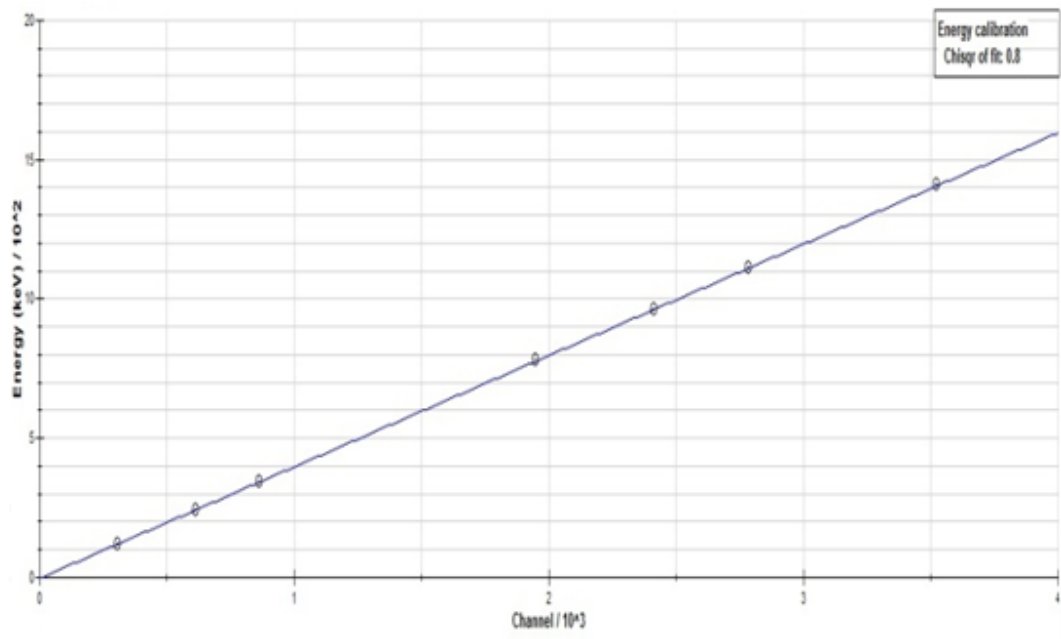
4.2 ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Eu-152

ภาพที่ 4.2 คือรูปของสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการวัดค่ารังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาจาก Eu-152 ซึ่งได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีแกมมาและค่าพลังงาน กราฟนี้จะถูกนำไปใช้ในกรณีวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน

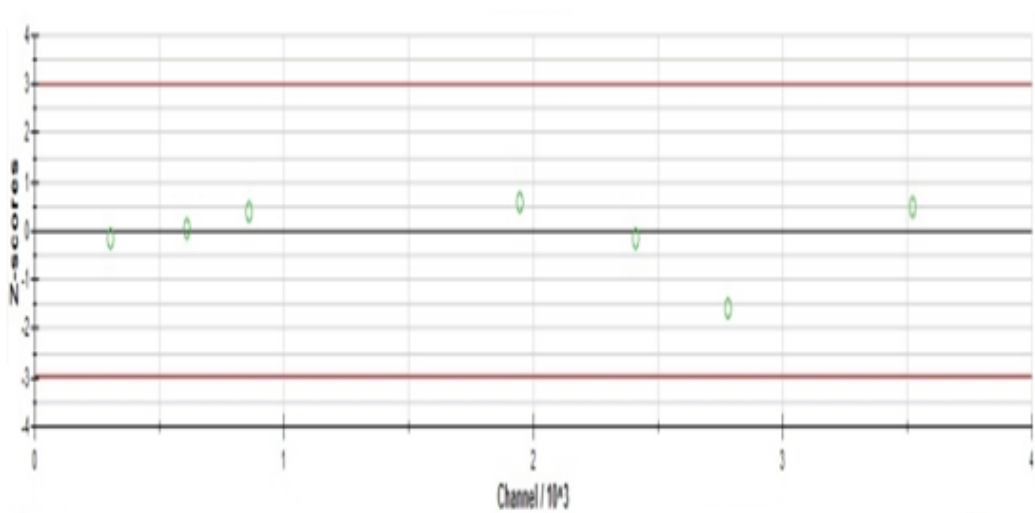


ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน ของ Eu-152

วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้น จะนำสเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้นี้ไปใส่ในโปรแกรม k_0 โดยที่โปรแกรม k_0 จะเปลี่ยนจากสเปกตรัมรังสีแกมมาให้เป็นค่า z-score เพื่อนำไปใช้ในการปรับเทียบค่าพลังงานและค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ซึ่งในขั้นต้นแรกจะเป็นการปรับเทียบค่าพลังงานของหัววัดการปรับเทียบค่าพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.3 แสดงการปรับเทียบค่าพลังงานของหัววัด เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานและค่า Channel และภาพที่ 4.4 เป็นรูปแสดงการเปลี่ยนกราฟของการปรับเทียบของหัววัดให้อยู่ในค่า z-score เพื่อให้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบค่าพลังงานของหัววัด

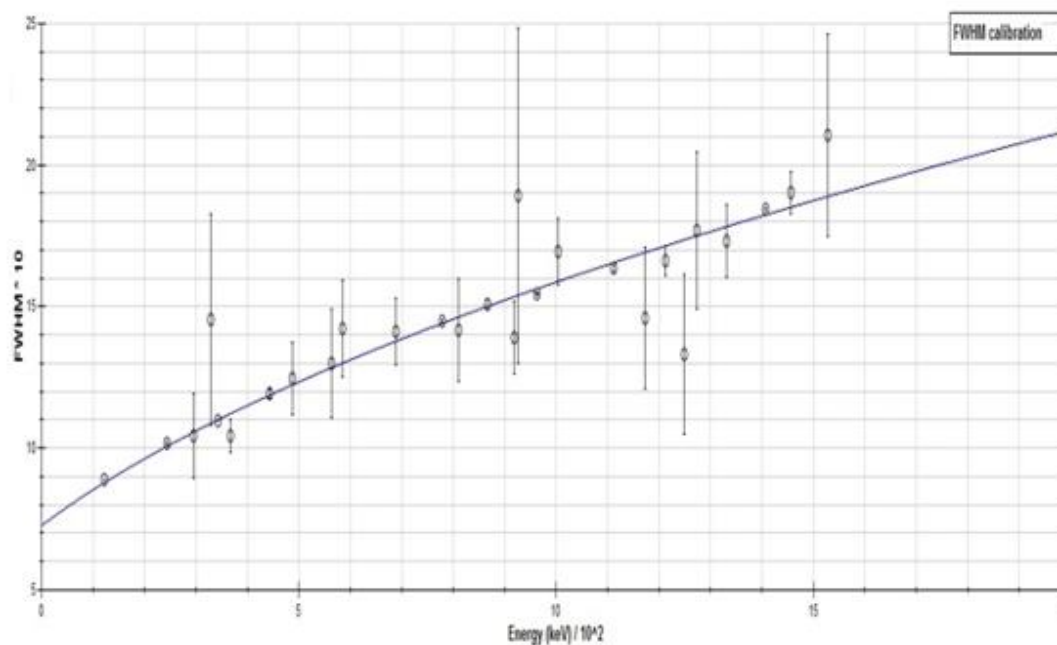


ภาพที่ 4.3 กราฟของการปรับเทียบค่าพลังงานที่ได้จาก Eu-152 ของโปรแกรม k_0



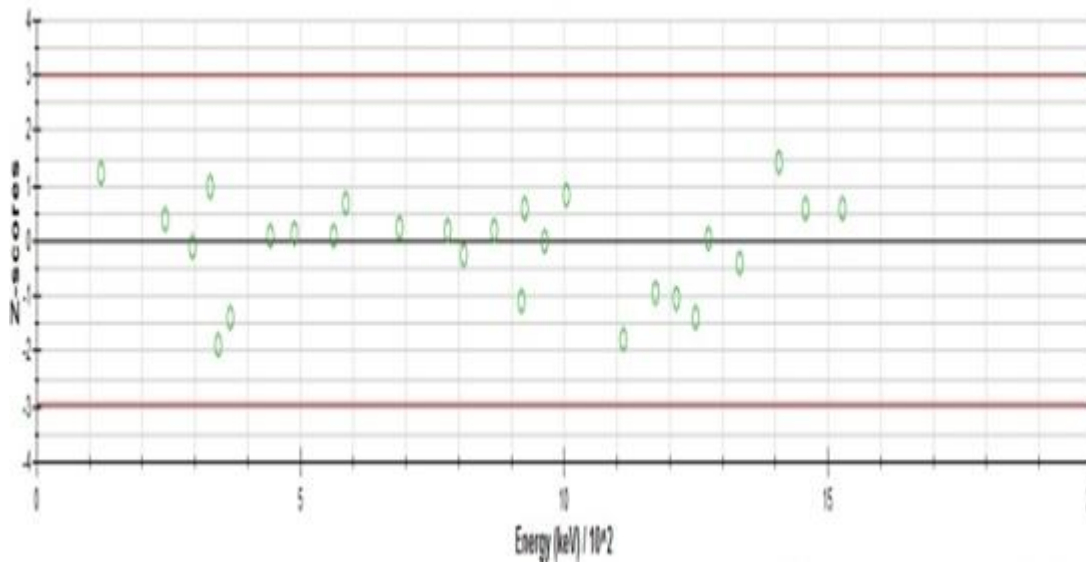
ภาพที่ 4.4 การปรับเทียบค่าพลังงานของหัววัดแบบค่า z-score

ภาพที่ 4.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM กับค่าพลังงานของรังสีแกมมาจากสารรังสี Eu-152 ซึ่งเป็นการปรับเทียบเครื่องมือวัดในขั้นตอนปรับเทียบรูปร่างพีค โดยเป็นการปรับเทียบหลังจากการปรับเทียบค่าพลังงานซึ่งใช้ข้อมูลจากกราฟของ Eu-152



