

การศึกษาธาตุองค์ประกอบทางโภชนาการและธาตุพิษ
ในธัญพืชของไทยด้วยเทคนิคเชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน

STUDY OF NUTRIENT AND TOXIC ELEMENTS IN THAI CEREALS
BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

วรพจน์ เพิ่มน้ำทิพย์
VORAPOT PERMNAMTIP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-012-078

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาธาตุองค์ประกอบทางโภชนาการและธาตุพิษ
ในธัญพืชของไทยด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน

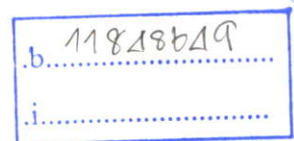
STUDY OF NUTRIENT AND TOXIC ELEMENTS IN THAI CEREALS
BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS



วรพจน์ เพิ่มน้ำทิพย์

VORAPOT PERMNAMTIP

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 76681
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.H. 2550



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL - 2007 - SC - M - 012 - 078

**STUDY OF NUTRIENT AND TOXIC ELEMENTS IN THAI CEREALS
BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS**

VORAPOT PERMNAMTIP

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

KMITL – 2007 – SC – M – 012 - 078

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาธาตุองค์ประกอบทางโภชนาการและธาตุพิษในธัญพืชของไทย
ด้วยเทคนิคเชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน
Study of Nutrient and Toxic Elements in Thai Cereals by Neutron
Activation Analysis

ชื่อนักศึกษา นายวรพจน์ เพิ่มน้ำทิพย์

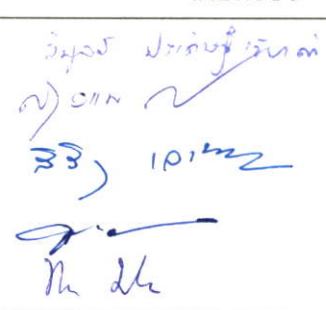
รหัสประจำตัว 46068802

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.วิบูลย์	ประดิษฐ์เวียงคำ	
รศ.ดร.สุวรรณ	ไชยสิทธิ์	
ดร.สิรินาฏ	เลาหะโรจนพันธ์	
รศ.อรุณี	กนกศักดิ์ไพศาล	
รศ.ดร.พรพิมล	ม่วงไทย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 12 ตุลาคม 2550 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603/1


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 25 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2550

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาราคาขององค์ประกอบทางโภชนาการและธาตุ พิษในธัญพืชของไทยด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสี ด้วยนิวตรอน
นักศึกษา	นายวรพงษ์ เพิ่มน้ำทิพย์
รหัสประจำตัว	46068802
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ธาตุในธัญพืช 2 ชนิดคือ ข้าวและถั่วด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน พบว่ามีขีดจำกัดในการตรวจวัดอะลูมิเนียม สารหนู โบรมีน แคลเซียม แคดเมียม คลอรีน โครเมียม ทองแดง เหล็ก ไอโอดีน โพแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส โมลิบดีนัม ซีลีเนียม คีบูก วาเนเดียม และ สังกะสี เป็น 0.06 0.04 0.12 14.94 1.44 4.63 0.40 0.85 17.69 0.38 15.28 39.93 0.58 0.54 0.35 3.79 0.02 และ 0.27 ไมโครกรัม/กรัม (ppm) ตามลำดับ ความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 8704 Buffalo River Sediment ACSP DORM-1 Dog Fish Muscle and Liver NMIJ 7302 – a Marine Sediment NIST 1568a Rice Flour และ NIES No. 9 Sargasso ได้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ของอะลูมิเนียม สารหนู โบรมีน แคลเซียม คลอรีน โครเมียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส ซีลีเนียม และ สังกะสีเป็น 2.2% -3.4% -1.3% -3.7% -0.6% -3.1% 4.2% -3.0% -1.6% -1.8% -3.0% 3.1% และ 1.5 % ตามลำดับ สำหรับความเที่ยงในการวัดอะลูมิเนียม สารหนู โบรมีน แคลเซียม คลอรีน โครเมียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส ซีลีเนียม และ สังกะสี ประเมินจากค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จากการทำซ้ำ 10 ครั้ง ได้เป็น 7.3% 4.5% 3.0% 5.5% 1.3% 5.3% 7.6% 4.3% 2.3% 4.8% 3.7% 6.6% และ 4.9% ตามลำดับ เมื่อนำเทคนิคดังกล่าวที่ได้มาวิเคราะห์ตัวอย่างธัญพืชพบว่าปริมาณของอะลูมิเนียม สารหนู โบรมีน คลอรีน ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และ สังกะสี เป็น 2.2 – 35.7 0.15 – 0.21 0.44 – 13.5 55.6 – 640.3 16.3 – 16.5 158.9 – 161.1 12.2 – 55.7 8.2 – 58.1 ไมโครกรัม/ กรัม และแคลเซียม โพแทสเซียม และ แมกนีเซียมเป็น 0.02 – 0.28 0.09 – 1.99 และ 0.03 – 0.26 % w/w ตามลำดับ การศึกษากครั้งนี้ให้ความเที่ยงตรงและความถูกต้องเหมาะสำหรับการใช้วิเคราะห์ตัวอย่างธัญพืชได้ดี และเป็นวิธีที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง

Thesis Title	Study of Nutrient and Toxic Elements in Thai Cereals by Neutron Activation Analysis
Student	Mr. Vorapot Permnamtip
Student ID.	46068802
Degree	Master of Science
Program	Chemistry (Analytical Chemistry)
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasith
Thesis Co-advisor	Dr. Sirinart Laoharajanaphand

ABSTRACT

The objective of this research study was to determine element concentration in cereal (rice and bean) by Neutron Activation Analysis (NAA). The detection limits for aluminium, arsenic, bromine, calcium, cadmium, chlorine, chromium, copper, iron, iodine, potassium, magnesium, manganese, molybdenum, selenium, tin, vanadium and zinc are 0.06, 0.04, 0.12, 14.94, 1.44, 4.63, 0.40, 0.85, 17.69, 0.38, 15.28, 39.93, 0.58, 0.54, 0.35, 3.79, 0.02 and 0.27 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The accuracy of the analytical procedure estimated by analysis of NIST 8704 Buffalo River Sediment, ACSP DORM-1 Dog Fish Muscle and Liver, NMIJ 7302 – a Marine Sediment, NIST 1568a Rice Flour and NIES No. 9 Sargasso were 2.2%, -3.4%, -1.3%, -3.7%, -0.6%, -3.1%, 4.2%, -3.0%, -1.6%, -1.8%, -3.0%, 3.1% and 1.5 % for aluminium, arsenic, bromine, calcium, chlorine, chromium, copper, iron, potassium, magnesium, manganese, selenium and zinc, respectively. The precision assessed as average values from 10 replicates for aluminium, arsenic, bromine, calcium, chlorine, chromium, copper, iron, potassium, magnesium, manganese, selenium and zinc were found as 7.3%, 4.5%, 3.0%, 5.5%, 1.3%, 5.3%, 7.6%, 4.3%, 2.3%, 4.8%, 3.7%, 6.6% and 4.9%, respectively. The results demonstrate that the concentration of aluminium (2.2 – 35.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), arsenic (0.15 – 0.21 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), bromine (0.44 – 13.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), chlorine (55.6 – 640.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), copper (16.3 – 16.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), iron (158.9 – 161.1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), manganese (12.2 – 55.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), zinc (8.2 – 58.1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), calcium (0.02 – 0.28 % w/w), potassium (0.09 – 1.99 % w/w) and magnesium (0.03 – 0.26 % w/w) are detected in Thai cereal. This study has shown that NAA is an accurate, high precision and non-destructive method to analyze element level in cereal.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะและตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็นไปอย่างถูกต้อง และ ดร. สิรินาฎ เลาหะโรจนพันธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะรวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ รศ. อรุณี กงศักดิ์ไพศาล และ รศ. ดร. พรพิมล ม่วงไทย กรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์และวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณอาภรณ์ บุญมงคล นักเคมีนิวเคลียร์ ที่ได้ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือทดลอง ให้คำแนะนำเรื่องความปลอดภัยในขณะที่ทำงานรวมทั้งให้ความรู้และคำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน ตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าได้ทำการวิจัยที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณรติรส เกียรติภาส นักเคมีนิวเคลียร์ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ทั้งคอยช่วยปลอบโยน เป็นแรงกระตุ้นในยามที่ข้าพเจ้ารู้สึกเหนื่อยและท้อแท้ จนกระทั่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ขอบใจน้องสาวของข้าพเจ้าและคุณนุชนาฎ ชนงาม ที่ได้ช่วยตรวจทานความถูกต้องและแก้คำผิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบใจ คุณภัทรวิดี จัดตานนท์ คุณสุวิมล แม้นจันทร์ คุณฉัตรชัย งามจำ คุณศุภลักษณ์ ชนงาม และเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าได้เข้าศึกษาจนกระทั่งข้าพเจ้าได้ทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับคุณพ่อและคุณแม่ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วรพจน์ เพิ่มนำทิพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	3
2.1.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.2 รังสีแกมมาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสสาร.....	9
2.1.3 องค์ประกอบของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	14
2.1.4 ชนิดของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	18
2.1.5 ข้อดีของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	19
2.1.6 ข้อเสียของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	20
2.1.7 ข้อผิดพลาดของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี.....	25
3.1.1 สารเคมีที่ใช้.....	25
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2 การเตรียมสารละลายและตัวอย่าง.....	26
3.2.1 การเตรียมสารละลายที่อยู่ในรูปของแข็ง.....	26

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม.....	26
3.2.3 ตัวอย่าง.....	27
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	28
3.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม.....	28
3.3.2 ความถูกต้องของการวิเคราะห์.....	30
3.3.3 ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์.....	30
3.3.4 การคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัด.....	31
3.3.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง.....	31
3.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	33
4.1 สภาวะที่เหมาะสม.....	33
4.1.1 ธาตุในกลุ่มที่ 1-4 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตสั้น).....	33
4.1.2 ธาตุในกลุ่มที่ 5-6 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตปานกลาง).....	34
4.1.3 ธาตุในกลุ่มที่ 7 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตยาว).....	35
4.2 ความถูกต้องของการวิเคราะห์.....	36
4.3 ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์.....	37
4.4 การคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัด.....	38
4.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง.....	40
4.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก. ข้อมูลทางนิวเคลียร์ของธาตุ.....	50

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน.....	51
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัด.....	53
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุ.....	54
ภาคผนวก จ. สเปกตรัมของรังสีแกมมา.....	55
ภาคผนวก ฉ. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของซิลิกอนและเจอร์เมเนียม.....	12
3.1 แสดงกลุ่มของธาตุที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม.....	27
4.1 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอาบรังสีแตกต่างกัน.....	33
4.2 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน.....	33
4.3 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน.....	34
4.4 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอาบรังสีแตกต่างกัน	34
4.5 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน	35
4.6 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน.....	35
4.7 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอาบรังสีแตกต่างกัน	36
4.8 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน	36
4.9 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน.....	36
4.10 ผลการศึกษาความถูกต้องของธาตุที่วิเคราะห์ ($n = 10$).....	37
4.11 ผลการศึกษาความเที่ยงของธาตุที่วิเคราะห์ ($n = 10$).....	38
4.12 แสดงค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดด้วยเทคนิคการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน.....	39
4.13 แสดงค่า coefficient of determination	40
4.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณข้าวและถั่ว ($N = 3$).....	41

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงบริเวณหักล้างกันของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำชนิด p-n junction.....	13
2.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้นำตัวอย่างเข้าสู่เตาปฏิกรณ์.....	16
2.3 ไดอะแกรมแสดงระบบอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนการวัดพลังงานรังสีแกมมา.....	17
ก.1 แสดงการหาขีดจำกัดในการตรวจวัดจากพื้นที่ที่ผิด.....	53
จ.1 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีด้วยระบบท่อลมที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{17} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 35 วินาที และปล่อยให้สลายตัว 1 นาที ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 200 วินาที.....	55
จ.2 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์บริเวณที่หุ้มแคดเมียมด้วยความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 38 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 1800 วินาที.....	56
จ.3 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 38 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 1800 วินาที.....	56
จ.4 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที.....	57
จ.5 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง ACSP DORM-1 หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที.....	57
จ.6 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 8704 หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที.....	58
จ.7 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NMIJ 7302-a หลังจากอาบรังสีที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที.....	58
ฉ.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย-1 (ปปว-1) ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ.....	59
ฉ.2 แสดงเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาพร้อมด้วยหัววัดรังสีชนิดไฮเปอร์เพียวเจอร์เมเนียม.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งในตระกูลหญ้า [1] ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองสายพันธุ์คือ ข้าวแอฟริกัน (African rice) ชื่อวิทยาศาสตร์เรียกว่า *Oryza glaberrima Steud.* และ ข้าวเอเชีย (Asian rice) ชื่อวิทยาศาสตร์เรียกว่า *Oryza sativa* ในอดีตข้าวเป็นอาหารหลักกับประชากรแถบทวีปแอฟริกาและเอเชีย แต่ในปัจจุบันการบริโภคข้าวมีความแพร่หลายมากขึ้นเนื่องจากข้าวมีความนุ่มและหอมทำให้เป็นธัญพืชที่บริโภคกันทั่วโลก

สำหรับในประเทศไทยข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อชีวิตของพลเมืองไทย [2-3] โดยประชาชนได้ใช้ข้าวเป็นอาหารหลักเนื่องจากเป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหารมาก ให้พลังงานสูง มีราคาถูก เก็บได้นาน นอกจากจะใช้เมล็ดเป็นอาหารโดยตรงแล้ว ยังสามารถนำมาบดเป็นแป้งเพื่อใช้ประกอบอาหารได้อีกด้วย

ถั่วหรือพืชตระกูลถั่วผลิตเมล็ด (grain legume) เป็นธัญพืชชนิดหนึ่ง [3] จัดอยู่ใน family *Leguminosae* เป็นวัตถุดิบทางเกษตรที่มนุษย์ใช้บริโภคที่สำคัญชนิดหนึ่ง เพราะถั่วจัดว่ามีคุณค่าทางอาหารแก่มนุษย์และสัตว์

การวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในธัญพืชเช่นข้าวและถั่ว เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญ เพราะว่าธาตุเหล่านี้บางชนิดเป็นสิ่งสำคัญต่อมนุษย์ในขณะที่บางชนิดเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งอาจจำแนกได้อย่างกว้างๆ 3 กลุ่มคือ 1.ธาตุที่มีความสำคัญต่อระบบการทำงานของมนุษย์ เช่น Fe Cu หรือ Ca เป็นต้น 2. ธาตุที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยในระดับหนึ่งจะมีความสำคัญต่อระบบการทำงานของมนุษย์แต่ถ้าเพิ่มจนถึงความเข้มข้นหนึ่งจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น Se เป็นต้น และ 3. ธาตุพิษ เช่น As หรือ Cd เป็นต้น [4] ปัญหาสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ปริมาณของธาตุโดยที่ในข้าวและถั่วนั้นมีธาตุชนิดต่างๆ ในปริมาณค่อนข้างน้อยการวิเคราะห์ที่จะให้ได้ผลถูกต้องนั้นจำเป็นต้องใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ที่มีความไว (sensitivity) สูง

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีน้อยในข้าวโดยทั่วไปใช้เทคนิคการวิเคราะห์ได้หลายเทคนิคด้วยกันประกอบด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี [5] อินดักทีฟฟลูออโรสโกปี [6] เทคนิคฟลูออโรสโกปี [7] ส่วนในถั่วก็เช่นกัน สามารถใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ธาตุ อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี [7-9] เทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการวิเคราะห์ธาตุในข้าว คือ การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) [4] เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวและมีความจำเพาะสูง สามารถวิเคราะห์

ธาตุที่มีปริมาณน้อยมากได้ดี นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุพร้อมกันอีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีการย่อยสลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณธาตุทางโภชนาการ เช่น เหล็ก ทองแดง และ แคลเซียม และธาตุพิษ เช่น สารหนู และ แคดเมียม ในตัวอย่างข้าวและถั่วชนิดต่างๆด้วยการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่พบในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ
3. เพื่อรวบรวมข้อมูลสำหรับใช้เป็นแนวทางนำไปสู่การประเมินค่าธาตุองค์ประกอบทางโภชนาการและธาตุพิษในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อหาปริมาณธาตุต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนให้ได้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด มีความถูกต้องและสามารถยอมรับได้ทางสถิติ
2. ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวและถั่วชนิดต่างๆทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปริมาณของธาตุในธัญพืชชนิดต่างๆ ในประเทศ
2. ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาเรื่องธาตุพิษปริมาณน้อยที่ตกค้างในธัญพืชของประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [10-12]

ในปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์เชิงนิวเคลียร์เป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าการใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเดิม (classical chemical methods) การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางนิวเคลียร์แบบหนึ่งซึ่งได้พัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย von Hevesy และ Levi ในปี ค.ศ. 1936 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เป็นอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดนิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) ที่ความเข้มประมาณ 10^{12} n/cm² .sec⁻¹ และใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียม (germanium detectors) เป็นอุปกรณ์ที่วิเคราะห์แถบแสงแกมมา (gamma spectra) ที่ได้รับจากการแผ่รังสีของตัวอย่าง ต่อมาในช่วงค.ศ. 1970 และ 1980 ได้เริ่มนำอุปกรณ์คำนวณที่เป็นคอมพิวเตอร์มาใช้ทำให้สามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น

ด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ศึกษาลักษณะและปริมาณของสารมลพิษ เพื่อหาแนวทางลดปริมาณสารมลพิษเหล่านั้น

วัสดุภัณฑ์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เจือปนและหาวิธีลดหรือกำจัดธาตุเจือปนเหล่านั้นจากผลผลิตสุดท้าย

ด้านเภสัชกรรม วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เจือปนและหาวิธีที่จะลดหรือกำจัดธาตุเจือปนเหล่านั้นจากผลผลิตสุดท้าย

ด้านนิติวิทยาศาสตร์ ใช้วิเคราะห์หลักฐานที่ได้รับจากที่เกิดเหตุ เพราะเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นเราสามารถเก็บตัวอย่างเพื่ออ้างอิงในชั้นศาลได้

ด้านโบราณคดี ใช้เพื่อหาอายุของสิ่งที่ขุดพบ เช่น โครงกระดูก ซากฟอสซิล

การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ขึ้นกับคุณลักษณะเฉพาะของรังสีแกมมาที่ปล่อยโดยไอโซโทปของตัวอย่างที่ผ่านการอาบรังสีด้วยธาตุนิวตรอน โดยปกติตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงจะอาบรังสีไปพร้อมกันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หลังจากอาบรังสีและปล่อยเวลาให้สลายตัวที่เหมาะสม สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาจะวัดโดยระบบการตรวจวัดที่มีความสามารถในการแยกสูง เทคนิคการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ประสิทธิภาพสูงโดยสามารถระบุชนิดของธาตุแต่ละชนิดจากความแตกต่างของพลังงานรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากสารกัมมันตรังสี

เทคนิคการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างต่างๆ ได้ทุกสถานะ อาทิ

ของแข็ง เช่น ถ่านหิน เหล็ก ตะกอน แร่ เนื้อเยื่อ กระจกและไฟเบอร์สังเคราะห์
 ของเหลว เช่น เลือด น้ำ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำมันและน้ำมันเชื้อเพลิง
 ก๊าซ เช่น อาร์กอน คลอรีน และฟลูออรีน
 สารแขวนลอย เช่น น้ำในแม่น้ำหรืออาหาร

การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการหาปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก ธาตุองค์ประกอบรองและธาตุที่มีน้อยมากได้ดี มีความถูกต้องและแม่นยำสูง สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุหลายๆ ธาตุพร้อมกันได้ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างความเข้มข้นในช่วงความเข้มข้นต่ำมากถึงความเข้มข้นสูงได้

2.1.1 ทฤษฎี [13]

การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนเป็นการอาบนิวเคลียสของธาตุที่สนใจด้วยอนุภาคนิวตรอนแล้วทำให้อนุภาคของธาตุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีซึ่งมักเรียกว่านิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclide) จำนวนอะตอมของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับจำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอน ปริมาณนิวตรอนที่กระตุ้นและภาคตัดขวาง (cross section คือ พื้นที่ปรากฏหรือยังผลของเป้าหมายนิวเคลียสหรือของอนุภาคที่แสดงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคหรือรังสีที่วิ่งเข้าหาเป้าหมายนั้นมีหน่วยเป็นบาร์น) และเวลาที่ตัวอย่างสัมผัสกับนิวตรอน นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวโดยมีชนิดรังสี ค่าครึ่งชีวิตและพลังงานของรังสี เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ ดังนั้นกัมมันตภาพ (activity) ที่เกิดขึ้นหลังจากการอาบรังสีจึงขึ้นกับค่าเฉพาะเหล่านี้ นอกจากนี้พลังงานของนิวตรอนที่ชนกับนิวเคลียสของธาตุที่สนใจจะเป็นตัวกำหนดชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดกับผลิตภัณฑ์และลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกระตุ้น ฉะนั้นถ้านิวเคลียสถูกอาบรังสีด้วยนิวตรอนที่มีพลังงานไม่เท่ากันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการกระตุ้นมากกว่า 1 ชนิด ในทำนองเดียวกันสิ่งรบกวนก็อาจจะเกิดขึ้นโดยเป็นผลมาจากเกิดการกระตุ้นอะตอมของธาตุนิวเคลียสอื่นแล้วทำให้ได้ไอโซโทปรังสีเหมือนกับธาตุที่สนใจ

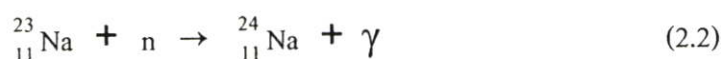
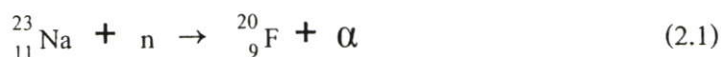
2.1.1.1 การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

นิวตรอนที่ผลิตจากต้นกำเนิดสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนมีหลายช่วงพลังงาน ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนแปลงพลังงานจนกลายเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำหรือเรียกว่าเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ซึ่งมีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) มักจะให้นิวตรอนเร็ว (fast neutron) ซึ่งจะมีพลังงานสูงประมาณ 14 เมกะอิเล็กตรอน

โวลต์ (MeV) สำหรับนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่างนิวตรอนเร็วและเทอร์มัลนิวตรอน เรียกว่า เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) ซึ่งมีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.5 eV ถึง 1 MeV

ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน นิวตรอนจะถูกดูดซับด้วยอะตอม นิวเคลียสเป้าหมายทำให้นิวเคลียสนิวตรอนเพิ่มขึ้น นิวเคลียสนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวเองไป อยู่ในสถานะที่มีพลังงานสูง (energetic state) และปลดปล่อยรังสีแกมมา อนุภาคโปรตอนหรือ อนุภาคแอลฟา โดยที่พลังงานนิวตรอนจะมีผลต่อธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ถ้า ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ใช้เทอร์มัลนิวตรอนเป็นแหล่งกระตุ้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ส่วนมากจะเกิด (n, γ) reaction ซึ่งจะเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาเรียกว่า พรอมต์แกมมา (prompt gamma) ทันที หลังจากเกิดการกระตุ้น

ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดเฉพาะรังสีแกมมาเพียง อย่างเดียวแต่จะทำให้ทั้งอนุภาคโปรตอนหรืออนุภาคแอลฟาควบคู่ไปด้วย ดังนั้นผู้ศึกษาสามารถ ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้จากทั้งสามปฏิกิริยา คือ (n, γ), (n, p) และ (n, α) reaction ในนิวเคลียส เป้าหมายเพียงชนิดเดียว เช่น ใน ^{23}Na เกิดปฏิกิริยาทั้ง (n, γ), (n, p) และ (n, α) reaction ดัง สมการ 2.1 2.2 และ 2.3



ดังนั้นถ้าในนิวตรอนฟลักซ์ที่ใช้กระตุ้น ^{23}Na ประกอบด้วยเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว ผลิตรังสีที่ได้จะเกิดทั้ง ^{24}Na ^{20}F และ ^{23}Ne

2.1.1.2 การกระตุ้นด้วยนิวตรอน

ในขบวนการกระตุ้นด้วยนิวตรอน อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปริมาณนิวตรอนที่มาทำ ปฏิกิริยา(นิวตรอนฟลักซ์) ดังนั้นถ้าปริมาณนิวตรอนฟลักซ์มาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะ มีมากตามความสัมพันธ์

$$\text{อัตราการกระตุ้น } \alpha \quad \text{นิวตรอนฟลักซ์ } (\phi) \quad (2.4)$$

อัตราการกระตุ้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของนิวคลีไอของธาตุที่สนใจในตัวอย่างอีกด้วย ตามความสัมพันธ์

$$\text{อัตราการกระตุ้น } \alpha \quad \text{จำนวนนิวคลีไอ (N)} \quad (2.5)$$

ในขณะที่จำนวนนิวคลีไอของธาตุที่สนใจขึ้นกับ isotopic abundance (θ , ความอุดมสมบูรณ์ของไอโซโทป) ของธาตุนั้น โดยจำนวนนิวคลีไอกำหนดจากเลขอะโวคาโดร เลขอะโวคาโดร (N_A) เป็นค่าที่แสดงจำนวนอะตอมทั้งหมดใน น้ำหนักอะตอม (A) ของธาตุใดๆ เพราะฉะนั้น เลขอะโวคาโดรหารด้วยน้ำหนักอะตอม จะได้จำนวนอะตอมทั้งหมดต่อกรัม (จำนวนนิวคลีไอ) ดังสมการ

$$N = \frac{N_A}{A} \quad (2.6)$$

ถ้าให้ w เป็นน้ำหนักของธาตุ จำนวนนิวคลีไอทั้งหมดคือ

$$N = \frac{wN_A}{A} \quad (2.7)$$

จากที่กล่าวไปข้างต้น ธาตุส่วนใหญ่มักจะมีไอโซโทปมากกว่า 1 ไอโซโทป เช่น แคลเซียมจะมีไอโซโทปที่เสถียรถึง 6 ไอโซโทปคือ ^{40}Ca ^{42}Ca ^{43}Ca ^{44}Ca ^{46}Ca และ ^{48}Ca ตัวอย่างเช่น ^{48}Ca มี isotopic abundance ประมาณ 0.185% ของทั้งหมด ดังนั้นในการศึกษาแต่ละกรณีเพื่อให้ได้ นิวคลีไอที่สนใจถูกต้องจำเป็นต้องเพิ่มตัวแปรคือ isotopic abundance ดังสมการ

$$N = \frac{wN_A\theta}{A} \quad (2.8)$$

จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนพบว่า ผลผลิตจากการก่อกัมมันตภาพรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลของธาตุที่กำลังศึกษา เพราะว่าอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวคลีไอนั้น จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์คือ

$$\text{อัตราการกระตุ้น } \alpha \quad \text{จำนวนมวลของธาตุ (w)} \quad (2.9)$$

2.1.1.3 ภาคตัดขวาง (Cross Section)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกระตุ้น จำนวนนิวคลีโอเป้าหมายและนิวตรอนฟลักซ์สามารถแสดงได้ในเทอม “ภาคตัดขวาง” (σ) ดังสมการ

$$\text{อัตราการกระตุ้น} = \sigma \phi N \quad (2.10)$$

เมื่อ N คือ จำนวนนิวคลีโอเป้าหมาย (atoms)

ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ ($\text{neutron m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

σ คือ ภาคตัดขวาง (m^2)

แทนค่า N จากสมการ 2.8 จะได้

$$\text{อัตราการกระตุ้น} = \frac{\sigma \phi w N_A \theta}{A} \quad (2.11)$$

ภาคตัดขวางโดยปกติมักแสดงในหน่วยบาร์น (barn) ซึ่ง 1 บาร์น คือ 10^{-28} m^2 ถ้านิวเคลียสเป้าหมายมีภาคตัดขวางในช่วงบาร์นจะเกิดการกระตุ้นได้ดี แต่ถ้ามีภาคตัดขวางในหน่วยมิลลิบาร์นแสดงว่าจะเกิดการกระตุ้นไม่ดี สิ่งหนึ่งที่ควรพิจารณาเมื่อจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้คือ ธาตุเสถียรชนิดเดียวกันอาจมีภาคตัดขวางไม่เท่ากันได้ เพราะว่าธาตุแต่ละชนิดจะมีหลายไอโซโทปคือ ไอโซโทปหนึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการกระตุ้นสูงแต่อีกไอโซโทปหนึ่งอาจมีโอกาที่จะเกิดการกระตุ้นต่ำได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาภาคตัดขวาง เพื่อที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกนิวคลีโอเป้าหมายที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1.1.4 อัตราการสลายตัว

ถ้าผลผลิตจากปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนให้นิวคลีโอที่เสถียรจะทำให้ง่ายต่อการคำนวณผลผลิต โดยคำนวณจากปฏิกิริยาการกระตุ้น โดยคูณด้วยระยะเวลาที่อาบรังสี (t)

$$\text{อัตราการกระตุ้น} = \sigma \phi N \quad (2.12)$$

$$\text{จำนวนนิวคลีโอ} = \sigma \phi N t \quad (2.13)$$

อย่างไรก็ตามในเหตุการณ์จริงผลผลิตที่เกิดขึ้นเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งจะมีการสลายตัวด้วยอัตราการสลายตัวค่าหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่เรียกว่าค่าครึ่งชีวิต ถ้าให้นิวคลีโอกัมมันตรังสีเป็น N' อัตราการสลายตัวของนิวคลีโอจะเป็นอัตราส่วนกับ N' ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสลายตัว } (dN^*/dt) & \propto -N^* \\ & = -\lambda N^* \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่การสลายตัว (ค่านี้เป็นค่าเฉพาะของสารกัมมันตรังสีแต่ละชนิด) ถ้าอินทิเกรตสมการที่ 2.14 ระหว่าง N^*_0 (ที่เวลาเริ่มต้น) ถึง N^* (ที่เวลา t) จะได้

$$N^* = N^*_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.15)$$

จากสมการสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมค่าครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) ได้เมื่อให้

$$N^* = N^*_0 / 2 \quad (2.16)$$

$$t = T_{1/2} \quad (2.17)$$

จะได้

$$\begin{aligned} N^*_0 / 2 & = N^*_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) \\ T_{1/2} & = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.1.1.5 กัมมันตภาพ

ในการศึกษาทางด้านการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนผลิตที่เกิดจากการกระตุ้นเกิดเป็นสารกัมมันตรังสี สารกัมมันตรังสีเหล่านั้นจะสลายตัวแตกต่างกันตามค่าคงที่การสลายตัว โดยอัตราการผลิตสารกัมมันตรังสีสามารถอธิบายได้จากสมการการกระตุ้นและสมการการสลายตัวคือ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์} & = \text{อัตราการกระตุ้น} - \text{อัตราการสลายตัว} \\ dN^*/dt & = \sigma\phi N - \lambda N^* \\ N^* & = \sigma\phi N (1 - \exp(-\lambda t)) / \lambda \end{aligned} \quad (2.19)$$

กัมมันตภาพหรือค่าการสลายตัวที่เวลาสิ้นสุดการอาบรังสี (A_0) มีค่าเท่ากับ

$$A_0 = \lambda N^* = \sigma\phi N (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (2.20)$$

จากสมการนี้สามารถคำนวณกัมมันตภาพเฉพาะกับธาตุที่สนใจโดยแทนค่าเทอม N จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$A_0 = \sigma \phi w N_A \theta (1 - \exp(-\lambda t)) / A \quad (2.21)$$

2.1.2 รังสีแกมมาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสสาร [13]

หลักการของการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนคือ การเหนี่ยวนำทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ผลผลิตที่เกิดขึ้นจะเกิดการสลายตัวจากนั้นจะถูกตรวจสอบและระบุว่าเป็นธาตุชนิดใดจากพลังงานและครึ่งชีวิตของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แผ่รังสี ส่วนการระบุปริมาณของธาตุจะศึกษาจากกัมมันตภาพ

2.1.2.1 การสลายกัมมันตรังสี

ผลผลิตที่ได้จากการสลายกัมมันตรังสีที่ใช้ในการระบุและวัดกัมมันตรังสีคือ อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา รังสีแกมมา รังสีเอกซ์และการแผ่รังสีนิวตรอน

อนุภาคแอลฟาเป็นอนุภาคที่แผ่กระจายตัวในระหว่างการเกิดลูกโซ่ในธรรมชาติและไม่ค่อยเกิดการสลายตัวในขบวนการกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน ยกเว้นแต่ในขบวนการที่เป็นผลจากการผลิตนิวไคลด์ในลูกโซ่การสลายกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น ^{235}U สลายตัวให้ ^{231}Th ซึ่งจะแผ่อนุภาคแอลฟา หรือการเกิดปฏิกิริยาการเหนี่ยวนำด้วยนิวตรอนของลิเทียมและโบรอน ซึ่งจะให้อนุภาคแอลฟาเช่นเดียวกัน นอกจากนี้อนุภาคแอลฟามีพลังงานอยู่ระหว่าง 2-10 MeV แต่อนุภาคแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านซิลิกอนเพียง 0.03 มิลลิเมตรเท่านั้น จากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้นอนุภาคแอลฟาจึงไม่ค่อยใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน ยกเว้นแต่การวิเคราะห์ยูเรเนียมในปฏิกิริยาฟิชชันและการวิเคราะห์โบรอนในเหล็ก

อนุภาคบีตาเป็นอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุลบ (β^-) และประจุบวก (β^+) อนุภาคบีตาไม่ได้มีพลังงานเดียวแต่มีพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-20 MeV แต่ส่วนใหญ่มีพลังงานต่ำกว่า 10 MeV ส่วนมากการกระตุ้นด้วยนิวตรอนในนิวคลีโอไซด์จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วแผ่ทั้งอนุภาค β^- และ β^+ ทำให้เลขอะตอมอาจจะเพิ่มหรือลดก็ได้ ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ ^{60}Co แผ่อนุภาค β^- ให้ผลผลิตเป็น ^{60}Ni หรือ การสลายตัวของ ^{65}Zn แผ่อนุภาค β^+ ให้ผลผลิตเป็น ^{65}Cu ข้อเสียของการนับอนุภาคบีตา คือ ช่วงพลังงานที่แสดงอนุภาคบีตากว้างและกัมมันตรังสีจะแผ่อนุภาคบีตาออกมาหลายชนิดทำให้การระบุชนิดของธาตุที่สนใจทำได้ยากจึงไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ธาตุหลายๆ ธาตุพร้อมกัน

รังสีเอกซ์เป็นอนุภาคที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในหรือการจับยึดอิเล็กตรอนในระหว่างการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยนิวตรอน ในกรณีที่เกิดการจับยึดอิเล็กตรอนนิวเคลียสจะไปจับยึดอิเล็กตรอนจากชั้น K หรือ L ซึ่งจะทำให้นิวไคลด์ลูกมีเลข

อะตอมลดลงหนึ่งและแผ่รังสีเอกซ์ออกมา ตัวอย่างเช่น ^{58}Co สลายตัวโดยการจับยึดอิเล็กตรอน และแผ่โพซิตรอน รังสีเอกซ์พร้อมทั้งให้ ^{58}Fe ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในเกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาแผ่ออกจากนิวเคลียสที่เกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กตรอน เมื่อเกิดการจัดเรียงออร์บิทัลใหม่จะทำให้ผลิตรังสีเอกซ์ เฟอร์เซ็นต์ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในคือ การเกิดการเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์ในนิวเคลียส เช่น การสลายตัวของ ^{60m}Co เป็น ^{60}Co รังสีเอกซ์สามารถใช้ในกระบวนการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนได้ แต่ปัญหาสำคัญของรังสีเอกซ์คือ สัญญาณรบกวนจากขบวนการอื่นของรังสีเอกซ์ อาทิการเกิดรังสีเอกซ์ครั้งที่สองจากกระบวนการฟลูออเรสเซนซ์ หรือเกิดรังสีพื้นหลังสูงเนื่องจากอนุภาคบีตา จึงไม่นิยมใช้รังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์ธาตุเช่นเดียวกัน

รังสีแกมมาเกิดจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียส กระบวนการนี้อาจจะเกิดรังสีแกมมาแบบพรอมต์เมื่อนิวตรอนถูกดูดซับในระหว่างการกระตุ้นหรือเกิดรังสีแกมมาแบบดีเลย์เมื่อเกิดการสลายตัวของกัมมันตรังสี กรณีแรกรังสีแกมมาจะถูกปลดปล่อยออกมาในขณะที่การอาบรังสี การเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานดังกล่าวจะเห็นในขณะที่กำลังอาบรังสีอยู่เท่านั้น การวิเคราะห์รังสีแกมมาแบบพรอมต์เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนซึ่งเป็นวิธีที่เฉพาะ โดยวิธีนี้ได้มีผู้ทำการศึกษาโดย Peisach (1981) [14] ส่วนกรณีรังสีแกมมาแบบดีเลย์จะแผ่รังสีในระหว่างการสลายตัวของนิวไคลด์แม่ ดังนั้นรังสีดังกล่าวจึงมีลักษณะเฉพาะกับนิวไคลด์แต่ละชนิด การเปลี่ยนแปลงพลังงานเกิดขึ้นระหว่างระดับพลังงานของนิวไคลด์ลูกที่เกิดขึ้นจึงทำให้ได้เส้นพลังงานรังสีแกมมาที่แตกต่างกันทำให้สามารถแยกชนิดของธาตุที่สนใจได้ดี ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนจึงตรวจนับรังสีแกมมาแบบดีเลย์เพื่อใช้ในการตรวจสอบเชิงคุณภาพและปริมาณของธาตุที่สนใจ

2.1.2.2 การวัดรังสีแกมมาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสาร [15]

การตรวจวัดรังสีแกมมาสามารถศึกษาจากกระบวนการที่รังสีแกมมาทำปฏิกิริยากับสารที่จะทำการตรวจวัดซึ่งมีกระบวนการสำคัญอยู่ 3 กระบวนการคือ โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตันและแพร์โพรดักชัน

ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เกิดจากโฟตอนหรือรังสีแกมมาเกิดการถ่ายเทพลังงานสู่อะตอมดูดซับในวัสดุที่ใช้เป็นหัววัดรังสีแล้วให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ซึ่งพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมา (E_0) เท่ากับผลต่างของพลังงานของอะตอมที่เป็นโฟโตอิเล็กตรอน (E_e) กับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ยึดเหนี่ยวอะตอมนั้น (binding energy, E_b) ดังสมการ

$$E_e = E_0 + E_b \quad (2.22)$$

ทำให้สามารถตรวจวัดพลังงานรังสีแกมมาได้ ปฏิริยาโฟโตอิเล็กทริกเหมาะสำหรับการตรวจวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่พลังงานต่ำๆ

การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาทำปฏิริยากับอิเล็กตรอน เกิดการถ่ายเทพลังงานแบบไม่ยืดหยุ่น ไปสู่อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนเกิดการกระดอนและรังสีแกมมาเกิดการกระเจิงเป็นมุมต่างๆ พลังงานและโมเมนตัมของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นเกิดจากการกระเจิงของรังสีแกมมาและอิเล็กตรอน

ผลของการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันคือ จะมีพีคของพลังงานรังสีแกมมากว้างและมีรังสีพื้นหลังสูงซึ่งจะรบกวนการตรวจวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจริง จึงเหมาะสำหรับการศึกษาพลังงานของรังสีแกมมาที่ 1 ถึง 5 MeV เพราะมีธาตุที่แผ่รังสีแกมมาที่ช่วงนี้้อย

