

การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน



นางสาว พรรณี เสถียรศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-262-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IN SITU ANALYSIS OF SOME MAJOR ELEMENTS IN SOIL
USING NEUTRON TECHNIQUES



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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

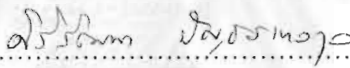
ISBN 974-334-262-1

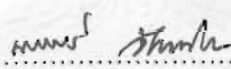
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน
โดย นางสาว พรรณี เสถียรศรี
ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์

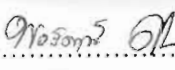
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

พรรณณี เสถียรศรี : การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน (IN SITU ANALYSIS OF SOME MAJOR ELEMENTS IN SOIL USING NEUTRON TECHNIQUES) อ. ที่ปรึกษา : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์, 122 หน้า. ISBN 974-334-262-1.

การวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เทคนิคนิวตรอนในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และเชิงกึ่งปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ เทคนิคที่ใช้มีสามเทคนิค คือ เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ส่วนสำคัญของระบบวิเคราะห์ที่ใช้ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนอะเมริเซียม - 241 / เบริลเลียม ความแรง 1 คูรี (37 กิกะเบคเคอเรล) และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงชนิดรีเวอร์สอเล็กโทรดแบบที่ใช้งานในภาคสนาม ผลการวิจัยพบว่า มี จำนวน 8 ธาตุ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน คือ ไฮโดรเจน โบรอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม ไททาเนียม และเหล็ก และมี 5 ธาตุ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน คือ ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน โปแตสเซียม และเหล็ก ส่วนเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันเหมาะสำหรับการวิเคราะห์โซเดียม อะลูมิเนียม คลอรีน และแมงกานีส การทดลองวิเคราะห์ธาตุเชิงกึ่งปริมาณ ณ พื้นที่ ได้ใช้ผลการวิเคราะห์ดินโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการ มาสร้างกราฟเปรียบเทียบและใช้พีคแกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอนของอินเดียมในหัววัดรังสีในการปรับแก้ความเข้มรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ผลการทดลองวิเคราะห์ธาตุ 5 ธาตุ เชิงกึ่งปริมาณ ณ พื้นที่ 8 แห่ง ได้ผลดังนี้ คือ จากเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ได้ปริมาณ ซิลิกอน ไททาเนียม และเหล็ก อยู่ในช่วง 256.53 – 453.75 , 3.54 – 8.75 และ 10.95 – 65.97 g/kg ตามลำดับ จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ณ พื้นที่ ได้ปริมาณอะลูมิเนียมและแมงกานีส อยู่ในช่วง 11.26 – 67.11 และ 0.11 – 2.28 g/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวัดรังสีแกมมาโดยตรง ณ พื้นที่ จากโปแตสเซียม - 40 ได้ปริมาณโปแตสเซียมอยู่ในช่วง 0.23 - 1.26 % ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ยังได้ผลไม่แน่นอน เนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบ และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการมีความแปรปรวนสูง

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต พรรณี เสถียรศรี
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา นเรศร์ จันทน์ขาว
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์

4070349721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD : NEUTRON TECHNIQUES / ELEMENTS IN SOIL / ELEMENTAL ANALYSIS / PROMPT CAPTURED GAMMA RAYS / IN SITU ANALYSIS

PHANNEE SATIANSRI : IN SITU ANALYSIS OF SOME MAJOR ELEMENTS IN SOIL USING NEUTRON TECHNIQUES. (IN SITU ANALYSIS OF SOME MAJOR ELEMENTS IN SOIL USING NEUTRON TECHNIQUES) THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR : PORNRAT SRISAWAD, 122 pp. ISBN 974-334-262-1.

In this research, neutron techniques were used for in situ qualitative and semi-quantitative analysis of some elements in soil. The techniques used were the prompt captured gamma-ray analysis (PGA), the prompt neutron inelastic scattered gamma-ray analysis (PISGA) and the neutron activation analysis (NAA). A 1 Ci (37 GBq) Am-241/Be and a portable reverse electrode high purity germanium detector were the major parts of the analysis system. The results showed that 8 elements namely H, B, O, Al, Si, Ca, Ti and Fe could be determined by the prompt captured gamma-ray analysis technique while 5 elements namely O, Al, Si, K and Fe could be determined by the prompt inelastic scattered gamma-ray analysis technique. The neutron activation analysis technique was found suitable for Na, Al, Cl and Mn. The laboratory analysis results from the NAA was used to calibrate the system for in situ analysis. Furthermore, the prompt captured gamma-ray peak of Indium from Indium in the detector was used to normalize the peak intensities of other elements. The in situ analysis results of 5 elements obtained from 8 areas were as follows. Si, Ti and Fe from the PGA technique were found to be in the range of 256.53 – 453.75, 3.54 – 8.75 and 10.95 – 67.97 g/kg respectively. Al and Mn from the NAA technique were found to be in the range of 11.26 – 67.11 and 0.11 – 2.28 g/kg respectively. In addition, K was also determined by in situ measurement of gamma-ray from ^{40}K and was found to be in the range of 0.23 – 1.26 %. However, the analysis results from the PISGA were not conclusive because of insufficient data points for calibration and the laboratory analysis results of those elements were inconsistent.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยภาคสนาม ค่อนข้างมีความลำบาก ยุ่งยาก และอุปสรรคต่างๆมากมาย แต่สามารถแก้ปัญหาผ่านมาได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง และงานวิจัยนี้คงจะไม่สำเร็จลุล่วงได้ ถ้าไม่ได้รับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ และต้นกำเนิดนิเวตรอน จาก อาจารย์พรรัตน์ ศรีสวัสดิ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และยังได้ให้คำปรึกษาขอแนะนำความคิดเห็นต่างๆ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงเช่นกัน

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ ที่ให้ความกรุณาและให้ข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชานิเวศเคี๋ยร์เทคโนโลยีที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านนิเวศเคี๋ยร์ให้แก่ผู้ทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิเชียร รตนธงชัย กองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ปริมาณธาตุหลักบางชนิดในดินโดยเทคนิคนิเวตรอนแอกติเวชัน ขอขอบคุณ คุณพัชรา ศกุลรัตน์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบางชนิดในดินโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ และขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ความห่วงใยและกำลังใจที่ดีตลอดมา จาก คุณอภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา คุณจิตติมา รัญญานิติ คุณเสมอใจ ศุภรเชาว์ คุณกานต์ แสงแก้ว เพื่อนนิสิต และอีกหลายท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้ครบในที่นี้ ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา มารดา คุณปู่ คุณย่า คุณยาย และญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ที่ให้ความเมตตากรุณา ความห่วงใย และดูแลให้กำลังใจที่ดีเสมอมา โดยเฉพาะที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยภาคสนามให้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในหลักสูตรนี้ได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	8
2.1 นิเวศรอน	
2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิเวศรอน.....	8
2.1.2 พลังงานของนิเวศรอน.....	9
2.1.3 ต้นกำเนิดนิเวศรอน.....	10
2.1.4 อันตรกิริยาของนิเวศรอนกับตัวกลาง.....	13
2.1.5 ภาคตัดขวางของนิเวศรอน.....	15
2.2 รังสีแกมมา.....	17
2.2.1 คุณสมบัติของรังสีแกมมา.....	17
2.2.2 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับตัวกลาง.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

2. ทฤษฎี (ต่อ)

2.3 การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอน.....	25
2.3.1 เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจาก ปฏิบัติการการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น.....	27
2.3.2 เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจาก ปฏิบัติการการจับนิวตรอน.....	31
2.3.3 เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	35
2.4 เทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ.....	39
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	55
4.1 ผลการศึกษาการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา.....	55
4.2 ผลการตรวจสอบที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของโบรอน.....	63
4.3 ผลการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่ต่างๆ เพื่อทดลองวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ... 66	
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุนานาชนิดในดิน ณ พื้นที่ตัวอย่าง.....	80
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียมในดินโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา ตามธรรมชาติ.....	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่	
5.สรุปผลการวิจัยและขอเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ขอเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก	103
ภาคผนวก ข	119
ประวัติผู้เขียน.....	122



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด Be (α,n)..... 11
2.2	คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด Be (γ,n)..... 12
2.3	รังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวไคลด์ ธาตุบางชนิดที่มีหลายระดับพลังงาน..... 28
2.4	พลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่มีความเข้มสูงสุดและขีดจำกัดปริมาณของการ วิเคราะห์ของธาตุบางชนิดที่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสี ฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน..... 30
2.5	ธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจาก ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน..... 34
2.6	ธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน..... 38
4.1	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อมีและไม่มี ถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนบนหลุม..... 55
4.2	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อมีและไม่มี กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน..... 57
4.3	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อวางหัววัดรังสี ในแนวตั้งและในแนวนอน..... 58
4.4	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อระยะห่างของ หัววัดรังสีจากพื้นดินต่าง ๆ กัน..... 60
4.5	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อต้นกำเนิด นิวตรอนอยู่ระดับลึกต่างๆ..... 61
4.6	พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน ที่ระยะห่างของ ต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสีต่าง ๆ 62

สารบัญญัตินี้ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 พื้นที่ไต่พิค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อใช้แผ่น แคลเซียมกำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี.....	63
4.8 พื้นที่ไต่พิค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อใช้ ลิเทียมคาร์บอเนตกำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี.....	65
4.9 พื้นที่ไต่พิคของธาตุบางชนิดในดินจากพื้นที่ต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์.....	67
4.10 ปริมาณของธาตุบางชนิดในดินโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	68
4.11 ปริมาณของธาตุบางชนิดในดินบางแห่งโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์.....	68
4.12 พื้นที่ไต่พิคของธาตุบางชนิดที่ได้หลังจากนำต้นกำเนิดนิวตรอนออก.....	69
4.13 เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ที่คำนวณได้ของพื้นที่ต่างๆ.....	69
4.14 สัดส่วนของพื้นที่ไต่พิครังสีพร้อมต์เกมมาต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ และปริมาณซีดิกอนจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	71
4.15 สัดส่วนของพื้นที่ไต่พิครังสีพร้อมต์เกมมาต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ และปริมาณโททานิยมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	73
4.16 สัดส่วนของพื้นที่ไต่พิครังสีพร้อมต์เกมมาต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ และปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	74
4.17 สัดส่วนของพื้นที่ไต่พิครังสีดีเลย์เกมมาต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ และปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	77
4.18 สัดส่วนของพื้นที่ไต่พิครังสีดีเลย์เกมมาต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ และปริมาณแมงกานีสจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	78
4.19 พื้นที่ไต่พิคพร้อมต์เกมมาของธาตุบางชนิดในดินของพื้นที่ตัวอย่าง..	80
4.20 พื้นที่ไต่พิครังสีดีเลย์เกมมาของธาตุบางชนิดในดินหลังนำต้นกำเนิด นิวตรอนออกจากหลุม.....	81
4.21 พื้นที่ไต่พิคของอินเดียมและเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ของ พื้นที่ตัวอย่าง.....	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.22 ปริมาณซิลิกอนที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์.....	82
4.23 ปริมาณไททาเนียมที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์.....	83
4.24 ปริมาณเหล็กที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์.....	83
4.25 ปริมาณอะลูมิเนียมที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์.....	84
4.26 ปริมาณแมงกานีสที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์.....	85
4.27 การเปรียบเทียบปริมาณโปแตสเซียมที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 เทคนิค..	86
4.28 ปริมาณโปแตสเซียมจากการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ณ พื้นที่ตัวอย่าง.....	88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่

หน้า

1.1 การจัดระบบวัดรังสีโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาเจอร์มาเนียม(ลิเทียม) และ ต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf	6
2.1 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดชนิด $\text{Be}(\alpha, n)$	12
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการดูดกลืนกับความเร็วนิวตรอน.....	16
2.3 แผนภาพกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	18
2.4 สเปกตรัมที่วัดได้จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	19
2.5 มุมกระเจิงของรังสีแกมมา (θ).....	20
2.6 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน.....	21
2.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้จากปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน.....	22
2.8 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอนและ Annihilation radiation.....	23
2.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้จากปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอน.....	24
2.10 กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานรังสีแกมมากับเลขอะตอม และโอกาสการ เกิดปรากฏการณ์ทั้งสามแบบ.....	24
2.11 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน.....	25
2.12 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอน การเกิดรังสีพรอมต์แกมมา และ การเกิดรังสีแกมมาหลังการสลายตัว.....	26
2.13 แผนภาพการสลายตัวให้รังสีดีเลย์แกมมา.....	31
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแรงแรงรังสีขณะที่อาบรังสีและปล่อยให้ สลายตัว.....	37
3.1 อุปกรณ์หลักของระบบวัดรังสีแกมมา.....	42
3.2 กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน.....	43
3.3 ถังอะลูมิเนียมสำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนออกภาคสนาม.....	43
3.4 ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมา ขณะวัดรังสี ณ พื้นที่.....	43

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แผนผังการจัดระบบวัดรังสีแกมมา ณ พื้นที่.....	44
3.6 แผนภาพของถังพาราฟินผสมบอแรกซ์สำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน...	45
3.7 การจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในเบื้องต้นที่เริ่มศึกษาวิจัย.....	46
3.8 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการทดสอบการวางถังพาราฟิน.....	47
3.9 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการทดสอบการใช้ระบอบตะกั่ว.....	47
3.10 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการศึกษาลักษณะการวางหัววัดรังสี.....	48
3.11 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการศึกษาระยะห่างหัววัดรังสีจากพื้นดิน...	49
3.12 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการศึกษาระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน..	50
3.13 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในการศึกษาระยะห่างหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน.....	51
3.14 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาโดยใช้แผ่นแคดเมียมกำบังนิวตรอนให้หัววัด..	52
3.15 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาโดยใช้ผ้าครอบลิเทียมคาร์บอเนตกำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี.....	53
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์กับปริมาณซิลิกอนจากเทคนิค NAA.....	72
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์กับปริมาณไททานเนียมจากเทคนิค NAA.....	73
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์กับปริมาณเหล็กจากเทคนิค NAA.....	75
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์กับปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิค NAA.....	77
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์กับปริมาณแมงกานีสจากเทคนิค NAA.....	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.6 กราฟความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีคที่วัดได้ ณ พื้นที่ กับปริมาณโปแตสเซียม จากเทคนิค NAA	88
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความเป็นมาของปัญหา [1], [2]

ดินโดยทั่วไปมีวัสดุประกอบที่สำคัญ 2 ประเภท คือ วัสดุอินทรีย์ และวัสดุอนินทรีย์ ทับถมกันอยู่ในดิน วัสดุอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ หินและแร่ทั้งที่ยังสดอยู่หรือที่ผุพังสลายตัวเป็นชั้นเล็กชิ้นน้อยแล้ว เรียกว่า วัสดุต้นกำเนิดดิน ส่วนวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ เศษซากพืชและซากสัตว์ที่เน่าเปื่อยแล้ว เรียกว่า ฮิวมัส (Humus) การผสมคลุกเคล้ากันขององค์ประกอบทั้งสองประเภทนี้มักมีอัตราส่วนผสมแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆของบริเวณที่กำเนิดดินนั้นเช่น สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ ประเภทวัสดุต้นกำเนิดดิน กาลเวลา และส่วนผสมฮิวมัสจากสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างกัน เป็นต้น หมายถึงมีการกำเนิดดินต่างกัน ทำให้ดินต่างสถานที่ต่างถิ่น มีลักษณะคุณสมบัติ และธาตุองค์ประกอบที่ต่างกัน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มีการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในดิน เพื่อประโยชน์หลายอย่างทั้งทางด้านปฐพีวิทยา การศึกษาถึงการกำเนิดดินและการจำแนกดิน ทางการเกษตร การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน หรือความเป็นพิษของธาตุบางชนิดที่มีอยู่ในดิน และการสำรวจแหล่งแร่ทางธรณีวิทยา เป็นต้น การวิเคราะห์โดยทั่วไปทำได้หลายวิธีทั้ง วิเคราะห์ทางเคมี วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ (Instrumental Analysis) และวิเคราะห์ทางนิวเคลียร์ เป็นต้น ซึ่งมักต้องสุ่มตัวอย่างดินปริมาณมากมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

วิธีการวิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์ เช่น วิธีการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Technique) เป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวก รวดเร็ว ให้ความแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) และยังสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสุ่มตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหรือทำการวิเคราะห์ ณ พื้นที่ตรงบริเวณนั้น แต่ก็เป็นวิธีการวิเคราะห์ตรงเพียงบริเวณผิวหน้าดิน และผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็ไม่สามารถเป็นค่าเฉลี่ยตัวแทนของบริเวณทั้งหมดที่ดีพอ อาจต้องทำการสุ่มวัดหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้

ได้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น และวิธีวิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์อีกวิธีหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในดิน คือ การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Technique) เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเช่นกัน ค่อนข้างให้ผลถูกต้องแม่นยำสูง แต่มักทำการวิเคราะห์โดยการสู่มตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และมีข้อจำกัดสำหรับไอโซโทปครึ่งชีวิตยาว (half-life) หรือมีภาคตัดขวาง (cross section) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนต่ำ ทำให้จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ที่ระดับกำเนิดนิวตรอนที่มีความเข้มข้นสูงๆ เพื่อให้ได้ความแรงรังสีของไอโซโทปที่เพิ่มขึ้นสูงซึ่งจะทำให้ความไวในการวิเคราะห์ (Analytical sensitivity) สูงพอสำหรับการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาถึงการวิเคราะห์ธาตุในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอนเพื่อศึกษาเบื้องต้นจากธาตุหลักบางชนิดในดิน ที่มีความไวต่อเทคนิคการวัดรังสีฟอสฟอรัสจากปฏิกิริยาจับนิวตรอนและชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เนื่องจากวิธีวิเคราะห์ธาตุในดินด้วยเทคนิคนี้ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้ ณ พื้นที่ในภาคสนามเลย โดยไม่ต้องสู่มเก็บตัวอย่างกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก วิธีนี้ก็ยังครอบคลุมถึงดินในบริเวณกว้างและลึกมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยการวัดรังสีฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ รังสีฟอสฟอรัสจากปฏิกิริยาจับนิวตรอนและชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและออกแบบระบบที่เหมาะสมสำหรับงานภาคสนาม ได้แก่ ภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน อุปกรณ์หน่วยพลังงานของนิวตรอน และระบบวัดรังสีฟอสฟอรัส

1.3.2 ทดลองวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ บริเวณต่างๆ ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยใช้วิธีการวัดรังสีฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ รังสีฟอสฟอรัสจากปฏิกิริยาจับ

นิวตรอนและชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เทียบผลวิเคราะห์จากวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน และการเรืองรังสีเอกซ์

1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบระบบที่เหมาะสมสำหรับภาคสนาม ได้แก่ ภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน อุปกรณ์หน่วยพลังงานของนิวตรอน และระบบวัดรังสีแกมมา
- 1.4.3 ทดลองวิเคราะห์ธาตุหลักในดิน ณ พื้นที่ บริเวณต่างๆ
- 1.4.4 สุ่มตัวอย่างดินไปวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันและการเรืองรังสีเอกซ์
- 1.4.5 สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้วิธีวิเคราะห์ธาตุหลักในดิน ณ พื้นที่ โดยใช้เทคนิคนิวตรอน เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ธาตุอื่นๆที่เจือปนอยู่ในวัสดุที่สนใจ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปานทิพย์ อัมพรรัตน์ [3] ทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก ซึ่งเป็นธาตุหลักในซีเมนต์ผง โดยใช้เทคนิคนิวตรอนต่างๆตามความเหมาะสมกับธาตุแต่ละชนิดซึ่งคำนึงจากความไวในการวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับนิวตรอน และแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามแต่ละเทคนิคดังนี้

ก.การวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนและเหล็ก โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพร้อมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน โดยระบบวัดรังสีประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ความแรง 90 มิลลิวี ในการอาบนิวตรอนเร็ว และใช้หัววัดรังสีแกมมา

ไซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว × 5 นิ้ว ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา สามารถวิเคราะห์ ปริมาณซีลีเนียมได้ต่ำที่สุด 10% โดยน้ำหนัก และปริมาณเหล็กได้ต่ำสุด 0.5 % โดยน้ำหนัก

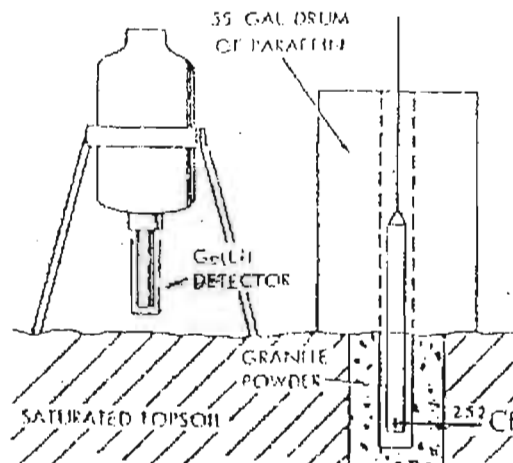
ข. การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน โดยระบบวัดรังสีประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี ในการอาบเทอร์มาลนิวตรอนและใช้หัววัดรังสีแกมมาไซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว × 5 นิ้ว ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา สามารถวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมต่ำที่สุด 20% โดยน้ำหนัก

ค. การวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียม โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ซึ่งระบบวัดรังสีประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี ในการอาบนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาไซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว × 5 นิ้ว ในการวัดรังสีแกมมา สามารถวิเคราะห์ ปริมาณอะลูมิเนียมได้ต่ำที่สุด 1-2 % โดยน้ำหนัก

1.6.2 กำธร สุนทรปกาสิต [4] ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การทดลองหาปริมาณไฮโดรเจน โดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 2.223 MeV จากปฏิกิริยา $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ โดยระบบวัดรังสีประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 90 มิลลิวูรี บรรจุในถังกราไฟต์ทรงกระบอกเพื่อห่อหุ้มพลังงานให้เป็นเทอร์มาลนิวตรอน เพื่อทำอันตรกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนในสารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนให้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 2.223 MeV และใช้หัววัดรังสีแกมมาไซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว × 5 นิ้ว ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา 2.223 ที่เกิดขึ้นนี้ ตัวอย่างของเหลวที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ เช่น น้ำมวลหนัก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายแอมโมเนีย และน้ำมันพาราฟิน เป็นต้น ซึ่งขีดจำกัดในการวัดปริมาณไฮโดรเจนในน้ำมวลหนักและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.383% และ 0.234% โดยโมล ในการวัดรังสี 5000 วินาที และยังสามารถทดลองวิเคราะห์ไฮโดรเจนในผงถ่านหินได้เมื่อมีอยู่ประมาณ 6% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้วิธีนี้วิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนในถ่านหินได้โดยไม่ทำลายตัวอย่างและให้ผลรวดเร็ว

1.6.3 คณิต ทองพิสิฐสมบัติ [5] ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาหาปริมาณไนโตรเจนโดยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา โดยการจัดระบบวัดรังสีดังนี้ ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ ความแรงรังสี 5 คูรี โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว \times 5 นิ้ว ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา 10.82 MeV ที่ได้จากปฏิกิริยา $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ โดยต้นกำเนิดนิวตรอนบรรจุในถังเหล็กบรรจุน้ำ โดยการทดลองหาปริมาณไนโตรเจนในสารอินทรีย์ และปุ๋ย ในรูปสารละลาย โดยใช้สารละลายยูเรียเป็นสารมาตรฐาน ได้ขีดจำกัดในการวัด 1% ของไนโตรเจน ของปริมาณตัวอย่างขนาด 7 ลิตร และเวลาการวัดรังสี 4000 วินาที และทดลองจำลองสถานการณ์การตรวจหาสารคล้ายวัตถุระเบิดจากการใช้เทคนิคนี้ โดยบรรจุสารยูเรียไว้ในกระเป๋าเอกสารปรากฏว่า ความไวในการวัดรังสีได้ประมาณ 0.1 cps ต่อ 100 กรัม ของไนโตรเจน

1.6.4 Trombka , J.I. , Senftle , F. and Schmadebeck ,R. [6] ได้ศึกษา เรื่องการวิเคราะห์ธาตุบริเวณผิวหน้าโดยเทคนิคจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ในงานวิจัยนี้ใช้ ^{252}Cf ขนาด 125 μg เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน และทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และรังสีแกมมาที่เกิดจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน โดยทดลองใช้ทั้งหัววัดรังสีแกมมาเจอร์มาเนียม (ลิเทียม) และโซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) ในการวัดรังสีแกมมาดังกล่าว และจัดระบบวัดรังสี ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งต้นกำเนิดรังสีอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 20 ซม. และหัววัดรังสีอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวอย่างประมาณ 90 ซม. โดยทดลองวิเคราะห์ผงแกรนิตแห้งประมาณ 11 กก. เป็นสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ได้จากสเปกตรัมที่เหลือแต่พีคพลังงานเดี่ยว (discrete line) ของแต่ละธาตุ จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดได้จากการทดลองโดยสเปกตรัมต่อเนื่องจากการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton continuum) ที่ได้จากการคำนวณ ทำให้ทราบถึงธาตุองค์ประกอบทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ตัวอย่างเช่น ธาตุแมงกานีส (Mn) ไททาเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) และไฮโดรเจน (H) เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การจัดระบบวัดรังสีโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาเจอร์มาเนียม(ลิเทียม) และต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf [6]

1.6.5 Hassan , A.M. , EL-Kady , A. and EL-Ezaby , B. [7] ได้ศึกษาเรื่อง ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาสำหรับการวิเคราะห์ธาตุของตัวอย่างที่มีธาตุหลายชนิด โดยมีการจัดระบบวัดรังสี บรรจุในกล่องไม้ขนาด $70 \times 70 \times 70$ ซม.³ และมีท่ออะลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ซม.วางตรงกลางกล่อง ท่ออะลูมิเนียมบรรจุพาราฟินและตรงกลางมีกัอนตะกั่ว โดยที่ ปลายด้านหนึ่งวางหัววัดรังสี Ge(Li) ไวข้างในมีโบรอนคาร์ไบด์และแผ่นแคดเมียมห่อหุ้ม ส่วนอีกด้านหนึ่งบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu/Be}$ 2.5 คูรี ทำการทดลองโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (efficiency calibration) ของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาตามฟังก์ชันระดับพลังงาน จากปฏิกิริยา $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ ซึ่งได้ทดลองวิเคราะห์ไลมอนไนต์ (limonite) เป็นสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์จากการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาเป็นเวลา 1 ชม. ได้พีคทั้งหมด 160 พีค สามารถวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ธาตุทั้งหมด 15 ธาตุที่เป็นธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่างไลมอนไนต์ ได้แก่ ธาตุหลักที่มีปริมาณมาก เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) แมกนีเซียม (Mg) ไททาเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) คลอรีน (Cl) โซเดียม (Na) และแมงกานีส (Mn) ธาตุที่มีปริมาณน้อย ซัลเฟอร์ (S) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) วาเนเดียม (V) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และดีบุก (Sn) สำหรับผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณนั้นคำนวณจากความเข้มของแต่ละพีคที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์ที่ได้ให้ผลค่อนข้างดีมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ

1.6.6 Mikesell , Jon L. , Dotson , Danny W. and Senftle , Frank E. [8] ได้ศึกษาเรื่องการวิเคราะห์ถ่านหินโดยการวัดรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ณ พื้นที่ ในหลุมขุดที่ขนาดใหญ่กว่าที่ระบบวัดรังสี โดยระบบวัดรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรีที่มีความละเอียดในการวัดรังสีสูง ใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เพื่อทำการวิเคราะห์หาทั้งความลึก ความหนา และ เส้นทางของแนวถ่านหิน สภาพลักษณะหินตรงตำแหน่งเหนือกว่าและต่ำกว่าแนวถ่านหิน โดยการวัดสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ของ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน และ แคลเซียม รวมทั้งสเปกตรัมรังสีแกมมาตามธรรมชาติ คือ โพแทสเซียม-40 บิสมัท-214 และ แทลเลียม-208 เป็นฟังก์ชันตามระยะความลึก และ มีการทดลองเปลี่ยนขนาดมวลของ ^{252}Cf ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการทางเคมีจะเห็นว่าเมื่อ ^{252}Cf มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความแรงแรงรังสีมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ปริมาณดีขึ้นด้วย เทคนิคนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุ และอัตราส่วนผสมของถ่านหินได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20% ยกเว้นปริมาณซิลิกอน และ ไนโตรเจนที่คลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง

1.6.7 Mikesell , J.L., Senftle , F.E. , Lloyd , T.A. and Tanner ,A.B. [9] ได้ศึกษาเรื่องการตรวจวัดปริมาณน้อยของแมงกานีสในแร่แมงกานีส ณ พื้นที่ โดยการวัดรังสีแกมมาหลังการสลายตัว คือใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน โดยมีระบบวัดรังสีแกมมา ประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf 100 กรัม หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ ในการตรวจวัดรังสีแกมมาพลังงาน 847 keV จากการสลายตัวของ ^{56}Mn จาก ปฏิกิริยา $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ ลักษณะเป็นรูปแบบท่อเครื่องมือหย่อนลงในหลุมขุด มีอัตราเร็วในการหย่อนลง 15 ซม.ใน 1 วินาที และจะทำการวัดรังสีต่อเนื่องโดยคำนวณอัตรานับรังสีทุกๆ 15 วินาที เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการวิเคราะห์ทางเคมีผลใกล้เคียงกัน แต่ในด้านอุตสาหกรรมเหมืองแร่แมงกานีสก็ยังมีได้นำใช้งานเป็นอุปกรณ์ประจำ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 นิวตรอน (Neutron)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่รวมตัวอยู่กับโปรตอนภายในนิวเคลียสของอะตอม โดยมีแรงนิวเคลียร์ (nuclear force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูงมาก ตามปกตินิวเคลียสมักอยู่ในสถานะเสถียร แต่ในบางสภาวะถ้ามีสิ่งรบกวนกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส นิวตรอนก็สามารถหลุดออกมาจากนิวเคลียสได้ นิวตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า นิวตรอนอิสระ ซึ่งมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างไปจากอนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียส ดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน

ก) ประจุไฟฟ้า (Charge) นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง ทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถเดินทางผ่านอะตอมตัวกลางได้โดยไม่เกิดคู่อิออนหรืออิออนแพร์ (ion pair) เนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมบ์ (coulomb force) ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

ข) มวล(Mass) มวลของนิวตรอนมีค่ามากกว่ามวลของโปรตอนเพียงเล็กน้อย

$$m({}_0^1n) = 1.008665 \text{ u}$$

$$m({}_1^1H) = 1.007825 \text{ u}$$

ค) สปินและโมเมนต์แม่เหล็ก (Spin and magnetic moment) นิวตรอนมีสปินหรือโมเมนต์เชิงมุมเท่ากับ $\frac{1}{2}h$ และมีโมเมนต์แม่เหล็กเท่ากับ -1.9135 นิวเคลียร์แมกเนตรอน (nuclear magnetron)

ง) คลื่นและคุณสมบัติโพลาไรเซชัน (Wave and Polarization) นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นเช่นเดียวกับอนุภาคเบาอื่นๆ โดยที่คุณสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงให้เห็นจากปรากฏการณ์การหักเหของนิวตรอน (neutron diffraction) ส่วนคุณ

สมบัติโพธาโรเซชัน นิวตรอนจะแสดงปรากฏการณ์เมื่อวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูง เนื่องจากนิวตรอนมีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก

จ) การสลายตัวให้กัมมันตรังสี (Radioactive decay) นิวตรอนอิสระเมื่อมีพลังงานสูงถึงระดับหนึ่งจะแตกตัวให้โปรตอน อิเล็กตรอน และแอนตินิวตริโน (Antineutrino) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV ดังสมการที่ 2.1 โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที



2.1.2 พลังงานของนิวตรอน [10]

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งประเภทได้ 3 กลุ่มใหญ่ ตามระดับพลังงานดังนี้

ก) นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0 - 1 keV แบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ ดังนี้

- โคลด์นิวตรอน (Cold neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าเทอร์มาลนิวตรอน เกิดจากการกระเจิงติดต่อกันของเทอร์มาลนิวตรอน มักมีพลังงานน้อยกว่า 0.01 eV

- เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพัทธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอนที่พบมากที่สุด ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มาลนิวตรอน (Epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนในช่วงระหว่าง 0.3 – 10 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 1 – 100 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่า “Resonance absorption”

ข) อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0.1 – 0.5 MeV

ค) นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 0.5 MeV ขึ้นไป

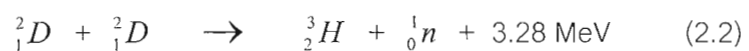
2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มักนิยมใช้งานในการผลิตนิวตรอนทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

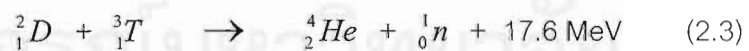
ก) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน ใน เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวของไอโซโทปของธาตุหนักบางตัว เช่น ยูเรเนียม-235 เมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอนหนึ่งตัวแล้วนิวเคลียสนั้นแตกตัวเป็นสองส่วนพร้อมกันให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว จากนั้นนิวตรอนเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันทวีคูณต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จึงทำให้ได้นิวตรอนฟลักซ์สูงกว่าวิธีอื่น พลังงานของนิวตรอนที่ได้นี้มีค่าตั้งแต่เทอร์มาลนิวตรอนถึง 18 MeV แต่มีพลังงานเฉลี่ยแล้ว ประมาณ 2.5 MeV

ข) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยเร่งให้อนุภาคหรือนิวเคลียสของธาตุชนิดหนึ่ง เช่น ดิวเทรียม หรือ โปรตอน ให้มีพลังงานสูงแล้วไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งซึ่งเรียกว่า เป้า (target) มักเป็นธาตุเบา แล้วเกิดปฏิกิริยาการรวมตัว (fusion reaction) ขึ้น ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่

ปฏิกิริยา D-D (DD reaction)



ปฏิกิริยา D-T (DT reaction)



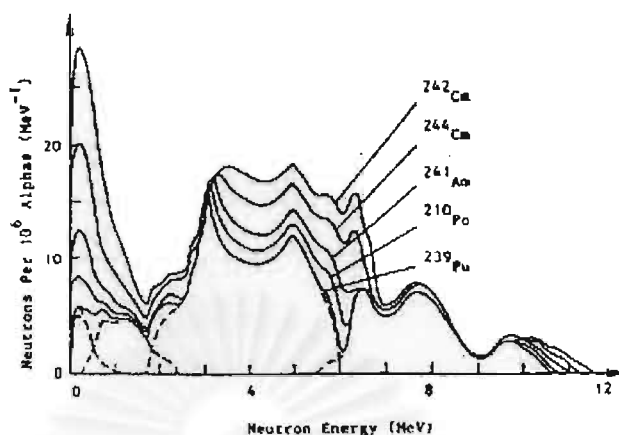
นิวตรอนที่ผลิตได้มีพลังงานประมาณ 2.46 และ 14.08 MeV ตามลำดับ นิยมเรียกอีกอย่างว่า เครื่องผลิตนิวตรอน (neutron generator)

ค) ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (Alpha emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอน (α, n) โดยมีไอโซโทปที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น ^{241}Am ^{238}U และ ^{239}Pu ผสมกับเป้าที่เป็นธาตุเบาบางชนิดที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนต่ำ เช่น ^9Be ^{10}B และ ^2D นิยมใช้เบริลเลียม (^9Be) เนื่องจากเป็นธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนต่ำสุดท้ายต่ำที่สุด และให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดประมาณ 80 ตัวต่อการชนของอนุภาคอัลฟาจำนวน 1 ล้านตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$ นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มข้นนิวตรอนในช่วง $10^5 - 10^7$ นิวตรอนต่อคูรีต่อวินาที คุณสมบัติของไอโซโทปที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ แสดงในตารางที่ 2.1 และสเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ แสดงในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $\text{Be}(\alpha, n)$

นิวไคลด์	ครึ่งชีวิต	พลังงานของอนุภาคอัลฟา (MeV)	พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอน(MeV)	ความเข้มข้นของนิวตรอน($\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Ci}^{-1}$)
^{238}Pu	89 ปี	5.50	4.00	2.8×10^6
^{239}Pu	24100 ปี	5.14	4.59	1.6×10^6
^{210}Po	138 วัน	5.30	4.54	2.5×10^6
^{241}Am	458 ปี	5.48	4.46	2.2×10^6
^{244}Cm	18.1 ปี	5.79	4.31	3.0×10^6
^{242}Cm	163 วัน	6.10	4.16	4.0×10^4
^{226}Ra	1620 ปี	7.69	3.94	1.1×10^7
^{227}Ac	22 ปี	7.36	3.87	1.5×10^7



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดชนิด Be(α ,n)

- ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้รังสีแกมมา (Photonuclear source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ ,n) โดยการผสมไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา (gamma emitter source) พลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ขึ้นไป เช่น ^{124}Sb , ^{88}Y เข้ากับธาตุเบาที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนต่ำ เช่น เบริลเลียม เมื่อรังสีแกมมาทำอันตรกิริยาเข้าชนนิวเคลียสของเบริลเลียม-9 นิวตรอนจะหลุดออกมา แต่นิวตรอนที่ได้นี้มักมีพลังงานต่ำจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการใช้งาน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด Be(γ ,n)

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน (n.s ⁻¹ Ci ⁻¹)
$^{88}\text{Y} - ^9\text{Be}$	106.6 วัน	0.16	1.0×10^5
$^{124}\text{Sb} - ^9\text{Be}$	60.2 วัน	0.024	3.0×10^6

- ไอโซโทปชนิดมีการแตกตัวของนิวเคลียส (Spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสีบางชนิดเช่นคาร์ลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมาโดยเฉลี่ยประมาณ 3.75 ตัว ต่อการแตกตัวของนิวเคลียส 1 ครั้ง โดยที่นิวตรอนมีพลังงานเฉลี่ย 2.14 MeV มีความเข้มนิวตรอนประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม

2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับตัวกลาง [11]

นิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้หลายแบบโดยขึ้นกับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของตัวกลาง ดังนี้

ก) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่เพียงแค่ออกไปเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น คือ มีการถ่ายเทพลังงานจลน์จากนิวตรอนให้นิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แต่ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนนั้นยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยาจะกระเจิงออกมาโดยที่ทิศทางและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสก่อนและหลังชนมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง อันตรกิริยาแบบนี้บางทีเรียกว่า การกระเจิงแบบโพเทนเชียล (potential scattering) อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็ว สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n,n)

ข) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้ว รวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) จากนั้นจะมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสของอะตอมตัวกลางยังคงอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ทำให้พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์ของระบบหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การเกิดอันตรกิริยาเช่นนี้นิวตรอนต้องมีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ ดังนั้นอันตรกิริยานี้จึงต้องมีพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) มักเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป เป็นอันตรกิริยาแบบดูดกลืนพลังงาน (endothermic interaction) อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ $(n,n'\gamma)$

ค) อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture) หรือ อันตรกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) หรือเรดิเอทิฟแคปเจอร์ (Radiative capture) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วถูกจับไว้กลายเป็นนิวเคลียสที่มีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่าก็ได้ หรือเรียกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Neutron captured gamma - rays) เป็นอันตรกิริยาแบบคายพลังงาน (exothermic interaction) เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวเคลียสใหม่นั้นจะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยว ของนิวเคลียสเดิม ร่วมกับ ของนิวตรอนอิสระเสมอ หรืออีกนัยหนึ่ง คือ มวลของนิวเคลียสเดิมนับรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระนั้นมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปฟรังซ์ และการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis , NAA) สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n,γ)

ง) ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาแตกตัวเป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโตเนียม-239 เป็นต้น แล้วรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะเกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วย อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญมากในการเกิดพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n,f)

จ) อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิดแล้ว รวมตัวกันเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา อนุภาคโปรตอน ส่วนนิวเคลียสของธาตุเดิมนั้นกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ไป สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,α) หรือ (n,p) ตัวอย่างของอันตรกิริยาแบบนี้คือ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ซึ่งจะมีความสำคัญมากในเรื่องการวัดนิวตรอน และการกำบังนิวตรอน และ $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ เป็นต้น

ฉ) ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นแบบดูดกลืนพลังงาน ผลของอันตรกิริยาแบบนี้ทำให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ $(n,2n)$ หรือ $(n,3n)$

2.1.5 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

นิวตรอนเมื่อวิ่งเข้ามาเพื่อทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง สามารถมีโอกาส (Probability) ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 6 แบบนี้น้อยเพียงใดขึ้นกับชนิดนิวเคลียสของตัวกลางนั้นและพลังงานของนิวตรอนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถอธิบายเชิงปริมาณได้ ในเทอมของ "ภาคตัดขวาง (cross section)" แบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

ก) ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section; σ) หมายถึง ค่าที่บอกถึงโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (2.3)$$

โดยที่ - σ_s คือภาคตัดขวางของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

$$\sigma_s = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n'\gamma)} \quad (2.4)$$

$\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,n'\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

- σ_a คือภาคตัดขวางของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

$$\sigma_a = \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} \quad (2.5)$$

$\sigma_{(n,\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,\alpha)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา

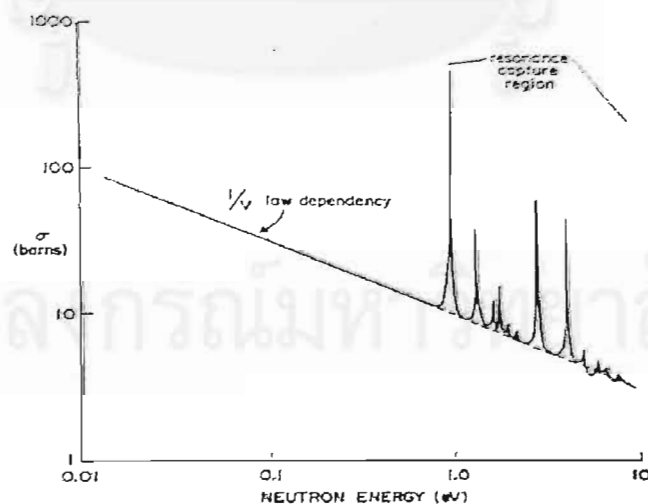
$\sigma_{(n,p)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n,f)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาฟิชชัน

ข) ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section; Σ) หมายถึงโอกาสที่นิวตรอนจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางต่อระยะทาง มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) นิยมใช้เมื่อตัวกลางที่มีความหนา สามารถคำนวณได้จากผลคูณของจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางต่อลบ.ซม. กับ ค่าภาคตัดขวางจุลภาค ดังสมการที่ 2.6

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.6)$$

ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับนิวไคลด์หนึ่งๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาด้วย ภาคตัดขวางของการดูดกลืนสำหรับเทอร์มาลนิวตรอนนั้นจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับความเร็ว ($\sigma_{th} \propto \frac{1}{v}$) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการดูดกลืนกับความเร็วของนิวตรอน

2.2 รังสีแกมมา (Gamma rays) [12]

2.2.1 คุณสมบัติของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ภายในนิวเคลียส มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) แผลออกจากมาในรูปโฟตอนหรือควอนตัมของพลังงาน เคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วแสง คือ 2.9979×10^8 เมตรต่อวินาที ไม่มีประจุไฟฟ้า ไม่มีมวล ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมา (E) กับความถี่คลื่น (ν) และความยาวคลื่น (λ) ดังสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu \quad (2.7)$$

และ
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.8)$$

โดยที่ $h =$ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 4.165669×10^{-15} eV/Hz

$c =$ ความเร็วแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า = 2.9979×10^8 m/s

2.2.2 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับตัวกลาง

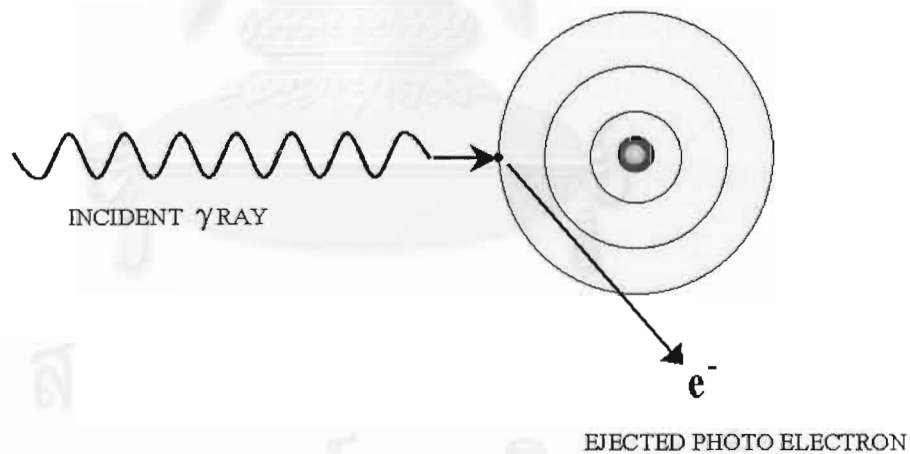
รังสีแกมมาสามารถทำอันตรกิริยาได้หลายแบบในตัวกลาง แต่มีเพียง 3 แบบเท่านั้นที่มีบทบาทความสำคัญในการวัดรังสี (radiation measurement) คือ

ก) ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาพลังงานต่ำเข้ามาชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมตัวกลางแล้ว ถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนและสลายตัวไป ส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy : E_b) จึงสามารถหลุดออกจากวงโคจรที่อยู่ เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า "โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)" โดยที่มีพลังงานจลน์เท่ากับ

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.9)$$

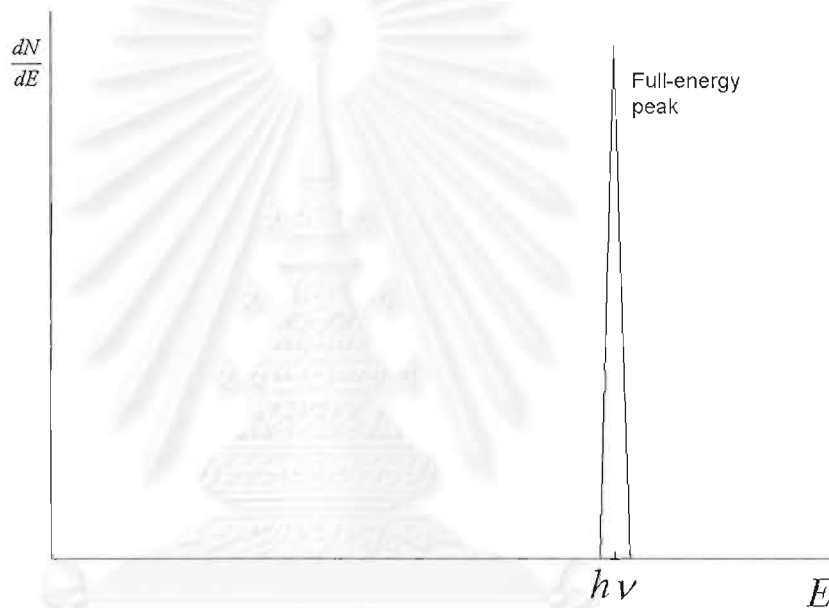
ปรากฏการณ์นี้มักจะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (วงโคจรชั้นในสุด)มากที่สุดทำให้อิเล็กตรอนในวงนอกต้องเข้ามาแทนที่ โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) ซึ่งรังสีเอกซ์นี้อาจจะไปชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปให้หลุดออกจากอะตอมได้อีก เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกนี้ว่า ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (σ_{PE}) จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อตัวกลางที่ทำอันตรกิริยานั้นมีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น และโอกาสการเกิดจะลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงาน (E_γ) เพิ่มขึ้น ดังนี้

$$\sigma_{PE} \propto \frac{Z^{4.5}}{E_\gamma^{3.5}} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ถ้ามีเพียงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้นเท่านั้นและหัววัดรังสี (Radiation detector) สามารถดูดกลืนพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาได้ทั้งหมด ดังนั้นการวัดสเปกตรัมความล้มพันธ์ระหว่างจำนวนรังสีแกมมากับพลังงานรังสีแกมมา จะมีเพียงพีคเดียวที่ปรากฏขึ้นในสเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พีคที่ได้นี้เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาที่เข้ามาในหัววัดนั้นสูญเสียพลังงานทั้งหมดในปรากฏการณ์การโฟโตอิเล็กทริก จึงเรียกพีคนี้ว่า “ โฟโตพีค (Photo peak) ” หรือ “ พีคเต็มพลังงาน (Full energy peak) ”



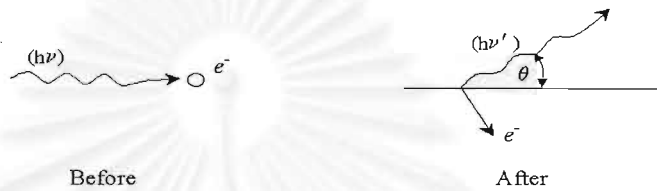
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมที่วัดได้จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ข) ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อรังสีแกมมาพลังงานระดับปานกลางเข้ามาชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมตัวกลางแล้วถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน และรังสีแกมมากระเจิงออกมาในทิศทางใหม่พร้อมกับมีพลังงานลดลง และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมด้วย เรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า “อิเล็กตรอนถดถอย (Recoil electron)” เนื่องจากรังสีแกมมามีพลังงานสูงมากเมื่อเทียบกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนถดถอยจึงมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานที่รังสีแกมมาถ่ายทอดให้ทั้งหมด จึงถือว่าการเกิดอันตรกิริยานี้เป็นการชนแบบยืดหยุ่น พลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมา ($h\nu'$) มีค่าดังสมการนี้



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \tag{2.11}$$

โดยที่ m_0c^2 = ค่าพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน = 0.511 MeV
 θ = มุมกระเจิงของรังสีแกมมา ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 มุมกระเจิงของรังสีแกมมา (θ)

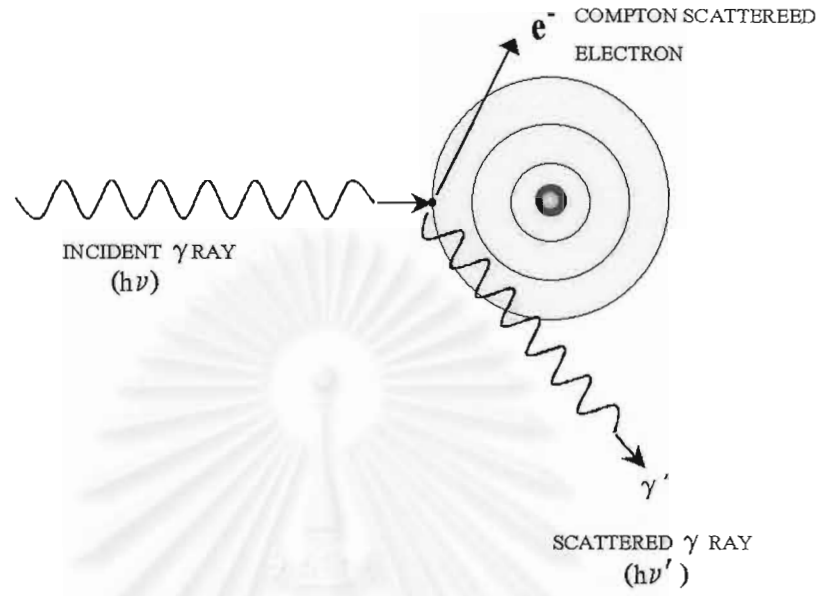
สำหรับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนถดถอย (E_e) มีค่าเท่ากับ

$$E_e = h\nu - h\nu' \tag{2.12}$$

โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ (σ_c) นี้ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนภายในอะตอมของตัวกลางที่อันตรกิริยาด้วยมีมากขึ้น คือเมื่อมีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น และโอกาสการเกิดลดลงเมื่อพลังงานรังสีแกมมามากขึ้น ดังความสัมพันธ์นี้

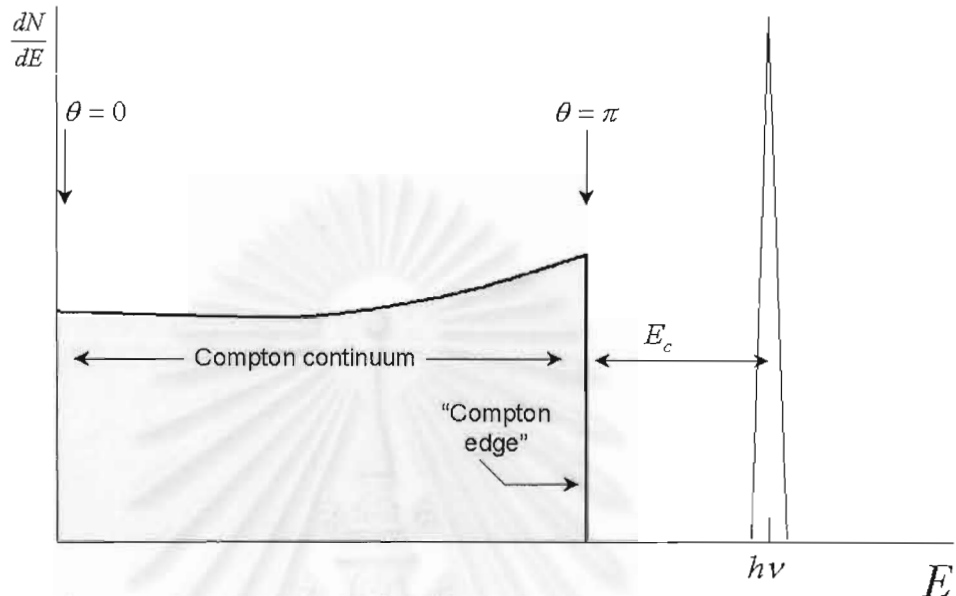
$$\sigma_c \propto \frac{Z}{E_\gamma} \tag{2.13}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

การวัดสเปกตรัมความสัมพัทธ์ระหว่าง จำนวนรังสีแกมมา กับพลังงานรังสีแกมมาที่เกิด เนื่องจากปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้น ไม่ได้เป็นพีคพลังงานเดียว จะเป็นลักษณะแถบพลังงานต่อเนื่องมักเรียกว่า "Compton continuum" เนื่องจากรังสีแกมมาที่เข้ามายังหัววัดรังสีสามารถเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตันนี้ได้ทุกมุม θ ตั้งแต่ $0 - 2\pi$ ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนแตกต่างกันตามแต่ค่ามุม θ ของรังสีแกมมา ที่กระเจิงออกมา และมีรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาบางส่วนกระเจิงหลุดออกไปจากหัววัดรังสีด้วย แต่อย่างไรก็ตามบางทีเกิดการกระเจิงคอมป์ตันหลายๆครั้งติดต่อกัน โดยไม่กระเจิงออกนอกหัววัดรังสีเลย ก็สามารถทำให้หัววัดรังสีดูดกลืนพลังงานจากรังสีแกมมาที่เข้ามาไว้ได้หมดเหมือนกัน ซึ่งก็สามารถเกิดเป็นพีคเต็มพลังงานหรือโฟโตพีคพลังงานเดียวได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้จากปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

ค) ปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอน (Pair production) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงมากเกินกว่า 1.022 MeV วิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงบริเวณรอบๆนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง ทำให้รังสีแกมมาถูกเหนี่ยวนำให้สลายตัวเป็นคู่อิเล็กตรอนที่มีประจุบวกหนึ่งตัวกับประจุลบหนึ่งตัว คือ โพซิตรอน (e^+) และอิเล็กตรอน(e^-) โดยแต่ละตัวมีพลังงานจลน์เท่าๆกันวิ่งแยกออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม ดังนี้