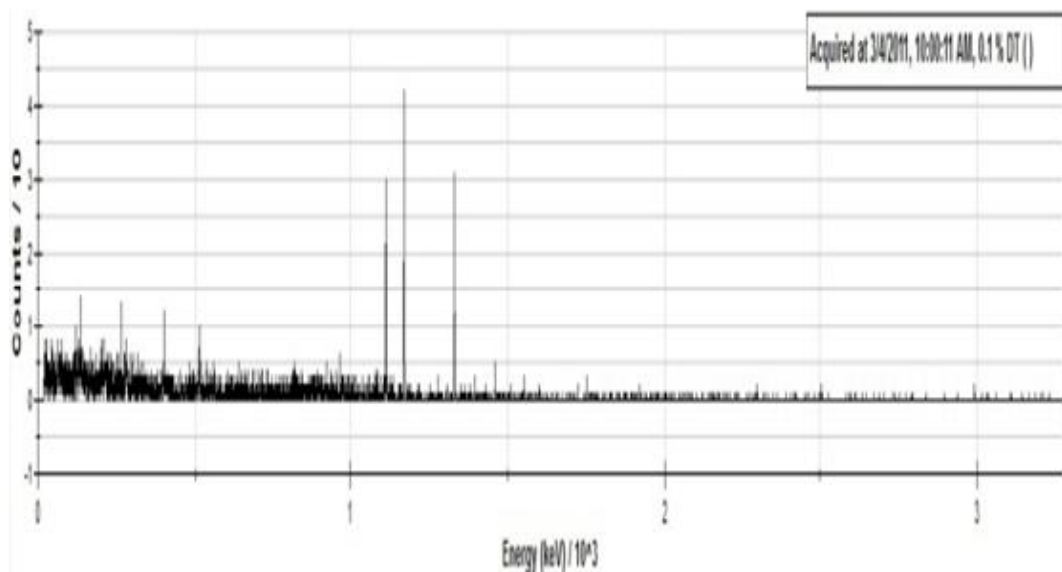
ภาพที่ 4.5 กราฟการปรับเทียบ Shape Calibration ของโปรแกรมน k_0

เมื่อได้กราฟ FWHM แล้ว โปรแกรมน k_0 จะเปลี่ยนจากกราฟ FWHM ให้เป็นค่า z-score ดังภาพที่ 4.6 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเป็นตัวปรับเทียบรูปร่างพีค



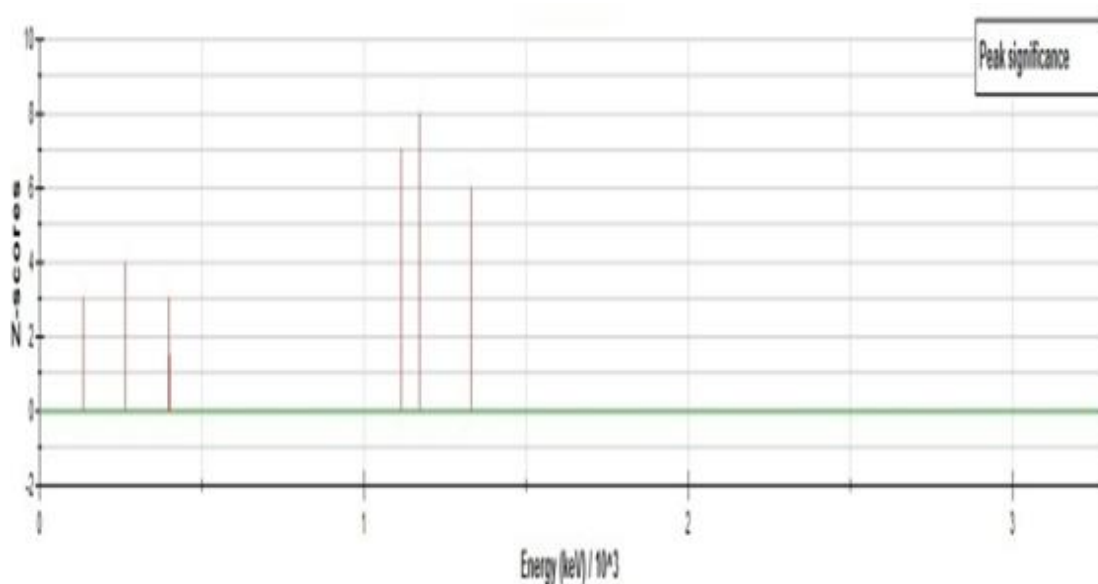
ภาพที่ 4.6 กราฟการปรับเทียบรูปร่างของพีค ของโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score

เมื่อได้ค่าการปรับเทียบทั้งการปรับเทียบค่าพลังงาน และการปรับเทียบรูปร่างของพีคแล้ว การปรับเทียบอย่างที 3 คือการปรับเทียบค่าแบคกราวด์ ซึ่งใช้กราฟของแบคกราวด์ในการใส่ค่า เข้าไปในโปรแกรม k_0 ดังแสดงในภาพที่ 4.7 เป็นรูปการวัดรังสีแกมมาในขณะที่ไม่มีสารตัวอย่าง หรือสารมาตรฐาน



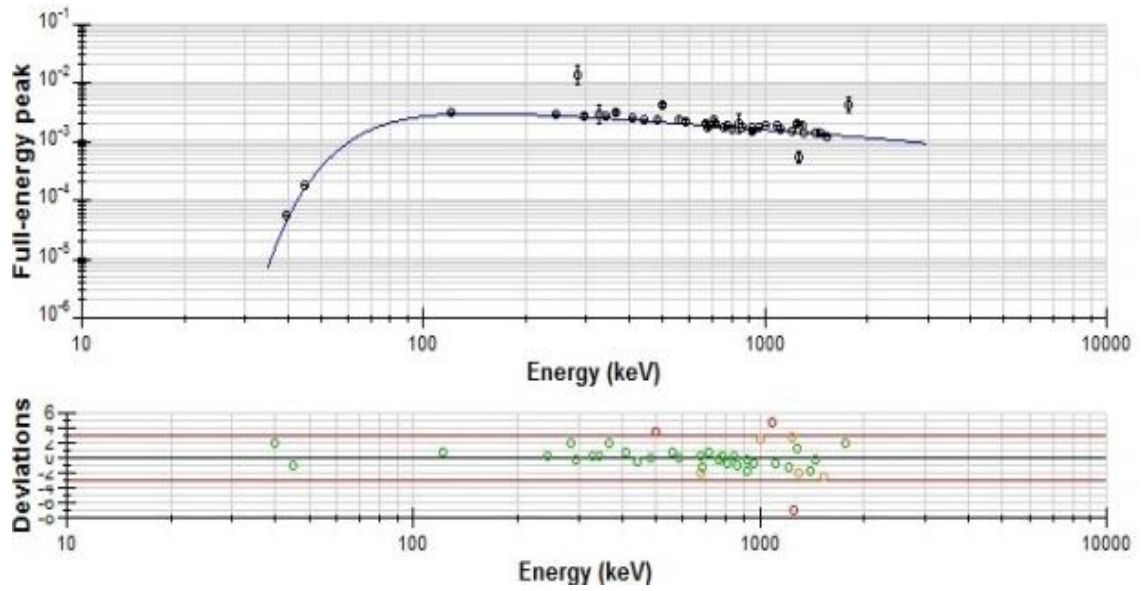
ภาพที่ 4.7 กราฟการปรับเทียบค่าแบคกราวด์ของโปรแกรม k_0

จากนั้นโปรแกรมจะเปลี่ยนค่าสเปกตรัมเป็นกราฟของค่า z-score ของแต่ละพลังงาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับเทียบกับค่าอื่น ๆ ดังภาพที่ 4.8

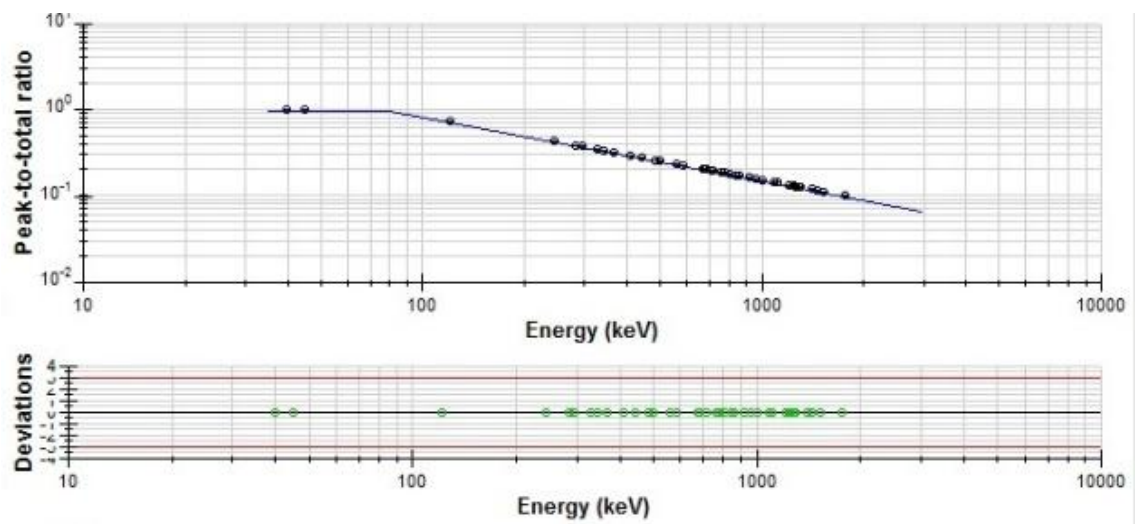


ภาพที่ 4.8 กราฟการปรับเทียบค่าแบริมาตรของโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score