แพร์โปรดักชัน เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาสูญเสียพลังงานเพื่อผลิตเป็นคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน ซึ่งการเกิดปฏิริยานี้จะเกิดขึ้น ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV เท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดแพร์โปรดักชันจะทำให้ได้อิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 0.511 MeV ดังนั้นพลังงานของรังสีแกมมาทั้งหมดจะเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน ส่วนพลังงานที่มากกว่า 1.02 MeV จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปพลังงานจลน์ อนุภาคทั้งสองจะเคลื่อนที่ออกจากหัววัดรังสีและจะเหลือเฉพาะพลังงานจลน์เท่านั้น ผลก็คือจะได้โฟโตพิคมีค่าเท่ากับพลังงานรังสีแกมมาที่ต้องการตรวจวัดลบกับ 0.511 หรือ 1.02 MeV

การเกิดปฏิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสารที่ได้บรรยายมาข้างต้นจึงใช้เป็นวิธีในการตรวจวัดรังสีแกมมา สำหรับวัสดุที่เหมาะสมสำหรับหัววัดรังสีแกมมาต้องมีคุณสมบัติคือต้องตอบสนองต่อการผลิตอิเล็กตรอนเมื่อทำปฏิริยากับรังสีแกมมาและต้องสามารถตรวจวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นได้

2.1.2.3 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detector) [16]

หัววัดรังสีแกมมาในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำเท่านั้นเพราะว่าเป็นหัววัดรังสีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยผลึก (ปกติมักใช้ซิลิกอนหรือเจอร์เมเนียม) ที่ประกอบติดกับอิเล็กโทรดสำหรับให้ศักย์ไฟฟ้า คุณสมบัติของผลึกแสดงไว้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของซิลิกอนและเจอร์เมเนียม [16]

	ซิลิกอน	เจอร์เมเนียม
เลขอะตอม (Z)	14	32
เลขมวล (A)	28.09	72.59
ความหนาแน่น (g.cm^{-3})	2.33	5.33
ช่วงพลังงาน (eV)	1.17	0.75
โมบิลิตีของอิเล็กตรอน ($\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$)		
ที่ 300 K	1350	3900
ที่ 77 K	21000	36000
โมบิลิตีของช่องว่าง ($\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$)		
ที่ 300 K	480	1900
ที่ 77 K	11000	42000
พลังงาน/e-h pair (eV)	3.62 (ที่ 300 K)	2.96 (ที่ 77 K)

หลักการการทำงานของหัววัดรังสีนี้คือ เมื่อพลังงานรังสีแกมมาตกกระทบกับผลึกจะสร้างหลุมอิเล็กตรอน (e-h pair) ขึ้น อิเล็กตรอนในแถบตัวนำหรือหลุมอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยโมบิลิตีตามตารางที่ 2.1 หลุมในแถบวาเลนซ์ก็จะเคลื่อนที่ด้วยแต่ในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมในสารกึ่งตัวนำจะประกอบกันขึ้นเป็นกระแสไฟฟ้าและถ้าอิเล็กตรอนและหลุมดังกล่าวเคลื่อนที่ไปถึงอิเล็กโทรดโดยปราศจากการรวมตัวกันหรือไปจับกับสิ่งเจือปนในผลึก จะทำให้ได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานที่ตกกระทบผลึก

ค่าพลังงานเฉลี่ยที่เกิดจากหลุมอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 3.6 eV สำหรับซิลิกอนและ 3 eV สำหรับเจอร์เมเนียม ดังนั้นถ้ามีหลุมอิเล็กตรอนหลายๆหลุมจะทำให้ได้พลังงานถึง MeV แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณที่ได้ยังมีขนาดเล็กในเครื่องวัดรังสีจึงต้องมีส่วนขยายสัญญาณอยู่

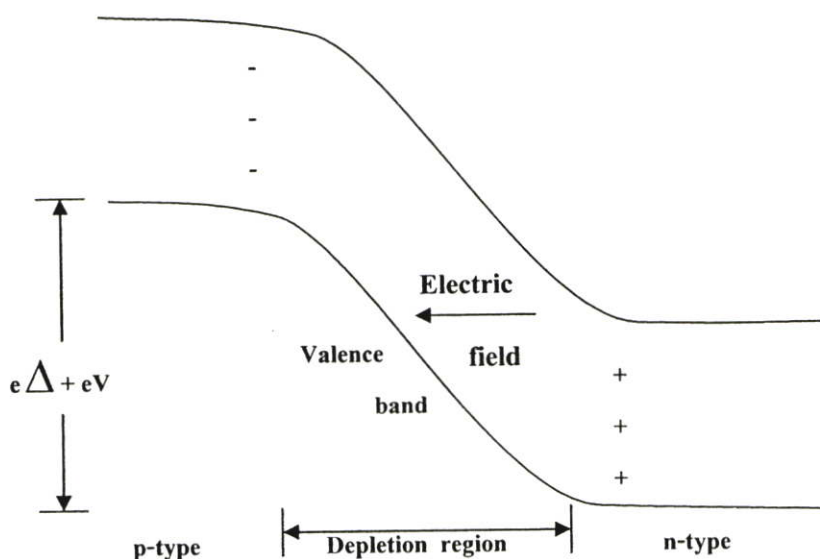
ปัจจุบันการพัฒนาหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำเน้นไปที่การใช้ผลึกให้มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อลดข้อผิดพลาด เนื่องจากสิ่งเจือปนทำให้สภาพไวของหัววัดรังสีสูงขึ้น หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ แบบ p-n junction ใช้ผลึกซิลิกอนและแบบ intrinsic ใช้ผลึกเจอร์เมเนียม

2.1.2.3.1 หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำชนิด p-n junction

หัววัดรังสีชนิดนี้เป็นไดโอดซึ่งเกิดการก่อดั้วเป็นสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกันบนผลึก ในระหว่างขบวนการผลิต อะตอมในผลึกสารกึ่งตัวนำ (ซิลิกอน) จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมที่มีวาเลนซ์ 3 หรือ 5 เช่น โบรอนหรือฟอสฟอรัส ถ้าให้ฟอสฟอรัสแทนที่ในผลึกซิลิกอนจะทำให้ผลึก

ซิลิกอนเกิดเป็นบริเวณผู้ให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่บริเวณดังกล่าวจะสามารถถูกกระตุ้นไปสู่แถบตัวนำได้ง่าย องค์ประกอบดังกล่าวเรียกว่า n-type ในขณะที่ถ้าให้อะตอมโบรอนแทนที่จะเกิดบริเวณผู้รับเพราะว่าต้องการอิเล็กตรอน เพื่อที่จะทำให้พันธะโควาเลนต์ครบตามกฎออกเคต องค์ประกอบดังกล่าวเรียกว่า p-type

เมื่อนำองค์ประกอบทั้งสองมาเชื่อมต่อกันจะทำให้อิเล็กตรอนจาก n-type เคลื่อนที่เข้ามาสู่ส่วนของ p-type เกิดเป็นบริเวณที่หักล้างกัน (depleted zone) บริเวณดังกล่าวบนหัวขั้วครึ่งที่เป็นบริเวณที่ใช้สำหรับการตรวจวัดปริมาณรังสี ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงบริเวณหักล้างกันของหัวขั้วครึ่งแบบสารกึ่งตัวนำชนิด p-n junction [16]

ข้อดีของหัวขั้วครึ่งชนิดนี้คือ มีขนาดเล็ก เวลาตอบสนองเร็ว และสามารถแยกไฟพลังงานได้ดี แต่ข้อเสียคือ หัวขั้วครึ่งจะถูกทำลายถ้ามีอนุภาคนิวตรอนหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบตรวจวัดเพราะว่าอนุภาคดังกล่าวจะไปทำให้อะตอมพวกโบรอนหรือฟอสฟอรัสหลุดออกจากผลึกซิลิกอน

2.1.2.3.2 หัวขั้วครึ่งแบบสารกึ่งตัวนำชนิด intrinsic

หัวขั้วครึ่งแบบสารกึ่งตัวนำชนิด intrinsic ทำมาจากวัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยการพัฒนาหัวขั้วครึ่งแบบนี้จะใช้เจอร์เมเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูงเพราะว่าเจอร์เมเนียมมีเลขอะตอมสูงทำให้สามารถจับรังสีแกมมาดีกว่าซิลิกอน ข้อดีของหัวขั้วครึ่งชนิดนี้คือ มีความสามารถในการแยกพลังงานสูงมากแต่มีราคาแพงและการใช้งานลำบากเพราะว่าหัวขั้วต้องจุ่มอยู่ในไนโตรเจนเหลวตลอดเวลา

2.1.3 องค์ประกอบของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [13], [17]

2.1.3.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน

2.1.3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactors)

ปัจจุบันมีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้เพื่อวิจัยหลายชนิดแต่หลักการทํางานจะเหมือนกัน คืออาศัยกระบวนการฟิชชันเพื่อเป็นแหล่งผลิตนิวตรอน ส่วนมากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนจะอาศัยกระบวนการฟิชชันของ ^{235}U ซึ่งที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเครื่องจะใช้แท่งเชื้อเพลิงที่เป็นธาตุ ^{235}U ^{235}U จะถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันด้วยเทอร์มัลนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน เมื่อเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้นิวตรอนเพิ่มขึ้น 2–3 ตัวต่ออนุภาค 1 ครั้ง นิวตรอนเหล่านั้นจะถูกลดความเร็วลงด้วยตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน (moderator) เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์หรือเบอริลเลียม นอกจากนี้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ยังก่อให้เกิดความร้อนจำนวนมากในกระบวนการ ดังนั้นภายในจึงต้องมีตัวทำให้เย็น (coolant) ด้วย เช่น แก๊ส น้ำ หรือโลหะเหลว ตัวอย่างเช่นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เป็นแบบสระน้ำใช้น้ำเป็นทั้งอุปกรณ์ลดพลังงานงานของนิวตรอนและวัสดุให้ความเย็น สำหรับการควบคุมอัตราการผลิตนิวตรอนจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า แท่งควบคุม (control rods) ซึ่งทำมาจากวัสดุที่ดูดนิวตรอนได้ เช่น แคดเมียมหรือโบรอน ดังนั้นในทํางานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หากต้องการเริ่มทํางานก็จะนำแท่งควบคุมขึ้นจากท่อและเมื่อเสร็จสิ้นการทํางานก็จะหย่อนแท่งควบคุมลง

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน เช่น Canadian SLOWPOKE reactor หรือ Amercian TRIGA reactor

ส่วนมากนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดสระน้ำจะเกิดนิวตรอนหลายชนิด แต่ในการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนจะตรวจวัดโดยการกระเด็นจากนิวตรอนชนิดเทอร์มัลนิวตรอน แต่ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ยังพบนิวตรอนที่อยู่ในช่วงเอพิเทอร์มัลหรือนิวตรอนเร็วอยู่ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ได้เทอร์มัลนิวตรอนจึงต้องใช้ตัวหน่วงความเร็วนิวตรอนเพิ่มอีกเช่น แกรไฟต์ ในทางตรงข้ามหากในระบบที่ศึกษาต้องการที่จะกำจัดเทอร์มัลนิวตรอนเพื่อจะใช้นิวตรอนเร็วในการวิเคราะห์ก็จะใช้ตัวดูดซับเช่นพวก แคดเมียมหรือโบรอนแทนเพื่อให้ได้เพียงนิวตรอนเร็ว

2.1.3.1.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclide Neutron

Sources)

แหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ง่าย มีราคาไม่แพง และมีกลไกการทํางานที่ไม่ซับซ้อน ในระบบนี้การปลดปล่อยนิวตรอนเกิดจากนิวเคลียสเป้าหมายถูกชนด้วยอนุภาคแอลฟาหรือรังสีแกมมา โดยใช้ตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอนเป็นพาราฟิน

ภายในแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ไม่คงที่ การอาบรังสีในตัวอย่างให้ได้นิวตรอนฟลักซ์ที่ต้องการต้องเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม รวมทั้ง

การเตรียมตัวอย่างทั้งทางด้านปริมาณและรูปร่าง ถ้าต้องการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุบางชนิด เช่น ซิลิกอนที่ต้องการฟอสฟอรัสเป็นแหล่งกระตุ้นโดยใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิด นิวโคลด์กัมมันตรังสีในระบบจะไม่ใช่ตัวห้วงนิวตรอน

แม้ว่าแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดนิวโคลด์กัมมันตรังสีมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อจำกัดคือ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ให้ฟลักซ์ต่ำ เหมาะกับธาตุที่มีภาคตัดขวางมากกว่า 10 บาร์นขึ้นไปและมีค่าครึ่งชีวิตในช่วง 30 นาทีถึง 72 ชั่วโมง

2.1.3.2 ภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างในการอบรังสี (Irradiation Containers)

ตัวอย่างที่จะทำการอบรังสีต้องนำไปใส่ในภาชนะที่ใช้ในการอบรังสี วัสดุที่ทำภาชนะควรที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารกัมมันตรังสี ไม่อย่างนั้นจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ทดลอง พอลิเอทิลีนคือ วัสดุที่ใช้สำหรับการอบรังสีด้วยเทอร์มัลนิวตรอนเพราะว่าเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีสิ่งเจือปนน้อย

ข้อเสียของภาชนะที่วัสดุทำมาจากพอลิเอทิลีนคือ จะเสียหายง่ายเมื่ออบรังสีที่นิวตรอนฟลักซ์สูงและนาน โดยภาชนะจะเกิดการแตกหักและเปลี่ยนสี การใช้ภาชนะที่วัสดุทำมาจากอะลูมิเนียมเป็นสิ่งที่มีความเหมาะสมกว่าเมื่อต้องการอบรังสีเป็นเวลานานและฟลักซ์สูง อะลูมิเนียมที่ใช่วิเคราะห์เมื่อผ่านการอบรังสีจะถูกกระตุ้นเป็น ^{28}Al และให้กัมมันตภาพรังสีที่มีครึ่งชีวิตประมาณ 2.3 นาทีซึ่งจะแผ่รังสีช่วงสั้นๆ เท่านั้น

ขนาดและรูปร่างของภาชนะที่ใช้อบรังสีขึ้นกับบริเวณที่อบรังสี โดยทั่วไปท่อที่ใช้อบรังสีมีลักษณะเป็นทรงกระบอกคั่นภาชนะที่ใช้อบรังสีจึงมีรูปทรงกระบอก สำหรับในระบบท่อลม (pneumatic) ภาชนะที่ใส่ตัวอย่างในการอบรังสีในระบบนี้จะต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับท่อลมเพราะในระบบท่อลมจะใช้แรงดันในการดึงภาชนะดังกล่าวเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์

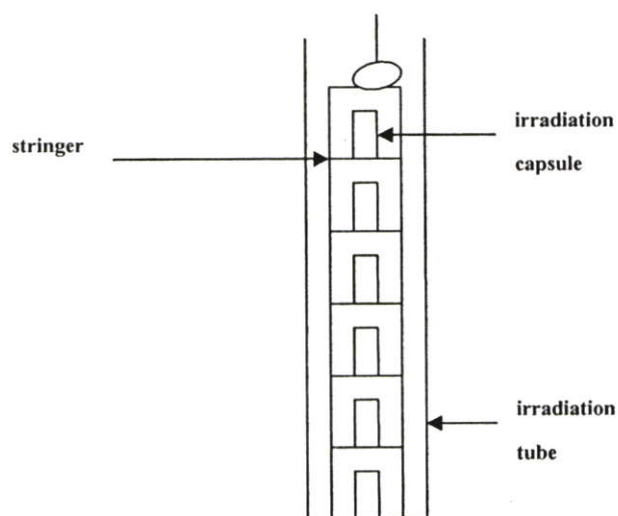
2.1.3.3 อุปกรณ์สำหรับนำตัวอย่างเข้าอบรังสี (Irradiation Devices)

การนำตัวอย่างเข้าสู่ส่วนของนิวตรอนเป็นขบวนการที่ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก โดยวิธีการนำตัวอย่างเข้าสู่บริเวณการกระตุ้นหรือบริเวณนิวตรอนขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้สร้างขึ้น

โดยทั่วไป แล้วบริเวณที่อบรังสีจะอยู่ในแกนกลางเครื่องปฏิกรณ์หรือบริเวณด้านนอกแกนกลางเครื่อง ในเตาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบสระวายน้ำที่อบรังสีอยู่ในน้ำ ถ้าตัวห้วงความเร็วนิวตรอนเป็นแกรไฟต์ที่อบรังสีจะอยู่ในท่อแกรไฟต์นั้น ท่อที่เป็นอุปกรณ์ในการอบรังสีทำมาจากอะลูมิเนียมเพราะว่าอะลูมิเนียมทนทานต่อการกร่อนและมีครึ่งชีวิตสั้น

ภาพที่ 2.2 แสดงการนำตัวอย่างเข้าสู่แกนกลางของเตาปฏิกรณ์วิธีหนึ่ง ตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะเรียบร้อยแล้วจะนำเข้าสู่แกนกลางกลางเครื่องโดยผ่านท่ออบรังสี (irradiation tube) ภาพนี้

แสดงระบบอบรังสีที่เป็นแบบแนวตั้ง ดังนั้นตัวอย่างจะนำเข้าสู่แกนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง แต่ถ้าในระบบอบรังสีเป็นแบบแนวราบ ตัวอย่างจะนำเข้าสู่แกนกลางโดยการดัน



ภาพที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้นำตัวอย่างเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ [13]

ในบางกรณีถ้าใช้เวลาในการอบรังสีสั้นมาก การนำตัวอย่างเข้าและออกต้องทำอย่างรวดเร็ว วิธีการที่สะดวกคือ การใช้ระบบท่อลม ระบบการทำงานคือ ตัวอย่างถูกดูดเข้าสู่ท่อลมพาไปสู่บริเวณอบรังสี และอบรังสีตามเวลาที่กำหนดเมื่อครบเวลาตัวอย่างจะถูกผลักกลับสู่ที่เดิม ตัวอย่างที่เข้าและออกท่อลมจะเกิดจากการเคลื่อนที่โดยอาศัยอากาศหรือแก๊สไนโตรเจน แก๊สฮีเลียม

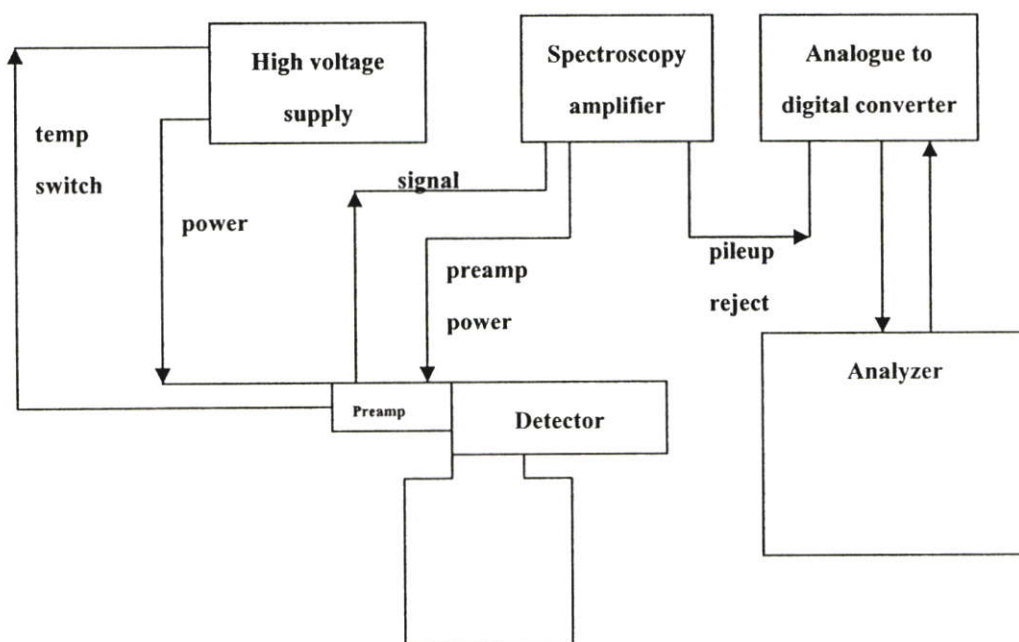
2.1.3.4 อุปกรณ์แกมมาสเปกโทรเมทรี

2.1.3.4.1 หัววัดรังสี (Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีเป็นสัญญาณไฟฟ้า (electrical pulse) ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ สามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 2.1.2.3