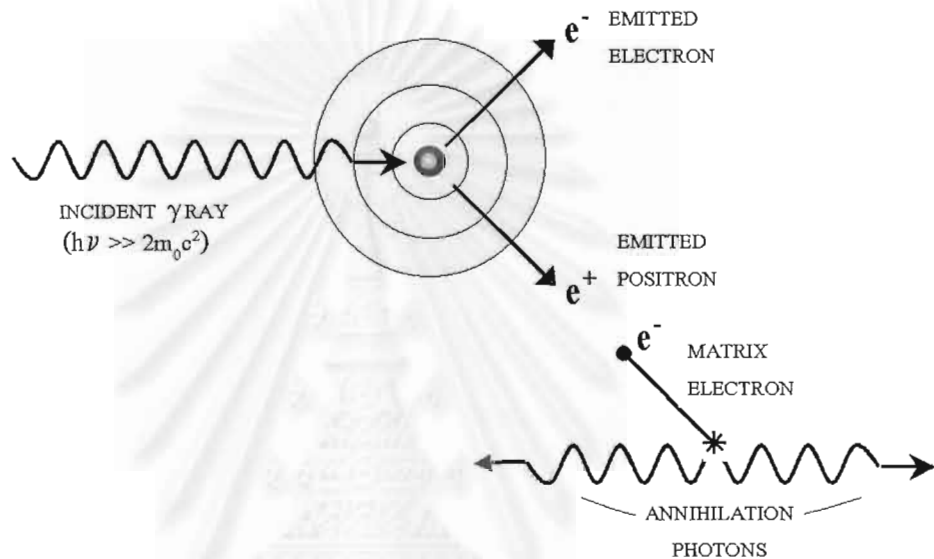
$$E_{e^+} + E_{e^-} = E\gamma - 2m_0c^2 \quad (2.14)$$

โพซิตรอนเมื่อมีพลังงานลดลงจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนตัวอื่นกลายเป็นโฟตอน 2 ตัว โดยที่โฟตอนแต่ละตัวมีพลังงาน 0.511 MeV ($E = m_0c^2$) การเกิดลักษณะนี้เรียกว่า Annihilation radiation ดังสมการนี้

$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu \quad (2.15)$$

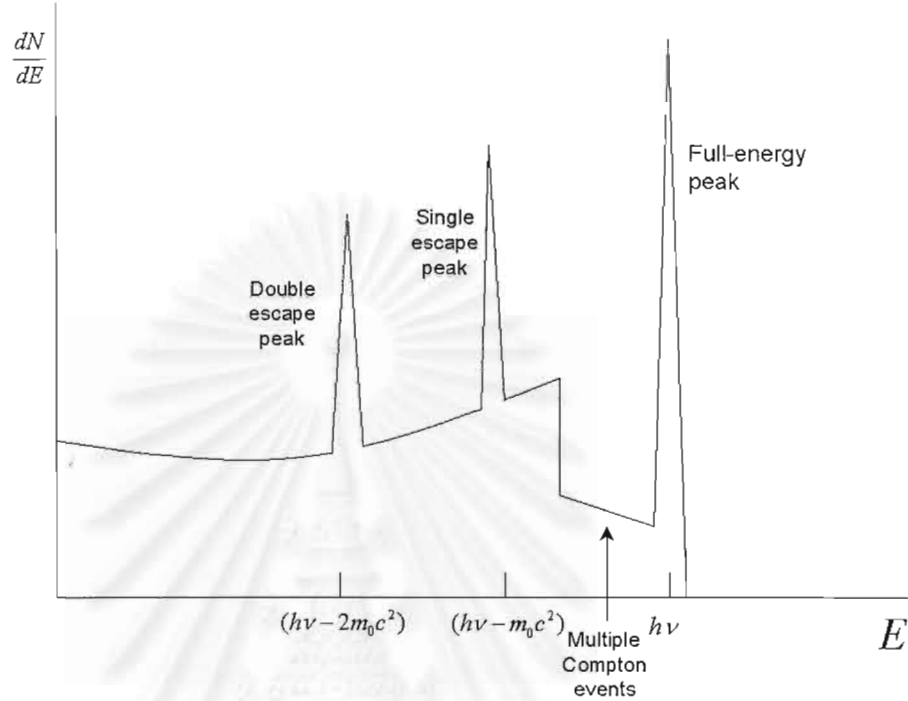
โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์นี้ (σ_{pp}) จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อตัวกลางที่อันตรกิริยาดำวยมีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น และพลังงานรังสีแกมมาสูงขึ้นด้วย ดังนี้

$$\sigma_{pp} \propto \log E_\gamma Z^2 \quad (2.16)$$

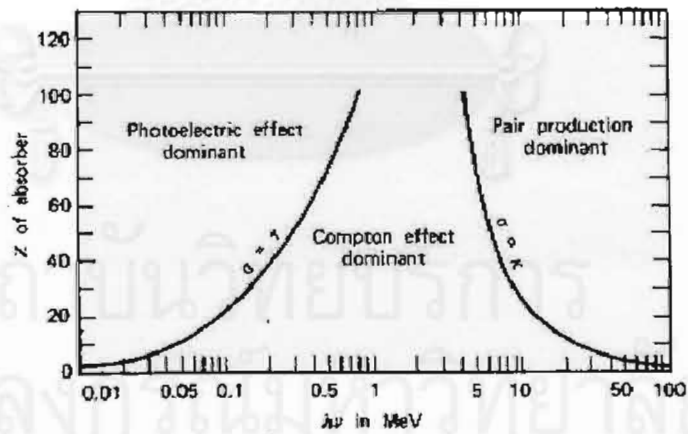


รูปที่ 2.8 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอนและ Annihilation radiation

เมื่อวัดสเปกตรัมความสัมพัทธ์ระหว่างจำนวนรังสีแกมมา กับ พลังงานรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น เนื่องจากปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอน และมักเกิดขึ้นพร้อมด้วยปรากฏการณ์ Annihilation เสมอ ซึ่งจะเกิดโฟตอนพลังงาน 0.511 MeV ขึ้น 2 ตัวที่วิ่งแยกออกจากกันในทิศทางตรงข้าม ทำให้โฟตอนเหล่านี้มีโอกาสที่จะหนีออกจากหัววัดรังสีได้มาก ถ้าโฟตอนหนีรอดออกจากหัววัดรังสีไปได้ 1 ตัว จะเรียกพีคที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Single escaped peak" ซึ่งจะมีค่าพลังงานที่น้อยกว่าพลังงานรังสีแกมมาที่เข้ามาอยู่ 0.511 MeV ($h\nu - m_0c^2$) และถ้าโฟตอนหนีรอดออกจากหัววัดรังสีไปได้ทั้ง 2 ตัว จะเรียกพีคที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Double escaped peak" จะมีค่าพลังงานที่น้อยกว่าพลังงานรังสีแกมมาที่เข้ามาอยู่ 1.022 MeV ($h\nu - 2m_0c^2$) แต่ถ้าโฟตอนทั้งสองตัวไม่สามารถหนีรอดออกจากหัววัดรังสีได้ เลยคือหัววัดรังสีสามารถดูดกลืนพลังงานไว้ได้หมดจากรังสีแกมมาที่เข้ามา ก็จะได้โฟโตพีคเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน



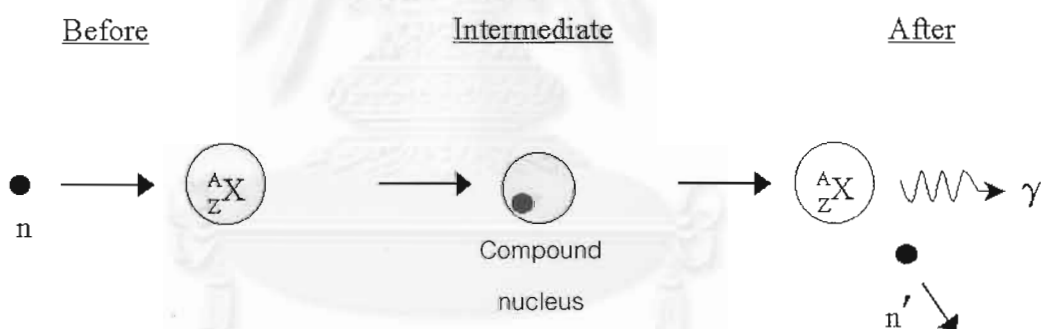
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้จากปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานรังสีแกมมากับเลขอะตอม (Z) และโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทั้งสามแบบ

2.3 การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอน

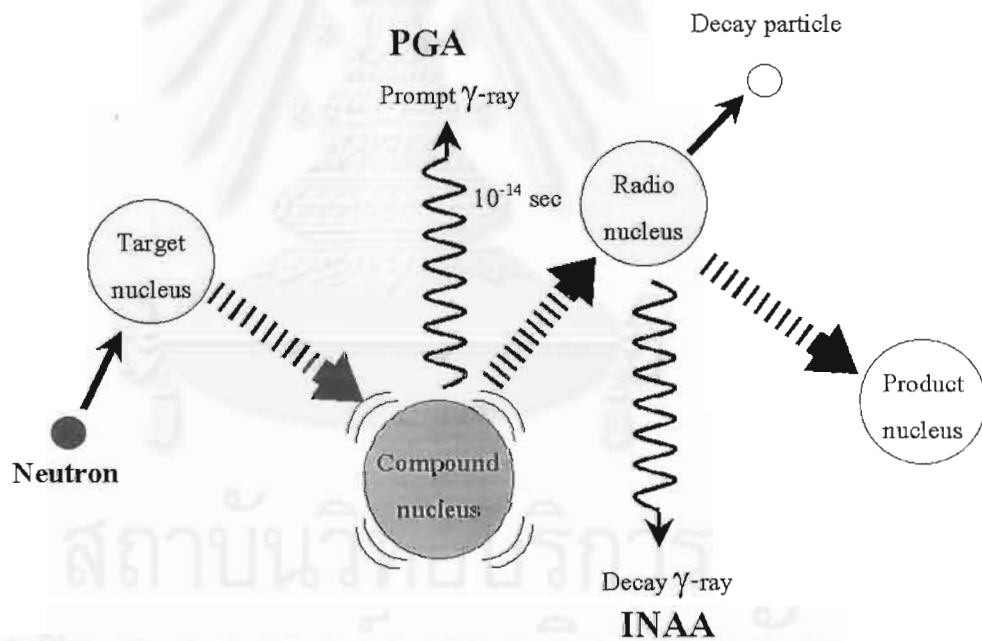
การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอน เป็นเทคนิคที่อาศัยการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสอะตอมตัวกลางในวัสดุที่สนใจศึกษา นิวตรอนสามารถที่จะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังกล่าวนำมาแล้วในหัวข้อ 2.1.4 การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนนั้นจะศึกษาได้จากการเกิดอันตรกิริยา เมื่อนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชน กับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วนิวตรอนถูกจับหรือดูดกลืนไปรวมตัวกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง จากนั้นกลายเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) ขึ้น ซึ่งนิวเคลียสรวมนี้จะอยู่ในสภาวะกระตุ้นสามารถที่จะปลดปล่อยทั้งอนุภาค (เช่น นิวตรอน โปรตอน อัลฟา เป็นต้น) และรังสีแกมมาออกมาได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสรวมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาออกมา อันตรกิริยาที่กล่าวมานี้ก็คือ การเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ($n, n'\gamma$) นั่นเอง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

รังสีแกมมาจากอันตรกิริยานี้ปลดปล่อยออกมาทันทีภายในเวลารวดเร็วมาก เรียกว่า "รังสีพรมมต์แกมมา (prompt gamma - ray)" ถ้าทำการตรวจวัดรังสี (radiation measurement) ที่เกิดจากอันตรกิริยา ($n, n'\gamma$) นี้ นั่นคือ เทคนิคการวัดรังสีพรมมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (Prompt gamma - ray from inelastic neutron scattering technique)

งานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อนิวเคลียสรวมนั้นกลายเป็นนิวเคลียสใหม่ อันตรกิริยานี้คือ การเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) โดยก่อนจะกลายเป็นนิวเคลียสใหม่ นิวเคลียสรวมนั้นมักอยู่ในสภาวะกระตุ้นระดับหนึ่งจึงพยายามลดพลังงานลง โดยการปลดปล่อยรังสีฟอตอนออกมาออกมาภายใน 10^{-14} วินาที ถ้าทำการวัดรังสีฟอตอนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาตรงนี้ เรียกว่า เทคนิคการวัดรังสีฟอตอนมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (Prompt gamma - ray from captured neutron techniques : PGA) ส่วนนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นทั้งนิวไคลด์เสถียรหรือนิวไคลด์กัมมันตรังสี ถ้าเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการสลายตัว (disintegrated) ให้อนุภาคเบตาหรืออัลฟา และรังสีแกมมาหลังการสลายตัว (decay gamma ray) ในอัตราครึ่งชีวิตของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นๆ ถ้าทำการวัดรังสีแกมมานี้ เรียกว่า เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation technique) ดัง รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอน การเกิดรังสีฟอตอนแกมมา และการเกิดรังสีแกมมาหลังการสลายตัว

ดังนั้น สำหรับการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนจากการวัดรังสีแกมมา สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 3 เทคนิค ดังต่อไปนี้

2.3.1 เทคนิคการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น

การวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ($n, n'\gamma$) เมื่อนิวตรอนเร็วซึ่งมีพลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชน กับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้ว นิวตรอนทำอันตรกิริยาโดยถูกจับเข้าไปรวมตัวเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวตรอนตัวใหม่ถูกปลดปล่อยออกมาในทิศทางที่กระเจิงออกไปจากเดิมพร้อมกับมีพลังงานลดลง เนื่องจากได้ถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นจึงปลดปล่อยรังสีฟอตอนต์แกมมาออกมาเพื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติ นิวเคลียสอาจจะถูกกระตุ้น ยกกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้หลายระดับ เช่น สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 1 (1^{st} excited state) สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 2 (2^{nd} excited state) สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 3 (3^{rd} excited state) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานสูงมากพอ ตัวอย่างนิวไคลด์ของธาตุที่ให้รังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ได้แก่

คาร์บอน	$^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$	มีสภาวะกระตุ้นระดับ 1	เท่ากับ 4.438 MeV
โซเดียม	$^{23}\text{Na}(n, n'\gamma)^{23}\text{Na}$	มีสภาวะกระตุ้นระดับ 1	เท่ากับ 0.440 MeV
อะลูมิเนียม	$^{27}\text{Al}(n, n'\gamma)^{27}\text{Al}$	มีสภาวะกระตุ้นระดับ 1	เท่ากับ 0.844 MeV
ซิลิกอน	$^{28}\text{Si}(n, n'\gamma)^{28}\text{Si}$	มีสภาวะกระตุ้นระดับ 1	เท่ากับ 1.779 MeV
เหล็ก	$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)^{56}\text{Fe}$	มีสภาวะกระตุ้นระดับ 1	เท่ากับ 0.847 MeV

ตัวอย่างของธาตุบางชนิดที่ให้รังสีฟอตอนต์แกมมาหลายระดับพลังงาน จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 รังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวไคลด์ธาตุบางชนิดที่มีหลายระดับพลังงาน

ธาตุ	ปฏิกิริยานิวเคลียร์	พลังงานรังสีพรอมต์ แกมมา (MeV)	ความเข้มรังสีพรอมต์ แกมมา ($\times 10^{-3}$ cps/wt%)
ออกซิเจน (O)	$^{16}\text{O}(n,n'\gamma)^{16}\text{O}$	(ระดับ 2,0) 6.128	***
		(ระดับ 3,0) 6.916	-
		(ระดับ 4,0) 7.115	-
อะลูมิเนียม (Al)	$^{27}\text{Al}(n,n'\gamma)^{27}\text{Al}$	(ระดับ 1,0) 0.844	-
		(ระดับ 2,0) 1.014	***
ซิลิกอน (Si)	$^{28}\text{Si}(n,n'\gamma)^{28}\text{Si}$ $^{29}\text{Si}(n,n'\gamma)^{29}\text{Si}$	(ระดับ 1,0) 1.779	927
		(ระดับ 1,0) 1.273	65
		(ระดับ 2,0) 2.028	16
		(ระดับ 3,0) 2.426	<6
เหล็ก (Fe)	$^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)^{56}\text{Fe}$	(ระดับ 1,0) 0.847	1709
		(ระดับ 2,1) 1.238	259
		(ระดับ 3,1) 1.811	133
		(ระดับ 5,1) 2.113	64
		(ระดับ 6,1) 1.038	66
	$^{54}\text{Fe}(n,n'\gamma)^{54}\text{Fe}$	(ระดับ 1,0) 1.408	57

เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนนี้ เหมาะกับธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) ต่ำจนถึงปานกลาง ธาตุเหล่านี้มักมีภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ($\sigma_{(n,n'\gamma)}$) โดยเริ่มต้นจากศูนย์ที่พลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) และจะมีค่าสูงขึ้นตามพลังงานของนิวตรอนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ค่าค่อนข้างคงที่สูงสุด (plateau) ที่พลังงานประมาณ 1-3 MeV และจะเริ่มลดลงน้อยลงเมื่อนิวตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น

ปริมาณการให้รังสีพร้อมดัมแกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (yield of inelastic scattering prompt γ -ray) จะขึ้นกับ ภาคตัดขวาง ($\sigma_{(n,n'\gamma)}$) และ น้ำหนักอะตอม ($A =$ atomic weight) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Yield}_{\text{inelastic prompt } \gamma\text{-ray}} \propto \frac{\sigma_{(n,n'\gamma)}}{A} \quad (2.17)$$

พลังงานรังสีพร้อมดัมแกมมาที่มีความเข้มสูงสุดและขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (detection limit) ของธาตุบางชนิดที่สามารถทำการวิเคราะห์ โดยเทคนิคการวัดรังสีพร้อมดัมแกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

งานวิจัยหลายงานที่นำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ตัวอย่างเช่น

- การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน [13] , [14]
- การตรวจวัดปริมาณถ่านและความชื้นในตัวอย่างถ่านหินปริมาณมาก [15]
- การวิเคราะห์ปริมาณมาก ของซิลเฟออร์ ตะกั่ว สังกะสี และเหล็ก บนสายพานนำแร่ ตะกั่วเข้าเตาถลุง [16]
- การตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนในถ่านหินโดยมีค่าแก้จากผลของความชื้น [17]

นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคนี้ไปศึกษางานทางการแพทย์ด้วย ตัวอย่างเช่น

- การตรวจวัดถึงความไวของฟอสฟอรัส ฟลูออไรด์ แมกนีเซียม ซิลิกอน และโซเดียม ที่บริเวณหน้าแข้งของหุ่นมนุษย์จำลอง (Phantom) และ ของทองแดง เหล็ก และสังกะสี ที่บริเวณตับในปริมาณเล็กน้อย เพื่อใช้งานจริงกับร่างกายผู้ป่วยในการวินิจฉัยโรคเนื่องจากธาตุทั้ง 8 เหล่านี้ [18]

ตารางที่ 2.4 พลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่มีความเข้มสูงสุดและขีดจำกัดปริมาณของการวิเคราะห์ของธาตุบางชนิดที่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิบัติการการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน [19]

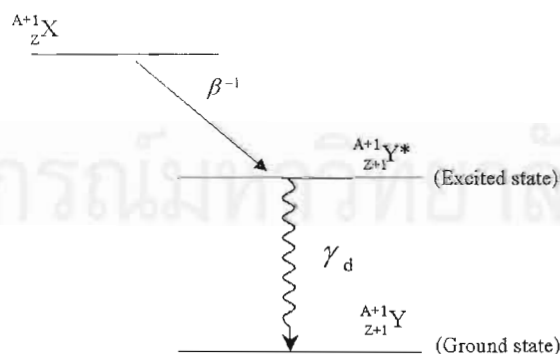
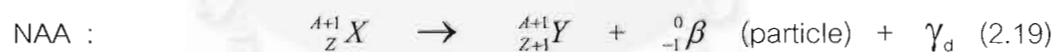
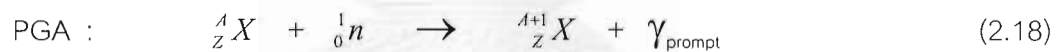
ธาตุ	พลังงานรังสีแกมมา (keV)	ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (กรัม)	ธาตุ	พลังงานรังสีแกมมา (keV)	ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (กรัม)
Na	440	0.18	Y	1745	0.65
Mg	1369	0.76	Zr	934	1.48
Al	1014	0.62	Nb	950	1.87
Si	1779	0.64	Mo	787	1.98
P	1270	0.48	Pd	434	0.84
S	2240	2.43	Ag	325	2.50
Cl	1763	0.93	Cd	556	2.13
Ti	983	0.27	Sn	1230	1.45
V	320	0.30	Sb	160	4.99
Cr	1434	0.60	Te	839	0.88
Mn	858	1.57	I	203	0.67
Fe	847	0.43	Ba	1436	1.09
Co	1192	1.19	La	166	1.15
Ni	1454	0.95	Ta	482	4.35
Cu	962	1.28	W	738	5.69
Zn	992	0.85	Pt	328	3.68
As	279	0.80	Hg	439	1.90
Se	666	0.68	Pb	803	4.51
Sr	1837	0.61	Bi	896	3.13

*ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ เมื่อใช้นิวตรอนพลังงาน 2.5 MeV

2.3.2 เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) นี้ โดยอาศัยอันตรกิริยาเดียวกันกับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน แต่รังสีแกมมาที่ตรวจวัดมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน นั่นคือ รังสีพรอมต์แกมมาเกิดจากนิวเคลียสรวมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นแล้วพยายามลดพลังงานลงจึงปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมา ส่วนรังสีแกมมาที่ถูกวัดในเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสผลผลิต (product nucleus) ที่เกิดขึ้นใหม่ ทำให้เวลาที่วัดรังสีแกมมาทั้งสองต่างกัน รังสีพรอมต์แกมมาวัดในขณะที่อาบรังสีและรังสีแกมมาที่ได้จากสลายตัว (decay γ -ray) สามารถวัดได้หลังการอาบรังสีแล้ว

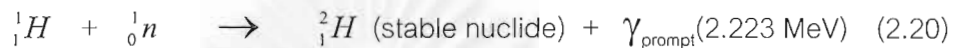
โดยส่วนมากแล้วปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) มักเกิดขึ้นได้ดีกับนิวตรอนพลังงานต่ำ โดยเฉพาะเทอร์มาลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มาลนิวตรอน กระบวนการเกิดมี 2 ขั้นตอน ดังแสดงในสมการที่ 2.18 และ 2.19 ในการวิเคราะห์โดยรังสีพรอมต์แกมมา (Prompt γ -ray Analysis : PGA) อาศัยขั้นตอนแรก ส่วนการวิเคราะห์โดยนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis : NAA) อาศัยขั้นตอนที่ 2



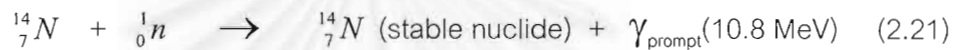
รูปที่ 2.13 แผนภาพการสลายตัวให้รังสีดีเลย์แกมมา

สำหรับปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้ นิวเคลียสผลผลิตอาจเป็นหรือไม่เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีก็ได้ ดังนั้นถ้านิวเคลียสผลผลิตกลายเป็นนิวไคลด์เสถียร (stable nuclide) ก็ไม่สามารถวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน แต่ยังคงสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้ได้ ตัวอย่างเช่น

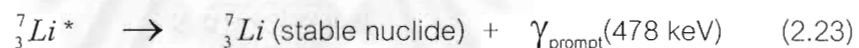
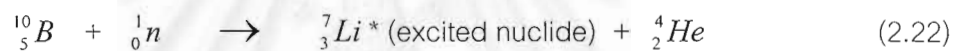
- ไฮโดรเจน (H)



- ไนโตรเจน (N)



- โบรอน (B)



ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน (exothermic reaction) มีค่า Q (Q-value) เป็นบวก เนื่องจากมวลของ ${}_Z^A\text{X}$ รวมกับมวลของ ${}^1_0\text{n}$ คือมวลก่อนเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่ามวลของ ${}^A+1_Z\text{X}$ หลังเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.24

$$Q = ((M_A + M_n) - (M_{A+1}))C^2 > 0 \quad (2.24)$$

ปริมาณการให้รังสีพร้อมดีแกมมา (Yield of prompt γ -ray) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield} = N \phi t \sigma(E_n) \quad (2.25)$$

โดยที่ Yield : จำนวนรังสีพร้อมดีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา

N : จำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์

ϕ : นิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) หน่วย $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

t : เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

$\sigma(E_n)$: ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาขณะที่นิวตรอนมีพลังงาน E_n

แต่ถ้าสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่หรือประกอบด้วยธาตุหลายๆชนิด (multi-element) พบว่า ภาคตัดขวางรวม (Total neutron cross section : σ_T) ของแต่ละธาตุมีผลทำให้ค่านิวตรอนฟลักซ์ลดลง ดังนั้น จำนวนรังสีฟรอมต์แกมมาที่ได้จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ $(1-e^{-f})$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Yield} = N \phi t \sigma(E_n) \cdot (1-e^{-f}) \quad (2.26)$$

โดยที่

$$f = \sum_i N_i (\sigma_T)_i \quad (2.27)$$

รังสีฟรอมต์แกมมาที่ได้จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้มีพลังงานค่อนข้างสูงจนถึงระดับ 10 MeV มักปลดปล่อยรังสีฟรอมต์แกมมาออกมาหลายระดับพลังงานเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน (nat Si) ให้รังสีฟรอมต์แกมมาทั้งหมดประมาณ 90 พลังงาน เช่น 1.273 , 2.092 , 3.539 , 4.935 , 6.381 และ 7.201 MeV เป็นต้น และบางทีอาจมีเพียงระดับพลังงานเดียว เช่น ไฮโดรเจน(1H) ให้รังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 2.223 MeV ตัวอย่างของธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์โดยเทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยา การจับนิวตรอน แสดงในตารางที่ 2.5 และสำหรับธาตุอื่นๆสามารถดูได้จาก www.nndc.bnl.gov [20]

มีงานวิจัยหลากหลายสาขาที่ได้นำเทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนใช้ในการวิเคราะห์ธาตุต่างๆทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเฉพาะ โบรอน มีการศึกษาด้วยเทคนิคนี้กันมากเนื่องจากมีภาคตัดขวางของการจับนิวตรอนสูง และมีความไวต่อเทคนิคนี้สูงที่สุด เช่น การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโบรอนในวัตถุอวกาศที่ตกมากับตัวอย่างสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติเพื่อหาสัดส่วนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (abundance) ของโบรอนในรังสีคอสมิก [21] ทางการเกษตร เช่น การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนเพื่อหาโปรตีนในเมล็ดพันธุ์ข้าว [22] ทางการแพทย์ เช่น การวิเคราะห์หาปริมาณของ N , Cd , Hg , C , Cl และ P ในร่างกายมนุษย์ [23] , [24] , [25] ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การวิเคราะห์ปริมาณส่วนประกอบวัตถุดิบของซีเมนต์ปริมาณมากในสายการผลิต [26] ทางธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์ปริมาณ C , H , S , Ni , O , Al , Si และ Fe ตามแนวถ่านหิน ณ พื้นที่ [9] เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 ธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์โดยเทคนิคการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมา
จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน [27]

Element	Cross section (barns)	Atomic mass (A)	Energy (MeV)	Intensity (photons/100 neutron)	Sensitivity ($1\sigma/A$)
B	752	10.811	0.478	47	3269
Na	0.534	22.989	6.395	25.69	0.592
			5.617	5.99	0.139
			3.982	21.58	0.501
			3.879	6.23	0.148
			3.588	17.31	0.402
			3.371	4.03	0.094
			3.098	9.67	0.225
			3.062	4.01	0.093
Al	0.235	26.981	7.724	20.10	0.175
			7.694	4.17	0.0363
			4.734	3.49	0.0304
			4.260	4.07	0.0354
			4.134	4.26	0.0371
			3.466	4.30	0.0374
			3.034	5.82	0.0507
Fe	2.62	55.847	9.298	3.85	0.181
			7.646	22.14	1.04
			7.632	27.19	1.27
			7.279	4.60	0.216
			6.018	8.08	0.379
			5.921	8.29	0.389

2.3.3 เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Technique)

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันนี้ เป็นเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันโดยไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี (Instrumental neutron activation analysis :INAA) เกิดได้เนื่องจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) เช่นกัน เมื่อนิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์มาลนิวตรอนวิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยาถูกจับรวมตัวกลายเป็นนิวเคลียสใหม่ ถ้าเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสี (Radioactive nucleus) นิวเคลียสนั้นจะสลายตัวให้นิวเคลียสผลผลิต (product nucleus) โดยการปลดปล่อยอนุภาค (เช่น อิเล็กตรอน โพซิตรอน อัลฟา เป็นต้น) และรังสีแกมมา (decay γ -ray) โดยที่รังสีแกมมามีพลังงานและครึ่งชีวิตเป็นคุณสมบัติเฉพาะ (characteristic) ของแต่ละนิวไคลด์นั้น กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนและกระบวนการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี ดังแสดงในสมการที่ 2.18 , 2.19 และรูปที่ 2.12 , 2.13

เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันเป็นการวิเคราะห์หลังจากที่ทำการอาบรังสีนิวตรอนแล้ว การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$R = N_0 \phi \sigma \quad (2.28)$$

$$= \left(\frac{WfN_A}{M} \right) \phi \sigma \quad (2.29)$$

โดยที่	R	: อัตราการเกิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
	N_0	: จำนวนอะตอมทั้งหมดของนิวไคลด์เดิมก่อนเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี
	ϕ	: ความเข้มนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์ หน่วย $n/(cm^2 \cdot s)$
	σ	: ภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนของนิวไคลด์นั้น หน่วย บาร์น
	W	: น้ำหนักของธาตุที่ทำการอาบรังสี
	f	: % abundance ของ นิวไคลด์นั้น
	N_A	: Avogadro's number = 6.022×10^{23} โมเลกุลต่อกรัมต่อโมล
	M	: มวลอะตอมของธาตุที่ทำการอาบรังสี

ส่วนอัตราการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ เวลา t จะเป็นไปตามสมการที่ 2.30

$$D_t = \lambda N_t \quad (2.30)$$

โดยที่ λ : ค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

(decay constant) โดย $\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$

$T_{\frac{1}{2}}$: ครึ่งชีวิต (half-life) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น

N_t : จำนวนอะตอมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ณ เวลา t

t : ช่วงเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

ถ้าอัตราการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าคงที่แล้ว สามารถคำนวณอัตราการเพิ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี $\left(\frac{dN_t}{dt}\right)$ ได้จาก ผลต่างระหว่างอัตราการเกิด (R) กับ อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (D_t) นั้น ดังสมการที่ 2.31

$$\frac{dN_t}{dt} = N_0 \phi \sigma - \lambda N_t \quad (2.31)$$

จากการอินทิเกรต จะได้

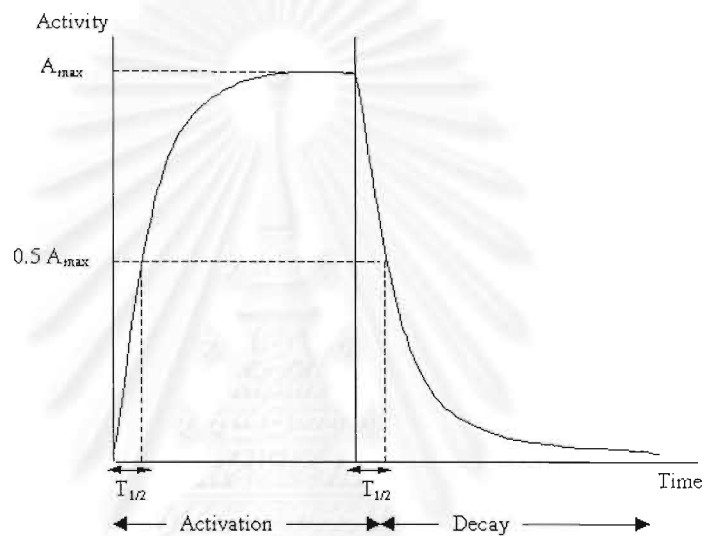
$$\lambda N_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.32)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.30 ค่า λN_t นั้นคือค่าอัตราการสลายตัว หรือ ค่าความแรงแรงรังสี (activity) ณ เวลา t (A_t) ดังนั้นความแรงแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.33)$$

แต่ถ้าทิ้งนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้หลังจากการอาบรังสีแล้วเป็นเวลา t_d ความแรงแรงรังสีจะมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.34

$$A_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) (e^{-\lambda t_d}) \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแรงแรงรังสี ขณะที่อาบรังสีและปล่อยให้สลายตัว

ความแรงแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างได้ ดังสมการที่ 2.34 แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มข้นของนิวตรอนมีค่าไม่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงได้และภาคตัดขวางของการจับนิวตรอนก็ไม่สามารถหาได้ถูกต้อง ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้จึงนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison method) จากความแรงแรงรังสีที่วัดได้ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน โดยที่ตำแหน่งในการอาบรังสี เวลาในการอาบรังสี ช่วงระยะเวลาในการวัด และระบบวัดรังสี เดียวกันทั้งหมด ทำให้สามารถคำนวณเปรียบเทียบหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้จากความสัมพันธ์นี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงแรงรังสีจากสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงแรงรังสีจากสารมาตรฐาน}} \quad (2.35)$$

ตัวอย่างธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน [28]

Element	Isotope	Abundance (%)	Reaction	γ -ray Energy (MeV)	Half-life	Detection Limits (μg)
Al	^{27}Al	100	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	1.779	2.31min	0.02
As	^{75}As	100	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	0.559	26.8 hr	0.002
Cd	^{114}Cd	28.93	$^{114}\text{Cd}(n,\gamma)^{115}\text{Cd}$	0.528	53.5 hr	0.05
	^{116}Cd	7.61	$^{116}\text{Cd}(n,\gamma)^{117}\text{Cd}$	1.997	3.0 hr	0.1
Ca	^{46}Ca	0.004	$^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}$	1.297	4.54 d	-
	^{48}Ca	0.185	$^{48}\text{Ca}(n,\gamma)^{49}\text{Ca}$	3.084	8.75min	3
Cl	^{37}Cl	24.47	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$	1.643	37.1min	0.04
Cu	^{63}Cu	69.09	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	1.346	12.88 hr	0.003
Au	^{197}Au	100	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	0.412	2.7 d	0.0003
I	^{127}I	100	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$	0.443	25 min	0.003
Fe	^{58}Fe	0.31	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	1.099	46.5 d	10
Ni	^{64}Ni	1.08	$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$	1.482	2.55 hr	0.4
Ti	^{50}Ti	5.18	$^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$	0.320	5.76min	-
Hg	^{196}Hg	0.146	$^{196}\text{Hg}(n,\gamma)^{197\text{m}}\text{Hg}$	0.134	24hr	0.006
	^{202}Hg	29.08	$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203}\text{Hg}$	0.279	46.9 d	0.02
	^{204}Hg	6.85	$^{204}\text{Hg}(n,\gamma)^{205}\text{Hg}$	0.204	5.1 min	0.9
Si	^{30}Si	3.09	$^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}$	1.266	2.64 hr	0.1
Ag	^{107}Ag	51.35	$^{107}\text{Ag}(n,\gamma)^{108}\text{Ag}$	0.633	2.42min	0.0001
	^{109}Ag	48.65	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	0.658	253 d	0.3

เนื่องจากมีธาตุประมาณ 60 ธาตุ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ดีโดยเทคนิคนี้ถึงแม้มีปริมาณเจือปนเพียงเล็กน้อย ทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันนั้นมีหลายสาขา ส่วนมากมักถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุบางชนิดในวัสดุตัวอย่างที่สนใจศึกษา ทั้งทางด้านโลหะวิทยา แร่ ถ่านหิน และดิน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยภาคสนาม ตัวอย่างเช่น การหาปริมาณอะลูมิเนียมในแร่เหล็ก [29] การหาปริมาณแมงกานีสในแร่แมงกานีสเพื่อวัดระดับคุณภาพ [30] การวิเคราะห์ธาตุพวกแลนธาไนด์ (Lanthanide) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับจุดกำเนิดพื้นผิวโลก [31] งานสำรวจทางด้านธรณีเคมี และแหล่งปิโตรเลียม [32],[33] เป็นต้น

อีกเทคนิคหนึ่งที่มีักสนใจศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยสำหรับออกภาคสนาม ณ พื้นที่ คือ เทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ

2.4 เทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ [34]

รังสีแกมมานั้นสามารถเกิดขึ้นเองได้เนื่องจากแหล่งกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นรังสีที่สิ่งมีชีวิตได้รับตลอดเวลาอยู่แล้ว มาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆ ดังนี้

ก) รังสีคอสมิก (Cosmic Radiation) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic rays) คือรังสีคอสมิกที่อยู่เหนือบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก โดยส่วนหนึ่งมีแหล่งกำเนิดจากนอกระบบสุริยะจักรวาล และอีกส่วนหนึ่งเกิดบนผิวของดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกจะประกอบด้วย โปรตอน 87% อนุภาคอัลฟา 11% นิวเคลียสหนัก (Heavy nuclei) 1% อิเล็กตรอน 1%

- รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic rays) เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิที่วิ่งเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกแล้วเกิดอันตรกิริยากัน

ข) กัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ที่ผิวโลก (Terrestrial radiation) ธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนผิวโลกมีทั้งหมด 340 ธาตุ มี 70 ธาตุที่เป็นธาตุกัมมันตรังสี โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิด คือ

- ธาตุกัมมันตรังสีดั้งเดิม (Primordial radionuclides) เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดโลก เป็นพวกที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวนานมาก ดังนี้

1. อนุกรมยูเรเนียม ยูเรเนียมในธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป ^{238}U มี 99.274% ^{235}U มี 0.721% และ ^{234}U มี 0.0056% ต่างก็เป็นไอโซโทปรังสี แต่เนื่องจาก ^{235}U และ ^{234}U มีปริมาณ

อยู่น้อยมาก ดังนั้นถือว่า กัมมันตรังสีจากยูเรเนียมเกิดจาก ^{238}U เพียงไอโซโทปเดียว มีครึ่งชีวิต 4.5×10^9 ปี สลายตัวอย่างต่อเนื่อง ให้อนุภาคแอลฟา 11 ตัว เบตา 10 ตัว และรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆอีกหลายตัว มีผลผลิตจากการสลายตัว (decay products) ของยูเรเนียมตัวหนึ่งเป็นก๊าซ คือ เรดอน (^{222}Rn) ซึ่งจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา สามารถแพร่กระจายสู่บรรยากาศได้ กัมมันตรังสีส่วนใหญ่มักเกิดจากลูกหลานตัวที่ 8 และ 9 คือ ^{214}Pb และ ^{214}Bi

2. อนุกรมทอเรียม จะมีไอโซโทปรังสีที่สำคัญที่สุด คือ ทอเรียม-232 (^{232}Th) มีครึ่งชีวิต 1.4×10^{10} ปี มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง และนิวไคลด์จากการสลายตัวของ ^{232}Th ตัวที่ให้รังสีแกมมาความเข้มมากที่สุด คือ ^{208}Tl

3. โปแตสเซียม มีเพียงโปแตสเซียม-40 (^{40}K) ที่เป็นไอโซโทปรังสีเท่านั้น มีสัดส่วนในธรรมชาติเล็กน้อยประมาณ 0.0119% ปลดปล่อยให้รังสีแกมมาพลังงานเดียว คือ 1.46 MeV มีครึ่งชีวิต 1.3×10^9 ปี

- ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmogenic radionuclides) เป็นกัมมันตรังสีที่เกิดเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับรังสีคอสมิก มีประมาณ 25 ธาตุ เช่น คาร์บอน-14 (^{14}C) จากปฏิกิริยา $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ ทริเทียม (^3H) เบริลเลียม-7 (^7Be) ฟอสฟอรัส-32 (^{32}P) ซิลิกอน-32 (^{32}Si) อาร์กอน-37 (^{37}Ar) และ ซัลเฟอร์-35 (^{35}S) เป็นต้น

โดยทั่วไปรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเนื่องจากธาตุกัมมันตรังสีดั้งเดิมที่ปะปนบนผิวโลก คือ อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และโปแตสเซียม เป็นส่วนใหญ่ที่มีผลต่อการตรวจวัดรังสีแกมมา ดังนั้น จึงมักทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ใน อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และโปแตสเซียม ที่มีอยู่ในดิน หิน หวาย แร่ และ วัสดุจากธรรมชาติ ได้โดยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี (gamma spectrometry) ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการ และในพื้นที่ภาคสนาม เทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาตินี้เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างสะดวก ถูกต้อง และมีปลอดภัยสูงมาก เนื่องจากไม่ต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีใด ๆ และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง การวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถที่จะคำนวณได้จากการวัดความเข้มรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุนั้น ๆ และคำนวณได้ด้วยค่าประสิทธิภาพการวัดรังสีของระบบวัดรังสีในแต่ละระดับพลังงาน แต่ทางปฏิบัติบางครั้งวิเคราะห์เชิงปริมาณได้จากวิธีการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานของธาตุนั้น ๆ

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนิวตรอนนี้ เป็นงานวิจัยภาคสนาม ดังนั้นอุปกรณ์หลักที่ใช้งานจึงเป็นแบบเคลื่อนย้ายได้ ที่สำคัญ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอน ต้องมีความแรงรังสีที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนย้ายนำไปทดลองภาคสนามได้ มีดังต่อไปนี้

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity – germanium , HPGe) แบบเคลื่อนย้ายได้ ขนาด 5.25 ซม. X 5.35 ซม. ของ CANBERRA รุ่น GR2521 มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV เท่ากับ 25%

3.1.2 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer ; MCA) แบบเคลื่อนย้ายได้ ของ CANBERRA รุ่น Series 10 plus

3.1.3 ไมโครคอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว (Notebook microcomputer) สำหรับบันทึกข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องเก็บลงในแผ่นดิสเกตต์ (diskette)

3.1.4 ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรงรังสี 1 คูรี

3.1.5 กระบอกตะกั่ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.5 ซม. หนา 0.5 ซม. สูง 35 ซม. ใช้สำหรับกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

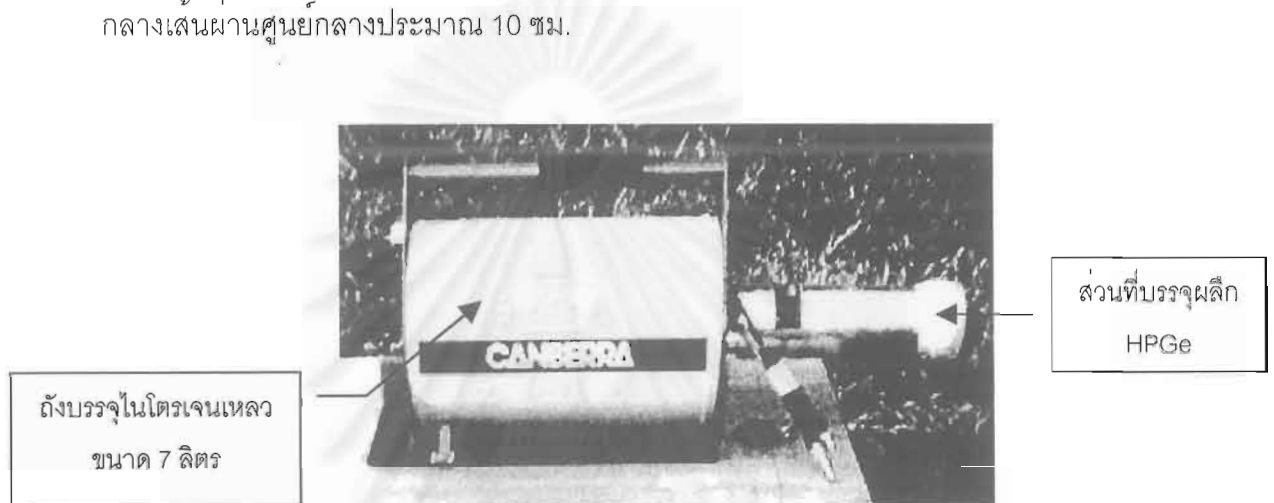
3.1.6 แผ่นแคดเมียม หนาประมาณ 0.5 มม. สำหรับดูดจับนิวตรอนช้าไม่ให้อ่านไปถึงหัววัดรังสี HPGe เพื่อการตรวจสอบที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 ของโบรอน

3.1.7 ฝาครอบลิเทียมคาร์บอเนต (LiCO_3) สำหรับดูดจับนิวตรอนช้าไม่ให้อ่านไปถึงหัววัดรังสี HPGe เพื่อการตรวจสอบที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 ของโบรอน

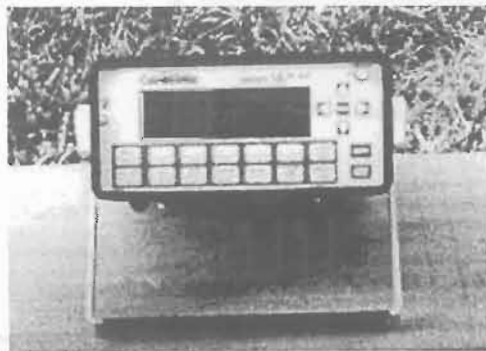
3.1.8 ถังอะลูมิเนียมทรงกระบอกบรรจุพาราฟินผสมบอแรกซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ซม. สูงประมาณ 40 ซม. สำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนในการออกภาคสนาม พร้อมรถเข็น

3.1.9 ท่อชุดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ยาวประมาณ 1.5 ม.

3.1.10 โต๊ะสำหรับวางคว่ำหัววัดรังสี ขนาด 33 × 38 ซม. สูง 40 ซม. มีช่องทะลุตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ซม.



ก) หัววัดรังสีแกมมาแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

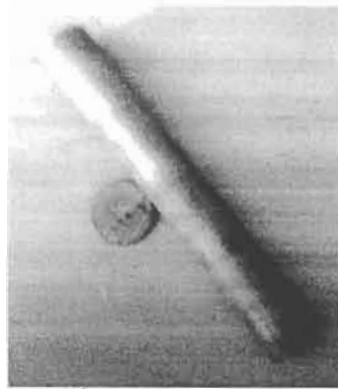


ข) เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

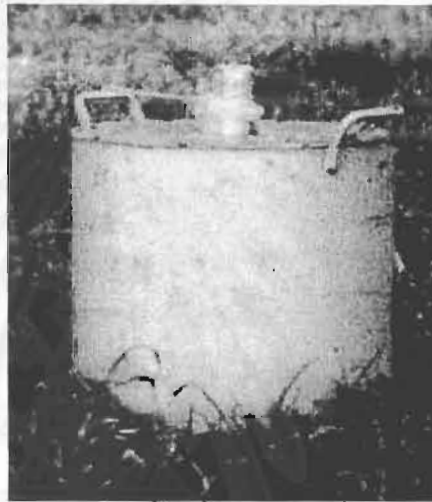


ค) เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

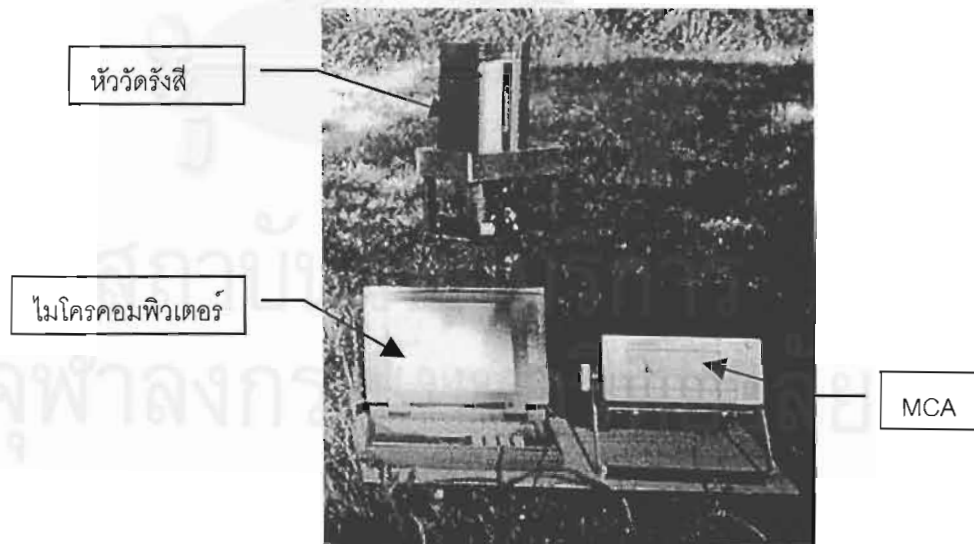
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์หลักของระบบวัดรังสีแกมมา



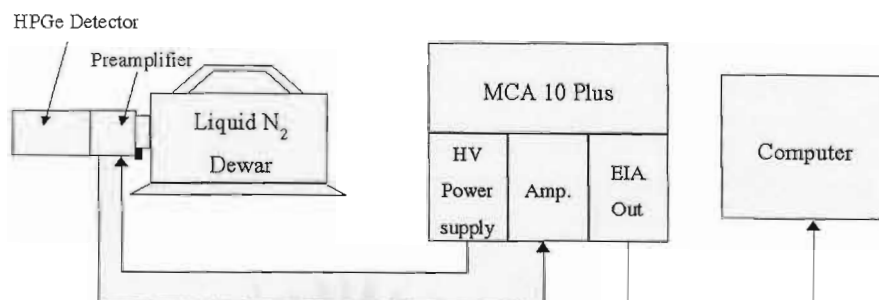
รูปที่ 3.2 กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ 3.3 ถังอะลูมิเนียมสำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนในการออกภาคสนาม



รูปที่ 3.4 ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมา ขณะวัดรังสี ณ พื้นที่



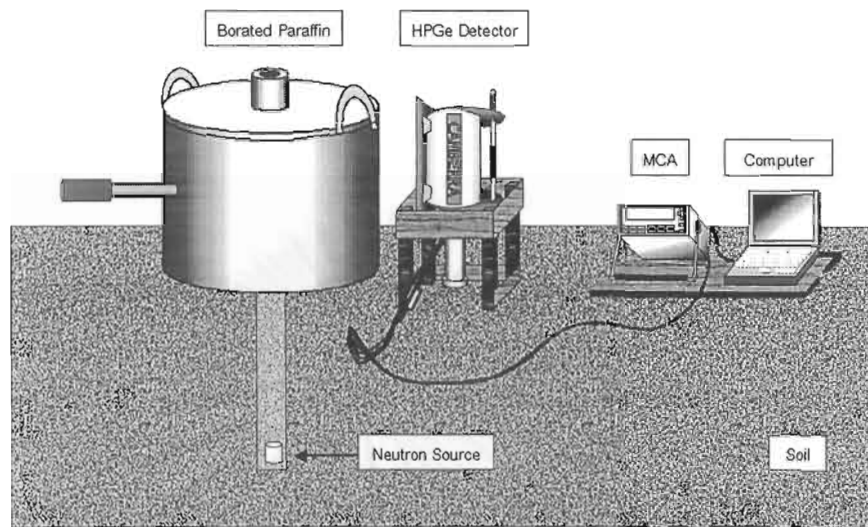
รูปที่ 3.5 แผนผังการจัดระบบวัดรังสีแกมมา ณ พื้นที่

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยอาศัยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและการจับนิวตรอน จะต้องออกแบบให้มีการอาบรังสีนิวตรอนขณะเดียวกันกับการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น ณ พื้นที่บริเวณนั้น อย่างเหมาะสม จึงจะมีความไวในการวัดรังสีสูง ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น วิธีการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.2.1 ศึกษาและออกแบบระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา ณ พื้นที่ เนื่องจากเป็นงานวิจัยภาคสนาม ที่มีการเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนออกภาคสนาม ดังนั้นจึงต้องมีภาชนะสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสมต่อความปลอดภัยด้วย ทำให้การออกแบบระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ก) ออกแบบถังบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนสำหรับออกภาคสนาม ถังบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 1 คูรี ในการออกภาคสนามนี้ ได้ดัดแปลงมาจากถังที่ใช้สำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอน $^{239}\text{Pu/Be}$ ความแรงแรังสี 5 คูรี ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ซึ่งเป็นถังอะลูมิเนียมบรรจุพาราฟินผสมบอแรกซ์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ซม. สูงประมาณ 40 ซม. มีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ตรงกลาง สำหรับใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน และมีแท่งอะลูมิเนียมซึ่งมีเกลียวขั้วเพื่อล็อกให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ตรงกลางถึงขณะเก็บ แผนภาพของถังพาราฟินผสมบอแรกซ์นี้แสดงในรูปที่ 3.6 พร้อมมรดกเงิน เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอน

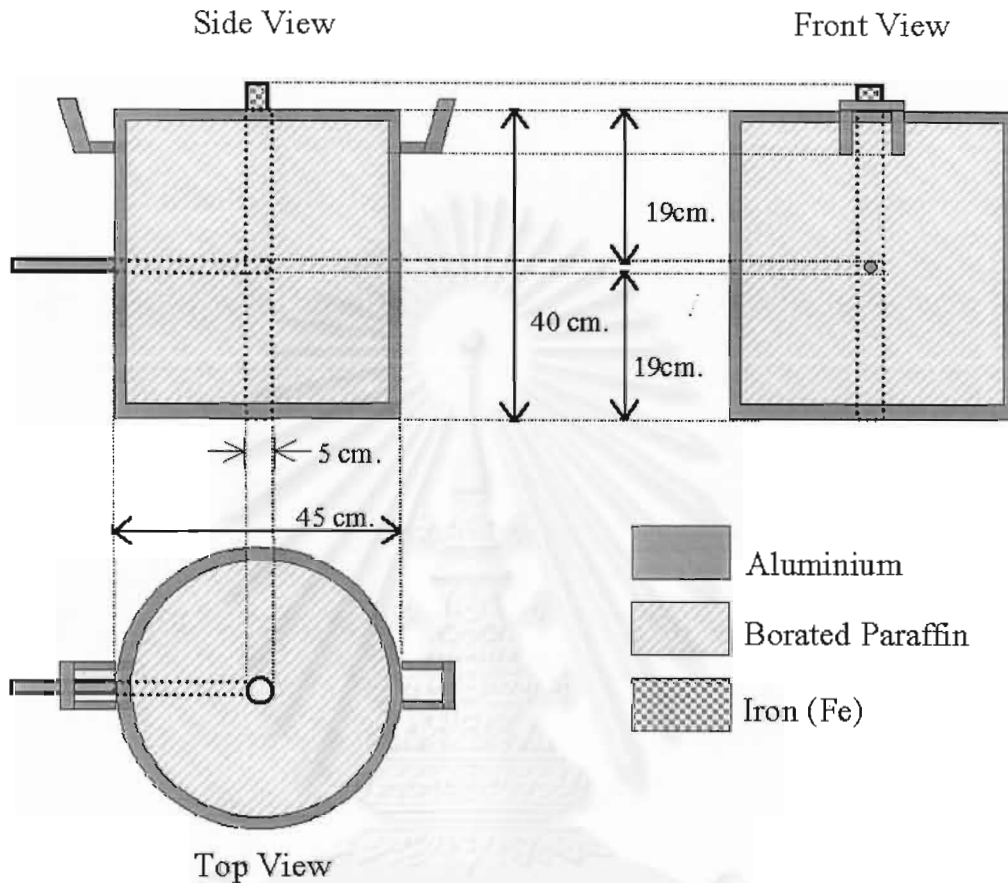


รูปที่ 3.7 ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในเบื้องต้นที่เริ่มศึกษาวิจัย

3.2.2 ศึกษาการจัดระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมา โดยศึกษาจากปัจจัยเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมา แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

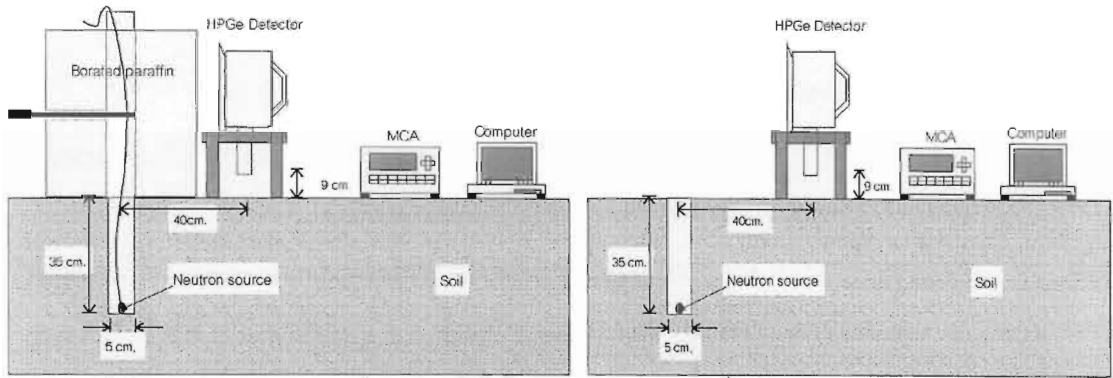
ก) ทดสอบการการรบกวนของรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 2223.1 keV ของไฮโดรเจน และรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของโบรอน จากถังพาราฟินผสมบอแรกซ์ที่บรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน เนื่องจากไฮโดรเจนและโบรอนเป็นธาตุองค์ประกอบของพาราฟินผสมบอแรกซ์ในถังนี้ จึงต้องทดสอบว่ามีความเข้มรังสีฟรอมต์แกมมาดังกล่าวมากน้อยเพียงใด ขณะที่ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์บนหลุมที่ขุดเจาะสำหรับหย่อนต้นกำเนิดนิวตรอนลงไปในดิน

โดยทดลองจัดระบบวัดรังสีดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 35 ซม. ระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสี 40 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 9 ซม. เวลาในการวัดรังสี 3600 วินาที ทำการทดลองโดยการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาขณะที่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน กับไม่มีถังพาราฟินวางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน ดังรูปที่ 3.8 ก) และ รูปที่ 3.8 ข)



รูปที่ 3.6 แผนภาพของถังพาราฟินผสมบอแรกซ์สำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน

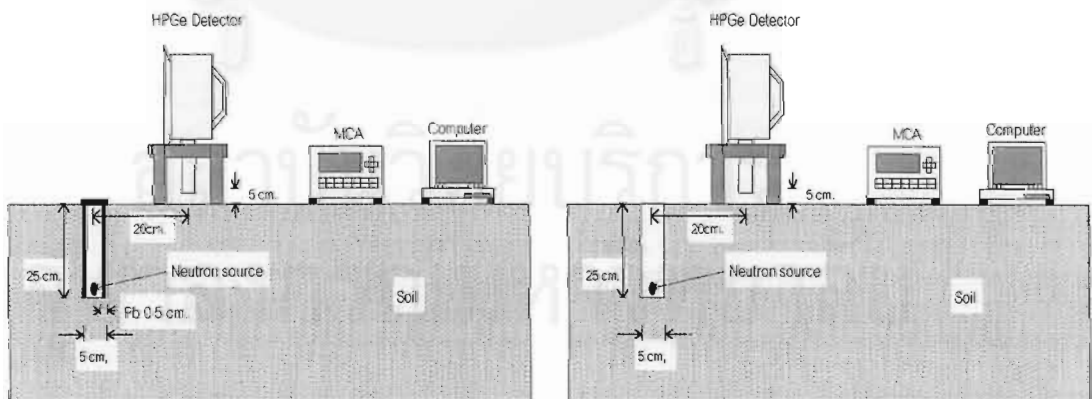
ข) ออกแบบระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมา ณ พื้นที่ โดยศึกษาเบื้องต้นจากงานวิจัยของ Trombka , Senftle and Schmadebeck [6] เรื่องการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดบริเวณผิวหน้าในผงหินแกรนิตโดยเทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เนื่องจากมีการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดเหมือนกัน และมีการจัดระบบวัดรังสีโดยให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ในดิน ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในเบื้องต้นที่เริ่มศึกษาวิจัย แสดงดังในรูปที่ 3.7 โดยเลือกชุดหลุมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. เนื่องจากมีขนาดเหมาะสมในการใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.24 ซม. สูง 3.1 ซม. ได้สะดวกและรวดเร็ว



ก) ขณะมีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุม
 ข) ขณะไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุม
 รูปที่ 3.8 ระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในการทดสอบการวางถังพาราฟินผสมบอแรกซ์

ข) ทดสอบการใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ นี้มีการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV จาก ^{241}Am มีปริมาณการปลดปล่อย 36 % [35] และ 4433 keV จากปฏิกิริยา $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}^*$ มีความเข้มรังสีค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงทดลองใช้กระบอกตะกั่วหนาประมาณ 0.5 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.5 ซม. เพื่อลดทอนรังสีแกมมาทั้งสองนี้จากต้นกำเนิดนิวตรอน และเพื่อความปลอดภัยด้วย

ได้ทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดสูงจากพื้น 5 ซม. และไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุม เวลาในการวัดรังสี 1800 วินาที ทดลองโดยใช้กระบอกตะกั่วและไม่ใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนดังรูปที่ 3.9 ก) และ 3.9 ข)

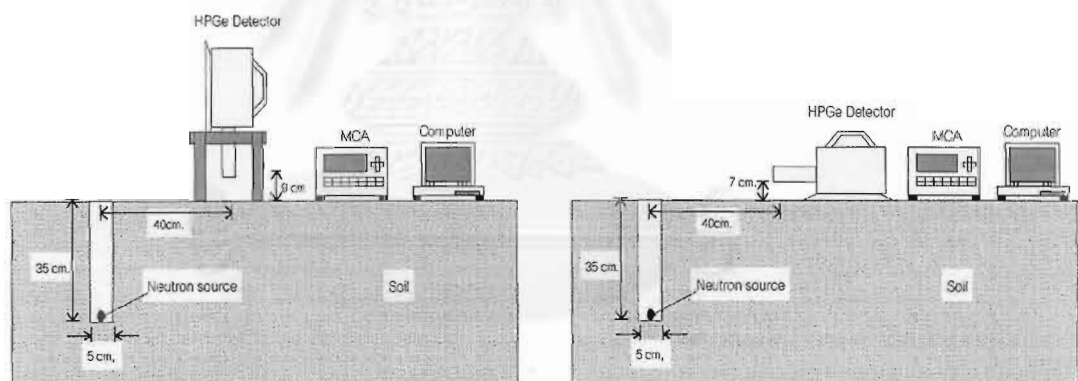


ก) ขณะใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสี
 ข) ขณะไม่ใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสี

รูปที่ 3.9 ระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในการทดสอบการใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

ค) ศึกษาการจัดตำแหน่งหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสี โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. **ศึกษาลักษณะการวางหัววัดรังสี** เพื่อทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของหัววัดรังสีในลักษณะการวางตามแนวตั้งและแนวนอน เนื่องจากหัววัดรังสีที่ใช้ในการวิจัยนี้ คุณลักษณะของผลึกเจอร์มาเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.25 ซม. หนา 5.35 ซม. มีความกว้างใกล้เคียงกัน ซึ่งจากลักษณะเชิงเรขาคณิตของผลึกเจอร์มาเนียมนี้ เห็นได้ว่าเมื่อวางหัววัดรังสีในแนวตั้งมีพื้นที่ในการวัดรังสีได้มากกว่าในแนวนอน จึงทำหาคาดคะเนว่า เมื่อวางหัววัดรังสีในแนวตั้งน่าจะวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าวางในแนวนอน ดังนั้นจึงทำการทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาในลักษณะการวางหัววัดรังสีทั้งแนวตั้งและแนวนอน โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 35 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 40 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากผิวดิน 9 ซม. ในแนวตั้ง และ 7 ซม. ในแนวนอน ไม่มีถังพาราฟินวางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน เวลาในการวัดรังสี 3600 วินาที ซึ่งทดลองวางหัววัดรังสีในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.10 ก) และวางหัววัดรังสีในแนวนอน ดังรูปที่ 3.10 ข)



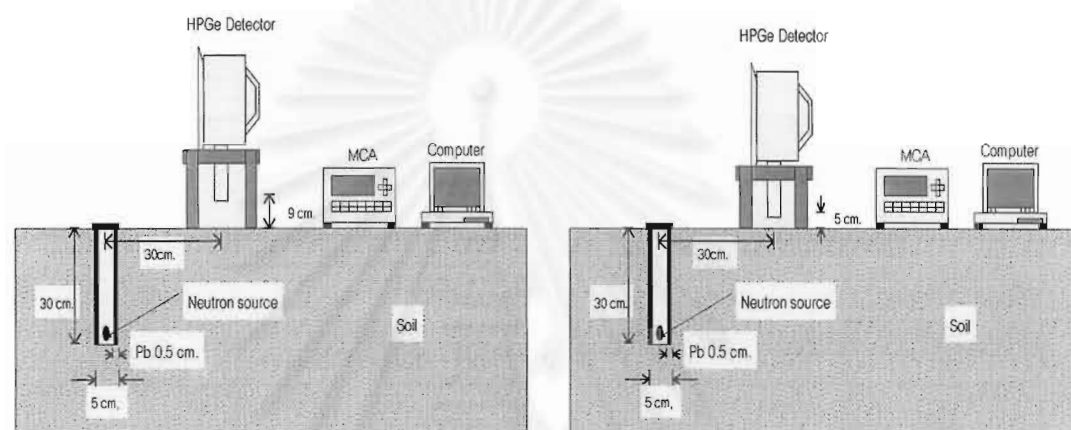
ก) ขณะวางหัววัดรังสีในลักษณะแนวตั้ง

ข) ขณะวางหัววัดรังสีในลักษณะแนวนอน

รูปที่ 3.10 ระบบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาในศึกษาลักษณะการวางหัววัดรังสี

2. **ศึกษาระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน** เมื่อหัววัดรังสีวางในลักษณะแนวตั้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาให้ดีขึ้น จึงทดลองลดระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดินที่ระยะ 9 ซม. เป็น 5 ซม. (ระยะ 5 ซม. คือ ระยะต่ำที่สุด เนื่องจากว่าต้องทำการทดลองใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหัววัดรังสี เพื่อดูดจับนิวตรอนเข้าในการตรวจสอบที่มาของรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของ โบรอน)

โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 30 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 30 ซม. ใช้กระบอกระบายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนและไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน เวลาในการวัดรังสี 1800 วินาที ทำการทดลองโดยวัดรังสีฟรอมต์แกมมาที่ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 9 ซม. และ 5 ซม. ดังรูปที่ 3.11 ก) และ 3.11 ข)



ก) ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 9 ซม.

ข) ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน

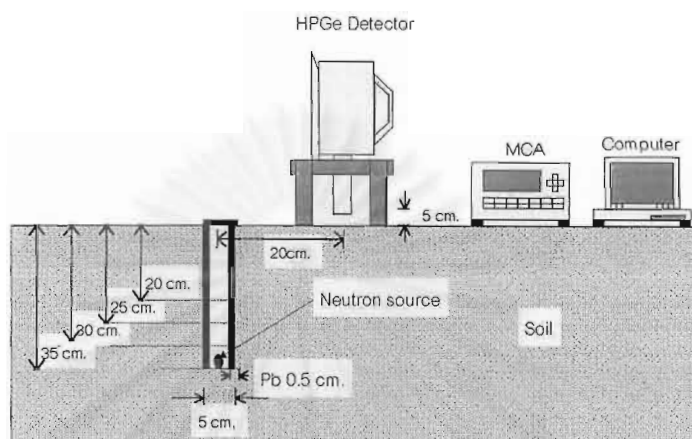
5 ซม.

รูปที่ 3.11 ระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในการศึกษาระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน

3. ศึกษา ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอนปลดปล่อยรังสีแกมมาปริมาณค่อนข้างสูงดังกล่าวมาแล้ว จะทำให้เกิดรังสีแบคกราวด์รบกวนต่อสเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมาที่ต้องการวัด ดังนั้นจึงทดลองวัดรังสีฟรอมต์แกมมาโดยปรับเปลี่ยนระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอนที่ระยะต่างๆ เพื่อให้ได้ระยะลึกที่เหมาะสมต่อการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในหลายช่วงพลังงาน

โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดสูงจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกระบายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน เวลาในการวัด

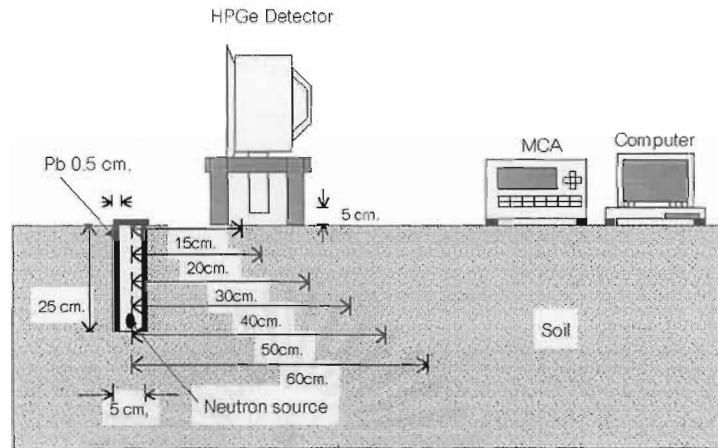
รังสี 1800 วินาที ทำการ ทดลองโดยให้หลุมต้นกำเนิดนิวตรอนมีระยะลึกที่ระยะ 20 , 25 , 30 และ 35 ซม. ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในการศึกษาระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน

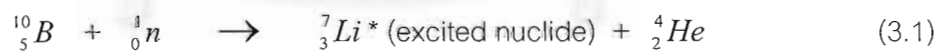
4. ศึกษาระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสี นอกจากรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนที่เป็นรังสีแบบควมรอบกวน ต่อสเปกตรัมรังสีพร้อมดีแกมมาแล้ว รังสีพร้อมดีแกมมาที่เกิดขึ้นสามารถเดินทางได้ระยะทางห่างจากจุดที่เกิดปฏิกิริยาได้ต่างกัน ขึ้นกับพลังงานของรังสีพร้อมดีแกมมาแต่ละตัวเอง ดังนั้นการวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจึงต้องทดลอง ปรับเปลี่ยนตำแหน่งวางหัววัดรังสี ให้มีระยะห่างที่เหมาะสมต่อการวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในหลายช่วงพลังงาน

โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีสูงจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนและไม่มีถึงพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน เวลาในการวัดรังสี 1800 วินาที ทำการทดลอง โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอนที่ระยะ 15 , 20 , 30 , 40 , 50 และ 60 ซม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในการศึกษาระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน

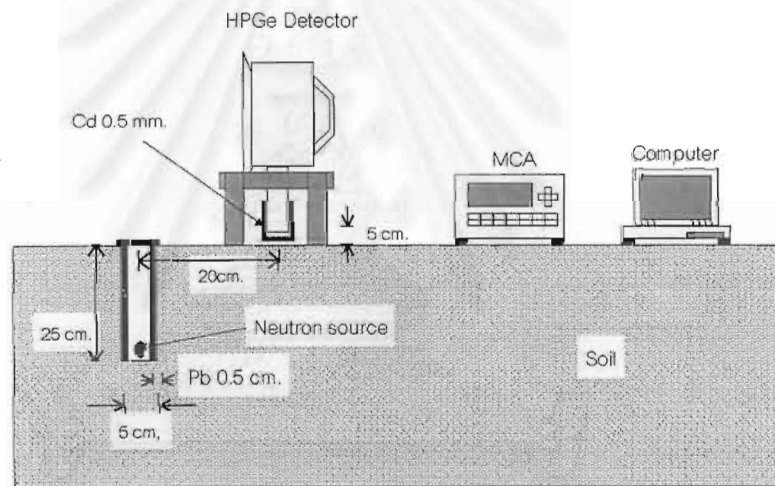
3.2.3. ตรวจสอบที่มาของพีครังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของโบรอน เนื่องจากหัววัดรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คุณลักษณะของผลึกเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์นั้นมีโบรอนและลิเทียมเจือปนเพียงเล็กน้อย (ดังแสดงใน ภาคผนวก ข) ซึ่งทั้งโบรอนและลิเทียมสามารถที่จะปลดปล่อยรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV จากการทำอันตรกิริยากับนิวตรอนได้ โดยโบรอนทำอันตรกิริยาการจับนิวตรอน ส่วนลิเทียมทำอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ดังต่อไปนี้



สำหรับงานวิจัยนี้จำเป็นต้องตรวจสอบที่มาของพีครังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV โดยใช้แผ่นแคดเมียมและลิเทียมคาร์บอเนต ครอบหัววัดรังสี โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ก) ใช้แผ่นแคดเมียมครอบหัววัดรังสี เพื่อดูดจับนิวตรอนช้าไม่ให้เข้ามาทำอันตรกิริยากับโบรอนและลิเทียมในหัววัดรังสี ซึ่งจะทำให้ทราบว่าพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV เป็นพีคเนื่องจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโบรอนในดินเท่านั้น หรือมาจากโบรอนและลิเทียมในหัววัดรังสีด้วย

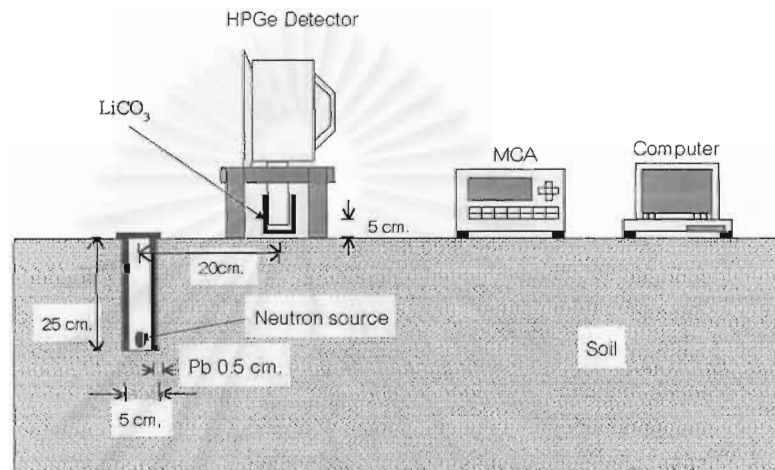
โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน ทดลองโดยใช้แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มม. ครอบหัววัดรังสี และไม่ใช่แผ่นแคดเมียมครอบหัววัดรังสี ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาโดยใช้แผ่นแคดเมียมครอบหัววัดรังสี

ข) ใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหัววัดรังสี เพื่อดูดจับนิวตรอนช้าไม่ให้ทำอันตรกิริยากับโบรอนและลิเทียมในหัววัดรังสี ทำนองเดียวกันกับการใช้แผ่นแคดเมียมในขั้นตอนที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าฝาครอบลิเทียมคาร์บอเนตจะมีลิเทียมเป็นธาตุองค์ประกอบ ลิเทียมนี้เมื่อทำอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวตรอนจะให้พีค 478 keV เช่นกัน แต่เป็นพีคปกติ มิได้เป็นพีคกว้าง (broaden peak) เหมือนอย่างกับที่เกิดจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนของโบรอน ดังนั้นจึงทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาเมื่อใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหัววัดรังสี

โดยทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกลดทอนกัมมันตรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน ทดลองโดยใช้และไม่ใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหัววัดรังสี ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ระบบวัดรังสีพร้อมลดทอนกัมมาโดยใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหัววัดรังสี

3.2.4. ทดลองวัดรังสีแกมมาในพื้นที่ต่างๆ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยเปรียบเทียบกับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการ โดยได้ทำการจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกลดทอนกัมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน ทั้งหมด 8 แห่ง โดยมีการวัดรังสีแกมมา 3 ลักษณะ ดังนี้

- วัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติหรือรังสีแบคกราวด์ เป็นเวลา 3600 วินาที
- วัดรังสีพร้อมลดทอนกัมมาที่เกิดขึ้น เป็นเวลา 3600 วินาที
- วัดรังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุบางชนิด เป็นเวลา 1800 วินาที

ได้ทดลองสร้าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อเทอร์มอลนิวตรอน ฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน โดยเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์นี้ได้มาจาก ความเข้มรังสีแกมมาพลังงาน 1293.5 keV ของอินเดียม ที่เป็นธาตุองค์ประกอบของอิเล็กโทรด (electrode) ภายในหัววัดรังสีแกมมา HPGe

3.2.5. **ทดลองวิเคราะห์ปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ตัวอย่าง** โดยจัดระบบดังนี้ คือ ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม. ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน 5 ซม. ใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่มีถังพาราฟินผสมบอแรกซ์วางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอน ทั้งหมด 4 แห่ง ใน 3 ลักษณะเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ผ่านมา คือ

- วัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติหรือรังสีแบคกราวด์ เป็นเวลา 3600 วินาที
- วัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น เป็นเวลา 3600 วินาที
- วัดรังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุบางชนิด เป็นเวลา 1800 วินาที

เมื่อได้พื้นที่ใต้พีคของรังสีแกมมาตัวแทนของแต่ละธาตุ จึงทดลองนำไปคำนวณหาปริมาณของธาตุบางชนิด จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อเทอร์มาลนิวตรอนพลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ของธาตุแต่ละชนิดนั้น

3.2.6. **ทดลองวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียม** โดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ ทำการทดลองวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติของตัวอย่างดินที่สุ่มเก็บจากแต่ละพื้นที่ทั้ง 8 แห่ง มาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี (gamma spectrometry) โดยจัดระบบวัดรังสีแกมมาดังนี้ คือ ใช้หัววัดรังสีแกมมาไซเดียมไอโอไดต์ (แคลเซียม) ขนาด 5 นิ้ว X 5 นิ้ว ครอบกเหล็กหลอกำบังรังสีแบคกราวด์ให้หัววัดรังสีและมีฝาปิด เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง รุ่น 35 Plus เวลาในการวัดรังสี 3600 วินาที ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จาก พื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาพลังงาน 1.460 MeV จากโปแตสเซียม - 40 (^{40}K) โดยวิธีการเปรียบเทียบกับสารโปแตสเซียมมาตรฐานปริมาณ 3% และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียมจากวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรีนี้ กับ ปริมาณโปแตสเซียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการ

ทดลองวิเคราะห์เชิงปริมาณโปแตสเซียม ณ พื้นที่ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน จากสเปกตรัมรังสีแกมมาตามธรรมชาติ (ก่อนนำต้นกำเนิดนิวตรอนลงในหลุม) ของพื้นที่ทั้ง 8 แห่ง ทดลองสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาพลังงาน 1.460 MeV กับปริมาณโปแตสเซียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน สำหรับทดลองการวิเคราะห์เชิงปริมาณของโปแตสเซียม ณ พื้นที่ตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมา

4.1.1. ผลการทดสอบการวางถังเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนบนหลุม

โดยวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพร้อมดีแกมมา ดังรูปที่ ก.1 ในภาคผนวก ก

พื้นที่ใต้พีค (Area) ของรังสีพร้อมดีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุบางชนิดที่อยู่ในดิน และอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีพร้อมดีแกมมาต่อแบคกราวด์ (Area/BG) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อมีและไม่มีถังเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนบนหลุม

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	เมื่อมีถัง		เมื่อไม่มีถัง	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	17493	0.38	4606	0.13
Annihilation	511	13683	0.32	14035	0.60
Ge*(inelastic)	596.1	148	0.01	616	0.04
Fe*(inelastic)	846.9	901	0.05	649	0.03
Al*(inelastic)	1014.42	169	0.02	147	0.02
Ti(capture)	1381.74	580	0.08	613	0.10
Si*(inelastic)	1779	2896	0.30	3417	0.49
H(capture)	2223.1	16107	3.84	16104	3.58
Si(capture)	3539.11	1748	0.64	1702	0.71
Si(capture)	4934.39	1307	1.99	1387	1.55
O*(inelastic)	6128.63	281	0.60	288	0.64
Al(capture)	7723.85	79	1.28	62	1.29

สังเกตเห็นว่าพื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาเหล่านี้ เมื่อไม่มีถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนวางบนหลุมต้นกำเนิดนิวตรอนแล้ว พีคของโบรอน เหล็ก อะลูมิเนียม มีพื้นที่ใต้พีคน้อยลง และอัตราส่วน Area/BG ก็น้อยลง เนื่องจากถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนนั้นเป็นอะลูมิเนียมซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบบ้าง และมีพาราฟินผสมบอแรกซ์บรรจุอยู่ในถัง แต่สังเกตพีค Annihilation พลังงาน 511 keV เห็นว่าพื้นที่ใต้พีคเพิ่มขึ้น แสดงว่ารังสีพรอมต์แกมมาพลังงานต่ำๆ น่าจะวัดได้มากขึ้นเมื่อไม่มีถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนวางบนหลุม ถ้าสังเกตพีคไททาเนียม (Ti) พลังงาน 1382 keV และ ซิลิกอน Si^* 1778.9 keV ซึ่งเป็นช่วงพลังงานระดับกลางและมาจากในดินเท่านั้น เห็นว่าวัดรังสีได้มากขึ้น และอัตราส่วน Area/BG ก็มากขึ้น ถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนนี้อาจก้ำกั๋งหรือลดทอนพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น และก็ยังก้ำกั๋งนิวตรอนไม่ให้เข้าทำอันตรกิริยากับหัววัดรังสีด้วย สังเกตจากพื้นที่ใต้พีคของเจอร์มาเนียม (เป็นธาตุองค์ประกอบของผลึกหัววัดรังสี) เพิ่มมากขึ้น เมื่อไม่มีถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนวางบนหลุม

สำหรับพีคของไฮโดรเจนและรังสีพรอมต์แกมมาพลังงานสูงๆ พื้นที่ใต้พีคมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเฉพาะพีคของไฮโดรเจนมีค่าเกือบเท่ากัน แสดงว่าการเกิดอันตรกิริยาของไฮโดรเจนเกิดที่บริเวณลึกใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนมากกว่าบนที่ผิวน้ำดิน การที่พื้นที่ใต้พีคไฮโดรเจนพลังงาน 2223.1 keV เมื่อมีถึงวางบนหลุมแล้วไม่เพิ่มขึ้นนั้น น่าจะเป็นเพราะว่า ไฮโดรเจนมีค่าภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนต่ำมากด้วยประกอบกับนิวตรอนช้าที่ทะลุผิวดินขึ้นมามีความเข้มข้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจึงไม่เพิ่มมากขึ้นนัก แต่สำหรับโบรอนนั้นมีค่าภาคตัดขวางสูงมาก ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าพีคพลังงาน 478 keV ของโบรอนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีถึง เนื่องจากปฏิกิริยาของนิวตรอนช้าที่ทะลุขึ้นมาจากดินกับโบรอนในถัง ดังนั้นในระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาขั้นตอนการทดลองต่อไป จึงเลือกไม่วางถึงเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนบนหลุม เพื่อไม่ให้มีการรบกวนของพีคโบรอนที่เป็นส่วนประกอบของถัง เพื่อพีคที่วัดได้เป็นพีคที่เกิดขึ้นมาจากโบรอนในดินเท่านั้น

4.1.2. ผลการทดสอบการใช้ตะกั่วก้ำกั๋งรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 1800 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.2 ในภาคผนวก ก พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อมีและไม่มีกระบอกตะกั่วกำบัง รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	เมื่อไม่มีกระบอกตะกั่ว		เมื่อมีกระบอกตะกั่ว	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	14259	0.121	14447	0.180
Annihilation	511	34265	0.409	28851	0.370
Ge*(inelastic)	596.1	4957	0.120	4458	0.105
Fe*(inelastic)	846.9	6260	0.115	4148	0.081
Al*(inelastic)	1014.42	2084	0.089	1237	0.041
Ti(capture)	1381.74	2209	0.148	1473	0.115
Si*(inelastic)	1779	14392	0.598	11963	0.647
H(capture)	2223.1	35765	2.957	33015	3.751
Pb*(inelastic)	2614.1	-	-	664	0.101
Si(capture)	3539.11	3991	0.575	3767	0.538
Si(capture)	4934.39	2951	1.492	2550	1.014
O*(inelastic)	6128.63	786	0.557	593	0.481
Al(capture)	7723.85	164	0.690	166	1.085