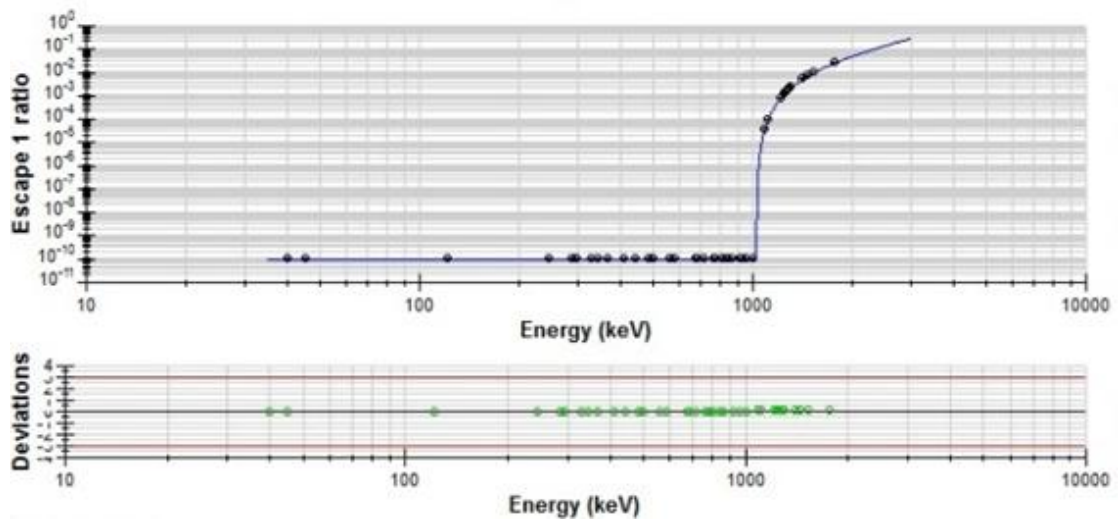
การปรับเทียบขั้นตอนนี้สุดท้ายคือ การปรับเทียบประสิทธิภาพของหัววัด ในการปรับเทียบประสิทธิภาพของหัววัดต้องทำหลังจากการปรับเทียบค่าพลังงาน, การปรับเทียบค่ารูปร่างพีค, การปรับเทียบแบริมาตร และการหาค่า Peak to total ratio ในการหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดนั้น จะใช้กราฟของ Eu-152 เป็นตัวใส่เข้าไปในโปรแกรม เนื่องจากเป็นสารรังสีที่มีหลายค่าพลังงาน ซึ่งผลที่ได้คือ Single Escape peak, Double Escape peak, Peak to total ratio และ Full energy peak ของโปรแกรม k_0 ดังแสดงในภาพที่ 4.9, 4.10, 4.11, และ 4.12



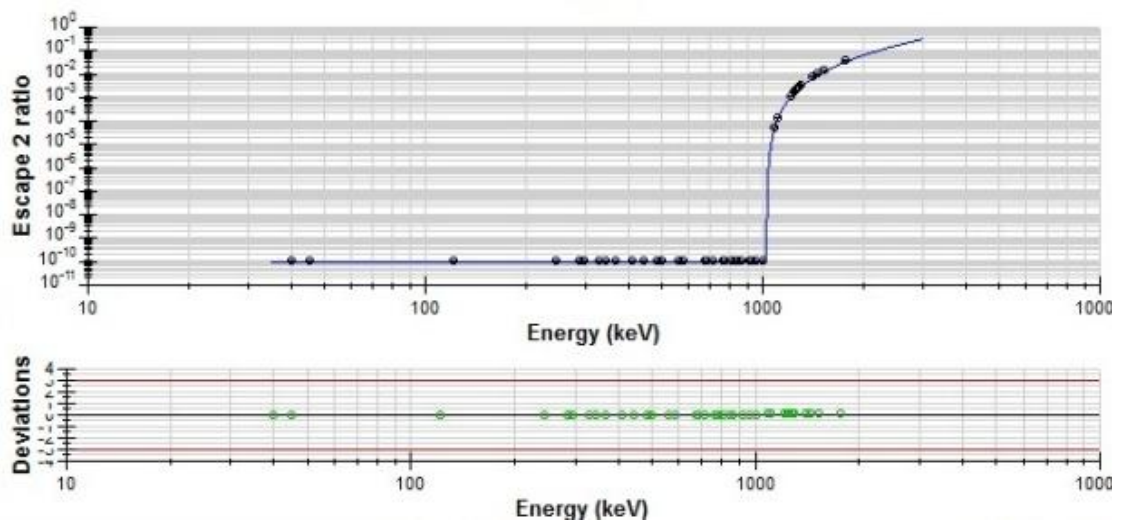
ภาพที่ 4.9 กราฟ Full energy peak ของโปรแกรม k_0



ภาพที่ 4.10 กราฟ Peak to total ratio ของโปรแกรม k_0



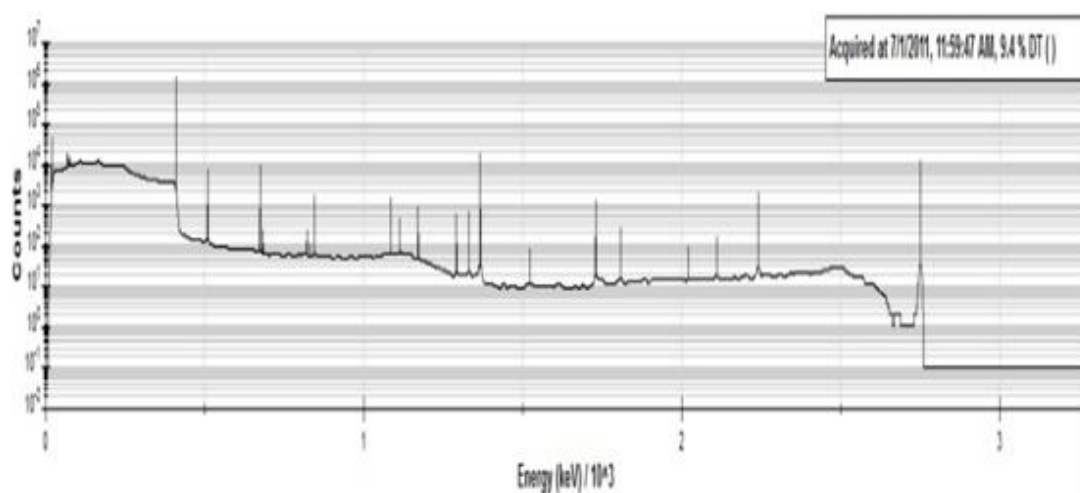
ภาพที่ 4.11 กราฟ Single Escape peak ของโปรแกรม k_0



ภาพที่ 4.12 กราฟ Double Escape peak ของโปรแกรม k_0

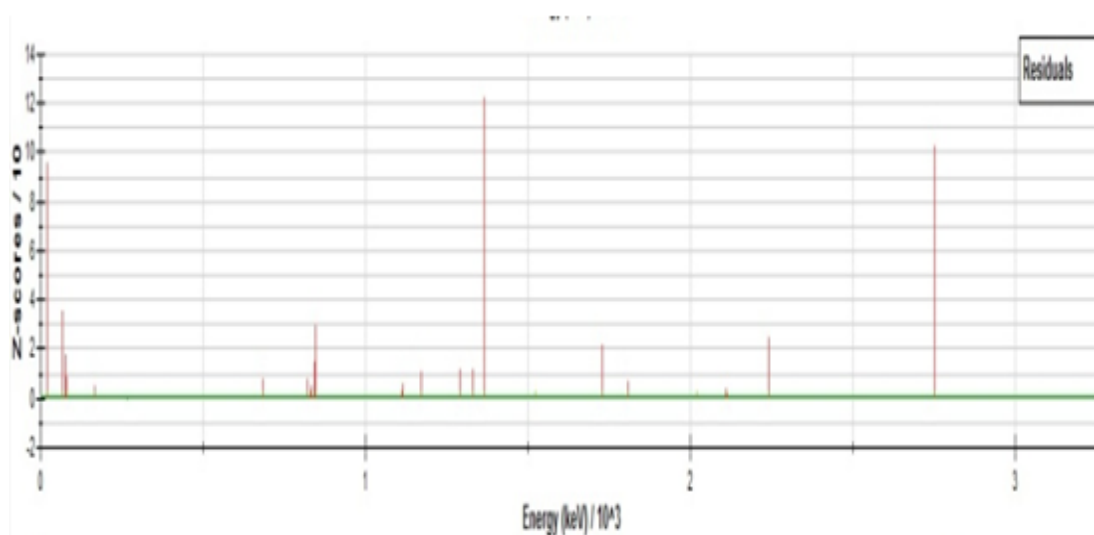
4.3 ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก Au-198

เมื่อทำการปรับเทียบค่าประสิทธิภาพของหัววัดแล้ว จากนั้นทำการวัดค่าฟลักซ์ ด้วยตัว Comparator ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ทองเป็นตัว Comparator ดังที่แสดงในภาพที่ 4.13 เป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดรังสีแกมมาของ Comparator ที่ถูกอบรังสี ณ ตำแหน่งเดียวกันกับตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน



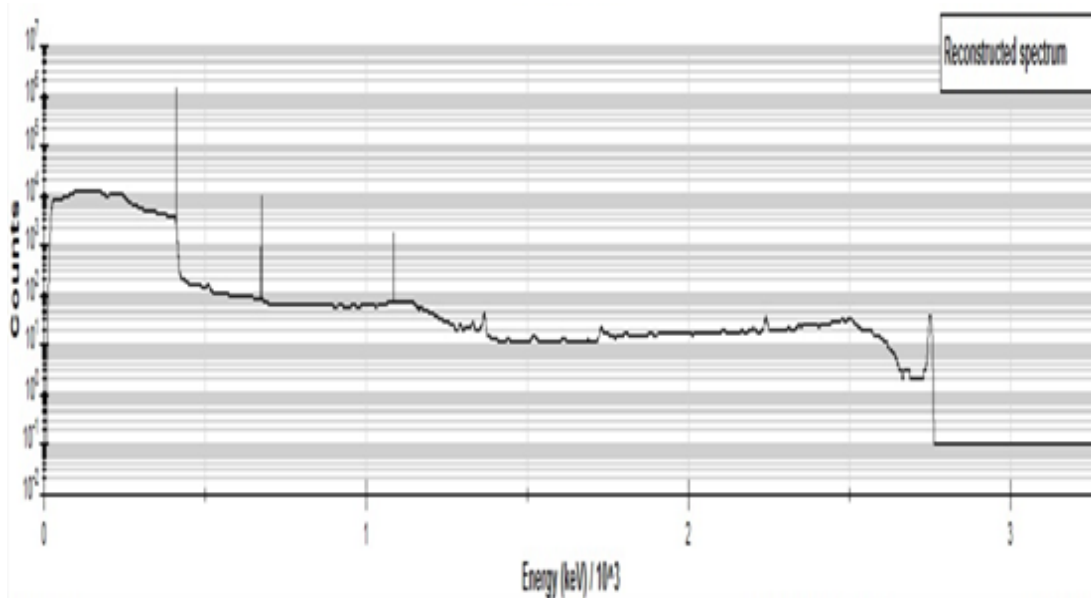
ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทอง-198 ในโปรแกรม k_0