2.1.3.4.2 เครื่องขยายสัญญาณเบื้องต้น (Preamplifier)

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีจะมีขนาดน้อยมาก ดังนั้นในส่วนการวัดพลังงานจึงต้องมีการขยายสัญญาณเบื้องต้นเพื่อขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ประมาณ 0.1 V MeV^{-1} จากนั้นจึงเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณประมาณ 10 V สัญญาณพลังงานที่ได้จะถูกแยกชนิดด้วยวงจรวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ (pulsed height analyzer) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โค้ดแกรมแสดงระบบอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนการวัดพลังงานรังสีแกมมา [13]

ระบบการขยายสัญญาณเบื้องต้นนั้นจะติดตั้งอยู่ใกล้กับส่วนหัววัดรังสีให้มากที่สุดเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน และถ้าต้องการลดสัญญาณรบกวนให้ต่ำลงมากๆ ในระบบจะติดตั้งพร้อมกับส่วนของเครื่องรักษาความเย็นอัตโนมัติ (cryostat system)

2.1.3.4.3 เครื่องขยายสัญญาณ

เครื่องขยายสัญญาณมีหน้าที่เพิ่มสัญญาณจากส่วนเครื่องขยายสัญญาณเบื้องต้นให้ได้สัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 0-10 V และมีหน้าที่ปรับปรุงอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนให้ดีขึ้น

2.1.3.4.4 วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์ (Pulse Height Analyzer)

ผลที่ได้จากส่วนของเครื่องขยายสัญญาณจะทำให้ได้พัลส์เป็นแบบ โค้งระฆังคว่ำ (Gaussian shape) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานรังสีแกมมาที่เข้ามาที่หัววัดรังสีแกมมา จากนั้นจะใช้อุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณที่ได้นั้นให้เป็นสัญญาณในระบบตัวเลขด้วย Analogue-Digital Converter (ADC) แล้วนำค่าที่ได้ไปนับด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์ต่อไป ส่วนของเครื่อง ADC อาจจะเป็นส่วนที่แยกกันกับเครื่องขยายสัญญาณหรืออยู่รวมกันก็ได้ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะ แต่ละเครื่องสามารถแยกสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณได้หลากหลาย โดยทั่วไปสัญญาณที่ได้จากส่วนเครื่องขยายสัญญาณจะให้แอมพลิจูดอยู่ในช่วง 0-10 V ส่วนเกณฑ์ที่ได้จากเครื่อง ADC จะใช้ค่าคือ 2048, 4096 หรือ 8192

ชนิดของ ADC ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในวงจรวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์คือแบบ successive approximation system ADC ชนิดนี้สามารถใช้วิเคราะห์สัญญาณพัลส์ที่ได้จากส่วนขยายสัญญาณได้เร็วกว่า Wilkinson system มีเวลาในการวิเคราะห์ช่วงระหว่าง 10 ไมโครวินาที และ 25 ไมโครวินาที แต่อุปกรณ์ ADC แบบนี้มีข้อเสียคือช่วงความเป็นเส้นตรงน้อย

สรุปคือ สัญญาณที่ได้จากเครื่องขยายสัญญาณจะถูกแปลงสัญญาณโดย ADC ให้เป็นสัญญาณตัวเลข แล้วเข้าสู่วงจรวิเคราะห์ตามช่องที่ได้แบ่งไว้ สัญญาณดังกล่าวก็จะถูกนับที่แต่ละช่องนั้นและรายงานค่าผลการทดลองออกมา

2.1.4 ชนิดของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [10]

2.1.4.1 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive NAA)

เป็นการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี (Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA) ที่กระทำโดย การนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงเข้าอบรังสีนิวตรอนพร้อมกันและปล่อยทิ้งให้สารเกิดการสลายตัวในช่วงเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการวัดความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีด้วยเครื่องมือวัดรังสี วิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง (relative method) วิธีการนี้จะไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่าง

2.1.4.2 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนด้วยวิธี k_0 (k_0 -Standardised NAA Method)

วิธี k_0 เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก โดยเทคนิคนี้จะไม่ใช้สารมาตรฐานอ้างอิงเนื่องจากต้องการลดปัญหาเนื่องจากความผิดพลาดจากรูปทรงเรขาคณิตและขนาดของตัวอย่าง โดยการทดลองจะทำการทดลองโดย จะคำนวณค่าคงที่ (k_0) ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับการอบรังสี นำค่าที่ได้ไปคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่างโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

2.1.4.3 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีหรือแบบทำลายตัวอย่าง (Destructive NAA)

เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้ขบวนการทางเคมีเข้าช่วยซึ่งแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.1.4.2.1 ผ่านกระบวนการทางเคมีก่อนการอบรังสี (Pre-Irradiation Technique)

เทคนิคนี้จะนำสารตัวอย่างมาผ่านขบวนการแยกธาตุที่จะวิเคราะห์ออกมาก่อนการอบรังสีนิวตรอน วิธีการนี้มีข้อควรระวังอย่างสูงเพราะอาจมีการเปราะเปื้อนเกิดขึ้น แต่จะนำมาใช้ต่อเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้น เช่น ธาตุที่จะวิเคราะห์ให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นมากและมีการรบกวนจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีของธาตุอื่น จึงจำเป็นต้องแยกธาตุที่จะรบกวนได้นั้นออกไป

ก่อนที่จะนำสารตัวอย่างไปอบรังสีหรือการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำซึ่งจำเป็นต้องนำมาผ่านขั้นตอนบางอย่างเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุที่จะวิเคราะห์ (pre-concentration) ก่อนนำไปอบรังสีเป็นต้น

2.1.4.2.2 ผ่านกระบวนการทางเคมีหลังการอบรังสี (Post-Irradiation Technique)

เทคนิคนี้เป็นการนำเทคนิคทางเคมีเข้าช่วยเพื่อแยกนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากสารตัวอย่างภายหลังการอบรังสีนิวตรอนแล้ว เพื่อให้ปราศจากการรบกวนของไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างด้วย แล้วจึงทำการวัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานอ้างอิง

วิธีการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีจะทำให้ตัวอย่างสูญเสียรูปและลักษณะไป สำหรับกรรมวิธีทางเคมีที่นำมาใช้ในการแยกธาตุหรือนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีหลายวิธีอาทิ การทำลาย การสกัด การตกตะกอน เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

2.1.5 ข้อดีของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [18]

- สามารถวิเคราะห์กับตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว สารแขวนลอย หรือก๊าซได้
- ในกรณีของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีไม่ต้องการเตรียมตัวอย่างโดยการย่อย สกัด หรือการทำให้เจือจาง
- สามารถวิเคราะห์ธาตุพร้อมกันหลายธาตุพร้อมกันในการวิเคราะห์หนึ่งครั้ง โดยไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์การวิเคราะห์เหมือนกับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี
- ในกรณีของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณได้สะดวกและรวดเร็ว โดยไม่สูญเสียสารตัวอย่าง
- สามารถวิเคราะห์ธาตุ โดยไม่ต้องกังวลต่อข้อผิดพลาดที่เกิดจากสิ่งปนเปื้อนในระหว่างการปฏิบัติงาน หลังอบรังสีแล้ว เนื่องจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้กลายเป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งแตกต่างจากสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ไม่มีรังสี
- สามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีไอโซโทปต่างกันรวมกันอยู่ได้ ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดกับแต่ละไอโซโทปต่างกัน เช่น ในกรณีของ ^{235}U และ ^{238}U โดย ^{235}U วิเคราะห์ปริมาณจากดีเลคต์นิวตรอนในขณะที่ ^{238}U วิเคราะห์จากปฏิกิริยา (n, γ)
- มีความไวของการวิเคราะห์สูง โดยที่ความไวของการวิเคราะห์ขึ้นกับความเข้มข้นของรังสีนิวตรอน ความสามารถในการจับนิวตรอน เวลาในการอบรังสี ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีและสัดส่วนการมีอยู่ตามธรรมชาติของไอโซโทปเสถียรของธาตุ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของรังสีนิวตรอน การเพิ่มเวลาในการอบรังสีและการพัฒนาประสิทธิภาพหัววัดรังสีให้สูงขึ้นจะช่วยทำให้เทคนิคนี้มีความไวของการวิเคราะห์สูงขึ้นและมีค่าต่ำสุดของการตรวจวัดต่ำมากได้
- มีความแม่นยำสูง

2.1.6 ข้อเสียของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [19]

- เป็นเทคนิคที่ใช้เงินลงทุนครั้งแรกสูง เพราะต้องมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนและเครื่องมือนับรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งทั้ง 2 สิ่งมีราคาแพงมาก

- ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี เป็นเทคนิคที่ไม่สามารถระบุได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์ห้อยู่ในลักษณะใด (ไม่สามารถบอกถึงสถานะเลขออกซิเดชันได้) ผลการวิเคราะห์ให้ข้อมูลในรูปปริมาณทั้งหมดของธาตุเท่านั้น

- เป็นเทคนิคที่ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ธาตุได้ทุกธาตุในตารางธาตุ

- ในบางครั้งถ้าสารตัวอย่างที่วิเคราะห์มีธาตุอื่นที่มีความสามารถในการจับนิวตรอนสูง จะทำให้ตัวอย่างที่อาบรังสีมีรังสีสูงมากซึ่งเป็นอันตราย เช่น พวกเกลือและโลหะบางชนิด จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกันและตรวจสอบรังสีชนิดต่างๆ อย่างครบถ้วนหรือเลือกใช้การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีแทน

2.1.7 ข้อผิดพลาดของการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน [17]

2.1.7.1 การสุ่มตัวอย่าง

เนื่องจากการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนมีความไวของการวิเคราะห์สูง จึงใช้สารตัวอย่างน้อยคั่งนั้น กรณีที่สารมีเนื้อแตกต่างกัน การสุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้เป็นตัวแทนทั้งหมดทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้

2.1.7.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในบางครั้งการเตรียมตัวอย่างต้องมีการเผาหรือทำให้แห้งก่อนการอาบรังสี อาจมีการสูญเสียธาตุที่ระเหยเป็นไอได้ บางครั้งต้องผ่านการบดให้ละเอียด อาจมีการปนเปื้อนจากภาชนะที่ใช้หรือฝุ่นละออง นอกจากนี้ถ้าภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างมีการปนเปื้อนยอมทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้ การแก้ไขข้อผิดพลาดทำได้โดยต้องระมัดระวังการเตรียมสารตัวอย่างทุกขั้นตอน จนกว่าจะนำเข้าอาบรังสีนิวตรอน

2.1.7.3 การกำบังตนเองขณะอาบรังสี (Self-Shielding)

ข้อผิดพลาดนี้เกิดเมื่อใช้ตัวอย่างจำนวนมากหรือใช้ตัวอย่างที่มีธาตุบางชนิดที่สามารถดูดจับอนุภาคนิวตรอนได้ดี ทำให้อนุภาคนิวตรอนไม่สามารถเข้าถึงบริเวณใจกลางของสารตัวอย่างได้ ทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ ทำให้มีข้อผิดพลาดทางการวิเคราะห์เกิดขึ้น การแก้ไขข้อผิดพลาดนี้สามารถทำได้โดยการใช้ตัวอย่างขนาดเล็กและเตรียมสารมาตรฐานอ้างอิงให้มีการกระจายของธาตุอย่างสม่ำเสมอ โดยให้มีความเข้มข้นของสารมาตรฐานอ้างอิงใกล้เคียงกับสารตัวอย่างมากที่สุด

2.1.7.4 ความหนาแน่นของนิวตรอนไม่คงที่

เนื่องจากความเข้มของนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้น ถ้านำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงเข้าอบรังสีในตำแหน่งต่างกันหรือใช้เวลาต่างกันแล้ว นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้ การแก้ไขทำได้โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงเข้าอบรังสีพร้อมกันและใกล้กันมากที่สุด

2.1.7.5 ปฏิกริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน

เป็นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุ 2 ข้อ คือ หนึ่ง ในสารตัวอย่างที่นำเข้าวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่สนใจ อาจมีธาตุอื่นที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกับธาตุที่สนใจปะปนอยู่และสองเกิดจากตำแหน่งที่นำตัวอย่างเข้าอบรังสีนิวตรอนนั้น ไม่ได้มีนิวตรอนชนิดที่ต้องการเพียงอย่างเดียว ดังนั้นนอกจากปฏิกริยาที่ต้องการคือ นิวตรอน-แกมมาจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์อาจมีปฏิกริยาอื่นๆ เช่น นิวตรอน-โปรตอน หรือ นิวตรอน-แอลฟาจากธาตุอื่นๆเกิดขึ้นด้วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดไปได้ การแก้ไขทำได้โดยเลือกตำแหน่งที่มีนิวตรอนชนิดที่ต้องการเพียงอย่างเดียวหรือใช้วัสดุบางอย่าง เช่น แคดเมียม ห่อหุ้มตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงก่อนนำเข้าอบนิวตรอน วัตถุประสงค์ของการห่อหุ้มด้วยแคดเมียมเพื่อป้องกันเทอร์มัลนิวตรอนที่จะไปทำให้เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chatt, A., et. al. [20] ได้พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ธาตุหลัก ธาตุปริมาณน้อย และธาตุปริมาณน้อยมากในอาหาร ด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีและเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมี พบว่าเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีสามารถวิเคราะห์ได้มีความถูกต้อง ความเที่ยงตรง และสามารถทำได้รวดเร็ว ในขณะที่เทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่าแต่สามารถวิเคราะห์ได้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำได้

Mannan, A., et. al. [21] ทำการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในข้าวชนิดต่างๆ ที่ผลิตขึ้นในประเทศปากีสถานโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี พบว่าสามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุได้จำนวน 12 ชนิด

Mannan, A., et. al. [22] ทำการวิเคราะห์ธาตุ Hg Pb Cd As Br Sb Se Ni Al และ Cs ในข้าวและเปลือกโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี และอะตอมมิคแอนาไลเซอร์พหุสเปกโทรสโกปี พบว่าความเข้มข้นของ Se มีสูงในข้าวมากกว่าที่เปลือกข้าว ในขณะที่ธาตุอื่นพบที่เปลือกข้าวมากกว่าในข้าว นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งยังกล่าวเป็นนัยว่าความเข้มข้นของธาตุอาจมาจากดินมากกว่าสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

Laiyan, S., et. al. [23] ได้ทำการศึกษาปริมาณธาตุ As Br Cd Cr Cu Hg Pb Sb Se และ Zn ในอาหารจีน เช่น ข้าว ธัญพืช ไข่ เป็นต้น ด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนทั้งที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีและที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมี รวมทั้งเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี พบว่าความเข้มข้นของธาตุพิษมีปริมาณต่ำและไม่เป็นอันตรายต่อประชากรแต่ผู้เขียนก็เสนอว่าควรที่จะมีการตรวจติดตามอย่างสม่ำเสมอ

Mannan, A., et. al. [24] ทำการศึกษาปริมาณธาตุพิษ Hg Pb Cd As Sb Br และ Se ในอาหาร อาทิ ข้าว ข้าวสาลี ถั่ว ผัก ฯลฯ ในประเทศปากีสถานโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีและอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี พบว่าปริมาณความเข้มข้นของธาตุเหล่านี้มีค่อนข้างสูงโดยเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับจากในเมืองหลวงของประเทศ

Sarmani, S., et. al. [25] ได้ทำการสืบหาปริมาณธาตุที่จำเป็นและธาตุพิษ เช่น As Hg Se และ Zn ในอาหารทะเลที่ประเทศมาเลเซียด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน พบว่าธาตุ As ตรวจพบที่ปริมาณ 1.42 – 5.61 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าข้อบังคับของมาเลเซียที่กำหนดไว้ที่ 1.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในขณะที่ธาตุชนิดอื่นตรวจพบในระดับที่ไม่สูงกว่าข้อบังคับของประเทศ

Sun, J., et. al. [26] ทำการศึกษาถึงปริมาณธาตุหายากในตัวอย่างข้าวและข้าวสาลีที่ส่วนต่างๆ ของพืช คือ ราก ลำต้น ใบ เปลือกเมล็ดและเมล็ดด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมี พบว่าเมื่อเติมธาตุหายากในตัวอย่าง ธาตุดังกล่าวจะไปสะสมอยู่ที่เมล็ดในปริมาณน้อย

Ratner, R. T. และ Vernetson, W. G. [27] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีโดยใช้วิธี พารามตริก เปรียบเทียบและ k_0 (k_0 -standardization) เพื่อการประเมินธาตุชนิดต่างๆ ในสารมาตรฐานอ้างอิง 3 ชนิดคือ SRM 1577a (ตับโค) SRM 2704 (ตะกอนตบกระป๋อง) และ BHVO-1 (หินบะซอลท์จากฮาวาย) โดยใช้ธาตุ 51 ชนิดในการเปรียบเทียบแต่จากการศึกษามีธาตุหลายชนิดไม่สามารถตรวจพบอาจเกิดจากการศึกษาไม่ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสม หรือกัมมันตภาพของไอโซโทปรังสีของธาตุที่สนใจมีปริมาณน้อยกว่าต่ำสุดของการตรวจวัด จากการศึกษาสามารถสรุปได้เบื้องต้นว่าการวิเคราะห์ธาตุส่วนมากที่ใช้เทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีโดยใช้วิธี k_0 มีความถูกต้องและเที่ยงตรงมากกว่าวิธีพารามตริกและเปรียบเทียบ

Pham Thi Huynh, M., et. al. [28] ได้ศึกษาถึงปริมาณธาตุหายากที่ส่วนต่างๆ ของพืชจำพวกข้าว คือ ราก ลำต้น ใบและเมล็ดด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีและอินดิคทีฟฟลิคอปเปิลพลาสมาแมสสเปกโทรเมทรี พบว่าธาตุหายากจะปนเปื้อนมากในรากและตรวจไม่พบในเมล็ด

Nichols, T. A., et. al. [29] ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ I ในนมและสูตรอาหารทารกด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีโดยการใส่โบรอนเป็นวัสดุบรรจุตัวอย่างในการอบรังสีเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากไอโซโทปรังสีของ ^{24}Na และ ^{38}Cl

Soliman, K. และ Zikovsky, L. [4] ได้ทำการศึกษาหาปริมาณธาตุในธัญพืช น้ำมัน สารให้ความหวานและผักในประเทศแคนาดาโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีตรวจพบธาตุทั้งหมด 14 ชนิด คือ Br Ca Cl Co Cu I K Mg Mn Na Rb S Ti และ V ในขณะที่ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ตรวจไม่พบธาตุพิช

Balaji, T., et. al. [30] ได้ทำการศึกษาหาปริมาณธาตุธัญพืชและพืชที่เป็นเมล็ด (เช่น ถั่วแดง ถั่วเหลือง และ งา) ด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีโดยใช้วิธี k_0 (k_0 -standardised NAA method) พบว่าสามารถวิเคราะห์ธาตุหลักและธาตุรองได้ดังนี้ Al Br Ca Cl Co Fe K La Mg Mn Na Rb Se Sm และ Zn

Zaichick, V. [31] ทำการศึกษาปริมาณธาตุที่จำเป็นและธาตุพิชในอาหาร (เช่น ถั่ว ผัก ผลไม้ ฯลฯ) ด้วยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี จากการศึกษาพบว่าธาตุทั้ง 17 ชนิดคือ Ca Cl Co Cr Cs Fe Hg K Mg Mn Na Rb Sb Sc Se Sr และ Zn มีความเข้มข้นอยู่ในระดับปกติ