เมื่อใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนแล้ว พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาวัดได้น้อยลง และอัตราส่วน Area/BG ส่วนใหญ่ลดลงไม่มากนัก ยกเว้นพีคของซิลิกอน ไฮโดรเจน และอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น เมื่อสังเกตจากสเปกตรัมจะเห็นเด่นชัดว่ากระบอกตะกั่วนี้สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV จากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ได้ปริมาณมาก ซึ่งเป็นรังสีแบคกราวด์ที่หนูนรังสีพรอมต์แกมมาพลังงานต่ำถึงพลังงานระดับกลางลดลงไปได้ค่อนข้างมาก แต่กระบอกตะกั่วนี้อาจจะกำบังรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นจากบริเวณที่ทำปฏิกิริยาที่ไม่ได้อยู่ฝั่งด้านเดียวกันกับหัววัดรังสีได้ จึงทำให้อัตราส่วน Area/BG ส่วนใหญ่ลดลงได้ แต่ถึงอย่างไรกระบอกตะกั่วนี้สามารถลดปริมาณรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV จากต้นกำเนิดนิวตรอนได้ค่อนข้างมากเช่นเดียวกัน ทำให้เพิ่มความปลอดภัยมากขึ้น และจากค่าเปอร์เซ็นต์ dead time ของระบบวัดลดลง เมื่อใช้กระบอกตะกั่วกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิด

นิวตรอน %DT ลดลงจาก 8.35 % เป็น 6.35 % ดังนั้นระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในขั้นต้นต่อไปจึงเลือกการใช้ระบบก่อกำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

4.1.3. ผลการศึกษาตำแหน่งหัววัดรังสีและต้นกำเนิดนิวตรอน

ก) ผลการศึกษาลักษณะการวางหัววัดรังสี

โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.3 ในภาคผนวก ก พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดินเมื่อการวางหัววัดรังสีในแนวตั้งและแนวนอน

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	หัววัดวางแนวนอน		หัววัดวางแนวตั้ง	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	3559	0.106	4606	0.132
Annihilation	511	11594	0.588	14035	0.601
Ge*(inelastic)	596.1	464	0.024	616	0.038
Fe*(inelastic)	846.9	682	0.056	649	0.031
Al*(inelastic)	1014.42	312	0.056	147	0.015
Ti(capture)	1381.74	424	0.081	613	0.101
Si*(inelastic)	1779	2857	0.492	3417	0.494
H(capture)	2223.1	13483	3.164	16104	3.577
Si(capture)	3539.11	1660	0.568	1702	0.706
Si(capture)	4934.39	1274	2.576	1387	1.551
O*(inelastic)	6128.63	202	0.639	288	0.635
Al(capture)	7723.85	67	1.117	62	1.292

เมื่อวางหัววัดรังสีในลักษณะแนวตั้ง พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วน Area/BG ก็มากขึ้นด้วย ยกเว้นพีคของเหล็ก และอะลูมิเนียม มีพื้นที่ใต้พีคน้อยลง เนื่องจากเมื่อวางหัววัดรังสีในลักษณะแนวนอนนั้น หัววัดรังสีจะใกล้พื้นดินหรือใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนมากกว่าแนวตั้ง เป็นไปได้ที่นิวตรอนกระเจิงขึ้นมาทำอันตรกิริยากับส่วนประกอบที่เป็นเหล็ก และ อะลูมิเนียมของหัววัดรังสีในแนวนอนได้มากกว่า เพราะแนวตั้งตรงส่วนปลายของหัววัดรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหน้าต่างเบริลเรียม และถ้าสังเกตที่พีคของเจอร์มาเนียมพลังงาน 596.1 keV แนวตั้งมีพื้นที่ใต้พีคมากกว่าแนวนอน เห็นได้ว่าในแนวตั้งหัววัดรังสีมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาได้ดีกว่าในแนวนอน ดังนั้นในระบบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาขั้นต่อไปจึงเลือกทำการทดลองโดยวางหัววัดรังสีในลักษณะแนวตั้ง

ข) ผลการศึกษาระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน

โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 1800 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.4 ในภาคผนวก ก

พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.4

เมื่อวางหัววัดรังสีในระยะห่างจากพื้นดิน 5 ซม. พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วน Area/BG ส่วนมากเพิ่มขึ้น มีบางพีคอัตราส่วน Area/BG น้อยลงไม่มากนัก ถึงแม้ว่าพื้นที่ใต้พีคของเจอร์มาเนียมเพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงว่านิวตรอนทำอันตรกิริยากับหัววัดรังสีมากขึ้น แต่เนื่องมาจากหัววัดรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมประเภท Reverse - electrode ซึ่งสามารถทนต่อนิวตรอนได้ ดังนั้นเมื่อมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาได้มากขึ้น และมีอัตราส่วน Area/BG ดีขึ้น จึงเลือกวางหัววัดรังสีที่ระยะห่างจากพื้นดิน 5 ซม. สำหรับระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน ระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดิน
ต่าง ๆ กัน

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	หัววัดห่างจากพื้น 9 ซม.		หัววัดห่างจากพื้น 5 ซม.	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	4514	0.154	5661	0.120
Annihilation	511	10132	0.508	14038	0.739
Ge*(inelastic)	596.1	498	0.034	1391	0.071
Fe*(inelastic)	846.9	1001	0.094	1371	0.074
Al*(inelastic)	1014.42	256	0.035	414	0.050
Ti(capture)	1381.74	617	0.112	887	0.123
Si*(inelastic)	1779	2820	0.464	4483	0.583
H(capture)	2223.1	14439	4.861	15695	4.517
Si(capture)	3539.11	1233	0.504	1806	0.643
Si(capture)	4934.39	1053	1.871	1417	1.540
O*(inelastic)	6128.63	197	0.432	190	0.289
Al(capture)	7723.85	39	0.650	88	1.222

ค) ผลการศึกษาประสิทธิภาพของต้นกำเนิดนิวตรอน

โดยวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอน เป็นเวลา 1800 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีฟรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.5 ในภาคผนวก ก พื้นที่ใต้พีคของรังสีฟรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ระดับลึกต่าง ๆ

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	20 cm		25 cm***		30 cm		35 cm	
		Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG
B(capture)	478	51824	0.79	34421	0.60	21724	0.54	13126	0.44
Annihilation	511	17320	0.37	13531	0.39	10867	0.59	7998	0.50
Ge*(inelastic)	596.1	1558	0.07	1595	0.08	764	0.08	455	0.04
Fe*(inelastic)	846.9	1902	0.09	1641	0.12	1002	0.08	556	0.08
Al*(inelastic)	1014.42	951	0.08	519	0.05	328	0.05	227	0.05
Ti(capture)	1381.74	599	0.07	727	0.09	511	0.08	385	0.08
Si*(inelastic)	1779	5462	0.59	4434	0.59	3169	0.55	1963	0.36
H(capture)	2223.1	15308	2.95	13224	3.22	10568	3.81	7814	3.03
Si(capture)	3539.11	1590	0.29	1458	0.46	1254	0.54	960	0.54
Si(capture)	4934.39	1134	1.36	1061	1.52	924	1.69	690	1.26
O*(inelastic)	6128.63	460	0.77	269	0.51	208	0.54	154	0.71
Al(capture)	7723.85	91	1.26	70	0.81	41	0.85	30	0.80

พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาทั้งหมด เมื่อระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอนยิ่งลึกยิ่งวัดรังสีพรอมต์แกมมาได้น้อยลงตามลำดับ แต่ถ้าสังเกตที่อัตราส่วน Area/BG จะเห็นว่า ที่รังสีพรอมต์แกมมาพลังงานระดับกลาง ระยะลึก 25 ซม. ส่วนใหญ่มีค่า Area/BG สูง และระดับพลังงานต่ำ ระยะลึก 20 ซม. ส่วนใหญ่มีค่า Area/BG สูง ส่วนระดับพลังงานสูง ระยะลึก 30 ซม. ส่วนใหญ่มีค่า Area/BG สูง ดังนั้นในระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมานี้ซึ่งจะต้องวัดทุกช่วงพลังงานจึงเลือกที่ระยะลึก 25 ซม. เนื่องจาก ระยะลึก 25 ซม.นี้สามารถวัดรังสีพรอมต์แกมมาในช่วงพลังงานต่ำได้อัตราส่วน Area/BG ไม่แตกต่าง จากระยะลึก 20 ซม.มากนัก และในช่วงพลังงานสูงได้อัตราส่วน Area/BG ไม่แตกต่าง จากระยะลึก 30 ซม.มากนักเช่นกัน

ง) ผลการศึกษาระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสี

โดยวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 1800 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีฟรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.6 ในภาคผนวก ก พื้นที่ใต้พีคของรังสีฟรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน ที่ระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสีต่างๆ

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	15 cm		20 cm***		30 cm		40 cm		50 cm		60 cm	
		Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG	Area	A/BG
B(capture)	478	23915	0.20	19918	0.20	11808	0.18	6099	0.15	2832	0.11	1452	0.10
Annihilation	511	42202	0.59	35320	0.57	22539	0.56	13796	0.54	8236	0.55	4629	0.53
Ge*(inelastic)	596.1	13256	0.15	9188	0.12	5464	0.11	2118	0.07	1560	0.09	816	0.08
Fe*(inelastic)	846.9	6278	0.14	5280	0.14	2937	0.12	1528	0.10	882	0.10	644	0.12
Al*(inelastic)	1014.42	2225	0.07	1823	0.07	962	0.06	720	0.07	558	0.09	248	0.07
Ti(capture)	1381.74	2544	0.15	2086	0.15	1122	0.12	588	0.10	320	0.09	222	0.11
Si*(inelastic)	1779	14136	0.62	11813	0.57	7087	0.56	4262	0.54	2126	0.55	1161	0.53
H(capture)	2223.1	52441	0.35	45129	0.36	28723	0.37	17139	0.37	9381	0.34	5070	0.31
Si(capture)	3539.11	4200	0.54	3898	0.59	2553	0.60	1818	0.73	1111	0.76	524	0.60
Si(capture)	4934.39	3160	0.12	2762	0.13	1875	0.13	1250	0.16	781	0.18	452	0.17
O*(inelastic)	6128.63	878	0.58	567	0.43	506	0.74	298	0.67	183	0.70	79	0.50
Al(capture)	7723.85	178	0.07	134	0.07	125	0.10	86	0.14	40	0.13	32	0.22

พื้นที่ใต้พีคของรังสีฟรอมต์แกมมาทั้งหมด เมื่อระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสียิ่งห่างมากยิ่งขึ้นวัดรังสีได้น้อยลงตามลำดับ แต่เมื่อสังเกตอัตราส่วน Area/BG โดยรวมทั้งทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงพลังงานตั้งแต่พลังงานต่ำจนถึงพลังงานระดับกลาง ที่ระยะห่าง 20 ซม. มีอัตราส่วน Area/BG ส่วนใหญ่มีค่าสูง ส่วนรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงานสูงมักวัดได้อัตราส่วน Area/BG มักมีค่าสูงในระยะห่างที่ไกลออกไปแต่ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นสำหรับระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจึงเลือกระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสีที่ระยะ 20 ซม.

4.2 ผลการตรวจสอบที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของโบราณ

4.2.1. ผลการใช้แผ่นแคดเมียมกำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี

โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.7 ในภาคผนวก ก

พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดินเมื่อใช้แผ่นแคดเมียมครอบหัววัดรังสี

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	ไม่ใช้แผ่น Cd		ใช้ Cd 0.5 mm	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	16989	0.198	17218	0.161
Annihilation	511	31653	0.421	42998	0.659
Cd (capture)	588	-	-	69041	1.129
Ge (inelastic)	596.1	5499	0.124	2309	0.040
Fe*(inelastic)	846.9	5544	0.113	4108	0.070
Al*(inelastic)	1014.42	1435	0.044	1716	0.080
Ti(capture)	1381.74	2031	0.106	-	-
Si*(inelastic)	1779	12170	0.617	11065	0.509
H(capture)	2223.1	35319	4.249	34215	2.386
Pb*(inelastic)	2614	985	0.192	1073	0.099
Si(capture)	3539.11	4153	0.485	3743	0.446
Si(capture)	4934.39	2939	1.367	2861	1.229
O*(inelastic)	6128.63	532	0.429	625	0.590
Al(capture)	7723.85	215	0.919	140	0.813

ผลการใช้แผ่นแคดเมียมกำบังห้วงรังสี จะเห็นว่าแคดเมียมสามารถที่จะกั้นนิวตรอนไม่ให้เข้าทำอันตรกิริยากับเจอร์มาเนียมในห้วงรังสีได้ในปริมาณหนึ่ง สังเกตได้จากพื้นที่ใต้พีคของเจอร์มาเนียมที่มีค่าลดลงมาก ส่วนพีคโบรอนพลังงาน 478 keV เห็นว่ามีพื้นที่ใต้พีคเท่าๆเดิม ซึ่งถ้าพิจารณาจากสเปกตรัมร่วมด้วย ได้ว่า พื้นที่ใต้พีคของโบรอนก็เท่าๆเดิม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนัก แสดงว่าพีคโบรอนนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอนในดินเท่านั้น ในระบบรังสีพรอมต์แกมมานี้ไม่เลือกใช้แผ่นแคดเมียมกำบังนิวตรอนให้ห้วงรังสี เนื่องจากนิวตรอนสามารถทำอันตรกิริยากับแคดเมียมได้ดี และให้รังสีพรอมต์แกมมาหลายระดับพลังงานที่มีปริมาณรังสีค่อนข้างสูงมาก จะเป็นการเพิ่มรังสีแบคกราวด์ให้สูงขึ้นไปอีก อีกทั้งมีบางพีคที่พลังงานใกล้เคียงกับพีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากธาตุในดิน ทำให้พีคนี้ไม่สามารถหาพื้นที่ใต้พีคได้ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น พีคของไททาเนียมพลังงาน 1381.7 keV ด้านซ้ายของพีคติดกับพีคของแคดเมียมพลังงาน 1364.3 keV ส่วนด้านขวาของพีคติดกับพีคของแคดเมียมพลังงาน 1399.6 keV

4.2.2. ผลการใช้ลิเทียมคาร์บอเนตกำบังนิวตรอนให้ห้วงรังสี

โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนเป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปที่ ก.8 ในภาคผนวก ก พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ใต้พีค และอัตราส่วน Area/BG ของธาตุบางชนิดในดิน เมื่อใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบ

หิวัดรังสี

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	ไม่ใช่ฝาครอบ LiCO_3		ใช้ฝาครอบ LiCO_3	
		Area	Area/BG	Area	Area/BG
B(capture)	478	14447	0.180	14807	0.148
Annihilation	511	28851	0.370	29336	0.412
Ge*(inelastic)	596.1	4458	0.105	987	0.025
Fe*(inelastic)	846.9	4148	0.081	3664	0.072
Al*(inelastic)	1014.42	1237	0.041	1726	0.113
Ti(capture)	1381.74	1473	0.115	1454	0.090
Si*(inelastic)	1779	11963	0.647	10452	0.568
H(capture)	2223.1	33015	3.751	30588	3.906
Pb*(inelastic)	2614	664	0.101	696	0.106
Si(capture)	3539.11	3767	0.538	3594	0.566
Si(capture)	4934.39	2550	1.014	2577	1.460
O*(inelastic)	6128.63	593	0.481	636	0.592
Al(capture)	7723.85	166	1.085	154	1.375

เมื่อใช้ลิเทียมคาร์บอเนตครอบหิวัดรังสี สามารถดูจับนิวตรอนเข้าไม่ให้อันตรกิริยากับหิวัดรังสีได้ดี สังเกตจากพื้นที่ใต้พีคของเจอร์มาเนียมลดลงค่อนข้างมาก ส่วนพื้นที่ใต้พีคของโบรอนนั้นเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากลิเทียมเองเมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอน สามารถขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ และเมื่อลงสู่สภาวะปกติจะปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 478 keV เช่นกัน และถ้าสังเกตจากสเปกตรัมพีคพลังงาน 478 keV เป็นพีคกว้างจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler broaden peak) ไม่ใช่พีคเดี่ยว ดังนั้นแสดงว่าเป็นพีคที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโบรอนในดินเป็นส่วนใหญ่



4.3 ผลการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่ต่างๆ เพื่อทดลองวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน

ผลการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่ต่างๆ 8 แห่ง โดยวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและการจับนิวตรอนเป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพร้อมตัวแกมมา ดังรูปแสดงสเปกตรัมตัวอย่างในภาคผนวก ก

พื้นที่ได้พีคของรังสีพร้อมตัวแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน และอัตราส่วน Area/BG แสดงในตารางที่ 4.9

จากสเปกตรัมพลังงานของรังสีพร้อมตัวแกมมาธาตุหลักในดินที่สามารถวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้โดยเทคนิคนี้ ทั้งหมด 11 ธาตุ คือ โบรอน เหล็ก อะลูมิเนียม ไททาเนียม ซิลิกอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ แคลเซียม สามารถพบพีคของแมงกานีส โซเดียม และคลอรีน หลังนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากหลุมแล้ว ดังรูปแสดงสเปกตรัมตัวอย่างในภาคผนวก ก

สำหรับการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณสามารถทำได้ โดยการเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุแต่ละชนิดจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันที่วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ผลการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน คือ ซิลิกอน ไททาเนียม เหล็ก อะลูมิเนียม แมงกานีส โซเดียม และแคลเซียม โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ผลการวิเคราะห์ปริมาณของซิลิกอน และไททาเนียมค่อนข้างสอดคล้องกัน มีความแตกต่างไม่สูงมาก ส่วนการวิเคราะห์แมงกานีสนั้นมีความแตกต่างสูง อาจเนื่องจากมีปริมาณเพียงเล็กน้อยในดินทั้งสองพื้นที่ สำหรับอะลูมิเนียม โซเดียม และแคลเซียม ในพื้นที่ 3 ค่าความแตกต่างค่อนข้างสูง อาจเนื่องจากในพื้นที่ 3 นี้มีปริมาณธาตุเหล่านี้ค่อนข้างน้อยกว่าในพื้นที่ 7 มาก การวิเคราะห์เหล็ก ในพื้นที่ 7 ค่าความแตกต่างค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเนื่องจากปริมาณธาตุต่างๆในดินของพื้นที่ 3 และ พื้นที่ 7 นั้นมีปริมาณค่อนข้างแตกต่างกันมาก อาจทำให้มีการวิเคราะห์นอกช่วงปริมาณที่สามารถวิเคราะห์ได้ของสารมาตรฐานที่เตรียมไว้ก็ได้ แต่ถือได้ว่าทั้งการวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์จะมีผลสอดคล้องกันดี ถ้าธาตุที่วิเคราะห์ในดินมีปริมาณไม่น้อยเกินไป และยังอยู่ในช่วงปริมาณที่สามารถวิเคราะห์ได้ของสารมาตรฐานที่เตรียมไว้

ตารางที่ 4.9 พื้นที่ใต้พีคของธาตุบางชนิดในดินจากพื้นที่ต่างๆ 8 แห่งเพื่อหาสมการความสัมพันธ์

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	พื้นที่ใต้พีค (Area)							
		พื้นที่ 1 (12.53)	พื้นที่ 2 (6.19)	พื้นที่ 3 (9.44)	พื้นที่ 4 (12.72)	พื้นที่ 5 (10.95)	พื้นที่ 6 (16.84)	พื้นที่ 7 (16.47)	พื้นที่ 8 (18.57)
B-10(capture)	478	25944	26393	25847	49900	36762	27077	8666	32468
Annihilation	511	49531	70155	49323	70215	58218	82911	65066	59685
Ge-74*(inelastic)	596.10	13174	8851	15576	12282	16738	6930	8885	8513
K-41(capture)	770.27	-	1975	-	387	-	686	914	2440
Fe* + Mn(NAA)	846.90	7848	9817	9860	5044	4112	10779	10785	4636
O(capture)	870.89	3189	2848	4338	3593	3571	1843	1614	1818
Al*(inelastic)	1014.42	2388	3786	3358	3944	4095	3468	2714	3888
In (NAA)	1098.60	2738	1490	2761	2880	1782	511	1623	1030
Si(capture)	1273.33	3941	2753	4397	5204	3462	1268	356	3188
Ti(capture)	1381.74	3901	3398	3726	5386	5453	5716	5591	3710
Si*+Al(NAA)	1778.90	27314	21739	35107	37526	36361	21564	14566	20589
Ca(capture)	1944.00	-	807	-	-	-	-	5363	219
Si(capture)	2092.90	3851	2301	4005	4021	3099	2205	1423	1760
H(capture)	2223.10	49896	71483	42711	77320	41938	62966	57164	71045
Pb*(inelastic)	2614.00	1419	2041	1684	2661	218	1461	1568	1961
Si(capture)	3539.10	10476	6951	11263	11676	9854	6905	4573	6634
C*(inelastic)	4433.00	23434	33913	28086	41977	32602	29617	26753	26202
Si(capture)	4934.39	7416	4942	8058	8256	7003	4860	3401	4762
O-16*(inelastic)	6128.63	1001	1299	1304	1433	1513	1286	1133	1264
Si(capture)	6380.70	608	589	932	762	572	531	218	530
Ti-48(capture)	6418.55	392	615	230	596	518	612	2008	627
Ti-48(capture)	6760.13	627	630	433	802	923	1240	1434	680
Al-27(capture)	7723.80	115	419	86	211	191	287	305	354
Si(capture)	7961.91	137	92	222	172	187	124	115	106
Si(capture)	8472.91	86	76	155	143	115	54	30	80
Fe-54(capture)	9297.80	30	117	41	55	25	141	103	76

หมายเหตุ - : ค่าต่ำมาก ไม่สามารถหา Area ได้

() : หมายถึงค่า % ความชื้นของดินในแต่ละพื้นที่

ตารางที่ 4.10 ปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
(ค่าเฉลี่ยจากการทำซ้ำ 2-3 ครั้ง)

ดินจาก	Si(g/kg)	Ti(g/kg)	Fe(g/kg)	Al(g/kg)	Mn(g/kg)	Na(g/kg)	Ca(g/kg)	K(g/kg)
พื้นที่ 1	403.92	4.03	15.52	19.97	0.26	0.47	-	2.62
พื้นที่ 2	407.77	3.58	12.85	11.70	0.17	0.34	1.17	2.53
พื้นที่ 3	453.75	3.54	10.95	11.26	0.11	0.32	-	2.30
พื้นที่ 4	398.70	5.06	14.07	32.12	0.41	0.60	-	5.04
พื้นที่ 5	438.19	5.98	11.99	18.79	0.19	0.51	-	3.17
พื้นที่ 6	289.36	6.63	65.97	67.11	1.84	0.98	-	10.25
พื้นที่ 7	256.53	8.75	38.31	52.44	2.28	2.67	55.96	4.92
พื้นที่ 8	291.93	3.91	34.26	64.86	0.75	3.23	6.12	12.64

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของธาตุบางชนิดในดินบางแห่งจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

ธาตุ	ปริมาณ (g/kg)					
	ดินจาก พื้นที่ 3			ดินจาก พื้นที่ 7		
	NAA	XRF	Diff.	NAA	XRF	Diff.
Si	453.75	382.44	71.31	256.53	222.79	33.74
Ti	3.58	4.90	1.32	8.75	7.45	1.30
Fe	12.85	12.21	0.64	38.31	50.03	11.72
Al	11.26	25.22	13.96	52.44	57.60	5.16
Mn	0.17	0.10	0.07	2.28	8.24	5.96
Na	0.32	0.53	0.21	2.67	1.87	0.80
Ca	1.17	0.24	0.93	55.96	46.80	9.16

เมื่อนำดินกำเนินิวตรอนออกจากหลุมแล้ว วัดรังสีดีเลย์แกมมาของธาตุบางชนิดในดินของแต่ละพื้นที่ ทำให้วิเคราะห์ในเชิงคุณภาพได้ว่าในดินมีธาตุ แมงกานีส โซเดียม และคลอรีน ส่วนพีครึ่งดีเลย์แกมมาพลังงานประมาณ 1097 keV กับพีคพลังงานประมาณ 1293 keV นั้นสามารถเป็นพีครึ่งดีเลย์แกมมาจากไอโซโทปรังสี 2 ตัว คือ จากอินเดียม - 116m ซึ่งปลดปล่อยให้รังสีดีเลย์แกมมาพลังงาน 1097 keV (56.21%) กับ 1293 keV (84.40%) จากปฏิกิริยา $^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116m}\text{In}$ ครึ่งชีวิต 54.15 นาที และอีกไอโซโทปหนึ่ง คือ เหล็ก - 59 ครึ่งชีวิต 44.51 วันปลดปล่อยรังสีดีเลย์แกมมาที่พลังงาน 1099 keV (56.50%) กับ 1292 keV (43.20%) จากปฏิกิริยา $^{58}\text{Fe} (n, \gamma) ^{59}\text{Fe}$ แต่เนื่องจากว่า เมื่อวิเคราะห์ดินเชิงปริมาณโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันในห้องปฏิบัติการตรวจวัดไม่พบปริมาณอินเดียม และเมื่อวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติก่อนนำดินกำเนินิวตรอนใส่ในหลุมก็ไม่พบพีคพลังงานประมาณ 1097 keV และ 1293 keV ด้วย

แสดงว่า พีคครึ่งสี่ดีเลย์แกมมาทั้งสองพลังงานนี้ได้สลายตัวในอัตราครึ่งชีวิตค่อนข้างสั้น สรุปได้ว่า รังสีแกมมาทั้งสองพลังงานนี้ มาจากอินเดียมที่เป็นธาตุองค์ประกอบของอิลเล็คโทรดในหัววัดรังสี

ตารางที่ 4.12 พื้นที่ใต้พีคของธาตุบางชนิดที่ได้หลังจากนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากหลุม

Peak (NAA)	ครึ่งชีวิต	พลังงาน (keV)	พื้นที่ใต้พีค (Area)							
			พื้นที่ 1	พื้นที่ 2	พื้นที่ 3	พื้นที่ 4	พื้นที่ 5	พื้นที่ 6	พื้นที่ 7	พื้นที่ 8
In-116m	54.15 m	416.9	597	475	815	742	783	391	530	387
Mn-56	2.58 h	846.8	46	188	28	25	127	582	548	262
In-116m	54.15 m	1097.3	599	420	654	736	651	382	370	386
In-116m	54.15 m	1293.5	624	559	820	817	863	476	440	413
Al-28	2.24 m	1778.9	179	201	166	136	157	209	107	174
In-116m	54.15 m	2112.3	40	67	60	69	115	91	124	48
Cl-38	37.24 m	2167.7	-	-	23	-	-	-	-	-
Na-24	14.96 h	2754.0	8	6	-	9	-	6	10	21

เมื่อพีคครึ่งสี่ดีเลย์แกมมาพลังงาน 1097.3 keV และ 1293.5 keV เป็นพีคของรังสีแกมมาจากการสลายตัวของ ^{116m}In แล้ว จึงคำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ของแต่ละพื้นที่ โดยเลือกพีคพลังงาน 1293.5 keV เนื่องจากมีปริมาณความเข้มรังสีสูงกว่า คำนวณจากสมการ 2.34 คือ $A_i = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda_{irr}}) (e^{-\lambda_d})$ โดยที่ค่าภาคตัดขวางสำหรับการจับเทอร์มาลนิวตรอนของ ^{115}In คือ 157 บาร์น ครึ่งชีวิต 54.15 นาที เวลาในการอบนิวตรอน (t_{irr}) 60 นาที เวลาในการปล่อยให้สลายตัวก่อนวัด (t_d) 2 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ที่คำนวณได้ของพื้นที่ต่างๆ

สถานที่	พื้นที่ใต้พีคของอินเดียม	เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์
พื้นที่ 1	624	7.606
พื้นที่ 2	559	6.814
พื้นที่ 3	820	9.996
พื้นที่ 4	817	9.959
พื้นที่ 5	863	10.520
พื้นที่ 6	476	5.802
พื้นที่ 7	440	5.363
พื้นที่ 8	413	5.034

ธาตุบางชนิดในดินที่สามารถหาความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ โดยเปรียบเทียบ กับผลการวิเคราะห์ปริมาณจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน คือ ซิลิกอน (Si) ไททาเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) อะลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) โดยหาความสัมพันธ์จากเทคนิคที่แตกต่างกัน คือ ซิลิกอน ไททาเนียม และเหล็ก จากเทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และ อะลูมิเนียม กับแมงกานีส จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังต่อไปนี้

ซิลิกอน

จากเทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน สามารถคำนวณปริมาณรังสีการให้รังสีฟอสมต์แกมมาได้จาก สมการ 2.25 คือ $Yield = N \phi t \sigma(E_n)$ โดยที่ - Yield คือ จำนวนรังสีฟอสมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา เทียบได้เป็น พื้นที่ใต้พีครังสีฟอสมต์แกมมาที่สามารถวัดได้ (ประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาพลังงานเดียวกันของหัววัดรังสีเดียวกันเท่ากัน)