จากนั้นโปรแกรม k_0 จะเปลี่ยนสเปกตรัมรังสีแกมมา ให้เป็นกราฟของค่า z-score ดังภาพที่ 4.14 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหัววัด



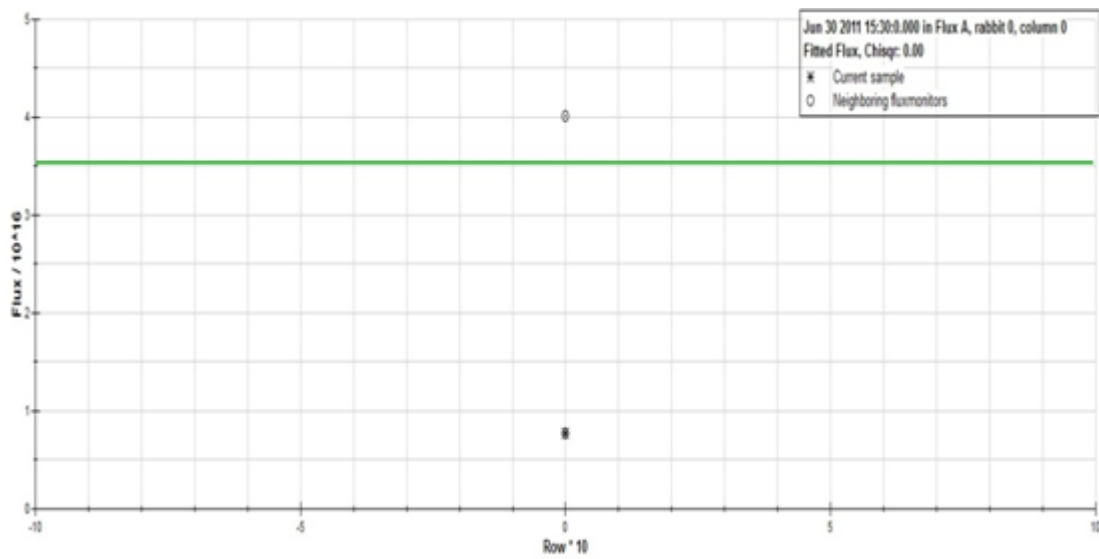
ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทอง-198 ในโปรแกรม k_0 แบบค่า z-score

ภาพที่ 4.15 เป็นรูปสเปกตรัมของรังสีแกมมาของตัว Comparator เมื่อทำการปรับเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหัววัดเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะเป็นตัวที่นำไปปรับเทียบหาค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ตำแหน่งที่อาบรังสี



ภาพที่ 4.15 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทอง-198 ในโปรแกรม k_0 เมื่อปรับเทียบค่าประสิทธิภาพของหัววัดแล้ว

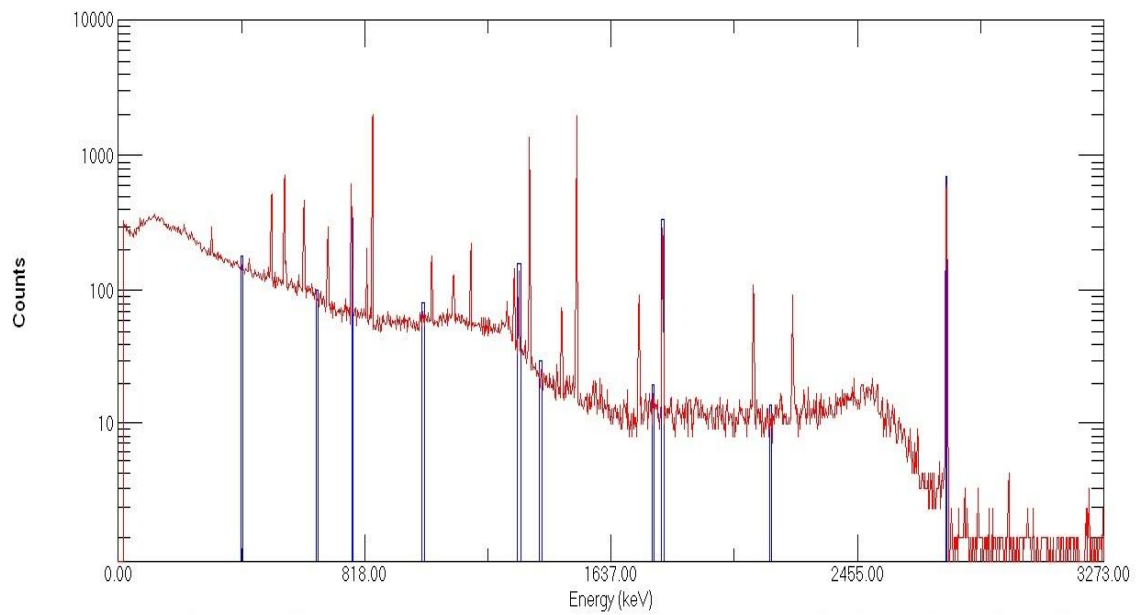
หลังจากนั้นโปรแกรม k_0 จะแสดงค่าฟลักซ์นิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ที่ท่อภายนอกแกน ณ ตำแหน่งที่อาบรังสี ดังภาพที่ 4.16 ซึ่งมีค่าประมาณ 3.5×10^{16} นิวตรอนต่อตารางเมตรต่อวินาที และค่าที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นค่าฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์ ณ ตำแหน่งที่อาบรังสี



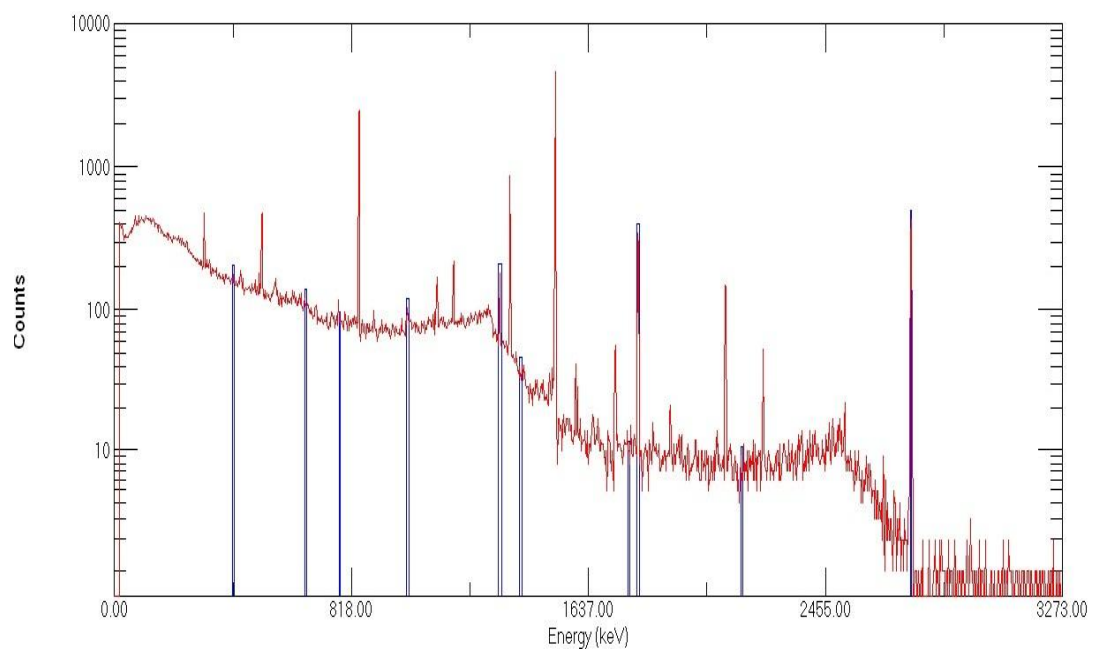
ภาพที่ 4.16 แสดงค่าฟลักซ์นิวตรอน ของทอง-198 (IRMM-530) ของโปรแกรม k_0

4.4 ผลจากการวัดรังสีแกมมาที่ได้จากตัวอย่างข้าวทั้ง 3 ชนิด

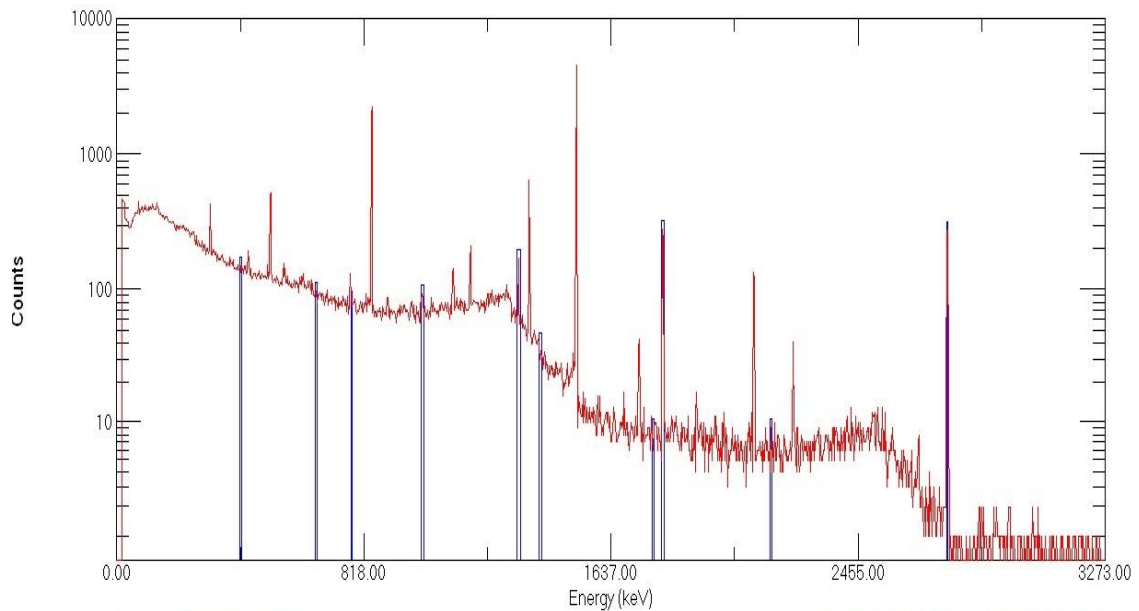
ตัวอย่างข้าวที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันนั้นมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง คือ ข้าวมาตรฐาน, ข้าวกล้อง และข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล ดังที่แสดงในภาพที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ ซึ่งภาพที่ 4.17 คือรูปของสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยจากข้าวมาตรฐานที่ถูกนำไปอบรังสี, ภาพที่ 4.18 คือรูปของสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยจากข้าวกล้องที่ถูกนำไปอบรังสี และภาพที่ 4.19 คือรูปของสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยจากข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่ถูกนำไปอบรังสี ซึ่งในกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดกับค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมา



ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน ของซ้ำวมาตรฐาน



ภาพที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน ของซ้ำวถ่วง



ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดและค่าพลังงาน ของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล

จากสเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวทั้ง 3 ชนิดนี้ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณธาตุในวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐาน ได้ตามสมการที่ 4.1

$$M_1 = \left(\frac{A_1 W_2}{A_2 W_1} \right) M_2 \quad (4.1)$$

โดยที่

M_1 = ปริมาณของธาตุตัวอย่าง (หน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

M_2 = ปริมาณของธาตุมาตรฐาน (หน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

A_1 = ความแรงรังสีของธาตุตัวอย่าง (หน่วยแบคเคอเรล)

A_2 = ความแรงรังสีของธาตุมาตรฐาน (หน่วยแบคเคอเรล)

W_1 = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (หน่วยกรัม)

W_2 = น้ำหนักของสารมาตรฐาน (หน่วยกรัม)

ซึ่งค่า ความแรงรังสี (Activity) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.2

$$A = \frac{\text{Net Peak}}{(\text{Efficiency} \times \% \text{Intensity})} \quad (4.2)$$

โดยที่

A	=	ค่าความแรงรังสี (หน่วยแบคเคอเรล)
Net peak area	=	พื้นที่ใต้พีค (ได้จากกราฟ)
Efficiency	=	ค่าประสิทธิภาพของหัววัด
%Intensity	=	เปอร์เซ็นต์ความเข้มรังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัว

ผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าปริมาณของธาตุ โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน (Comparative Method) ซึ่งได้ใช้ข้าวมาตรฐานเป็นสารมาตรฐานเพื่อมาคำนวณหา Na, K และ Mn แสดงได้ในตารางที่ 4.2

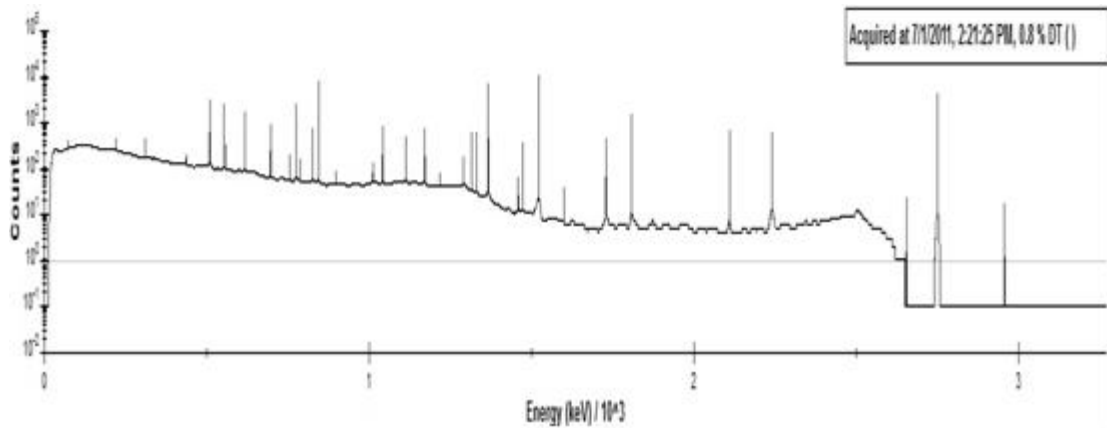
ตารางที่ 4.1 ตารางปริมาณธาตุจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน

ธาตุ	ข้าวมาตรฐาน (mg/kg)	ข้าวกล้อง (mg/kg)	ข้าวหอมมะลิสีนิล (mg/kg)
Na	6.6	3.96	2.96
K	1280	2901	2828
Mn	20	26	33

เมื่อคำนวณหาปริมาณธาตุแบบใช้สารมาตรฐานแล้ว จากนั้นนำสเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวทั้ง 3 ชนิด ไปใส่ในโปรแกรม k_0 เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุแบบวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานต่อไป ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

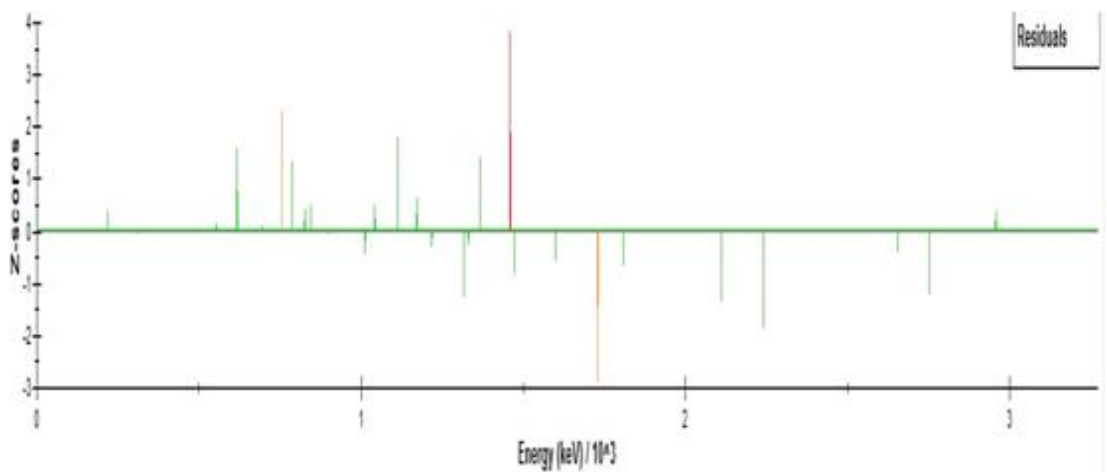
(1) ข้าวมาตรฐาน

เมื่อใส่ค่าพีคของข้าวมาตรฐานลงในโปรแกรม k_0 แล้วโปรแกรม k_0 จะแสดงรูปสเปกตรัมที่ออกมา ดังภาพที่ 4.20 เป็นรูปสเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานที่ได้จากการใส่ค่าสเปกตรัมรังสีแกมมาลงในโปรแกรม k_0



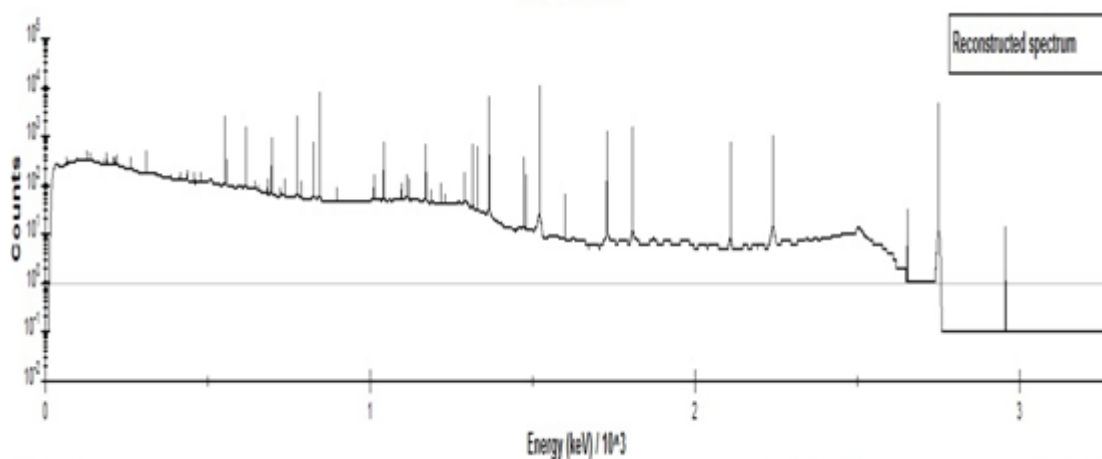
ภาพที่ 4.20 สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานที่ได้จากโปรแกรม k_0

จากนั้นโปรแกรมจะเปลี่ยนจากสเปกตรัมรังสีแกมมามาเป็นกราฟของค่า z-score เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหัววัดได้ ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานที่แสดงแบบค่า z-score ในโปรแกรม k_0

เมื่อทำการปรับเทียบกับค่าประสิทธิภาพของห้วงวัดแล้ว ผลที่ได้จะแสดงออกมาในรูปสเปกตรัมรังสีแกมมา ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวมาตรฐานที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพโดยโปรแกรม k_0

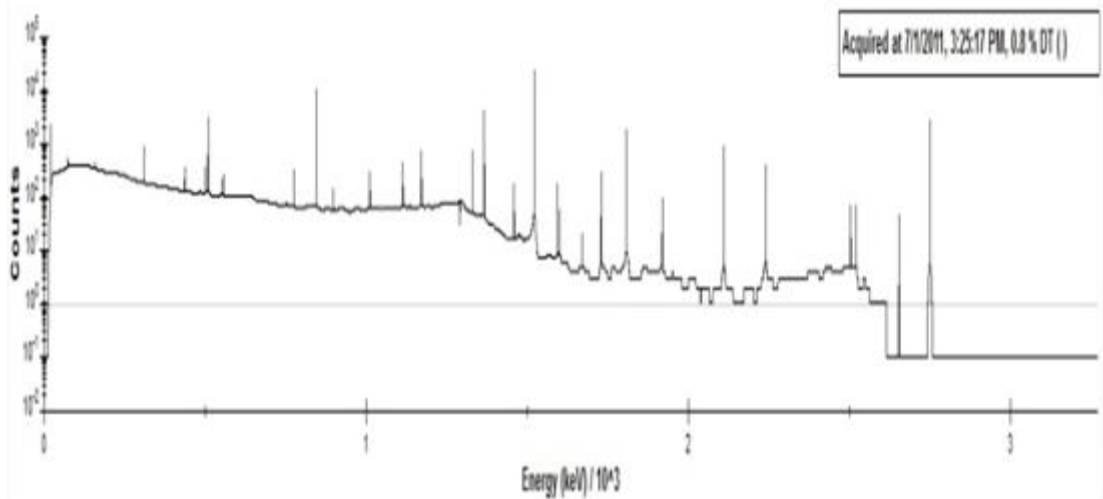
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน แบบไม่ใช้สารมาตรฐาน (Standardless Method) ของข้าวมาตรฐาน ซึ่งได้เปรียบเทียบกับปริมาณธาตุใน Certification ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยโปรแกรม k_0 และค่าใน Certification ของข้าวมาตรฐาน