Hacisferogullari, H., et. al. [32] ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความยาว ปริมาตร ความหนา น้ำหนัก และคุณสมบัติทางเคมี อาทิ โปรตีน เซลลูโลส แร่ธาตุ เป็นต้น ในถั่ว (faba bean) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าตัวอย่างดังกล่าวเป็นแหล่งของสารอาหารทั้ง โปรตีน เส้นใย พลังงาน แร่ธาตุหลักและแร่ธาตุรองที่เหมาะสมกับการบริโภคของมนุษย์

Vassileva, E., และ Quetel, C. R. [33] ได้ศึกษาถึงปริมาณธาตุ Cd Cu และ Pb ในข้าวที่ใช้เป็นสารอ้างอิงของ international measurement evaluation programme (IMEP) โดยใช้เทคนิคอินดักทีฟลิคอปเปิลพลาสมาแมสสเปกโทรเมทรี

Howe, A., et. al. [34] ได้รายงานความเข้มข้นของธาตุในผลไม้ ถั่วและผักในประเทศจามาICA โดยใช้เทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีและอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี แบบเปลวไฟและไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาตรวจพบธาตุทั้งหมด 27 ชนิดในการศึกษารั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของธาตุกับข้อกำหนดของประเทศเดนมาร์ก สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกาและไนจีเรีย พบว่าธาตุส่วนมากจะพบมากกว่าข้อกำหนดของประเทศต่างๆ โดยเฉพาะธาตุแคลเซียม

Vivek, S. และ Garg, A. N. [35] ทำการศึกษาปริมาณในธัญพืช ผักและเครื่องเทศโดยเทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุได้ความเข้มข้นในตัวอย่าง 2 ระดับคือ ธาตุที่มีปริมาณน้อย (Na K P และ Cl) และ ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก (Br Co Cr Cs Cu Fe Hg Mn Mo Rb Sb Sc Se Sr Th และ Zn)

Acharya R., et. al. [36] ได้ทำการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคเชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีด้วยวิธี k_0 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่งที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้ โดยในขั้นแรกพวกเขาได้พัฒนาขบวนการวิเคราะห์จากนั้นได้นำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างข้าวสาลีที่มีขนาด 0.45 – 1 กิโลกรัม เปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวสาลีขนาด 50 – 1000 มิลลิกรัม ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าไม่มีผลกระทบจากขนาดของตัวอย่างที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้

1. สารละลายมาตรฐาน AA Grade ของ Al As Ca Cd Cr Cu Fe K Mg Mn Mo Se Sn V Zn (1,000 ppm ของ SCP SCIENCE)
2. แอมโมเนียมไอโอดด์ (NH_4I ; analytical grade ของ SPEX INDUSTRIES)
3. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl ; analytical grade ของ SPEX INDUSTRIES)
4. กรดไนตริก (HNO_3 ; ของ MERCK)
5. Buffalo River Sediment: NIST 8704 (ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology, U.S Department of Commerce)
6. Dog Fish Muscle and Liver: ACSP DORM-1 (ของสถาบัน Analytical Chemistry Standards Program, National Research Council Canada)
7. Marine Sediment: NMIJ 7302 – a (ของสถาบัน National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, National Metrology Institute of Japan)
8. Rice Flour : NIST 1568a (ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology, U.S Department of Commerce)
9. Sargasso : NIES No. 9 (ของสถาบัน National Institute for Environmental Studies)
10. Corn Starch (ของ CARLO ERBA)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 (ปปว-1) ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติซึ่งเป็นแบบสระว่ายน้ำ (swimming pool)
2. เครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาชนิด 4096 ช่องพร้อมด้วยหัววัดรังสีชนิดไฮเปอร์เพียวเจอร์เมเนียม ของบริษัท EG&G INSTRUMENTS IRELAND Model 918AOPTB ผลิตที่ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. ภาชนะอวบน้ำรังสีทำจากพลาสติกพอลิเอทิลีนและอลูมิเนียม
4. เครื่องชั่งแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER รุ่น AT201

3.2 การเตรียมสารละลายและตัวอย่าง

สารละลายที่ใช้ในการทดลองทำการเตรียมโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water) ทั้งสิ้น

3.2.1 การเตรียมสารละลายที่อยู่ในรูปของแข็ง

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายคลอไรด์ 1000 ไมโครกรัม/กรัม จำนวน 10 มิลลิลิตร
ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.0151 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริก บนเตาไฟฟ้า เมื่อของแข็งละลายหมด ให้ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดปริมาตร ขนาด 10 มิลลิลิตร

3.2.1.2 การเตรียมสารละลายไอโอดีน 1000 ไมโครกรัม/กรัม จำนวน 10 มิลลิลิตร
ชั่งแอมโมเนียมไอโอดีน 0.0114 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริก บนเตาไฟฟ้า เมื่อของแข็งละลายหมด ให้ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดปริมาตร ขนาด 10 มิลลิลิตร

3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม

การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมในการทดลองครั้งนี้แบ่งได้ทั้งหมด 3 กลุ่มใหญ่ 7 กลุ่มย่อย โดยแบ่งตามค่าครึ่งชีวิตของธาตุ ประกอบด้วย ธาตุกลุ่มที่ 1-4 เป็นธาตุกลุ่มครึ่งชีวิตสั้น ได้แก่ ธาตุ Al V Cu Ca Mg Cl Sn I และ Mn ธาตุกลุ่มที่ 5-6 ได้แก่ ธาตุ K As Cd และ Mo ธาตุกลุ่มที่ 7 ได้แก่ ธาตุ Cr Fe Se และ Zn สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงกลุ่มของธาตุที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม

กลุ่มที่	ธาตุ	ค่าครึ่งชีวิต
1	Al-28	2.24 นาที
	V-52	3.75 นาที
	Cu-66	5.10 นาที
2	Ca-49	8.72 นาที
	Mg-27	9.46 นาที
	Cl-38	37.24 นาที
3	Sn-125	9.50 นาที
4	I-128	24.99 นาที
	Mn-56	2.58 ชั่วโมง
5	K-42	12.36 ชั่วโมง
6	As-76	1.01 วัน
	Cd-115	2.23 วัน
	Mo-99	2.75 วัน
7	Cr-51	27.70 วัน
	Fe-59	45.51 วัน
	Se-75	119.77 วัน
	Zn-65	243.80 วัน

- ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม 100 ppm กลุ่มที่ 1

ปีเปตสารละลายมาตรฐาน 1000 ไมโครกรัม/กรัม ของ Al V และ Cu อย่างละ 1 มิลลิลิตร ด้วยปีเปตอัตโนมัติ ใส่ในขวดวัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้เท่ากับ 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานผสม 100 ไมโครกรัม/กรัม

3.2.3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างประกอบด้วย ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวหอมมะลิขั้วขาว ข้าวหอมมะลีสีนีล ข้าวหอมมะลีสีมพู ถั่วเขียว ถั่วดำ ถั่วแดง ถั่วแดงหลวง และถั่วเหลือง รวมทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง จัดซื้อจากร้านค้าทั่วไป

3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างข้าวหรือถั่วชนิดที่ต้องการมาประมาณ 100 กรัมบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า (grinder) ที่ทำจากอาร์เกตและผ่านการทำความสะอาดแล้ว โดยบดจนละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน นำตัวอย่างแต่ละชนิดที่ผ่านการบดเรียบร้อยแล้วในภาชนะพลาสติกที่ปิดสนิทในตู้ควบคุมความชื้น เพื่อเก็บไว้ใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของธาตุทั้ง 3 กลุ่มคือ กลุ่มครึ่งชีวิตสั้น กลุ่มครึ่งชีวิตปานกลาง และกลุ่มครึ่งชีวิตยาว ได้เตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทำการทดลอง 5 ชั่วโมงแต่ในกลุ่มครึ่งชีวิตยาวทำการทดลองเพียง 2 ชั่วโมง เนื่องจากหากทำเช่นเดียวกับครึ่งชีวิตสั้นและครึ่งชีวิตปานกลางจะทำให้ระยะเวลาในการศึกษานานมาก จากนั้นบันทึกค่าความแรงรังสีในหน่วย count per minute (cpm) ซึ่งค่า cpm ที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของความแรงรังสีที่ทำการตรวจวัด

3.3.1.1 ธาตุกลุ่มที่ 1-4 (ครึ่งชีวิตสั้น)

การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหาปริมาณธาตุกลุ่มที่ 1-4 ในตัวอย่าง ทำได้โดยบรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.07 กรัมในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีน (vial) ปิดฝาให้สนิทด้วยความร้อน จากนั้นนำไปอบรังสีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ด้วยระบบท่อลมที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{17} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อต่อไปนี้

(1) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบรังสีกับตัวอย่าง

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.1 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 15 25 35 45 และ 55 วินาทีตามลำดับ ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำตัวอย่างไปนับด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 200 วินาที บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(2) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการสลายตัว

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.1 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 35 วินาที และนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 200 วินาที แต่ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 1 2 4 8 และ 10 นาทีตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(3) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการนับ

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.1 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 35 วินาที และปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา

100 200 400 800 และ 1,000 วินาทีตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

3.3.1.2 ธาตุกลุ่มที่ 5-6 (ครึ่งชีวิตปานกลาง)

การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหาปริมาณธาตุกลุ่มที่ 5-6 ในตัวอย่าง ทำได้โดยบรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.07 กรัม ในพลาสติกพอลิเอทิลีน ปิดผนึกด้วยความร้อน จากนั้นนำไปอบรังสีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ในท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อต่อไปนี้

(1) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบรังสีกับตัวอย่าง

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.2 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 6 8 และ 12 ชั่วโมง ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลาประมาณ 38 ชั่วโมงและนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 1800 วินาที บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(2) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการสลายตัว

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.2 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 1800 วินาที แต่ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 14 38 และ 62 ชั่วโมงตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(3) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการนับ

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.2 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 38 ชั่วโมง จากนั้นนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 900 1800 และ 3600 วินาทีตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

3.3.1.3 ธาตุกลุ่มที่ 7 (ครึ่งชีวิตยาว)

การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหาปริมาณธาตุกลุ่มที่ 7 ในตัวอย่าง ทำได้โดยบรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.07 กรัม ในพลาสติกพอลิเอทิลีน ปิดผนึกด้วยความร้อน จากนั้นนำไปอบรังสีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ในท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อต่อไปนี้

(1) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบรังสีกับตัวอย่าง

ทำการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.3 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 24 46 และ 58 ชั่วโมง ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลาประมาณ 12 วันและนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 3600 วินาที บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(2) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการสลายตัว

ทำการเตรียมตัวอย่างคั่งที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.3 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 46 ชั่วโมง นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 3600 วินาที แต่ปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 5 12 19 26 และ 33 วันตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

(3) การศึกษาเวลาที่ใช้ในการนับ

ทำการเตรียมตัวอย่างคั่งที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.3.1.3 นำตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา 19 วัน และนับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 1800 3600 และ 5400 วินาทีตามลำดับ บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบ

3.3.2 ความถูกต้องของการวิเคราะห์

3.3.2.1 ธาตุกลุ่มที่ 1-4

ชั่งแบ่งข้าวโพคประมาณ 0.05 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีน (vial) จากนั้นนำไปหยดด้วยสารละลายมาตรฐานผสมในกลุ่มที่ต้องการ (หัวข้อ 3.2.2) ประมาณ 0.1 มิลลิลิตร (ตามความเหมาะสม) นำไปประเหยด้วยหลอดไฟอินฟราเรดจนแห้ง ปิดฝา จากนั้นนำไปอบรังสีพร้อมกับสารมาตรฐานตามสภาวะที่เหมาะสม นำตัวอย่างที่ผ่านการอบรังสีไปวัดด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ที่พบทั้งในสารละลายมาตรฐานผสมและสารมาตรฐานอ้างอิง จำนวนค่าที่ได้ด้วยวิธี relative method (ภาคผนวก ง) จำนวนปริมาณธาตุที่พบในสารมาตรฐานอ้างอิง นำปริมาณธาตุที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่ได้จากใบรับรองของสารมาตรฐานอ้างอิง หาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ (% relative error)

3.3.2.2 ธาตุในกลุ่มที่ 5-7

นำสารละลายมาตรฐานผสมที่ได้เตรียมไว้ (หัวข้อ 3.2.2) ปิเปตมา 0.1 มิลลิลิตร (ตามความเหมาะสม) หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 41 และนำไปประเหยด้วยหลอดไฟอินฟราเรดจนแห้ง นำกระดาษกรองบรรจุในพลาสติกพอลิเอทิลีนปิดผนึกด้วยความร้อนให้เรียบร้อย จากนั้นนำกระดาษกรองที่ได้ไปอบรังสีพร้อมกับสารมาตรฐานตามสภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างที่ผ่านการอบรังสีทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.3.2.1

3.3.3 ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์

3.3.3.1 ธาตุกลุ่มที่ 1-4

ทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.3.2.1 แต่เตรียมสารมาตรฐานอ้างอิงจำนวน 10 ครั้ง จำนวนค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% relative standard deviation)

3.3.3.2 ธาตุกลุ่มที่ 5-7

ทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.3.2.2 แต่เตรียมสารมาตรฐานจำนวน 10 ครั้ง
คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% relative standard deviation)

3.3.4 การคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit, D_L)

ซึ่งตัวอย่างประมาณ 0.07 กรัมบรรจุในภาชนะ และหยดสารละลายมาตรฐานที่ทราบปริมาณ (เช่น 5 ไมโครกรัม) ของธาตุที่ต้องการหาค่าต่ำสุดของการตรวจวัดบนวัสดุที่เหมาะสม นำตัวอย่าง และสารละลายมาตรฐานไปอาบรังสีตามสถานะของแต่ละธาตุที่ได้ศึกษาตามหัวข้อ 3.3.1 นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา บันทึกค่าจำนวนการนับรังสีในตัวอย่างและหาพื้นที่พีคของรังสีของธาตุที่ต้องการในสารละลายมาตรฐาน นำค่าที่ได้ไปคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัดจาก [15]

$$D_L = 2.71 + 3.29 \sqrt{B \left(1 + \frac{n}{2m} \right)} \quad (3.1)$$

และ

$$B = (B_1 + B_2) \frac{n}{2m} \quad (3.2)$$

เมื่อ	B_1	คือ ผลรวมจำนวนการนับแต่ละช่องทุกช่อง (channel) บนสเปกตรัมด้านซ้ายของพีคที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ช่องเดียวกับในสารละลายมาตรฐาน
	B_2	คือ ผลรวมจำนวนการนับแต่ละช่องทุกช่อง (channel) บนสเปกตรัมด้านขวาของพีคที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ช่องเดียวกับในสารละลายมาตรฐาน
	n	คือ จำนวนช่อง (channel) ของการนับบนสเปกตรัมทั้งหมดที่ทำให้เกิดพีคในสารละลายมาตรฐาน
	m	คือ จำนวนช่อง (channel) ของการนับบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมด้านซ้ายหรือสเปกตรัมด้านขวาของพีคในสารละลายมาตรฐาน

3.3.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

หยดสารละลายมาตรฐานของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน บนวัสดุที่เหมาะสม นำสารละลายมาตรฐานดังกล่าวไปอาบรังสีตามสถานะของแต่ละธาตุที่ได้ศึกษาตามหัวข้อ 3.3.1 นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา บันทึกค่าพลังงานและความแรงรังสีแกมมาของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ คำนวณช่วงความเป็นเส้นตรงโดยแสดงในรูปของ coefficient of determination (R^2)

3.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวและถั่วชนิดต่างๆ ตามขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ศึกษามาจากหัวข้อ 3.3.1

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 สภาวะที่เหมาะสม

4.1.1 ธาตุในกลุ่มที่ 1-4 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตสั้น)

ตารางที่ 4.1 - 4.3 แสดงถึงผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของธาตุในกลุ่มที่ 1 - 4 เพื่อใช้ในการเลือกเวลาในการอบรังสี เวลาในการสลายตัวและเวลาในการนับตัวอย่างที่ผ่านการอบรังสี

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอบรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการอบรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a					
15 วินาที	Al/(13)	Cl/(7)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(3)	Mn/(60)
25 วินาที	Al/(30)	Cl/(10)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(10)	Mn/(120)
35 วินาที	Al/(53)	Cl/(17)	Ca/(0)	Cu/(3)	Mg/(13)	Mn/(187)
45 วินาที	Al/(63)	Cl/(20)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(17)	Mn/(220)
55 วินาที	Al/(80)	Cl/(23)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(23)	Mn/(297)

a - ความแรงรังสีหลังจากทิ้งให้สลายตัว 2 นาที และนับรังสีเป็นเวลา 200 วินาที

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน

เวลาในการสลายตัว	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a					
1 นาที	Al/(83)	Cl/(13)	Ca/(3)	Cu/(0)	Mg/(13)	Mn/(253)
2 นาที	Al/(57)	Cl/(13)	Ca/(3)	Cu/(0)	Mg/(13)	Mn/(243)
4 นาที	Al/(37)	Cl/(10)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(10)	Mn/(237)
8 นาที	Al/(10)	Cl/(10)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(10)	Mn/(233)
10 นาที	Al/(3)	Cl/(10)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(7)	Mn/(227)

a - ความแรงรังสีเมื่ออบรังสีเป็นเวลา 35 วินาทีและนับรังสีเป็นเวลา 200 วินาที

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการนับรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a					
100 วินาที	Al/(93)	Cl/(23)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(23)	Mn/(420)
200 วินาที	Al/(40)	Cl/(10)	Ca/(3)	Cu/(0)	Mg/(10)	Mn/(150)
400 วินาที	Al/(33)	Cl/(10)	Ca/(3)	Cu/(0)	Mg/(10)	Mn/(150)
800 วินาที	Al/(13)	Cl/(10)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(7)	Mn/(140)
1000 วินาที	Al/(13)	Cl/(7)	Ca/(0)	Cu/(0)	Mg/(7)	Mn/(137)

a = ความแรงรังสีหลังจากอบรังสีเป็นเวลา 35 วินาที และทิ้งให้สลายตัว 2 นาที

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ธาตุในกลุ่มที่ 1-4 คือ อบรังสีด้วยระบบท่อลมเป็นเวลา 35 วินาที ใช้เวลาในการสลายตัว 1 นาทีและใช้เวลาในการนับรังสี 200 วินาที ที่ใช้สภาวะนี้เป็นเพราะว่า จากตารางที่ 4.1 หากใช้เวลาในการอบรังสีน้อยกว่า 35 วินาทีจะทำให้ได้ธาตุที่ควรวิเคราะห์ได้น้อยชนิดกว่าที่เวลาดังแต่ 35 วินาทีขึ้นไป นอกจากนี้การที่การศึกษาครั้งนี้ไม่เลือกอบรังสีด้วยเวลาที่มากกว่า 35 วินาทีขึ้นไปเป็นเพราะว่าจะทำให้ได้กัมมันตภาพรังสีสูงมากไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ สำหรับเวลาที่ใช้ในการสลายตัว จากตารางที่ 4.2 พบว่าหากปล่อยให้สลายตัวด้วยเวลาที่นานกว่า 1 นาทีขึ้นไปจะทำให้การวิเคราะห์ธาตุบางชนิดประสบปัญหา อาทิ การวิเคราะห์ Al หากปล่อยให้ใช้เวลาในการสลายตัวนานเกินไปจะทำให้สภาพไวของการวิเคราะห์ Al ไม่ดี เนื่องจาก Al สลายตัวไปหลายครั้งชีวิต (Al มีค่าครึ่งชีวิต 2.24 นาที) ส่วนเวลาในการนับรังสีนั้น หากใช้เวลาในการนับรังสีสูงกว่า 200 วินาทีจะทำให้ประสบปัญหาในการวิเคราะห์ Al เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปในเรื่องเวลาในการสลายตัว ส่วนหากใช้เวลาในการนับรังสีน้อยมากก็มีผลทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่มีปริมาณน้อยได้

4.1.2 ธาตุในกลุ่มที่ 5-6 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตปานกลาง)