- t คือ เวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน ใช้เวลา 1 ชั่วโมงเท่ากันในแต่ละพื้นที่ เป็นค่าคงที่
- $\sigma(E_n)$ คือ ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาขณะที่นิวตรอนมีพลังงาน E_n เป็นค่าคงที่
- ϕ คือ เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

ดังนั้น N หรือ จำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีฟอสมต์แกมมาที่วัดได้ กับ นิวตรอนฟลักซ์ ดังนี้

$$N \propto \frac{Yield}{\phi} \quad (4.1)$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของเทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมา โดยเปรียบเทียบ กับผลการวิเคราะห์ปริมาณจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน พื้นที่ใต้พีครังสีฟอสมต์แกมมา จึงต้องแก้ค่าเพื่อนำไปเปรียบเทียบ โดยการคำนวณเป็นค่าสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีฟอสมต์แกมมาต่อค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.14

สำหรับการวิเคราะห์ซิลิกอนเลือกพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 1273.33 keV เนื่องจากเป็นพีคพลังงานต่ำที่สุดและปลดปล่อยให้ปริมาณรังสี 23.43% ของรังสีพรอมต์แกมมาทั้งหมดจากซิลิกอน ซึ่งประสิทธิภาพในการวัดของหัววัดรังสีจะดีกว่าในช่วงพลังงานระดับสูง และช่วงพลังงานระดับกลางนั้นจะเป็นในช่วงที่มีรังสีแบคกราวด์จากคอมพ์ตันของรังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV จากต้นกำเนิดนิวตรอนปริมาณสูงมาก

ตารางที่ 4.14 สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และปริมาณซิลิกอนจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ (1)	พื้นที่ใต้พีค Si 1273.33 keV (2)	พื้นที่ใต้พีค Si / นิวตรอนฟลักซ์ (2)/(1) (3)	Si จาก NAA (g/kg) (4)
พื้นที่ 1	7.606	3941	518.117	403.92
พื้นที่ 2	6.814	2753	404.018	407.77
พื้นที่ 3	9.996	4397	439.895	453.75
พื้นที่ 4	9.959	5204	522.542	398.70
พื้นที่ 5	10.520	3462	329.096	438.19**
พื้นที่ 6	5.802	1268	218.534	289.36
พื้นที่ 7	5.363	356	66.375	256.53
พื้นที่ 8	5.034	3188	633.249	291.93**

** ไม่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์มีความแปรปรวนสูง

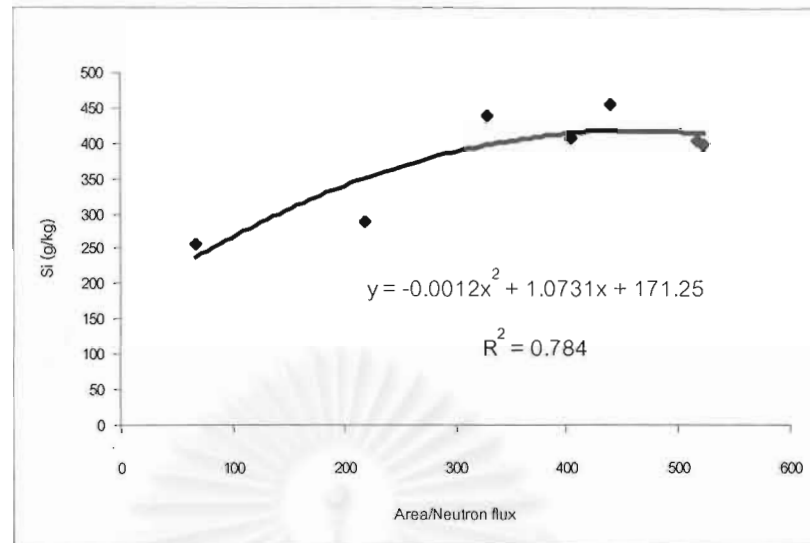
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณซิลิกอนจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = -0.0012X^2 + 1.0731X + 171.25 \quad R^2 = 0.7840 \quad (4.2)$$

โดยที่ y : ปริมาณซิลิกอน หน่วย กรัมต่อกิโลกรัม

x : สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์

ช่วงปริมาณซิลิกอนที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ 256.53 – 453.75 g/kg



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคครึ่งสี่พหุคูณแกมมาต่อเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณซิลิกอนจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

ไททาเนียม

วิเคราะห์ได้โดยเทคนิคการวัดครึ่งสี่พหุคูณแกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเช่นเดียวกับซิลิกอน เลือกพีคครึ่งสี่พหุคูณแกมมาพลังงาน 1381.7 keV ในการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ เนื่องจากเป็นพีคครึ่งสี่พหุคูณแกมมาของไททาเนียมที่มีปริมาณรังสีมากที่สุด 100% ใช้หลักการวิเคราะห์เดียวกันกับซิลิกอน สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อเทอร์มาลนิวตรอนสัมพันธ์ และปริมาณไททาเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน แสดงในตารางที่ 4.15

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคครึ่งสี่พหุคูณแกมมาต่อเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณไททาเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = 0.00002X^2 - 0.0197X + 8.7102 \quad R^2 = 0.9478 \quad (4.3)$$

โดยที่ y : ปริมาณไททาเนียม หน่วย กรัมต่อกิโลกรัม

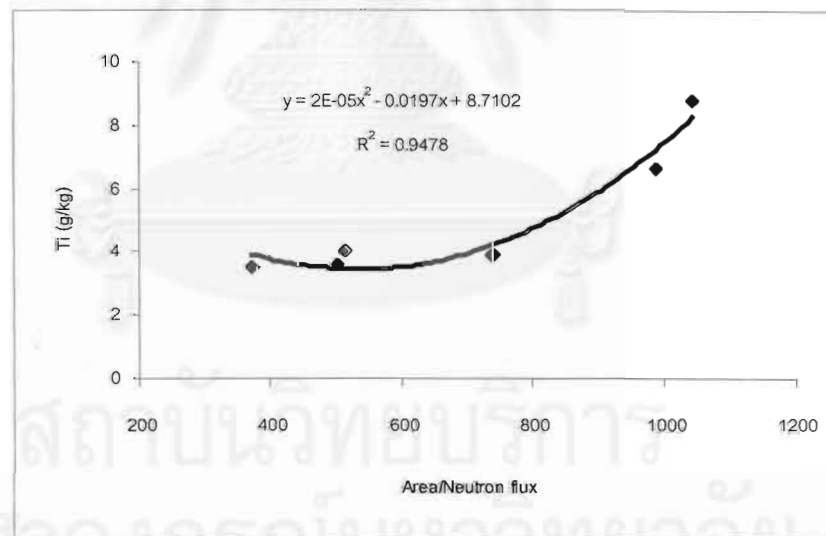
x : สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคครึ่งสี่พหุคูณแกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์

ช่วงปริมาณไททาเนียมที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ 3.54 – 8.75 g/kg

ตารางที่ 4.15 สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคครึ่งสัฟรอมต์เกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และ ปริมาณไททาเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ (1)	พื้นที่ใต้พีค Ti 1381.7keV (2)	พื้นที่ใต้พีค Ti / นิวตรอนฟลักซ์ (2)/(1) (3)	Ti จาก NAA (g/kg) (4)
พื้นที่ 1	7.606	3901	512.858	4.03
พื้นที่ 2	6.814	3398	498.675	3.58
พื้นที่ 3	9.996	3726	372.765	3.54
พื้นที่ 4	9.959	5386	540.817	5.06**
พื้นที่ 5	10.520	5453	518.359	5.98**
พื้นที่ 6	5.802	5716	985.125	6.63
พื้นที่ 7	5.363	5591	1042.420	8.75
พื้นที่ 8	5.034	3710	736.936	3.91

** ไม่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์มีความแปรปรวนสูง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคครึ่งสัฟรอมต์เกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณไททาเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

เหล็ก

วิเคราะห์ได้จากเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เช่นเดียวกับซิลิกอนและไททาเนียม โดยใช้หลักการวิเคราะห์ จากความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณเหล็กที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ในการวิจัยนี้เลือกใช้พีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 9297.80 keV เป็นพีคตัวแทนของเหล็ก เนื่องจากเป็นพีคเดียวของพีครังสีพรอมต์แกมมาทั้งหมดของเหล็กที่ไม่มีพีคอื่นพลังงานใกล้เคียงมาอยู่ติดกัน สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ (1)	พื้นที่ใต้พีค Fe 9297.80 keV (2)	พื้นที่ใต้พีค Fe / นิวตรอนฟลักซ์ (2)/(1) (3)	Fe จาก NAA (g/kg) (4)
พื้นที่ 1	7.606	30	3.944	15.52
พื้นที่ 2	6.814	117	17.170	12.85**
พื้นที่ 3	9.996	41	4.102	10.95
พื้นที่ 4	9.959	55	5.523	14.07
พื้นที่ 5	10.520	25	2.376	11.99
พื้นที่ 6	5.802	141	24.301	65.97
พื้นที่ 7	5.363	103	19.204	38.31
พื้นที่ 8	5.034	76	15.096	34.26**

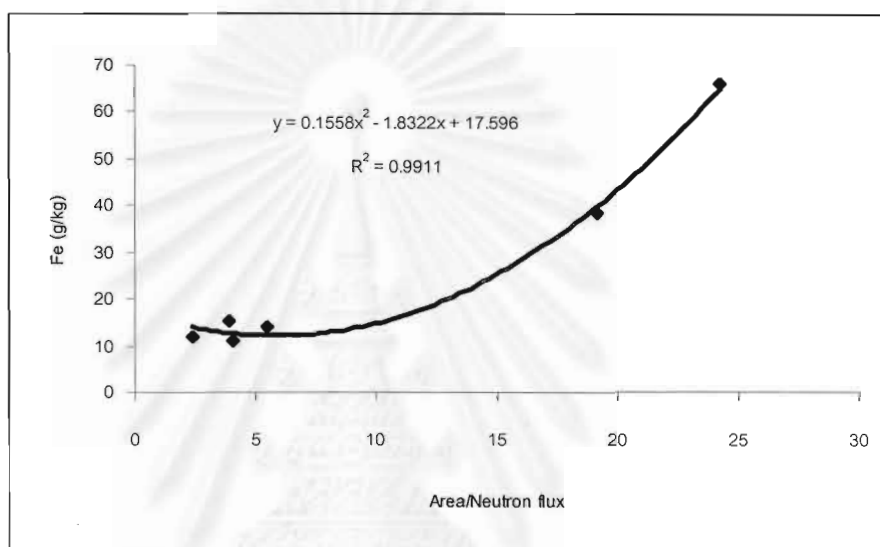
** ไม่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์มีความแปรปรวนสูง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = 0.1558x^2 - 1.8322x + 17.596 \quad R^2 = 0.9911 \quad (4.4)$$

โดยที่ y : ปริมาณเหล็ก หน่วย กรัมต่อกิโลกรัม

x : สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์
ช่วงปริมาณเหล็กที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ 10.95 – 65.97 g/kg



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

อะลูมิเนียม

สำหรับการวิเคราะห์อะลูมิเนียมกับแมงกานีสนั้น จะวิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน คือ การวัดรังสีดีเลย์แกมมาหลังจากเอาต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากหลุมแล้ว โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน สามารถคำนวณหาความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นหลังการอาบรังสีได้ดัง สมการที่ 2.34 คือ $A_t = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) (e^{-\lambda t_d})$

โดยที่ A_t คือ ความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น เทียบเป็น พื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาที่วัดได้

σ คือ ภาคตัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เป็นค่าคงที่

และพจน์ของ $(1 - e^{-\lambda_{irr}})(e^{-\lambda_d})$ เป็นค่าคงที่สำหรับธาตุเดียวกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เวลาอบนิวตรอน 60 นาที (t_{irr}) และเวลาที่ปล่อยให้สลายตัว 2 นาที (t_d) เท่ากันทุกครั้ง

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ N_0 หรือ จำนวนอะตอมหรือปริมาณของไอโซโทปก่อนอบนิวตรอน กับ รังสีดีเลย์แกมมาที่วัดได้ และ เทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์ คือ

$$N_0 \propto \frac{A_r}{\phi} \quad (4.5)$$

ฉะนั้นในการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ณ พื้นที่นี้ เปรียบเทียบกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการ จึงต้องมีการแก้ค่าพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาก่อนทำการเปรียบเทียบ โดยคิดเป็นสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์

ในการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียม เลือกใช้พื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาพลังงาน 1779 keV ดังแสดงในตารางที่ 4.17

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาต่อเทอร์มอลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = 0.1692X^2 - 6.054X + 68.593 \quad R^2 = 0.9864 \quad (4.6)$$

โดยที่ y : ปริมาณอะลูมิเนียม หน่วย กรัมตอกิโลกรัม

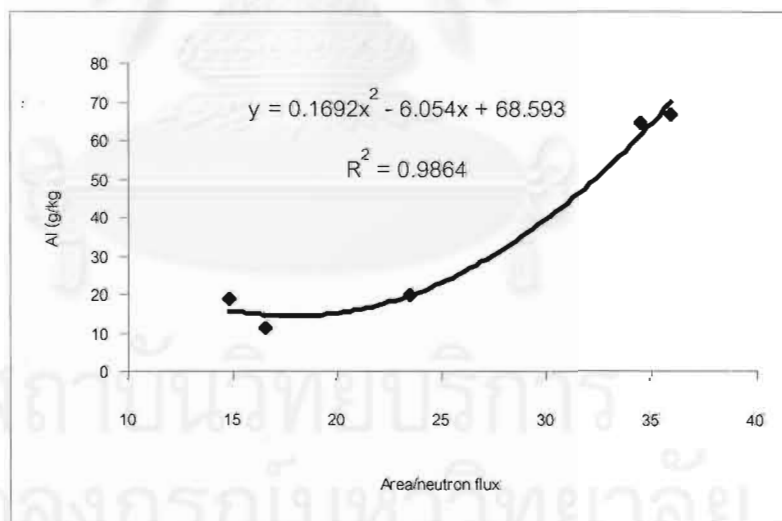
x : สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์

ช่วงปริมาณอะลูมิเนียมที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ 11.26 – 67.11 g/kg

ตารางที่ 4.17 สัดส่วนพื้นที่ใต้พีคครั้งเดียวแกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ (1)	พื้นที่ใต้พีค Al 1779 keV (2)	พื้นที่ใต้พีค Al / นิวตรอนฟลักซ์ (2)/(1) (3)	Al จาก NAA (g/kg) (4)
พื้นที่ 1	7.606	179	23.533	19.97
พื้นที่ 2	6.814	201	29.498	11.70**
พื้นที่ 3	9.996	166	16.607	11.26
พื้นที่ 4	9.959	136	13.656	32.12**
พื้นที่ 5	10.520	157	14.924	18.79
พื้นที่ 6	5.802	209	36.020	67.11
พื้นที่ 7	5.363	107	19.950	52.44**
พื้นที่ 8	5.034	174	34.563	64.86

**ไม่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่มีความแปรปรวนสูง



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนพื้นที่ใต้พีคครั้งเดียวแกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

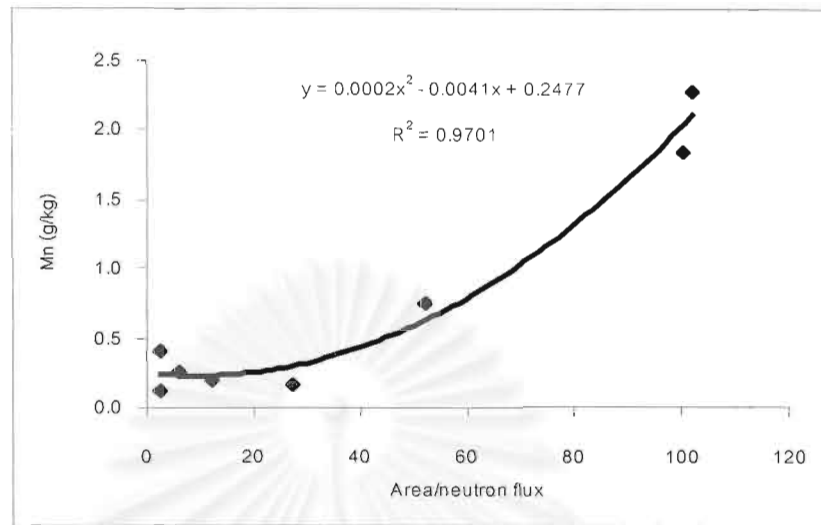
แมงกานีส

สำหรับการวิเคราะห์แมงกานีสทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับอะลูมิเนียม คือ จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน โดยใช้ฟลักซ์นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แกมมาจากแมงกานีส - 56 พลังงาน 846.8 keV ให้ปริมาณรังสีมากที่สุด 98.87% โดยสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และปริมาณแมงกานีสที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 สัดส่วนพื้นที่ใต้พีคสัมพันธ์แกมมาต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ และ ปริมาณ แมงกานีส จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์ สัมพันธ์ (1)	พื้นที่ใต้พีค Mn 846.8 keV (2)	พื้นที่ใต้พีค Mn / นิวตรอนฟลักซ์ (2)/(1) (3)	Mn จาก NAA (g/kg) (4)
พื้นที่ 1	7.606	46	6.048	0.26
พื้นที่ 2	6.814	188	27.590	0.17
พื้นที่ 3	9.996	28	2.801	0.11
พื้นที่ 4	9.959	25	2.510	0.41
พื้นที่ 5	10.520	127	12.073	0.19
พื้นที่ 6	5.802	582	100.305	1.84
พื้นที่ 7	5.363	548	102.172	2.28
พื้นที่ 8	5.034	262	52.042	0.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาต่อเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับปริมาณแมงกานีสจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีดีเลย์แกมมาต่อเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณแมงกานีสจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = 0.0002X^2 - 0.0041X + 0.2477 \quad R^2 = 0.9701 \quad (4.7)$$

โดยที่ y : ปริมาณแมงกานีส หน่วย กรัมต่อกิโลกรัม

x : สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์

ช่วงปริมาณแมงกานีสที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ 0.11 – 2.28 g/kg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ตัวอย่าง

เมื่อทดลองวัดรังสีแกมมาจากพื้นที่ตัวอย่าง 4 แห่ง โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอน เป็นเวลา 3600 วินาที ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปแสดงสเปกตรัมตัวอย่างในภาคผนวก ก

พื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของธาตุหลักบางชนิดในดิน แสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 พื้นที่ใต้พีครังสีพรอมต์แกมมาของธาตุบางชนิดในดิน ของพื้นที่ตัวอย่าง 4 แห่ง

Element (reaction)	พลังงาน (keV)	พื้นที่ใต้พีค (Area)			
		พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	พื้นที่ตัวอย่างที่ 4
B(capture)	478	24150	37658	27339	42026
Annihilation	511	56214	65325	53034	75702
Ge*(inelastic)	596	9873	10768	8303	11909
Fe*(inelastic)	846.9	3345	11076	4627	12010
Al*(inelastic)	1014.42	2967	3964	2038	3427
Si(capture)	1273.33	3104	3717	3224	3599
Ti(capture)	1381.74	3236	4630	2222	3427
Si*(inelastic)	1779	20831	27865	20240	28510
H(capture)	2223.1	53718	64875	62432	72322
Pb*(inelastic)	2614	1580	2013	1449	2113
Si(capture)	3539.11	7117	8213	6645	8795
C*(inelastic)	4433	25652	36761	30362	47264
Si(capture)	4934.39	5057	6116	5018	5867
O*(inelastic)	6128.63	765	1245	975	1506
Al(capture)	7723.85	341	417	309	488
Fe(capture)	9297.8	77	76	80	93

และวัดรังสีดีเลย์แกมมาหลังจากเอาต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากหลุมประมาณ 2 นาที เท่ากันทุกครั้งในแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีดีเลย์แกมมาเทียบกับรังสีแบคกกราวด์ตามธรรมชาติ ดังรูปแสดงสเปกตรัมตัวอย่างในภาคผนวก ก และพื้นที่ใต้พีคของรังสีดีเลย์แกมมาของแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 พื้นที่ใต้พีคของรังสีดีเลย์แกมมาของธาตุบางชนิดในดิน หลังนำต้นกำเนิดนิวตรอนออก

Peak (NAA)	ครึ่งชีวิต	พลังงาน (keV)	พื้นที่ใต้พีค (Area)			
			พื้นที่ตัวอย่าง 1	พื้นที่ตัวอย่าง 2	พื้นที่ตัวอย่าง 3	พื้นที่ตัวอย่าง 4
In-116m	54.15 m	416.9	323	444	609	841
Mn-56	2.58 h	846.8	47	85	64	87
In-116m	54.15 m	1097.3	351	445	512	651
In-116m	54.15 m	1293.5	407	559	605	749
Al-28	2.24 m	1778.9	176	232	191	265
In-116m	54.15 m	2112.3	28	54	64	106
Na-24	14.96 h	2754.0	15	14	6	14

คำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพัทธ์ของแต่ละพื้นที่ตัวอย่างจากสมการที่ 2.34 จากพื้นที่ใต้พีคของรังสีดีเลย์แกมมาพลังงาน 1293.5 keV ของ ^{116m}In ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 พื้นที่ใต้พีคของอินเดียมและเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพัทธ์ของพื้นที่ตัวอย่าง

สถานที่	พื้นที่ใต้พีค ^{116m}In 1293.54 keV	เทอร์มาลนิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	407	4.961
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	559	6.814
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	605	7.375
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	749	9.130

สำหรับการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน สามารถวิเคราะห์ได้ 5 ธาตุ โดยแยกวิเคราะห์ในแต่ละธาตุดังนี้

ซิลิกอน

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์ กับ ปริมาณซิลิกอนจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังสมการที่ 4.2 ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณซิลิกอน ณ พื้นที่ ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 4 แห่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ปริมาณซิลิกอนที่คำนวณได้จากสมการเปรียบเทียบกับที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาล นิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์	พื้นที่ใต้พีค Si 1273.33 keV	พื้นที่ใต้พีค Si / นิวตรอนฟลักซ์	ปริมาณ Si (g/kg) คำนวณได้	ปริมาณ Si (g/kg) จาก NAA	Diff.
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4.961	3104	625.653	372.91	323.07	49.84
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	6.814	3717	545.495	399.54	332.53	67.01
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	7.375	3224	437.153	411.04	349.70	61.34
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	9.130	3599	394.190	407.79	354.14	53.64

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนจากการคำนวณ กับ ปริมาณซิลิกอนที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน มีความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 50 – 67 g/kg

ไททาเนียม

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์ กับปริมาณไททาเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังสมการที่ 4.3 ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณไททาเนียม ณ พื้นที่ ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 4 แห่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ปริมาณไททาเนียมที่คำนวณจากสมการเปรียบเทียบกับได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มวล นิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์	พื้นที่ใต้พีค Ti 1381.80 keV	พื้นที่ใต้พีค Ti / นิวตรอนฟลักซ์	ปริมาณ Ti (g/kg) คำนวณได้	ปริมาณ Ti (g/kg) จาก NAA	Diff.
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4.961	3236	652.259	4.37	4.96	0.59
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	6.814	4630	679.478	4.56	5.60	1.04
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	7.375	2222	301.297	4.59	5.50	0.91
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	9.130	3427	375.352	4.13	5.86	1.73

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณไททาเนียมจากการคำนวณ กับ ปริมาณไททาเนียมที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน มีความแตกต่างในช่วงประมาณ 0.6 – 2 g/kg

เหล็ก

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์ กับปริมาณเหล็กจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังสมการที่ 4.4 ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณเหล็ก ณ พื้นที่ ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 4 แห่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ปริมาณเหล็กที่คำนวณได้จากสมการเปรียบเทียบกับที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มวล นิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์	พื้นที่ใต้พีค Fe 9297.80 keV	พื้นที่ใต้พีค Fe / นิวตรอนฟลักซ์	ปริมาณ Fe (g/kg) คำนวณได้	ปริมาณ Fe (g/kg) จาก NAA	Diff.
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4.961	77	15.520	26.69	34.52	7.83
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	6.814	76	11.153	16.54	28.44	11.90
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	7.375	80	10.848	16.05	29.75	13.70
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	9.130	93	10.186	15.10	23.28	8.18

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กจากการคำนวณ กับ ปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน มีความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 8 – 14 g/kg

อะลูมิเนียม

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์ กับปริมาณอะลูมิเนียมจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังสมการที่ 4.6 ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณอะลูมิเนียม ณ พื้นที่ ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 4 แห่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ปริมาณอะลูมิเนียมที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

สถานที่	เทอร์มาล นิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์	พื้นที่ใต้พีค AI 1779 keV	พื้นที่ใต้พีค AI / นิวตรอนฟลักซ์	ปริมาณ AI (g/kg) คำนวณได้	ปริมาณ AI (g/kg) จาก NAA	Diff.
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4.961	176	35.475	66.76	55.89	10.87
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	6.814	232	34.047	58.61	60.56	1.95
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	7.375	191	25.899	25.29	53.05	27.76
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	9.130	265	29.025	35.42	61.16	25.74

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมจากการคำนวณ กับ ปริมาณอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน มีความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 2 – 28 g/kg

แมงกานีส

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์ กับปริมาณแมงกานีสจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังสมการที่ 4.7 ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณแมงกานีส ณ พื้นที่ ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 4 แห่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ปริมาณแมงกานีสที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับที่ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

สถานที่	เทอร์มวล นิวตรอน ฟลักซ์สัมพัทธ์	พื้นที่ใต้พีค Mn 846.8 keV	พื้นที่ใต้พีค Mn/ นิวตรอนฟลักซ์	ปริมาณ Mn (g/kg) คำนวณได้	ปริมาณ Mn (g/kg) จาก NAA	Diff.
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4.961	47	9.473	0.227	0.277	0.050
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	6.814	85	12.474	0.228	0.272	0.044
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	7.375	64	8.678	0.227	0.294	0.067
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	9.130	87	9.529	0.227	0.246	0.019

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสจากการคำนวณ กับ ปริมาณแมงกานีสที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน มีความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 0.02 – 0.07 g/kg

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุทั้ง 5 ชนิดในดิน จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของซิลิกอน ไททาเนียม และแมงกานีส มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความแตกต่างของเหล็กและอะลูมิเนียม มีค่าสูงใกล้เคียงกัน เป็นไปได้ที่ค่าความแตกต่างของเหล็ก และอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจากมีส่วนประกอบของหิวด์ริงส์ทำจากเหล็กและอะลูมิเนียม อีกทั้งพีคริงส์พรอมต์เกมมาที่เป็นตัวแทนของเหล็กนั้นมีพื้นที่ใต้พีคค่อนข้างน้อย และพีคริงส์ดีเลย์เกมมาพลังงาน 1779 keV ของอะลูมิเนียม นั้น อยู่ใกล้กับพีคริงส์เกมมาตามธรรมชาติพลังงาน 1765 keV จาก Bi-214 ซึ่งจะทำให้ในการคำนวณหาพื้นที่ใต้พีคของอะลูมิเนียมนั้นคลาดเคลื่อนได้ง่าย และเมื่อสังเกตปริมาณแมงกานีสที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเกือบเท่ากัน อาจเนื่องมาจากปริมาณแมงกานีสในดินมีเพียงเล็กน้อยไม่ต่างกันมากนัก ทั้งในพื้นที่ตัวอย่างและในพื้นที่ที่หาสมการความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียมในดินโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ

ผลการวิเคราะห์โปแตสเซียมโดยการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 1460.8 keV ณ พื้นที่ ได้พื้นที่ได้พืชของโปแตสเซียม-40 ดังแสดงในตารางที่ 4.27

และทำการเปรียบเทียบเชิงปริมาณกับปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันและการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการ ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์ได้จากทั้ง 2 เทคนิค นั้น แสดงเปรียบเทียบ ในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 การเปรียบเทียบปริมาณโปแตสเซียมที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 เทคนิค