ธาตุ	ค่าจากCertification (mg/kg)	ค่าจากโปรแกรม k_0 (mg/kg)	ค่า Relative error (%)
Na	6.6	7.23	-9.54
K	1280	1266	1.09
Mn	20	19.97	0.15
As	0.29	0.27	7.58
Br	8	7.67	4.12

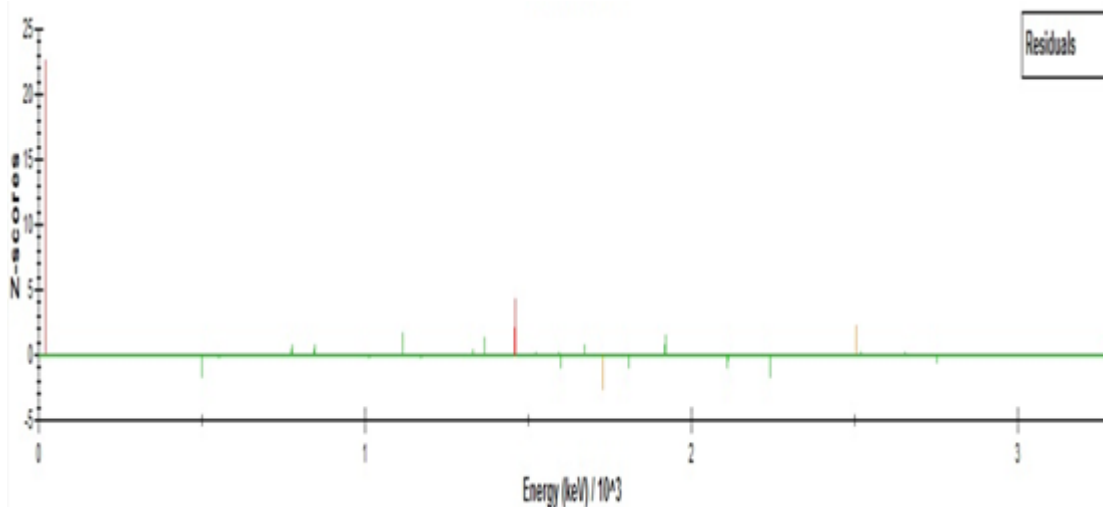
(2) ขี้วกล้าง

เมื่อใส่ค่าพีคของขี้วกล้างลงในโปรแกรม k_0 แล้วโปรแกรม k_0 จะแสดงรูปสเปกตรัมนั้นออกมา ดังภาพที่ 4.23 เป็นรูปสเปกตรัมรังสีแกมมาของขี้วกล้างที่ได้จากการใส่ค่าสเปกตรัมรังสีแกมมาลงในโปรแกรม k_0



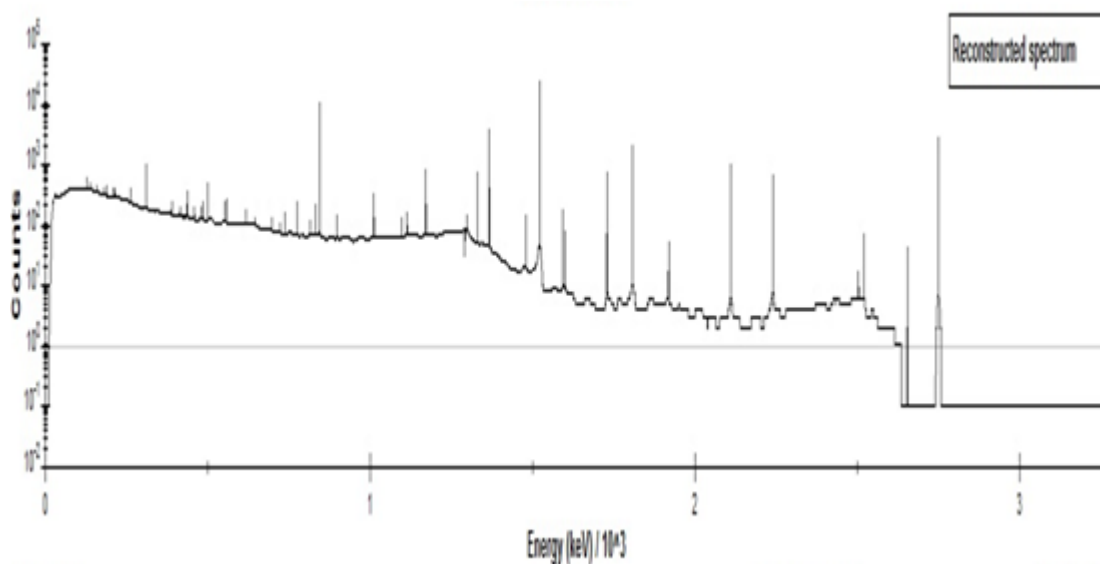
ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมรังสีแกมมาของขี้วกล้างในโปรแกรม k_0

จากนั้นโปรแกรมจะเปลี่ยนจากสเปกตรัมรังสีแกมมาเป็นกราฟของค่า z-score เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหิววัดได้ ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของขี้วกล้างที่แสดงค่าแบบ z-score ใน k_0

เมื่อทำการปรับเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหัววัดแล้ว ผลที่ได้จะแสดงออกมาในรูปสเปกตรัมรังสีแกมมา ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวกล้องที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพโดยโปรแกรม k_0

ซึ่งค่าปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม k_0 จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐาน ดังที่แสดง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยโปรแกรม k_0 และปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐาน ของข้าวกล้อง

ธาตุ	ค่าจากวิธี Comparative (mg/kg)	ค่าจากโปรแกรม k_0 (mg/kg)	ค่า Relative error (%)
Na	3.96	3.64	8.11
K	2901	2801	3.45
Mn	26.47	25.34	4.3

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณธาตุของข้าวกล้องที่คำนวณได้จากวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานนั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรม k_0 เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐาน ไม่สามารถทำการวัดเพียงครั้งเดียวเพื่อให้ได้ค่าปริมาณธาตุทั้งหมดได้ แต่วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานสามารถทำได้ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.4

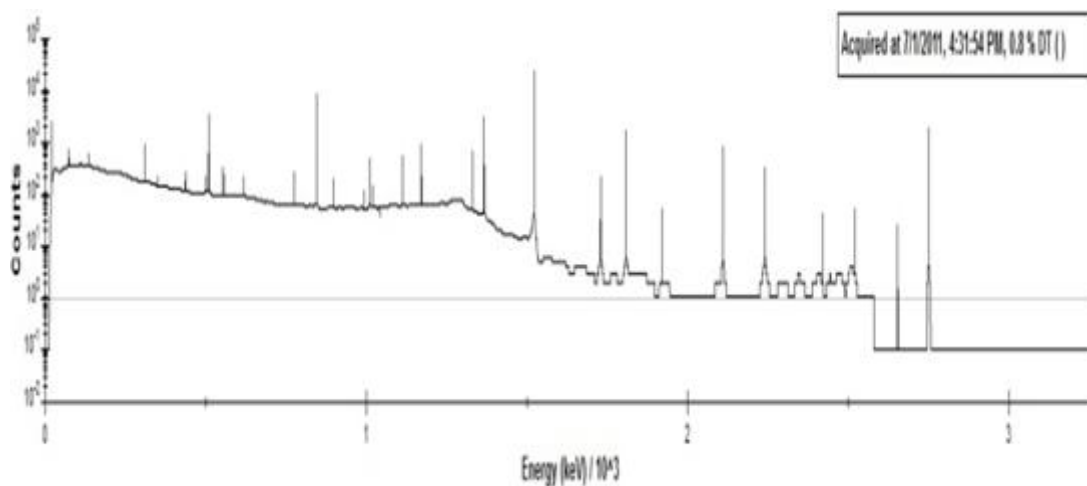
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม k_0 ของข้าวกล้อง

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (mg/kg)
Br	0.54
Na	3.64
K	2801
Mn	25.34
As	0.36
Zn	19.87

จากตารางที่ 4.4 พบว่า วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวและค่าครึ่งชีวิตที่สั้นได้จากการวัดแค่เพียงครั้งเดียวได้

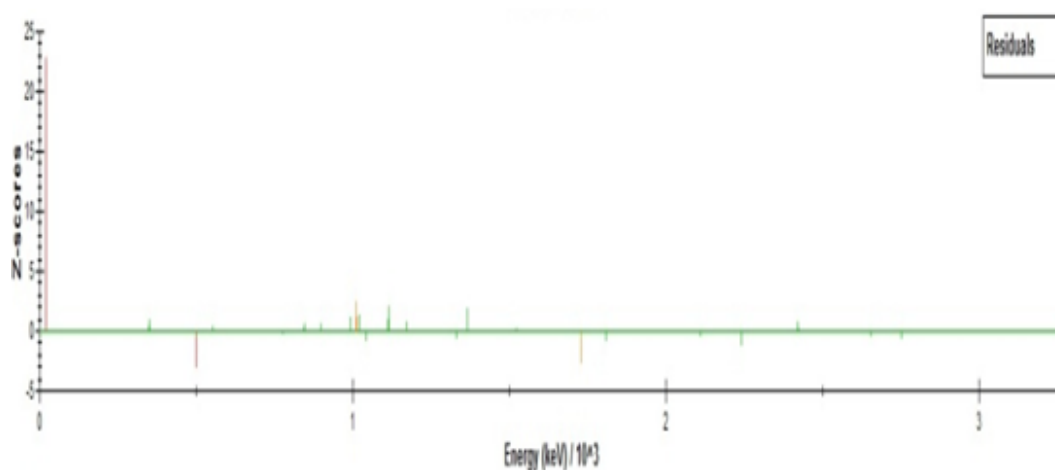
(3) ข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล

เมื่อใส่ค่าพีคของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลลงในโปรแกรม k_0 แล้วโปรแกรม k_0 จะแสดงรูปสเปกตรัมนั้นออกมา ดังภาพที่ 4.26 เป็นรูปสเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่ได้จากการใส่ค่าสเปกตรัมรังสีแกมมาลงในโปรแกรม k_0



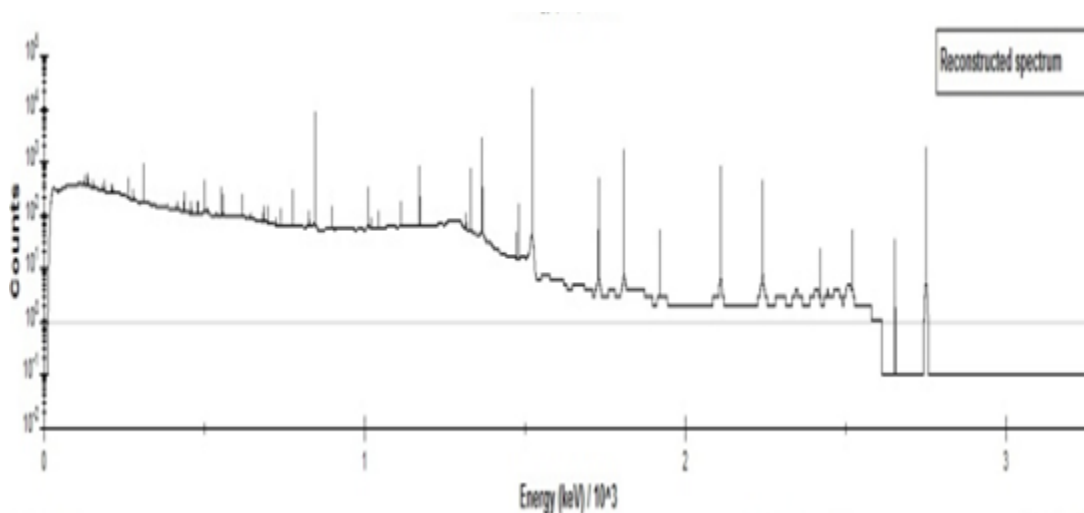
ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลในโปรแกรม k_0

จากนั้นโปรแกรมจะเปลี่ยนจากสเปกตรัมรังสีแกมมาเป็นกราฟของค่า z-score เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของห้ววัดได้ ดังภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่แสดงค่าแบบ z-score ในโปรแกรม k_0

เมื่อปรับเทียบกับค่าประสิทธิภาพของหีวดัดแล้ว ผลที่ได้จะแสดงออกมาในรูปสเปกตรัมรังสีแกมมา ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 สเปกตรัมรังสีแกมมาของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาลที่ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพโดยโปรแกรม k_0

ซึ่งค่าปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม k_0 จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานดังที่แสดง ดังนี้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยโปรแกรม k_0 และปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานของข้าวหอมมะลิสีน้ำตาล

ธาตุ	ค่าจากวิธี Comparative (mg/kg)	ค่าจากโปรแกรม k_0 (mg/kg)	ค่า Relative error (%)
Na	2.96	3.25	-9.91
K	2828	2908	-2.82
Mn	33.35	34.82	-4.40

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณธาตุของข้าวหอมมะลิสีนิลที่คำนวณได้จากวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานนั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรม KO แต่วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานไม่สามารถทำการวัดเพียงครั้งเดียวเพื่อให้ได้ค่าปริมาณธาตุทั้งหมดได้ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานสามารถทำได้ ทำให้ได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม k_0 ของข้าวหอมมะลิสีนิล

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (mg/kg)
Br	0.38
Na	3.25
K	2908
Mn	34.82
As	0.24
Zn	22.5
Fe	12.96

จากตารางที่ 4.6 พบว่า วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวและค่าครึ่งชีวิตที่สั้นได้จากการวัดแค่เพียงครั้งเดียวได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อสรุปและวิจารณ์

ในการทดลองได้นำข้าว 3 ชนิด มาวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานและวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานโดยในการทดลองได้อ้างอิงกับ ข้าวมาตรฐาน และ วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบแบบใช้สารมาตรฐาน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าถูกต้องที่สุด โดยในการทดลอง ค่าที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานและมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทำการทดลองแบบ วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานนั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยากมากกว่าวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานเพราะต้องมีขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเหมือนกับตัวอย่าง ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐานนั้น มีค่าใช้จ่ายสูงเพราะสารมาตรฐานเป็นสารที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาแก้ไขปัญหานี้ เพราะวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน นั้นไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐาน จึงทำให้ไม่มีความยุ่งยากในการเตรียม โดยวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้นสามารถใช้ตัว Comparator แทนสารมาตรฐานได้ ซึ่งตัว Comparator นี้ไม่มีความยุ่งยากในการเตรียม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเหมือนกับสารตัวอย่าง จึงไม่มีความยุ่งยากในการเตรียมสารมาตรฐานเลย อีกทั้งยังสะดวกรวดเร็วกว่าและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในการวิเคราะห์ธาตุที่มีขนาดใหญ่โดยที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่างได้ ในการทดลองวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานในครั้งแรก ๆ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ใช้สารมาตรฐานทำให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ต้องคงที่ และมีความถูกต้องแม่นยำที่สุด อีกทั้งโปรแกรม k_0 ต้องใช้ความแม่นยำในการป้อนค่าสูงมาก แต่เมื่อทำการทดลองครั้งต่อ ๆ ไป การทดลองวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน ยิ่งมีความง่ายขึ้นเรื่อย ๆ เพราะเมื่อเราสามารถใส่โปรแกรม k_0 ได้แม่นยำแล้ว การป้อนค่าต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมจะง่ายขึ้น และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

จากผลการทดลองสามารถสังเกตได้ว่า วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้นสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นโลหะหนักได้ดีกว่าวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานเนื่องจาก

วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานการวิเคราะห์จากกราฟของโลหะหนักจะวิเคราะห์ยาก และสังเกตเห็นพีคได้ยาก เนื่องจากในข้าว โลหะหนักที่ปนอยู่จะมีปริมาณที่น้อยมาก แต่ k_0 สามารถวิเคราะห์ได้และมีค่าใกล้เคียงกัน และวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้น สามารถนำไปใช้กับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่สามารถทำลายได้ เช่น วัตถุโบราณ

จากการทดลองวิเคราะห์ธาตุทั้ง 2 วิธีจึงสามารถสรุปได้ว่า ทั้งสองวิธีมีทั้งข้อดีและข้อด้อย แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งในกรณีของวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สารมาตรฐานนั้น ข้อดีคือสะดวก รวดเร็ว และมีความแม่นยำ แต่ก็มีข้อด้อยคือ ต้องใช้เวลาในการศึกษา และชำนาญในการใช้ โปรแกรมซึ่งเมื่อใช้เป็นแล้วก็จะง่ายขึ้น ส่วนวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานนั้น ข้อดีคือ มีความแม่นยำสูง แต่ข้อด้อยคือ ต้องจัดเตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะเหมือนกับตัวอย่างและ ไม่สามารถทำการทดลองครั้งเดียวในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุให้ได้ทุกธาตุจึงไม่สะดวกและช้า กว่าวิธีแรก อีกทั้งอาจจะต้องสั่งซื้อสารมาตรฐานจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก และข้อสำคัญ ในการวิเคราะห์ธาตุแบบวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบใช้สารมาตรฐานไม่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ ธาตุกับตัวอย่างที่ไม่สามารถทำลายได้ เช่น วัตถุโบราณ แต่วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ใช้สาร มาตรฐานสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ธาตุในวัตถุเหล่านี้ได้ และยังสามารถพัฒนาไป วิเคราะห์ข้าวในปริมาณที่มากขึ้นได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมสารมาตรฐาน

จากกระบวนการวิจัยในเรื่องของการเตรียมสารมาตรฐาน ที่ใช้วิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวแล้ว ในการเตรียมนั้น จะมีปัญหามากในเรื่องของลักษณะทางกายภาพของสาร มาตรฐาน ซึ่งต้องใช้สารมาตรฐานที่มีลักษณะเหมือนกัน ประเภทเดียวกัน ปริมาณใกล้เคียงกัน

5.2.2 เวลาในการอบรังสี เวลาในการปลดปล่อยซึ่งได้สลายตัวก่อนวัดรังสี แกมมา

ในการอบรังสี, การปลดปล่อย ต้องใช้เวลาที่พอเหมาะกับค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่เราสนใจ ดังนั้นการทำการทดลองนี้จึงต้องฝึกฝนให้เกิดความชำนาญก่อน ถ้าเวลาที่ใช้ในการทดลองไม่ เหมาะสม สารรังสีอาจปลดปล่อยรังสีแกมมาในช่วงพลังงานที่เราสนใจออกจนหมด จนไม่สามารถ พบพีคได้

5.2.3 การขอใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

ในการขอใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ควรมีการวางแผนที่ดี เนื่องจากว่า มีคนใช้งานจำนวนมาก และใช้เวลาในการยื่นเรื่องขอใช้เครื่องเป็นเวลานาน ควรที่จะยื่นเรื่องขอใช้ล่วงหน้าเป็นเวลา 1 อาทิตย์เป็นอย่างน้อย เพื่อความรวดเร็วในการปฏิบัติงานวิจัย

5.2.4 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบใช้สารมาตรฐาน

จากผลการทดลองพบว่า พีคที่ได้สังเกตได้ยาก จึงควรต้องใช้ค่าจริงของพีคในการสังเกต ว่าเกิดพีคจริงหรือไม่