ตารางที่ 4.4 – 4.6 แสดงถึงผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของธาตุในกลุ่มที่ 5-6 เพื่อใช้ในการเลือกเวลาในการอบรังสี เวลาในการสลายตัวและเวลาในการนับตัวอย่างที่ผ่านการอบรังสี

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอบรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการอบรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a	
6 ชั่วโมง	Br/(0)	K/(141)
8 ชั่วโมง	Br/(8)	K/(315)
12 ชั่วโมง	Br/(16)	K/(614)

a = ความแรงรังสีหลังจากทิ้งให้สลายตัว 38 ชั่วโมง และนับรังสีเป็นเวลา 1800 วินาที

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน

เวลาในการสลายตัว	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a	
14 ชั่วโมง	Br/(15)	K/(564)
38 ชั่วโมง	Br/(12)	K/(140)
62 ชั่วโมง	Br/(0)	K/(35)

a = ความแรงรังสีเมื่ออาบรังสีเป็นเวลา 8 ชั่วโมงและนับรังสีเป็นเวลา 1800 วินาที

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการนับรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a	
900 วินาที	Br/(0)	K/(383)
1800 วินาที	Br/(8)	K/(384)
3600 วินาที	Br/(7)	K/(392)

a = ความแรงรังสีหลังจากอาบรังสีเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งให้สลายตัว 38 ชั่วโมง

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ธาตุในกลุ่มที่ 5-6 คือ อาบรังสีด้วยท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการสลายตัว 38 ชั่วโมงและใช้เวลาในการนับรังสี 1800 วินาที ที่ใช้สภาวะนี้เป็นเพราะว่าจากตารางที่ 4.4 หากอาบรังสีด้วยเวลาน้อยจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เกิดปฏิกิริยา (n, γ) reaction ได้น้อย อาทิ Br สำหรับเวลาในการสลายตัวนั้นจากตารางที่ 4.5 ถ้าให้เวลาในการสลายตัว 38 ชั่วโมงเป็นเวลาเหมาะสมเพราะว่าถ้าใช้เวลาในการสลายตัวน้อยกว่านี้จะทำให้ความแรงรังสีสูงอาจก่อให้เกิดอันตรายในขณะที่ศึกษา ส่วนหากให้เวลาในการสลายตัวนานจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยได้ อาทิ Br หรือธาตุอื่นๆ ได้ สำหรับเวลาในการนับรังสีจากตารางที่ 4.6 ในการนับรังสีหากใช้เวลาน้อย เช่น 900 วินาที จะทำให้วิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่มีปริมาณน้อยทำได้ยาก ในขณะที่การใช้เวลาในการนับรังสีที่ 1800 หรือ 3600 วินาที ได้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่เวลา 1800 วินาทีเพราะทำให้ได้ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกับที่ใช้เวลา 3600 และไม่ใช่เวลานาน

4.1.3 ธาตุในกลุ่มที่ 7 (ธาตุในกลุ่มครึ่งชีวิตยาว)

ตารางที่ 4.7 – 4.9 แสดงถึงผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของธาตุในกลุ่มที่ 7 เพื่อใช้ในการเลือกเวลาในการอาบรังสี เวลาในการสลายตัวและเวลาในการนับตัวอย่างที่ผ่านการอาบรังสี

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการอบรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการอบรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a
24 ชั่วโมง	Zn(0)
46 ชั่วโมง	Zn(5)
58 ชั่วโมง	Zn(5)

a = ความแรงรังสีหลังจากทิ้งให้สลายตัว 12 วัน และนับรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการสลายตัวแตกต่างกัน

เวลาในการสลายตัว	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a
5 วัน	Zn(0)
12 วัน	Zn(3)
19 วัน	Zn(4)
26 วัน	Zn(3)
33 วัน	Zn(2)

a = ความแรงรังสีเมื่ออบรังสีเป็นเวลา 46 ชั่วโมง และนับรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเมื่อเวลาในการนับรังสีแตกต่างกัน

เวลาในการนับรังสี	ธาตุที่พบ/ความแรงรังสี (cpm) ^a
1800 วินาที	Zn(13)
3600 วินาที	Zn(15)
5400 วินาที	Zn(15)

a = ความแรงรังสีหลังจากอบรังสีเป็นเวลา 46 ชั่วโมง และทิ้งให้สลายตัว 19 วัน

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ธาตุในกลุ่มที่ 7 คือ อบรังสีด้วยท่อออกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง ใช้เวลาในการสลายตัว 19 วันและใช้เวลาในการนับรังสี 3600 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.7 – 4.9

4.2 ความถูกต้องของการวิเคราะห์

จากการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โดยใช้สารมาตรฐานอ้างอิง เป็นจำนวน 10 ครั้ง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการศึกษาความถูกต้องของธาตุที่วิเคราะห์ (n = 10)

ธาตุ	สารมาตรฐาน อ้างอิง	ความเข้มข้น		เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาดสัมพัทธ์
		การทดลองนี้	ค่ารับรอง	
Al	NIST 1568a	4.5 ppm	4.4 ppm	2.2
As	NIST 1568a	0.28ppm	0.29ppm	-3.4
Br	NIST 1568a	7.9 ppm	8.0 ppm	-1.3
Ca	NIES No. 9	1.29 %	1.34 %	-3.7
Cl	NIST 1568a	298 ppm	300 ppm	-0.6
Cr	NIST 8704	118.1 ppm	121.9 ppm	-3.1
Cu	NIST 1568a	2.5 ppm	2.4 ppm	4.2
Fe	NMIJ 7302-a	5.24 %	5.40 %	-3.0
K	NIST 1568a	0.126 %	0.128 %	-1.6
Mg	NIST 1568a	0.055 %	0.056 %	-1.8
Mn	NIST 1568a	19.4 ppm	20.0 ppm	-3.0
Se	ACSP DORM-1	1.67ppm	1.62ppm	3.1
Zn	NIST 1568a	19.7 ppm	19.4 ppm	1.5

จากตารางที่ 4.10 จากการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละชนิด เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าอ้างอิงแล้วพบว่ามีความผิดพลาดสัมพัทธ์ไม่เกิน 10%

4.3 ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์

จากการศึกษาครั้งนี้ได้ตรวจสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์โดยทำการวิเคราะห์กับสารมาตรฐานอ้างอิงเป็นจำนวน 10 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการศึกษาความเที่ยงของธาตุที่วิเคราะห์ (n = 10)

ธาตุ	สารมาตรฐาน อ้างอิง	ความเข้มข้น		เปอร์เซ็นต์ของค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
Al	NIST 1568a	4.5	ppm \pm 0.329	7.3
As	NIST 1568a	0.28	ppm \pm 0.0125	4.5
Br	NIST 1568a	7.9	ppm \pm 0.234	3.0
Ca	NIES No. 9	1.29	% \pm 0.071	5.5
Cl	NIST 1568a	298	ppm \pm 3.984	1.3
Cr	NIST 8704	118.1	ppm \pm 6.239	5.3
Cu	NIST 1568a	2.5	ppm \pm 0.191	7.6
Fe	NMIJ 7302-a	5.24	% \pm 0.224	4.3
K	NIST 1568a	0.126	% \pm 0.0029	2.3
Mg	NIST 1568a	0.055	% \pm 0.0026	4.8
Mn	NIST 1568a	19.4	ppm \pm 0.718	3.7
Se	ACSP DORM-1	1.67	ppm \pm 0.110	6.6
Zn	NIST 1568a	19.7	ppm \pm 0.958	4.9

จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าความเที่ยงโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละชนิด แสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ พบค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าไม่เกิน 10%

4.4 การคำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit, D_L)

การทดสอบและคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจวัด ทำการทดสอบจากสภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละชนิด โดยคำนวณตามวิธีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ดังภาคผนวก ค ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดด้วยเทคนิคการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน

ธาตุ	ค่าต่ำสุดของการตรวจวัด (ไมโครกรัม / กรัม)
Al	0.06
As	0.04
Br	0.12
Ca	14.94
Cd	1.44
Cl	4.63
Cr	0.40
Cu	0.85
Fe	17.69
I	0.38
K	15.28
Mg	39.93
Mn	0.58
Mo	0.54
Se	0.35
Sn	3.79
V	0.02
Zn	0.27

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดกับงานวิจัยอื่น พบว่า

Yeh, S. J., Chen, J., Ke, C. N., Hsu, S. T. and Tanaka S. [37] วิเคราะห์ข้าวโดยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน พบว่ามีค่าต่ำสุดของการตรวจวัดของ Al As Br Cd Cr Cu Fe Mn Mo และ Zn เท่ากับ 1 0.002 0.5 0.01 0.03 0.05 4 0.6 0.01 และ 0.5 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ และ Ca Cl K และ Mg เท่ากับ 0.004 0.003 0.002 และ 0.004 % w/w ตามลำดับ

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดในการศึกษาครั้งนี้ของธาตุบางชนิดมีค่าน้อยกว่าของงานวิจัยอื่น บางชนิดมากกว่า ทั้งนี้มีผลมาจากปริมาณความแรงรังสีจากตัวอย่างแต่ละชนิดไม่เท่ากันจึงทำให้ได้สัญญาณพื้นหลังแตกต่างกัน หรือถ้าวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเชิงก่อก

กัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน ในตัวอย่างชนิดเดียวกันก็อาจมีความแตกต่างได้ซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของนิวตรอนไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการแทรกสอดทางปฏิกิริยานิวเคลียร์ทำให้เกิดความผิดพลาดได้เช่นเดียวกัน

4.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

เตรียมสารละลายมาตรฐาน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันแล้วนำไปวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรงในสภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละชนิดโดยรายงานในรูปของ R^2 (coefficient of determination) ดังผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า coefficient of determination

ธาตุ	coefficient of determination (R^2)	ช่วงความเข้มข้น (ไมโครกรัม/กรัม)
Al	0.9977	0.1 - 1
As	0.9998	1.25 - 10
Ca	0.9999	12.5 - 100
Cd	0.9900	5 - 40
Cl	0.9971	2.5 - 50
Cr	0.9962	2.5 - 20
Cu	0.9963	1 - 10
Fe	0.9980	12.5 - 100
I	0.9977	0.25 - 1.5
K	0.9902	10 - 40
Mg	0.9998	5 - 100
Mn	0.9966	0.25 - 1.5
Mo	0.9990	5 - 40
Se	0.9946	2.5 - 20
Sn	0.9981	1 - 3
V	0.9987	0.05 - 0.5
Zn	0.9965	5 - 40

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ ค่า coefficient of determination ควรมีใกล้ 1 ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จากตารางที่ 4.13 พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียง 1 ทุกค่า ดังนั้นผลการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง [38]

4.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในข้าวและถั่วชนิดต่างๆ

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้คำนวณปริมาณธาตุชนิดต่างๆ หลังจากนำตัวอย่างไปอบรังสีและนำมาวัดปริมาณรังสีแกมมาตามสภาวะที่เหมาะสมดังรายละเอียดตามหัวข้อที่ 4.1 ทำการคำนวณปริมาณโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่เตรียมขึ้นและนำไปอบรังสีพร้อมกับตัวอย่าง (คังภาคผนวก ง) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณข้าวและถั่ว (N = 3)

	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว	ข้าวหอมมะลิสีนิล	ข้าวหอมมะลิสีชมพู	ถั่วเขียว	ถั่วดำ	ถั่วแดง	ถั่วแดงหลวง	ถั่วเหลือง	หมายเหตุ
ธาตุ										
Al(ppm)	2.7	2.2	9.1	9.1	10.8	14.1	20.2	35.7	20.4	3-100 ^c
As(ppm)	0.21	0.15	0.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2 ^a
Br(ppm)	0.62	0.46	0.75	ND	0.92	0.44	13.5	ND	2.2	2-8 ^c
Cd(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	≤0.02 ^c
Cl(ppm)	346.6	312.5	254.5	175.6	640.3	89.6	99.5	168.2	55.6	275-1550 ^c
Cr(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	≤0.035 ^b
Cu(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	16.4	0.22-0.90 ^b
Fe(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	160.0	ND	ND	ND	9.3-28.2 ^b
I (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	≤0.15 ^b
Mn(ppm)	33.3	13.6	55.7	26.5	12.2	20.3	15.1	15.3	33.6	0.6-2.3 ^b
Mo(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	≤0.045 ^b
Sc(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	≤0.055 ^b
Sn(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	250 ^a
V (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6-18 ^d
Zn(ppm)	21.7	20.5	26.3	21.4	8.5	36.9	8.2	34.9	58.1	2-13 ^b
Ca (% w/w)	ND	ND	0.02	ND	0.13	0.07	0.11	0.10	0.28	270-1000 ^b
K (% w/w)	0.28	0.09	0.24	0.21	1.31	1.51	1.20	1.87	1.99	925-4500 ^b
Mg (% w/w)	0.13	0.03	0.15	0.11	0.16	0.23	0.16	0.16	0.26	30-320 ^b

ND = ตรวจไม่พบ

a = ปริมาณธาตุปนเปื้อนมากที่สุดที่ยอมรับได้ประกาศโดยกระทรวงสาธารณสุขของไทย (ไมโครกรัม/กรัม) [39]

b = ปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย (มิลลิกรัม/วัน) [40]

c = ปริมาณสารที่ได้รับไม่ควรเกิน (มิลลิกรัม) [41]

d = ปริมาณสารอาหารที่ควรได้รับ (ไมโครกรัม/วัน) [42]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาเทคนิควิเคราะห์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนเพื่อหาปริมาณของธาตุในธัญพืช คือ ข้าวและถั่ว รวม 9 ชนิด สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ ธาตุที่มีครึ่งชีวิตสั้นจะอาบรังสีในระบบท่อลมเป็นเวลา 35 วินาที ทิ้งให้สลายตัว 1 นาที และนับรังสี 200 วินาที ธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลางอาบรังสีที่ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ด้วยเทอร์มัลนิวตรอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทิ้งให้สลายตัว 38 ชั่วโมง และนับรังสี 1800 วินาที ส่วนธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาวอาบรังสีที่ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ด้วยเทอร์มัลนิวตรอนเป็นเวลา 46 ชั่วโมง ทิ้งให้สลายตัว 19 วัน และนับรังสี 3600 วินาที ในการวิเคราะห์ตัวอย่างธัญพืชในสภาวะที่ได้เลือกมาจะพบธาตุ Al As Br Cl Cu Fe Mn Zn ในปริมาณคือ 2.2 – 35.7 0.15 – 0.21 0.44 – 13.5 55.6 – 640.3 16.3 – 16.5 158.9 – 161.1 12.2 – 55.7 8.2 – 58.1 ไมโครกรัม/กรัม และ Ca K Mg ในปริมาณ 0.02 – 0.28 0.09 – 1.99 0.03 – 0.26 % w/w ตามลำดับ จากการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนพบว่า มีขีดจำกัดของการตรวจวัดของ Al As Br Ca Cd Cl Cr Cu Fe I K Mg Mn Mo Se Sn V และ Zn เป็น 0.06 0.04 0.12 14.94 1.44 4.63 0.40 0.85 17.69 0.38 15.28 39.93 0.58 0.54 0.35 3.79 0.02 และ 0.27 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ ในการทดลองครั้งนี้ได้รายงานความถูกต้องของการวิเคราะห์ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ของ Al As Br Ca Cl Cr Cu Fe K Mg Mn Se และ Zn ได้เป็น 2.2 -3.4 -1.3 -3.7 -0.6 -3.1 4.2 -3.0 -1.6 -1.8 -3.0 3.1 และ 1.5 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์รายงานในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของ Al As Br Ca Cl Cr Cu Fe K Mg Mn Se และ Zn ได้เป็น 7.3 4.5 3.0 5.5 1.3 5.3 7.6 4.3 2.3 4.8 3.7 6.6 และ 4.9 ตามลำดับ สำหรับความเป็นเส้นตรงของธาตุที่วิเคราะห์ได้ทำการศึกษาความเป็นเส้นตรงของธาตุโดยรายงานในรูปของค่า coefficient of determination ของ Al As Ca Cd Cl Cr Cu Fe I K Mg Mn Mo Se Sn V และ Zn ได้เป็น 0.9977 0.9998 0.9999 0.9900 0.9971 0.9962 0.9963 0.9980 0.9977 0.9902 0.9998 0.9966 0.9990 0.9946 0.9981 0.9987 และ 0.9965 ตามลำดับ

ในการทดลองครั้งนี้ธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลางทำการอาบรังสีที่ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ธาตุบางชนิดคือ As และ Br ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้เนื่องจากธาตุเหล่านี้ไม่เหมาะสมกับการอาบรังสีที่ตำแหน่งดังกล่าวด้วยเทอร์มัลนิวตรอน แต่เหมาะที่จะอาบรังสีด้วยเอพิเทอร์มัลนิวตรอน ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงได้ทำการ

อาบรังสีตัวอย่างธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลางเพิ่ม โดยทำการอาบรังสีที่ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งที่มีการหุ้มแคดเมียม โดยใช้สภาวะเดียวกันกับที่ได้ทำการทดลองของธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลาง ได้ปริมาณธาตุพิษของ As และ Br เป็น 0.15 – 0.21 และ 0.44 – 13.5 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ

การศึกษารังสีนี้ให้ความเที่ยงตรงและความถูกต้องเหมาะสมสำหรับการใช้วิเคราะห์ตัวอย่างข้าวและถั่วได้ดี สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้หลายธาตุพร้อม ๆ กันโดยเวลาในการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละกลุ่มที่สนใจ จากการศึกษาทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในแต่ละธาตุเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาปริมาณธาตุในธัญพืชชนิดอื่นได้ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนในรังสีนี้แม้ว่าจะศึกษาวิเคราะห์ธาตุทั้งหมด 18 ชนิด พบธาตุในตัวอย่างทั้งหมดเพียง 11 ชนิด แต่ในการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 18 ชนิด ยังมีขั้นตอนในการทดลองแตกต่างกันมาก ประการแรกในการวิเคราะห์แต่ละครั้งต้องแบ่งกลุ่มวิเคราะห์แต่ละกลุ่มตามค่าครึ่งชีวิตคือ ธาตุที่มีครึ่งชีวิตสั้น ปานกลางและยาวทำให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ ประการที่สองหลังจากแยกกลุ่มธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในกลุ่มดังกล่าวข้างต้นแล้ว ธาตุแต่ละชนิดก็มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์แตกต่างกันอีกซึ่งเป็นผลมาจาก ค่าครึ่งชีวิตของธาตุแต่ละชนิด ภาคตัดขวาง เวลาในการนับรังสี ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ ในการวิเคราะห์ธาตุครึ่งชีวิตปานกลางซึ่งพิจารณาตามค่าครึ่งชีวิตแล้วน่าจะวิเคราะห์พร้อมกันได้โดยในการศึกษารังสีนี้มีธาตุที่สนใจ คือ As Br Cd Mo และ K แต่ในการศึกษาพบว่าการอาบรังสีด้วยเทอร์มัลนิวตรอนในท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอน $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ นั้น ประสบปัญหาในการวิเคราะห์เพราะกัมมันตภาพรังสีของตัวอย่างสูง ทำให้หาขีดจำกัดของการตรวจวัดธาตุ As Br Cd และ Mo ได้ไม่ดีจึงจำเป็นต้องแยกวิเคราะห์อีกด้วยเอพิเทอร์มัลนิวตรอนในท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งที่มีการหุ้มแคดเมียม ในขณะที่การวิเคราะห์ K ด้วยเทอร์มัลนิวตรอนทำได้ดี ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้าวและถั่วให้ได้พร้อมกันทุกธาตุ จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมค่อนข้างมาก หลังจากนั้นเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมเริ่มต้นแล้วการวิเคราะห์โดยเลือกเฉพาะธาตุที่จะทำการศึกษาก็ทำได้ง่ายและให้ผลการทดลองที่ดีมากกว่า