5.2.5 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ยังไม่เป็นการแพร่หลายในประเทศไทย ทำให้การใช้โปรแกรม k_0 ในการทำการวิจัยครั้งนี้เป็นเรื่องที่ยากในตอนเริ่มต้น แต่เมื่อใช้จนชำนาญจะง่ายขึ้นเรื่อย ๆ เพราะฉะนั้นการทำการวิจัยในเทคนิคนี้ควรมีความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม ความรู้เกี่ยวกับ เทคนิค นิวตรอนแอกติเวชันแบบไม่ใช้สารมาตรฐาน เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และที่สำคัญ โปรแกรม k_0 เป็นโปรแกรมที่ต้องป้อนค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ ในการป้อนค่า จึงต้องมีการเช็คความถูกต้องของค่าที่ป้อนทุกครั้งทุกครั้ง เพื่อให้ผลที่ได้ถูกต้องที่สุด

5.2.6 การใช้ตัว Comparator

ในการเตรียมตัว Comparator นั้น ไม่จำเป็นต้องมีขนาด รูปร่าง และลักษณะเหมือนกับตัวอย่างที่ต้องการวัด แต่เนื่องจากตัว Comparator ที่ใช้นั้นมีความแรงรังสีมากกว่าตัวอย่าง เวลาในการอบ การปลดปล่อย และการวัดต้องใช้ความเหมาะสมและชำนาญอย่างมาก

5.2.7 ระยะห่างจากตัวอย่างและหัววัด

ระยะห่างจากตัวอย่างที่ต้องการวัดกับหัววัดในการนับวัดรังสีจากตัวอย่างนั้นต้องมีระยะห่างที่เหมาะสม กับเวลาที่ทำการนับวัดรังสี

5.2.8 ค่า Dead time

ในการนับวัดนั้น จะมีค่า Dead time ของหัววัดที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเป็นค่าที่หัววัดไม่สามารถนับวัดได้ ในขณะที่นับวัดจึงต้องสังเกตค่า Dead time ในการวัดแต่ละครั้ง

รายการอ้างอิง

- [1] Laoharojanaphand, S., Busamongkol, A., Chaiyasith, S., Permnamtip, V., Parengam, M., and Srianujata, S. Elemental composition of Thai rice and beans by instrumental neutron activation analysis. Radioanal Nucl Chem 281 (2009) : 69 - 73
- [2] Sudarshan, K., Nair, A.G.C., and Goswami, A. A proposed k_0 based methodology for neutron activation analysis of samples of non-standard geometry. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 256 (2003) : 93-98.
- [3] Nair, A.G.C., Acharya, R., Sudarshan, K., Gangotra, S., Reddy, A.V.R., Manohar, S.B., and Goswami, A. Development of an Internal Monostandard Instrumental Neutron Activation Analysis Method Based on In Situ Detection Efficiency for Analysis of Large and Nonstandard Gemetry Samples. Anai, Chem (2003) : 4868-4874.
- [4] Acharya, R., Nair, A.G.C., Reddy, A.V.R., and Goswami, A. Standard-less analysis of Zircaloy clad samples by an instrumental neutron activation method. Journal of Nuclear Materials 326 (2004) : 80-85.
- [5] Koster-Ammerlaan, M.J.J., Bacchi, M.A., Bode, P., and De Nadai Fernandes, E.A. A new monitor for routine thermal and epithermal neutron fluence rate monitoring in k_0 INAA. Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) : 1964 – 1969.
- [6] Rossbach, M., Blaauw, M., Bacci, M.A., and Xilei Lin. The k_0 -IAEA program. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 274, 3 (2007) : 657-662.

- [7] Rossbach, M., and Blaauw, M. Progress in the k_0 -IAEA program. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 564 (2006) : 698 - 701.
- [8] Blaauw, M. The k_0 -IAEA program manual for version 5.00 [Online]. Available from : <http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/K0-IAEA.html> [2011,Sep,9]
- [9] พรรณี เสถียรศรี. การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [10] Simonits, A., and Corte, F.de., Single comparator methods in reactor neutron activation analysis. J.Hoste. J. Radioanal. Chem 24 (1975) : 31 - 46.
- [11] Blaauw, M., The accuracy of k_1 -standardized INAA applied to a gold-lined well-type detector. J.Radioanal.Nucl.Chem 245 (2000) : 185 - 188.
- [12] Gunnink, R., and Prindle, A.L., Non-conventional ways for accurately calibrating germanium detectors. J.Radiananl.Nucl.Chem 160 (1992) : 305 - 314.
- [13] De Felice, P., Angelini, P., Fazio, A., and Biagini, R., Fast procedures for coincidence-summing correction in gamma-ray spectrometry. Radiat.Isot 52 (2000) : 745 - 752.
- [14] Blaauw, M., Bode, P., and De Bruin, M., An alternative convention describing the (n, γ) -reaction rate suited for use in the k_0 method of NAA, J.Radioanal.Nucl.Chem 152 (1991) : 435 - 445.
- [15] David Tin Win. Neutron Activation Analysis (NAA). AU J.T. (Jul.2004) : 8 - 14.
- [16] วิเชียร รตนธงชัย, สมชาย พงษ์เกษม, และ ศศิพันธุ์ คะวีรัตน์. การวัดรังสีแกมมาแบบแยกพลังงาน(Gamma ray Spectrometry). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/labs/kmitt_gamma%20spect-2.pdf [15 ตุลาคม 2554]

- [17] Ramkhamhaeng University. Neutron Interaction. [Online]. Available from : [http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426\(50\)/PH426-1.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426(50)/PH426-1.pdf). [2011, September 9].
- [18] ศูนย์จัดการความรู้สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. Neutron energy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://km.oaep.go.th/vlibrary> [9 กันยายน 2554]
- [19] Massachusetts Institute of Technology. Neutron generator [Online]. Available from : <http://www.core.org.cn/OcwWeb/Nuclear-Engineering/22-106Spring-2005/CourseHome/index.htm> [2011, September 9]
- [20] Hugh Crocker. Neutron Interaction [Online]. Available from : http://www.petrolog.net/webhelp/Logging_Tools/cnl/cnl.html [2011, September 9]
- [21] Roger. Fission reaction [Online]. Available from : <http://www.green-planet-solar-energy.com/nuclear-fission.html> [2011, September 9]
- [22] Department of Energy United States of America. Neutron cross section [Online]. Available from : http://knowledgepublications.com/doe/doe_nuclear_physics_detail.htm [2011, December 3]
- [23] Office of Atoms for Peace. Neutron Radiography [Online]. Available from: http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/nr.htm [2011, September 10]
- [24] Office of Atoms for Peace. Reactor [Online]. Available from : http://www.tint.or.th/reactor/what_is_trr1m1.html [2011, Sep 12]

ภาคผนวก

การใช้โปรแกรม k_0 ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่าง มีขั้นตอนการในการทำงานแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. การปรับเทียบค่าพลังงาน ค่าแบล็คกราว และค่าประสิทธิภาพของหัววัด

การปรับเทียบค่าพลังงาน

- เลือกตัวอย่างที่ 2
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Perform peak search
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก List of detected peak
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Calibration แล้วเลือก Fit calibration peak
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Calibration แล้วเลือก Energy calibration ทำการแก้ค่า Energy เพื่อให้ค่า z-score อยู่ในช่วง 3 ถึง -3
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Calibration แล้วเลือก Save current energy calibration
- จากนั้นทำการจัดเก็บ Energy calibration โดยใช้คำสั่ง Detector แล้วเลือก Energy calibration เลือก Store current Calibration ซึ่งจะถูกระบุเก็บไว้ใน Permanence database

การปรับเทียบ Shape

- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Calibration แล้วเลือก FWHM
- จากนั้นทำการจัดเก็บ Shape calibration โดยใช้คำสั่ง Detector แล้วเลือก Shape calibration เลือก Store current Calibration ซึ่งจะถูกระบุเก็บไว้ใน Permanence database

การปรับเทียบค่า Background

- เลือกตัวอย่างที่ 1
- ใช้คำสั่ง Spectrum analysis เลือก Analysis all peak

- จากนั้นทำการจัดเก็บ Background spectra โดยใช้คำสั่ง Detector แล้วเลือก Background spectra เลือก Store current Calibration ซึ่งจะถูกเก็บไว้ใน Permanence database

การปรับเทียบค่าประสิทธิภาพหัววัด

ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ สามารถทำการ Import ค่าประสิทธิภาพเข้ามาได้จากโปรแกรมอื่น ๆ เช่น Notepad แล้วจัดค่าต่าง ๆ ให้ได้ตามรูปแบบ จึง Import เข้ามาในโปรแกรม k0 ได้ อีกวิธีหนึ่งคือ การให้โปรแกรม k0 คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดให้ ซึ่งสามารถทำได้ ดังนี้

- เลือกตัวอย่างที่ 3
- ใช้คำสั่ง Edit เลือก Interpret select sample
- สิ่งที่จะได้จากการ Interpret ครั้งนี้คือ Peak to total ratio
- จากนั้นทำการจัดเก็บ ค่าประสิทธิภาพของหัววัด โดยใช้คำสั่ง Detector แล้วเลือก Efficiency curve เลือก Store efficiency curve ซึ่งจะถูกเก็บไว้ใน Permanence database
- เลือกตัวอย่างที่ 4
- ใช้คำสั่ง Edit เลือก Interpret select sample ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาเล็กน้อย
- จากนั้นทำการจัดเก็บ ค่าประสิทธิภาพของหัววัด โดยใช้คำสั่ง Detector แล้วเลือก Efficiency curve เลือก Store efficiency curve ซึ่งจะถูกเก็บไว้ใน Permanence database

2. การหาค่า Flux Parameters

- เลือกตัวอย่างที่ 5
- ใช้คำสั่ง Edit เลือก Interpret select sample
- ใช้คำสั่ง Edit เลือก Map flux

- จากนั้นทำการจัดเก็บ ค่าฟลักซ์ที่ได้ โดยใช้คำสั่ง Irradiation facility แล้วเลือก Store flux parameter

3. การ Interpreting sample

- เลือกตัวอย่างที่ 6
- ใช้คำสั่ง Edit เลือก Interpret select sample
- ได้ผลของปริมาณธาตุสามารถเข้าไปดูได้ โดยใช้คำสั่ง View แล้วเลือก
- Numerical result

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวโสภาวดี บริบูรณ์ เกิดวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2529 จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จาก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชา วิศวกรรม นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551

นำเสนอผลงานทางวิชาการในรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมระดับนานาชาติ NALMS10 “Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences” ครั้งที่ 10 วันที่ 15-20 มกราคม พ.ศ.2555