สำหรับในการศึกษารังสีนี้แม้ว่าผลที่ได้จากการศึกษาทางสถิติออกมาจะเป็นที่ยอมรับได้คือ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าน้อย และค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีค่าที่ยอมรับได้แต่หากพิจารณาให้ละเอียดจะพบว่ากรณีที่ %RSD สูง ทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยเพราะค่าดังกล่าวเกิดจากการใช้ค่าเฉลี่ย ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการวัดรังสีซึ่งใช้ช่วงการปรับเทียบมาตรฐาน ช่วงพลังงานเดียวกันตลอดประมาณ 81.0 - 3090 keV ทั้งที่ในการวิเคราะห์ธาตุใน

กลุ่มค่าครึ่งชีวิตสั้นต้องการใช้ช่วงพลังงาน 332.04 keV – 3084.54 keV ธาตุในกลุ่มค่าครึ่งชีวิตปานกลางต้องการใช้ช่วงพลังงาน 140.47 - 1524.58 keV ธาตุในกลุ่มค่าครึ่งชีวิตยาวต้องการใช้ช่วงพลังงาน 264.66 - 1115.52 keV แต่จำเป็นต้องใช้ช่วงพลังงานเดียวกันทำให้พลังงานต่อจำนวนช่องมีค่าสูงทำให้การแยกพีคไม่ดีน่าจะส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์บ้าง ซึ่งจุดนี้หากมีการปรับเปลี่ยนก็น่าจะส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ที่ดีขึ้นรวมทั้งน่าจะทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยได้ดีขึ้นและสามารถหาค่าต่ำสุดของการตรวจวัดได้ดีขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wayne, S., **Rice Origin, History, Technology, and Production.** New Jersey : John Wiley & Sons. 2003. pp. 1-4.
- [2] Leonard, W. H. and Martin, J. H., **Cereal Crop.** New York : Macmillan. 1963. pp. 607-612.
- [3] Salunkhe, D. K. and Deshpande, S. S., **Food of Plant Origin Production, Technology and Human Nutrition.** New York : Van Nostrand Reinhold. 1991. pp. 11-15, 137-147.
- [4] Soliman, K. and Zikovsky, L., "Determination of Br, Ca, Cl, Co, Cu, I, K, Mg, Mn, Na, Rb, S, Ti and V in Cereals, Oils, Sweeteners and Vegetables Sold in Canada by Neutron Activation Analysis." **J. Food Compos. Anal.** vol. 12, 1999. pp. 85-89.
- [5] Das, P., Raghuramulu, N. and Rao, K.C., "Determination of in Vitro Availability of Iron from Common Foods." **J. Hum. Ecol.** vol. 18, no. 1, 2005. pp. 13-20.
- [6] D'Ilio, S., Alessandrelli, M., Cresti, R., Forte, G. and Caroli, S., "Arsenic Content of Various Types of Rice as Determined by Plasma-based Techniques." **Microchem. J.** vol. 73, 2002. pp. 195-201.
- [7] Demirbas, A., " β -Glucan and Mineral Nutrient Contents of Cereals Grown in Turkey." **Food Chem.** vol. 90, 2005. pp. 773-777.
- [8] Aremu, M. Olaleke, Aremu, M. Olaofe, Aremu, M. Olorunfemi and Akintayo, T. Emmanuel., "A Comparative Study on the Chemical and Amino Acid Composition of Some Nigerian Under-Utilized Legume Flours." **Pakistan J. Nutr.** vol. 5, no. 1, 2006. pp. 34-38.
- [9] Acar, Z., Ayan, L. and Gulser, C., "Some Morphological and Nutritional Properties of Legumes under Natural Conditions." **Pakistan J. Biol. Sci.** vol. 4, no. 11, 2001. pp. 1312-1315.
- [10] International Atomic Energy Agency. "Use of research reactors for neutron activation analysis." in Vienna, **Report of an Advisory Group meeting 22 – 26 June 1998.** Vienna : Physics Section IAEA. 2001. pp. 31, 23 – 25.
- [11] International Atomic Energy Agency. **Analytical Applications of Nuclear Techniques.** Vienna : IAEA. 2004. pp. 78 – 80, 85 – 88, 96 – 99, 150 – 154, 177 – 180.

- [12]Molnar, Zs., “**Neutron Activation Analysis.**” [Online]. Available :
http://www.reak.bme.hu/nti/Education/Wigner_Course/WignerManuals/Budapest/NEUTRON_ACTIVATION_ANALYSIS.htm. 2005.
- [13]Parry, J. S., **Activation Spectrometry in Chemical Analysis.**
 New York : John Wiley & Sons. 1991. pp. 8-18, 39-41, 20-29, 56-66.
- [14]Peisach, M., **Nondestructive Activation Analysis.** Amsterdam : Elsevier. 1981.
 pp.93-111.
- [15]Gilmore, G. and Hemingway, D. J., **Practical Gamma-Ray Spectrometry.** Chichester :
 John Wiley & Sons. 1995. pp. 24-27, 122.
- [16]Lilley, J. S., **Nuclear Physics.** Chichester : John Wiley & Sons. 2001. pp. 158-162.
- [17]Tolgyessy, J. and Kyrs, M., **Radioanalytical Chemistry II.** Chichester : Ellis Horwood.
 1989. pp. 27-30, 34-37.
- [18]Win, T. D., “Neutron Activation Analysis(NAA).” **AU J. T.** vol. 8, no. 1. 2004.
 pp. 8 - 14
- [19]Filby, R. H., “Part IX. Neutron Activation Analysis(Technical Report).”
Pure Appl. Chem. vol. 67, no. 11. 1995. pp. 1929-1941.
- [20]Chatt, A., Dang, H. S., Fong, B. B., Jayawickreme, C. K., Mcdowell, L. S. and Pegg,
 D.L., “Determination of Trace Elements in Food by Neutron Activation Analysis.”
J. Radioanal. Nucl. Ch. vol. 124, 1988, pp. 65-77.
- [21]Mannan, A., Waheed, S. and Qureshi, I. H., “Trace Element Evaluation of Rice and Husk
 by INAA.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.** vol. 134, 1989, pp. 161-172.
- [22]Mannan, A., Waheed, S. and Qureshi., “Concentration and Distribution of Toxic
 Elements in Rice and Husk.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.** vol. 140, 1990, pp. 91-102.
- [23]Laiyan, S., Fengying, L., Rongwei, S. and Houxi, Z., “Determination and Evaluation of
 Some Trace Elements in Chinese Foodstuffs.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.** vol. 151, 1991,
 pp. 277-285.
- [24]Mannan, A., Waheed, S., Ahmad, S. and Qureshi, I. H., “Dietary Evaluation of Toxic
 Elements Through Integrated Diet.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.** vol. 162, 1992,
 pp. 111-123.
- [25]Sarmani, S., Wood, A. K., Hamzah, Z. and Majid, A. A., “Analysis of Toxic Trace

- Elements in Sea Food Samples by Neutron Activation.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.**
vol. 169, 1993, pp. 255-258.
- [26]Sun, J., Zhao, H. and Wang, Y., “Study on the Contents of Trace Rare Earth Elements and their Distribution in Wheat and Rice Samples by RNAA.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.**
vol. 179, 1994, pp. 377-383.
- [27]Ratner, R. T. and Vernetson, W. G., “Multielement Comparison of Instrumental Neutron Activation Analysis Techniques using Reference Materials.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.**
vol. 192, 1995, pp. 351-359.
- [28]Pham Thi Huynh, M., Carrot, F., Chu Pham Ngoc, S., Dang Vu, M. and Revel, G.,
“Determination of Rare Earth Elements in Rice by INAA and ICP-MS.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.** vol. 217, 1997, pp. 95-99.
- [29]Nichols, T. A., Morris, J. S., Spate, V. L., Tharp, C. J., Baskett, C. K., Horsman, T. L., Mason, M. M. and Cheng, T. P., “Longitudinal Study of Iodine in Market Milk and Infant Formula via Epiboron Neutron Activation Analysis.” **J. Radioanal. Nucl. Ch.**
vol. 236, 1998, pp. 65-69.
- [30]Balaji, T., Acharya, R.N., Nair, A.G.C., Reddy, A.V.R., Rao, K.S., Naidu, G.R.K. and Manohar S.B., “Multielement Analysis in Cereals and Pulses by k_0 Instrumental Neutron Activation Analysis.” **Sci. Total Environ.** vol. 253, 2000, pp. 75-79.
- [31]Zaichick, V., “Instrumental Neutron Activation Analysis of Minor and Trace Elements in Food in the Russian Region that suffered from the Chernobyl Disaster.” **Food and Nutrition Bulletin.** vol. 23, no.3, 2002, pp. 191-194.
- [32]Haciseferogullari, H., Gezer, I., Bahtiyarca, Y. and Menges, H. O., “Determination of some Chemical and Physical Properties of Sakiz Faba Bean (*Vicia faba* L. *Var. major*).” **J. Food and Eng.** vol. 60, 2003, pp. 475-479.
- [33]Vassileva, E. and Quétel C. R., “Certification Measurement of the Cadmium, Copper and Lead Contents in Rice using Isotope Dilution Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.” **Anal. Chim. Acta.** vol. 519, 2004, pp. 79-86.
- [34]Howe, A., Fung, L. H., Lalor, G., Rattary R. and Vutchkov, M., “Elemental Composition of Jamaican Foods 1: A Survey of Five Food Crop Categories.” **Environ. Geochem. Hlth.**
vol. 27, 2005, pp. 19-30.
- [35]Vivek, S. and Garg, A. N., “Availability of Essential Trace Elements in Indian Cereals,

- Vegetables and Spices Using INAA and the Contribution of Spices to Daily Dietary Intake.” **Food Chem.** vol. 94, 2006, pp. 81-89.
- [36] Acharya, R., Nair, A.G.C., Sudarshan, K., Reddy, A.V.R. and Goswami A., “Development and Applications of the k_0 -based Internal Mono Standard INAA Method.” **Appl. Radiat. Isotopes.** vol. 65, 2007, pp. 164-169.
- [37] Yeh, S. J., Chen, J., Ke, C. N., Hsu, S. T. and Tanaka S., “Neutron Activation Analysis for Trace Elements in Unpolished Rice.” **Anal Chim Acta.** vol 87, 1976. pp. 119-124.
- [38] Richard C. Graham, **Data Analysis for the Chemical Sciences.** New York : VCH. 1993. pp. 223-226.
- [39] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข. ฉบับที่ 98 (พ.ศ. 2529). เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน. ราชกิจจานุเบกษาฉบับพิเศษ เล่มที่ 103 ตอนที่ 23 (ลงวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2529).
- [40] คณะกรรมการจัดทำข้อกำหนดสารอาหารที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย. **ปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย พ.ศ. 2546.** กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข. 2546.
- [41] Nielsen, F. H., **Other Trace Elements. In: Present Knowledge in Nutrition (Ziegler, E. E. and Filer, L. J. Jr., eds.).** 3rd ED. Washington, DC. : International Life Sciences Institute Press. 1996. pp. 353-357.
- [42] Pennington, J.A. and Jones, J. W., “Molybdenum, nickel, cobalt, vanadium and strontium in total diets.” **J. Am. Diet. Assoc.** vol. 87, 1987, pp. 1644-1650.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลทางนิวเคลียร์ของธาตุ

นิวไคลด์ เป้าหมาย	ความอุดม สมบูรณ์ของ ไอโซโทป	ภาคตัดขวาง(barn)	นิวไคลด์ กัมมันตรังสี	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงาน (keV)
²⁶ Mg	11.01	0.036	²⁷ Mg	9.462 m	1014.43
²⁷ Al	100	0.226	²⁸ Al	2.2406 m	1778.99
³⁷ Cl	24.2	0.445	³⁸ Cl	37.24 m	2167.68
⁴¹ K	6.73	1.38	⁴² K	12.36 h	1524.58
⁴⁸ Ca	0.187	1.12	⁴⁹ Ca	8.716 m	3084.54
⁵¹ V	99.8	4.79	⁵² V	3.75 m	1434.08
⁵⁰ Cr	4.35	15.2	⁵¹ Cr	27.704 d	320.08
⁵⁵ Mn	100	13.3	⁵⁶ Mn	2.5785 h	1810.77
⁵⁸ Fe	0.28	1.31	⁵⁹ Fe	45.51 d	1098.2
⁶⁵ Cu	30.8	2.48	⁶⁶ Cu	5.1 m	1039.35
⁶⁴ Zn	48.6	0.726	⁶⁵ Zn	243.8 d	1115.52
⁷⁵ As	100	3.86	⁷⁶ As	1.097 d	559.08
⁷⁴ Se	0.9	50.4	⁷⁵ Se	119.77 d	264.66
⁸¹ Br	49.3	0.208	⁸² Br	1.4708 d	554.3
⁹⁸ Mo	24.1	0.131	⁹⁹ Mo	2.7477 d	140.47
¹¹⁴ Cd	28.7	0.23	¹¹⁵ Cd	2.228 d	336.3
¹²⁴ Sn	5.79	0.119	¹²⁵ Sn	9.5 m	332.04
¹²⁷ I	100	4.04	¹²⁸ I	25.0 m	442.92

ภาคผนวก ข

มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน[39]

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข
ฉบับที่ 98 (พ.ศ.2529)
เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 5 และมาตรา 6(3) แห่งพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ.2522 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงสาธารณสุขออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ให้ยกเลิกประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 80 (พ.ศ.2527) เรื่อง กำหนดมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน ลงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2527

ข้อ 2 ให้อาหารที่มีสารปนเปื้อนที่ผลิตเพื่อจำหน่าย นำเข้าเพื่อจำหน่าย หรือที่จำหน่าย เป็นอาหารที่กำหนดมาตรฐาน

ข้อ 3 สารปนเปื้อน หมายความว่า สารที่ปนเปื้อนกับอาหารซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต กรรมวิธีการผลิต โรงงานหรือสถานที่ผลิต การดูแลรักษา การบรรจุ การขนส่งหรือการเก็บรักษา หรือ เกิดเนื่องจากการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม

ข้อ 4 อาหารที่มีสารปนเปื้อนต้องมีมาตรฐาน โดยตรวจพบสารปนเปื้อนได้ไม่เกินข้อกำหนด ดังต่อไปนี้

(1) โลหะ

(ก) ดีบุก 250 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

(ข) สังกะสี 100 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

(ค) ทองแดง 20 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

(ง) ตะกั่ว 1 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เว้นแต่อาหารที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนตามธรรมชาติ

ในปริมาณสูง ให้มีได้ตามที่ได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

(จ) สารหนู 2 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

(ฉ)ปรอท 0.5 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารทะเล และไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัม

ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารอื่น

(2) อฟลาทอกซิน 20 ไมโครกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

(3) สารปนเปื้อนอื่น ตามที่ได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

ข้อ 5 ประกาศฉบับนี้ มิให้ใช้บังคับแก่อาหารที่ผลิตเพื่อจำหน่าย นำเข้าเพื่อจำหน่าย หรือที่จำหน่าย ที่ได้มีประกาศกระทรวงสาธารณสุขกำหนดให้เป็นอาหารควบคุมเฉพาะ หรืออาหารที่กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน และในประกาศกระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดปริมาณของสารปนเปื้อนไว้โดยเฉพาะหรือกำหนดไว้เป็นอย่างอื่นแล้ว

ประกาศฉบับนี้ ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 21 มกราคม พ.ศ.2529

มารุต นุนนาค

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงสาธารณสุข

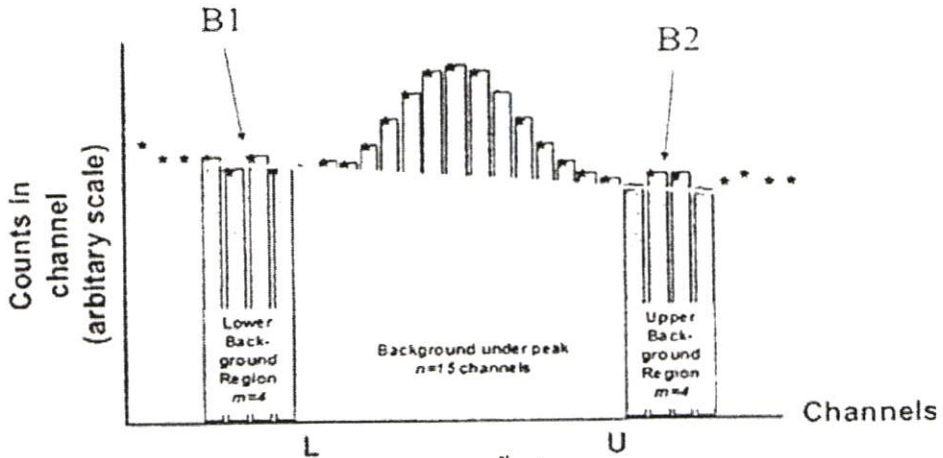
(ราชกิจจานุเบกษาฉบับพิเศษ เล่มที่ 103 ตอนที่ 23 ลงวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2529)

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัด

ในการคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจวัดนั้น ทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด โดยทำการคำนวณตามวิธี International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

ในการทดลองเพื่อหาขีดจำกัดของการตรวจวัดของยูเรเนียมในตัวอย่างชนิดหนึ่งพบว่าได้ผลการทดลองดังภาพที่ ก.1 และคำนวณค่า B1 + B2 ได้เป็น 119 และในการศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม 5 ไมโครกรัม/กรัม และทำการทดลองเช่นเดียวกับในตัวอย่างได้พื้นที่พีคเป็น 3950



ภาพที่ ก.1 แสดงการหาขีดจำกัดในการตรวจวัดจากพื้นที่พีค

คำนวณขีดจำกัดของการตรวจวัดได้โดยนำค่าที่ได้มาเทียบกับพื้นที่ได้พีคของสารมาตรฐาน

$$B = \frac{119 \times 15}{8} = 223.13$$

$$D_L = 2.71 + 3.29 \sqrt{223.13(1 + 15/8)} = 86.04$$

พื้นที่ได้พีคของยูเรเนียม 3950 มีเนื้อสารอยู่ 5 ไมโครกรัม/กรัม

ถ้าพื้นที่ได้พีคของยูเรเนียม 86.04 มีเนื้อสารอยู่ $\frac{5 \times 86.04}{3950} = 0.11$ ไมโครกรัม

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุ

การคำนวณหาปริมาณธาตุในตัวอย่างหรือในสารละลายสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธี relative method ใช้สูตรดังนี้

$$M_1 = \frac{(A_1 \times W_2)}{(A_2 \times W_1)} \times M_2 \quad (\text{ง.1})$$

- เมื่อ W_1 = น้ำหนักของสารตัวอย่าง
 W_2 = น้ำหนักของสารมาตรฐานอ้างอิง
 A_1 = ความแรงรังสี (Peak area) ของธาตุในตัวอย่าง
 A_2 = ความแรงรังสี (Peak area) ของธาตุในสารมาตรฐานอ้างอิง
 M_1 = ความเข้มข้นของธาตุในตัวอย่าง
 M_2 = ความเข้มข้นของธาตุในสารมาตรฐานอ้างอิง

ในการทดลองหาปริมาณแมงกานีสในตัวอย่างชนิดหนึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

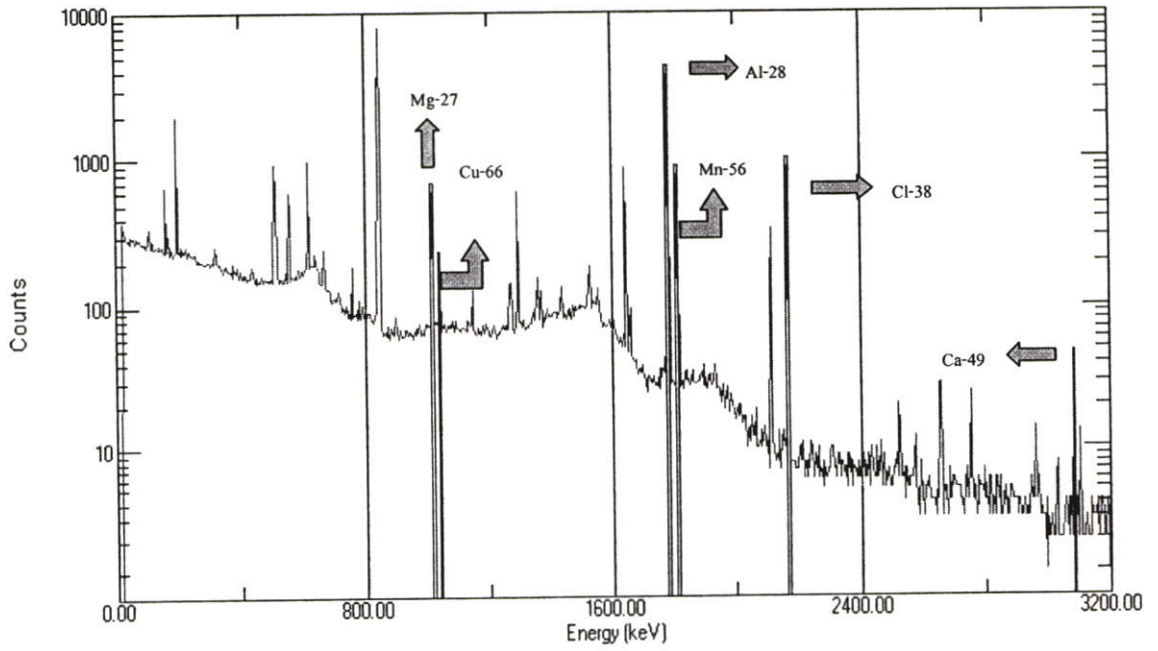
สาร	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	น้ำหนักสารมาตรฐานอ้างอิง (กรัม)	ความเข้มข้นสารมาตรฐานอ้างอิง (ไมโครกรัม/กรัม)	พื้นที่ใต้พีคสารตัวอย่าง	พื้นที่ใต้พีคสารมาตรฐานอ้างอิง
แมงกานีส	0.0335	0.0333	5	13661	1311

คำนวณปริมาณแมงกานีสในตัวอย่างได้ดังนี้

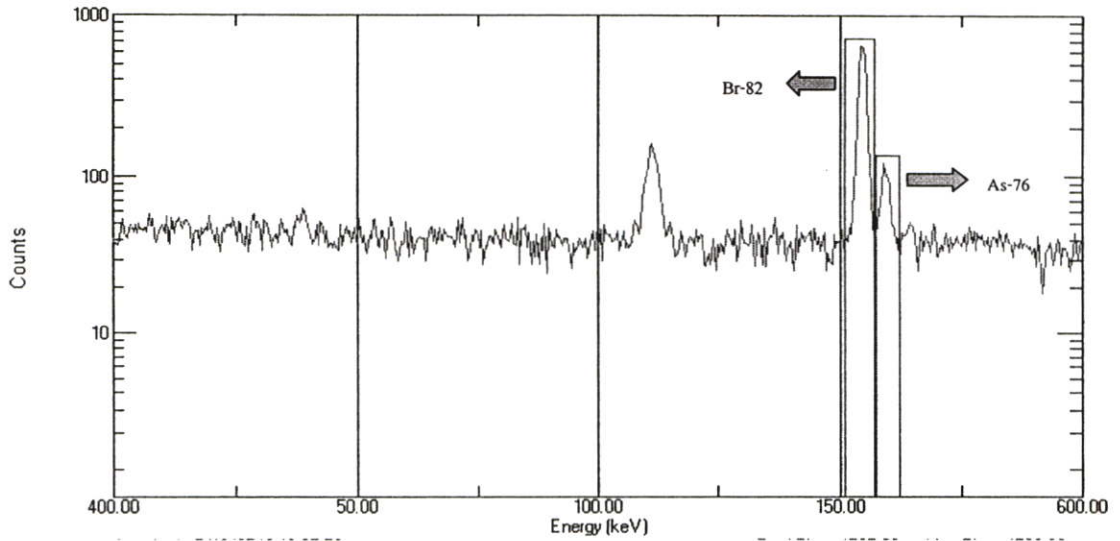
$$M_1 = \frac{13661 \times 0.0333}{1311 \times 0.0335} \times 5 = 51.8$$

ดังนั้นความเข้มข้นของแมงกานีสในตัวอย่างนี้คือ 51.8 ไมโครกรัม/กรัม

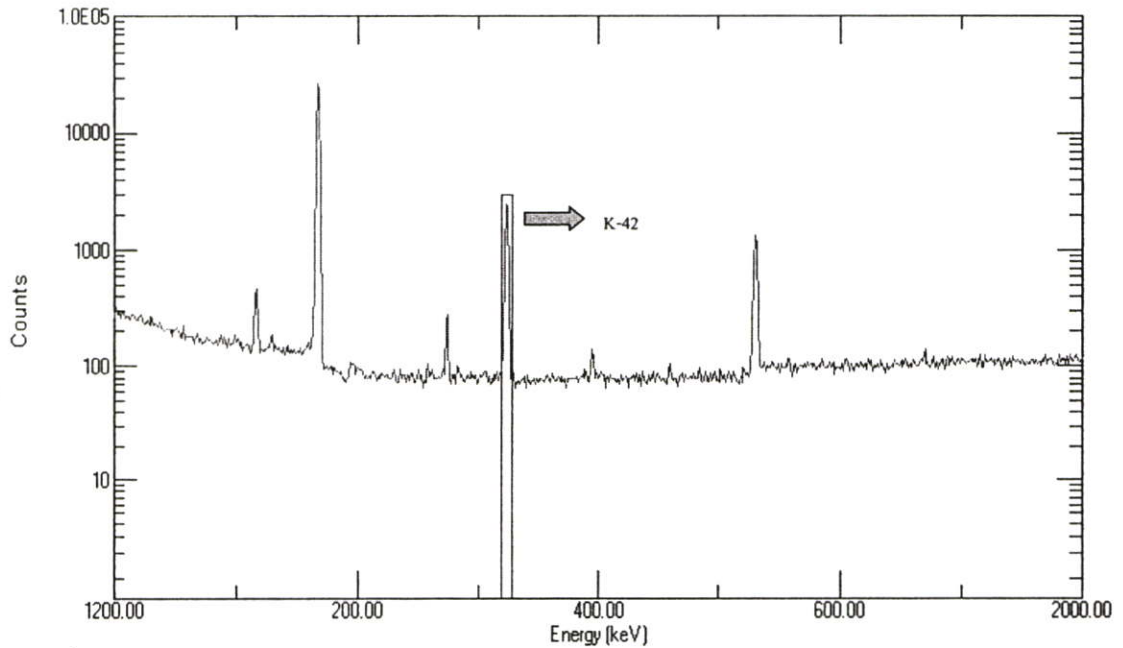
ภาคผนวก จ
สเปกตรัมของรังสีแกมมา



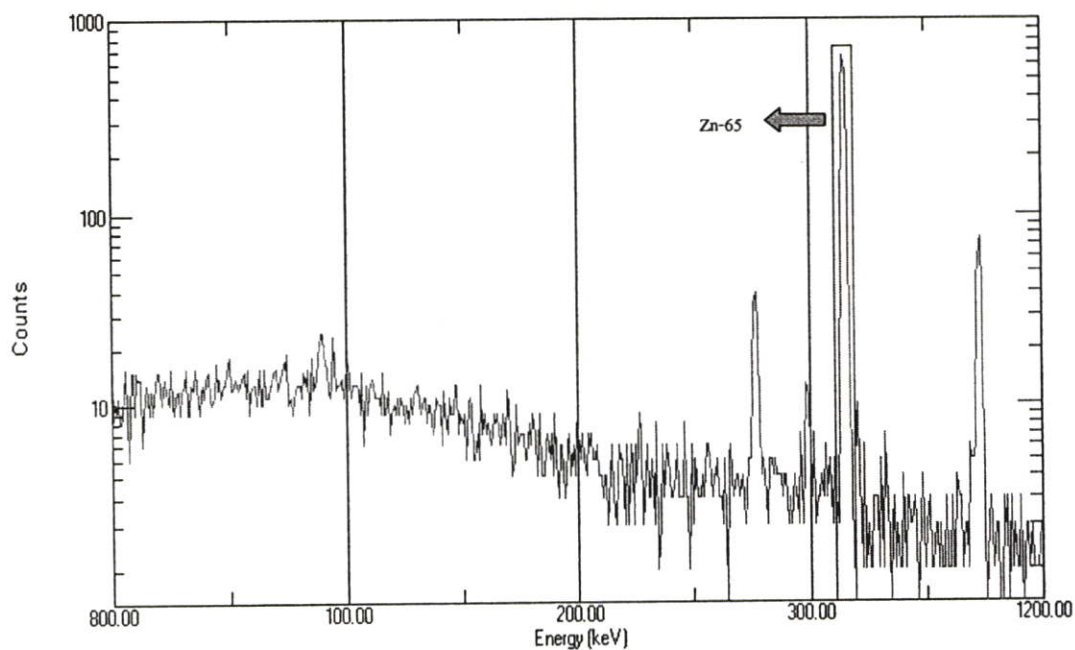
ภาพที่ จ.1 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีด้วยระบบท่อลมที่ความเข้มข้นของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{17} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 35 วินาที และปล่อยให้สลายตัว 1 นาที ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 200 วินาที



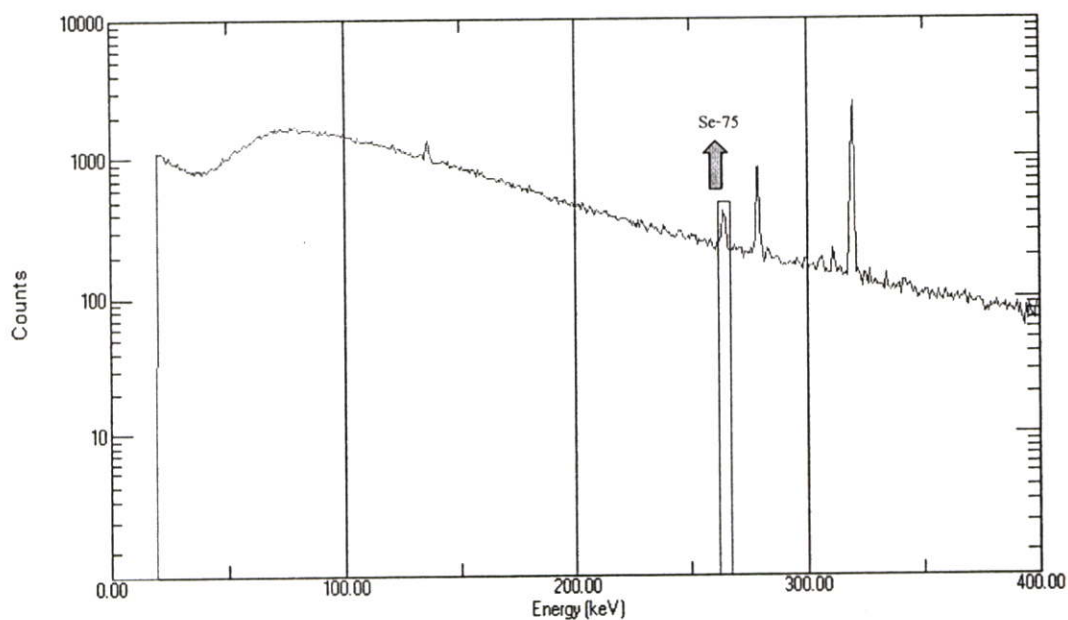
ภาพที่ จ.2 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีที่ท่อที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์บริเวณที่หุ้มแคดเมียมด้วยความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 38 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 1800 วินาที



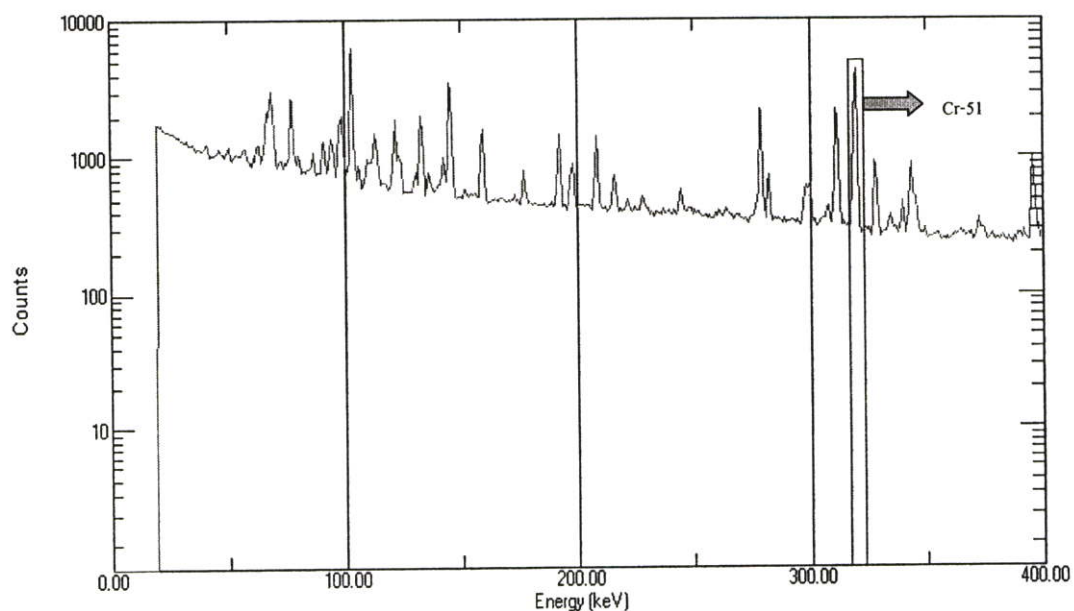
ภาพที่ จ.3 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอาบรังสีที่ท่อที่นอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $2 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 38 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 1800 วินาที



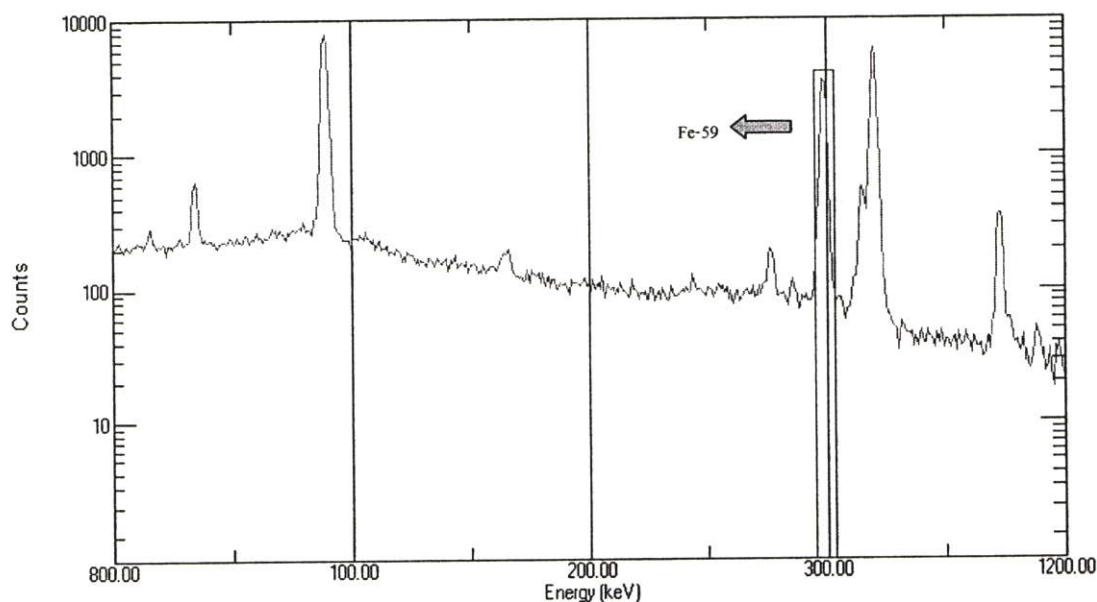
ภาพที่ จ.4 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 1568a หลังจากอบรังสีที่
 ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา
 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที



ภาพที่ จ.5 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง ACSP DORM-1 หลังจากอบ
 รังสีที่ท่อนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
 เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที



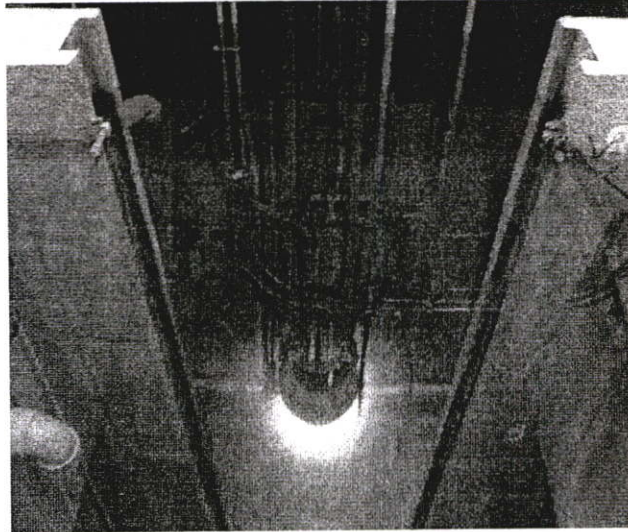
ภาพที่ จ.6 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NIST 8704 หลังจากอบรังสีที่ห้องนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที



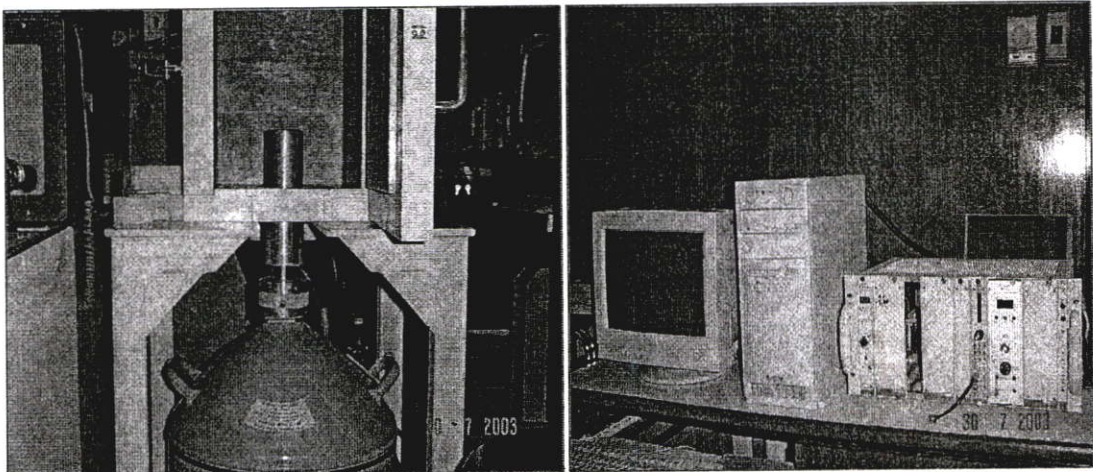
ภาพที่ จ.7 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานอ้างอิง NMIJ 7302-a หลังจากอบรังสีที่ห้องนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเข้มของรังสีนิวตรอนคือ $1 \times 10^{15} \text{ n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 46 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัว 20 วัน ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 3600 วินาที

ภาคผนวก ฉ

อุปกรณ์ในการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน



ภาพที่ ฉ.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย-1 (ปปว-1) ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ



ภาพที่ ฉ.2 แสดงเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาพร้อมด้วยหัววัดรังสีชนิดไฮเปอร์เพียวเจอร์เมเนียม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล วรพจน์ เพิ่มน้ำทิพย์

วัน เดือน ปีเกิด 26 พฤษภาคม 2523 ที่ จ.กรุงเทพมหานคร

ที่อยู่ 336 ถ.พัฒนาการ เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง
กรุงเทพมหานคร 10250 โทร. 02-3147873, 081-8193884

E-mail address jamesvorapot@yahoo.com

ประวัติการศึกษา 2541-2545 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จ. กรุงเทพมหานคร

 2535-2541 มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย
โรงเรียนปทุมคงคา จ.กรุงเทพมหานคร