สถานที่	In situ γ -spectrometry	%K (NAA)	%K (γ -spectrometry)	Diff.
พื้นที่ 1	1284	0.262	0.371	0.109
พื้นที่ 2	3550**	0.253	0.351	0.098
พื้นที่ 3	566	0.230	0.297	0.067
พื้นที่ 4	977	0.504	0.614	0.110
พื้นที่ 5	628	0.317	0.387	0.070
พื้นที่ 6	1700**	1.025	1.208	0.183
พื้นที่ 7	1336	0.492	0.677	0.185
พื้นที่ 8	4107	1.264	1.938	0.674

** ไม่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์มีความแปรปรวนสูง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของโปแตสเซียมจากพื้นที่ทั้ง 8 แห่ง จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน และการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการแล้ว ทั้ง 2 เทคนิคนี้ ให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกัน แต่ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์จากการวัดรังสีตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการ มีปริมาณสูงกว่าที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน โดยมีค่าแตกต่างในช่วงประมาณ 0.1 – 0.7 % อาจเนื่องจากการวิเคราะห์โดยเทคนิคการวัดรังสีตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการ มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

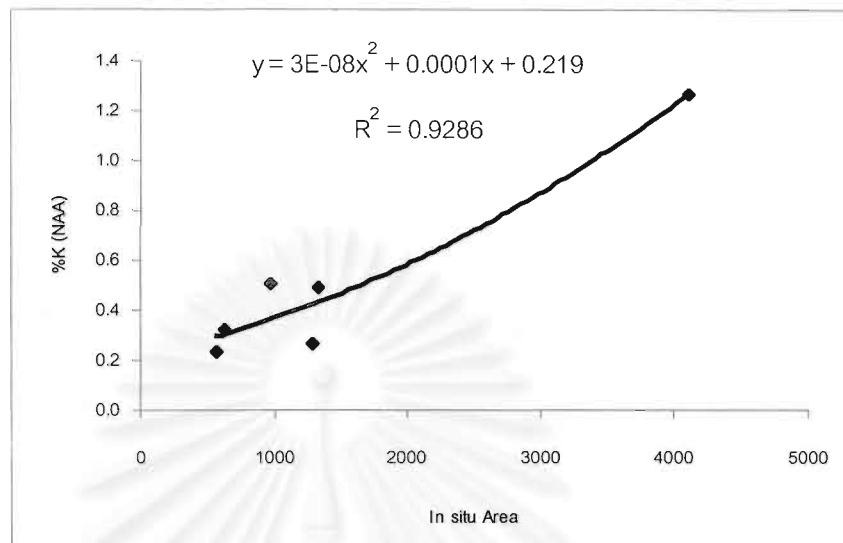
- ปริมาณสารโปแตสเซียมมาตรฐานที่เตรียมไว้เปรียบเทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์สูงกว่าที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ สารโปแตสเซียมมาตรฐานที่เตรียมไว้ คือ 3 % ถ้าเตรียมสารมาตรฐานให้มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณในดินมากขึ้นก็จะสามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้องมากขึ้น
- ชุดกำบังรังสีในการทดลองนี้ กำบังรังสีแกมมาจากรังสีแบคกรวด์ในห้องปฏิบัติการได้ไม่ค่อยดีนัก โดยเฉพาะการกำบังพีคพลังงาน 1460.8 keV ของ ^{40}K ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียมในดินซึ่งมีปริมาณอยู่ค่อนข้างน้อย จึงทำให้สามารถเกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้สูงในการหกลบรังสีแบคกรวด์ก่อนการวิเคราะห์ปริมาณ
- ตัวอย่างดินที่เก็บมาทำการวิเคราะห์มีปริมาณค่อนข้างน้อย จึงทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาพลังงาน 1460.8 keV ของ โปแตสเซียม-40 ในดินน้อยด้วย
- เวลาในการวัดรังสีน้อยเกินไป

เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาพลังงาน 1460.8 keV ของโปแตสเซียม- 40 ที่วัดในพื้นที่ต่างๆ 8 แห่ง มีค่าสอดคล้องกัน เมื่อพื้นที่ใดมีพื้นที่ใต้พีคมาก ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์จากดินนั้นก็สูงเช่นกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.8 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคที่วัด ณ พื้นที่ กับ ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ดังรูปที่ 4.6 ยกเว้น พื้นที่ 2 และ พื้นที่ 6 อาจเนื่องจาก 2 พื้นที่นั้นมีหญาค่อนข้างปกคลุมจำนวนมากแต่ในดินจริงๆอาจมีโปแตสเซียมค่อนข้างน้อย ทำให้เมื่อวัด ณ พื้นที่ พีคโปแตสเซียมอาจจะสูงกว่าค่าที่มีอยู่จริงในดิน ถึงแม้ว่าในพื้นที่ที่ 8 ก็เป็นพื้นที่ที่หญาชั้นเยอะเช่นกัน แต่สังเกตไม่เห็นผลชัดอาจเนื่องจากมีปริมาณโปแตสเซียมในดินค่อนข้างสูงด้วย

สมการความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีครังสี กับ ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ได้ดังนี้

$$y = (3 \times 10^{-8}) X^2 + 0.0001X + 0.219 \quad R^2 = 0.9286 \quad (4.8)$$

โดยที่ y : ปริมาณโปแตสเซียม หน่วย กรัม ต่อ 100 กรัม (%)
 X : พื้นที่ใต้พีคพลังงาน 1460.8 keV ที่วัด ณ พื้นที่
 ช่วงปริมาณโปแตสเซียมที่สามารถวิเคราะห์ได้ 0.230 – 1.264 %



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีควัด ณ พื้นที่ กับ ปริมาณโปแตสเซียมจากเทคนิค NAA

เมื่อวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของโปแตสเซียมโดยใช้สมการความสัมพันธ์นี้ จะได้ปริมาณโปแตสเซียม ดังแสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ปริมาณโปแตสเซียมจากการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ ณ พื้นที่ ของบางพื้นที่ตัวอย่าง

สถานที่	In situ γ -spectrometry	%K (NAA)	%K(คำนวณ)	Diff
พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	4195	0.858	0.639	0.219
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	3777	0.788	0.597	0.191

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียม โดยการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ ณ พื้นที่ ได้ปริมาณสอดคล้องกับที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน มีค่าความแตกต่างประมาณ 0.2 % ซึ่งอาจเนื่องจาก กราฟความสัมพันธ์นี้ได้จากพื้นที่ส่วนใหญ่มีปริมาณโปแตสเซียมในดินค่อนข้างน้อย ยกเว้นในพื้นที่ที่ 8 แต่เมื่อคำนวณหาปริมาณโปแตสเซียมในพื้นที่ตัวอย่างที่ 1 และ 3 มีปริมาณโปแตสเซียมค่อนข้างสูง แต่ก็ถือได้ว่าเป็นเทคนิคการหาปริมาณโปแตสเซียมในดินค่อนข้างสะดวกรวดเร็ว ไม่ต้องเก็บตัวอย่างดินกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจใช้ประโยชน์เป็นเทคนิคประกอบในการวิเคราะห์เบื้องต้นได้ โดยที่จะต้องมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติม และอาจมีการคำนวณแก้ค่าต่างๆประกอบอีกด้วย เพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนิวตรอนนี้ ผลการวิจัยทั้งหมดสามารถแบ่งสรุปได้ในแต่ละขั้นตอน ดังนี้

5.1.1. ผลการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา

สำหรับงานวิจัยนี้ การจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เหมาะสมต่อการวัดรังสีแกมมาในหลายช่วงพลังงาน ตั้งแต่ประมาณ 0.5 – 10 MeV คือ

- หัววัดรังสีวางในลักษณะแนวตั้ง โดยคว่ำหัววัดรังสีลงพื้นดิน มีระยะห่างจากพื้นดิน 5 ซม. และวางหัววัดรังสีที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน 20 ซม.
- ระยะลึกของต้นกำเนิดนิวตรอน 25 ซม. โดยใช้กระบอกตะกั่วหนา 0.5 ซม. กำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

เพื่อให้มีประสิทธิภาพการวัดรังสีพรอมต์แกมมาเฉลี่ยโดยรวมทั้งหมดดีขึ้น และมีอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่อรังสีแบคกราวด์ที่จากรังสีแกมมาของต้นกำเนิดนิวตรอนน้อยลง

5.1.2. ผลการตรวจสอบที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV ของโบรอน

เมื่อใช้แผ่นแคดเมียมและฝาครอบลิเทียมคาร์บอเนตกำบังนิวตรอนไม่ให้เกิดอันตรกิริยากับหัววัดรังสีแล้ว (ผลึกเจอร์มาเนียมของหัววัดรังสีนี้ เจือปนด้วยโบรอนและลิเทียมปริมาณเล็กน้อย) พื้นที่ใต้พีคของโบรอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นที่มาของพีครังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV มาจากการทำปฏิกิริยากาจับนิวตรอนของโบรอนในดินเท่านั้น

เนื่องจากโบรอนในดินมีปริมาณเพียงเล็กน้อยมาก ระดับหนึ่งในล้านส่วน (ppm) จากงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์โดยเทคนิคนี้ได้อัตราการวัดรังสีเฉลี่ย 832 cpm ณ พื้นที่ ที่มีพื้นที่ใต้พีคของโบรอนสูงที่สุด และ 144 cpm ณ พื้นที่ ที่มีพื้นที่ใต้พีคของโบรอนต่ำที่สุด

ถือได้ว่าโบรอนมีความไวในการวิเคราะห์ ณ พื้นที่ โดยเทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้ ค่อนข้างสูง น่าจะเป็นแนวทางที่ดีในการทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณโบรอน ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนี้ ต่อไปได้

5.1.3. ผลการวัดรังสีแกมมาจากพื้นที่ต่างๆ 8 แห่ง เพื่อทดลองวิเคราะห์เชิงปริมาณจากการทดลองวัดรังสีฟรอมต์แกมมา และรังสีดีเลย์แกมมา โดยใช้เทคนิคนิวตรอน สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งเทคนิคนิวตรอนในการวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 3 เทคนิค คือ

- การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน
- การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
- การวัดรังสีดีเลย์แกมมาของเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ ได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ ดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของธาตุบางชนิดในดิน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 11 ธาตุ โดยแต่ละธาตุจะมีความไวต่อการวิเคราะห์ของแต่ละเทคนิคแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ธาตุแต่ละชนิดได้จากเทคนิคต่างกัน ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. โบรอน จาก การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
2. เหล็ก จาก การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน
การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน*
3. อะลูมิเนียม จาก การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน
การวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
การวัดรังสีดีเลย์แกมมาของเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน*

- | | | | |
|-----|-----------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. | ไททาเนียม | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน
การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน* |
| 5. | ซิลิกอน | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน
การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน* |
| 6. | แคลเซียม | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน |
| 7. | ไฮโดรเจน | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน |
| 8. | ออกซิเจน | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน*
การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน |
| 9. | แมงกานีส | จาก | การวัดรังสีดีเลย์แกมมาของเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน |
| 10. | โซเดียม | จาก | การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
การวัดรังสีดีเลย์แกมมาของเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน* |
| 11. | คลอรีน | จาก | การวัดรังสีดีเลย์แกมมาของเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน |

การวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ

สำหรับการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณได้โดยการเปรียบเทียบ กับปริมาณธาตุจากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของธาตุบางชนิดในดินได้ทั้งหมด 5 ธาตุ ดังต่อไปนี้

ซิลิกอน ไททาเนียม และเหล็ก จากเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน อะลูมิเนียม และแมงกานีส จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของพื้นที่ใต้พีค ต่อ เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับปริมาณธาตุแต่ละชนิดจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันในห้องปฏิบัติการ ได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Si: y = -0.0012X^2 + 1.0731X + 171.25 \quad R^2 = 0.7840 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 256.53 - 453.75 \text{ g/kg}$$

$$Ti: y = 0.00002X^2 - 0.0197X + 8.7102 \quad R^2 = 0.9478 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 3.54 - 8.75 \text{ g/kg}$$

$$Fe: y = 0.1558X^2 - 1.8322X + 17.596 \quad R^2 = 0.9911 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 10.95 - 65.97 \text{ g/kg}$$

$$Al: y = 0.1692X^2 - 6.0540X + 68.593 \quad R^2 = 0.9864 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 11.26 - 67.11 \text{ g/kg}$$

$$Mn: y = 0.0002X^2 - 0.0041X + 0.2477 \quad R^2 = 0.9701 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 0.11 - 2.28 \text{ g/kg}$$

โดยที่ $y =$ ปริมาณธาตุ (g/kg) และ $x =$ สัดส่วนพื้นที่ใต้พีคต่อนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์

5.1.4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ตัวอย่าง 4 แห่ง

เป็นการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ โดยการเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน โดยคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคต่อเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ กับ ปริมาณธาตุจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปริมาณของ ซิลิกอน ไททาเนียม เหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส ในแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง ได้ดังนี้

ซิลิกอน

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	372.91 g/kg	จากเทคนิค NAA	323.07 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	คำนวณได้	399.54 g/kg	จากเทคนิค NAA	332.53 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	411.04 g/kg	จากเทคนิค NAA	349.70 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	คำนวณได้	407.79 g/kg	จากเทคนิค NAA	354.14 g/kg

ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 50 - 67 g/kg

ไททาเนียม

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	4.37	g/kg	จากเทคนิค NAA	4.96 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	คำนวณได้	4.56	g/kg	จากเทคนิค NAA	5.60 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	4.59	g/kg	จากเทคนิค NAA	5.50 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	คำนวณได้	4.13	g/kg	จากเทคนิค NAA	5.86 g/kg

ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 0.6 – 2 g/kg

เหล็ก

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	26.69	g/kg	จากเทคนิค NAA	34.52 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	คำนวณได้	16.54	g/kg	จากเทคนิค NAA	28.44 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	16.05	g/kg	จากเทคนิค NAA	29.75 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	คำนวณได้	15.10	g/kg	จากเทคนิค NAA	23.28 g/kg

ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 8 - 14 g/kg

อะลูมิเนียม

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	66.76	g/kg	จากเทคนิค NAA	55.89 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	คำนวณได้	58.61	g/kg	จากเทคนิค NAA	60.56 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	25.29	g/kg	จากเทคนิค NAA	53.05 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	คำนวณได้	35.42	g/kg	จากเทคนิค NAA	61.16 g/kg

ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 2 – 28 g/kg

แมงกานีส

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	0.227	g/kg	จากเทคนิค NAA	0.277 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 2	คำนวณได้	0.228	g/kg	จากเทคนิค NAA	0.272 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	0.227	g/kg	จากเทคนิค NAA	0.294 g/kg
พื้นที่ตัวอย่างที่ 4	คำนวณได้	0.227	g/kg	จากเทคนิค NAA	0.246 g/kg

ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงประมาณ 0.02 – 0.07 g/kg

ถือได้ว่า การวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนิวตรอนนี้ สามารถเป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ ได้เลยโดยไม่ต้องทำการสุมตัวอย่างดินปริมาณมากมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และยังเป็นเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive technique :NDT) แต่เนื่องจากในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดยังมีค่าความเคลื่อนสูง อาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกเมื่อต้องการนำไปใช้ประโยชน์ในงานทั่วไป

5.1.5. ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียม

ปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคพลังงาน 1460.8 keV ของ ^{40}K จากการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติ ณ พื้นที่ กับ ปริมาณโปแตสเซียมที่ได้จากทั้งเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันและเทคนิคการวัดรังสีตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการแล้ว มีผลสอดคล้องกันค่อนข้างดี ยกเว้นบางพื้นที่ที่มีหญ้าปกคลุมดินค่อนข้างมาก ซึ่งจะเป็นการเพิ่มปริมาณโปแตสเซียมมากขึ้นจากปริมาณที่มีอยู่จริงในดิน

สำหรับการวิเคราะห์โปแตสเซียมในดิน ณ พื้นที่ เซึ่งกึ่งปริมาณ โดยการเปรียบเทียบปริมาณโปแตสเซียมที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$y = (3 \times 10^{-8})X^2 + 0.0001X + 0.2190 \quad R^2 = 0.9286 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 0.230 - 1.264 \%$$

โดยที่ y = ปริมาณโปแตสเซียม (g/100 g : %) และ x = สัดส่วนพื้นที่ใต้พีคพลังงาน 1460.8 keV

เมื่อทดลองวิเคราะห์ปริมาณโปแตสเซียม ณ พื้นที่ตัวอย่าง ได้ดังนี้

พื้นที่ตัวอย่างที่ 1	คำนวณได้	0.639 %	จากเทคนิค NAA 0.858 %
พื้นที่ตัวอย่างที่ 3	คำนวณได้	0.597 %	จากเทคนิค NAA 0.788 %

ค่าความแตกต่างประมาณ 0.2 %

เทคนิคการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณของโปแตสเซียม ณ พื้นที่ โดยวิธีนี้ ถือได้ว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์โปแตสเซียมที่ค่อนข้างสะดวกรวดเร็วมาก แต่อาจมีความถูกต้องแม่นยำไม่สูงมากนัก ซึ่งจะต้องมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติมอีก

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น ที่จะทดลองวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนิวตรอน ซึ่งถ้าได้มีการศึกษางานวิจัยนี้ต่อไปจะเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจาก มีหลายธาตุที่มีความไวในการวิเคราะห์ถึงแม้จะมีปริมาณอยู่น้อยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้ ดังต่อไปนี้

5.2.1. สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ จะต้องมีการปรับเทียบ (calibration) สารมาตรฐานของแต่ละธาตุนั้นในดินในห้องปฏิบัติการ อาจจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจาก ปริมาตรอิทธิพล (sphere of influence) หรือ รัศมีอิทธิพล (radius of influence) ของการเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอนเร็วพลังงานประมาณ 5 MeV ในดินค่อนข้างกว้างประมาณ 70 ซม. ในดินแห้ง และประมาณ 15 ซม. สำหรับดินเปียกที่มีความชื้นสูง [36] ฉะนั้นภาชนะที่ใส่ดินในการปรับเทียบจะต้องใหญ่มากอย่างน้อยต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 140 ซม. หรือ 1.4 เมตร ความสูงอย่างน้อยประมาณ 140 ซม. หรือ 1.4 เมตร ค่อนข้างใหญ่มาก และเพื่อให้ระยะของการเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอน เป็นระยะอนันต์เหมือนเวลาที่ทำการทดลองในภาคสนามจริง ดังนั้นภาชนะที่ใส่ดินก็อาจจะต้องใหญ่มากกว่านี้อีก ปริมาณดินที่จะนำมาใช้ปรับเทียบสารมาตรฐานก็ต้องมีปริมาตรอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 6.16 ลูกบาศก์เมตร ในการคลุกเคล้าสารมาตรฐานของธาตุแต่ละชนิดที่ต้องการวิเคราะห์เชิงปริมาณจึงค่อนข้างที่จะทำลำบาก ทั่วไปดินในแต่ละพื้นที่มักมีความหนาแน่น ความชื้น และประเภทของดิน ที่แตกต่างกัน อย่างชัดเจนเช่น ดินเหนียว ดินทราย ดินแดง เป็นต้น ก็จะต้องมีการปรับเทียบแก้ไขค่าความหนาแน่นในดิน ค่าความชื้นในดิน แต่ทั้งหมดก็มีข้อดีมากๆ คือ ถ้าสามารถเตรียมสารมาตรฐาน และแก้ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่นของดิน และค่านิวตรอนฟลักซ์ได้แล้ว จะถือว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุในดินได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ณ พื้นที่ ได้ทุกพื้นที่อย่างสะดวกรวดเร็ว และไม่ต้องสุ่มเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการอีกเลย เช่นเดียวกับ ที่องค์การนาซา (NASA) ได้ใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนในการวิเคราะห์ธาตุนบนพื้นผิวดวงจันทร์ เมื่อปี 1964 [37]

5.2.2. ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุในดิน ณ พื้นที่ อาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง คือ การคำนวณหาค่าความแรงรังสีเฉพาะ (Specific activity : Ci/g or Ci/m²) ของแต่ละธาตุในดิน โดยคำนวณได้จากพื้นที่ใต้พีคของรังสีพรอมต์แกมมา ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุนั้น กับนิวตรอน โดยจะต้องทดลองหาสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพหัววัดรังสีแกมมากับพลังงานของรังสีแกมมา ซึ่งเคยใช้เป็นวิธีการตรวจวัดรังสีแกมมา ณ พื้นที่ ในสิ่งแวดล้อม [38] แต่วิธีการคำนวณของวิธีการวิเคราะห์ธาตุในดิน โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและการจับนิวตรอน อาจจัดประเภทในการคำนวณต่างกัน โดยเทคนิคนิวตรอนนี้อาจจัดอยู่ในประเภทต้นกำเนิดรังสีมีระยะลึกในดิน ถ้ามีการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมอีกอาจเป็นแนวทางที่ดีในการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่สะดวกขึ้นมาก [39]

5.2.3. สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ได้โดยการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนพื้นที่ใต้พีคต่อเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ กับปริมาณที่วิเคราะห์จากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ในงานวิจัยนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนสูงในการคำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์สูง เนื่องจากเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์สัมพันธ์ที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้เป็นเทอร์มาลนิวตรอนที่ขึ้นมาบนผิวน้ำดินแล้ว ถ้าต้องการให้การคำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนสัมพันธ์ถูกต้องมากขึ้นก็ควรจะศึกษาเพิ่มเติม โดยวางแผนอินเดียมหรือสารมาตรฐานที่ไม่เป็นธาตุองค์ประกอบที่เจือปนอยู่ในดินใส่ลงในดินตรงตำแหน่งการวางที่เหมาะสมที่จะได้จากการศึกษาต่อไป

และพื้นที่ที่วัดรังสีแกมมา เพื่อศึกษาหาสมการความสัมพันธ์สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ แต่ละพื้นที่ควรจะต้องเลือกศึกษาจากพื้นที่ที่คาดว่าจะมีปริมาณของแต่ละธาตุแตกต่างกัน คือ ปริมาณไม่ใกล้เคียงกันมากนักในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้สมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น และช่วงปริมาณที่สามารถวิเคราะห์ได้จะกว้างมากขึ้นด้วย

5.2.4. สามารถที่จะนำวิธีวิเคราะห์ธาตุ โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและการจับนิวตรอนนั้น มาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างที่เป็นน้ำทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ เนื่องจากน้ำมีรัศมีวิกฤตของการเกิด

ปฏิกิริยาของนิวตรอนเร็วค่อนข้างแคบประมาณ 15 ซม. ซึ่งอาจจะสามารถทำการปรับเทียบสารมาตรฐานได้ง่ายกว่า และสะดวกกว่า ตัวอย่างงานวิจัยที่น่าจะสามารถนำวิธีวิเคราะห์ ณ พื้นที่ โดยเทคนิคนี้ได้ เช่น การหาปริมาณธาตุที่เป็นพิษในบ่อน้ำเสียที่ปล่อยจากโรงงานหรือในแหล่งน้ำธรรมชาติ หรือ งานสำรวจแร่ธาตุในบ่อน้ำพุร้อน บ่อน้ำแร่ธรรมชาติ เป็นต้น

5.2.5. เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในดินเชิงปริมาณ โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ณ พื้นที่ เนื่องจากมีบางธาตุ เช่น อะลูมิเนียม โซเดียม แมงกานีส และคลอรีน นั้นค่อนข้างมีความไวสูงในการวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันนี้ แต่สำหรับการวิเคราะห์ในเชิง ปริมาณ สำหรับอะลูมิเนียมอาจต้องใช้เวลาในการวัดรังสีดีเลย์แกมมาในระยะสั้น เป็นช่วงๆ และต้องรีบวัดหลังจากนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกทันที เนื่องจากไอโซโทปรังสีของอะลูมิเนียม - 28 มีครึ่งชีวิตสั้น คือ 2.24 นาที และ พีคของอะลูมิเนียมมีพลังงานใกล้เคียงกับพีค รังสีแกมมาตามธรรมชาติของ Bi - 214 ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการแก้ปัญหาในการหาพื้นที่ใต้พีค เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องมากขึ้น แต่สำหรับโซเดียมและแมงกานีส อาจต้องเพิ่มทั้งเวลาการอบนิวตรอน หรือ เวลาในการวัดรังสีดีเลย์แกมมาให้นานขึ้น เนื่องจากโซเดียม -24 มีครึ่งชีวิต 14.96 ชม. และ แมงกานีส มีครึ่งชีวิต 2.58 ชม. ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล่านี้ทั้งในดินหรือน้ำโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ณ พื้นที่ ควรศึกษาถึงระยะเวลาในการอบนิวตรอนและเวลาในการวัดรังสีดีเลย์แกมมา ให้เหมาะสมในการวิเคราะห์ของแต่ละธาตุ โดยที่จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของสิ่งแวดล้อมจากไอโซโทปที่เกิดขึ้นที่จะยังคงอยู่ในดินหรือน้ำต่อไปอีก ในระยะเวลาหนึ่งด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.
2. อภิลิทธิ์ เอี่ยมหน่อ. การกำเนิดและจำแนกดิน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2527.
3. ปานทิพย์ อัมพรรัตน์. การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. กำธร สุนทรปกาสิต. การหาปริมาณไฮโดรเจนโดยการวัดรังสีฟรอมต์แกมมา พลังงาน 2.223 MeV จากปฏิกิริยา $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
5. คณิต ทองพิสิฐสมบัติ. การหาปริมาณไนโตรเจนโดยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีฟรอมต์แกมมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
6. Trombka, J.I. ; Senftle, F. ; and Schmadebeck, R. Neutron Radiative Capture Method for Surface Elemental Analysis. Nuclear Instruments and Methods. 87 (1970) : 37- 43.
7. Hassan, A.M. ; El-Kady, A. ; and El-Ezaby, B. A. Prompt Gamma – Ray System for Elemental Analysis of Complex Samples. Nuclear Instruments and Methods. 192 (1982) : 595 - 601.
8. Mikesell, Jon L. ; Dotson, Danny W. ; and Senftle, Frank E. In Situ Capture Gamma – Ray Analysis of Coal in An Oversize Borehole. Nuclear Instruments and Methods. 215 (1983) : 561 - 566.
9. Mikesell, Jon L. ; Senftle, F. E. ; Lloyd, T.A. ; Tanner, A.B. ; Merritt , C. T. ; and Force, E.R. Borehole Field Calibration and Measurement of Low Concentration Manganese by Decay Gamma - Rays. Nuclear

- Geophysics. 51 (1986): 2219 – 2224.
10. Curtiss, L.F. Introduction to Neutron Physics. New Delhi : Affiliated East – West Press, 1959.
 11. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. เอกสารการสอน. กรุงเทพฯ: ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
 12. Knoll, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. 2nd edition New York: John Wiley & Son, 1989.
 13. Stewart, R.B. Trans. Instrum. Soc. Am. 6(1976) : 200.
 14. Sowerby, B.D. Elementary Analysis by Neutron Inelastic Scatter Gamma – Rays with a Radioisotope Neutron Source. Nuclear Instruments and Methods. 166 (1979): 571 – 579.
 15. Sowerby, B.D. Measurement of Specific Energy , Ash and Moisture in Bluk Coal Samples by A Combined Neutron and Gamma - Ray Method. Nuclear Instruments and Methods. 160 (1979): 173 – 182.
 16. Cunningham, J.B. ; Sowerby, B.D. ; Rafter, P.T. ; and Greenwood – Smith , R. International Journal Applied Radiation and Isotope. Vol 35. No 7. (1984): 635 - 643.
 17. Sowerby, B.D. The Use of a Hydrogen Signal in Correcting the Carbon Concentration from $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ Reaction in Coal. Nuclear Geophysics. Vol.7 No.4 (1993): 529 – 537.
 18. Kacpererek, A. ; Morgan, W.D. ; Sivyer, A. ; Dutton, J. ; and Evans, C.J. The Application of a Plused Fast Neutron Beam to Partial Body In Vivo Activation Analysis of Minerals and Trace Elements. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Vol.140 No.1 (1990): 141 – 151.
 19. Cheng, C.Y. ; Coope, D.F. ; Filo, A.J. ; and Yates, S.W. Elementary Analysis by Gamma – Ray Detection Following Inelastic Neutron Scattering. Journal of Radio analytical Chemistry. Vol.46 (1978): 343 – 355.

20. Tuli, J.K. Thermal Neutron Capture Gamma – Rays. National Nuclear Data Center.
New York: Brookhaven National Laboratory, 1998.
21. Curtis, D.B. ; Gladney, E.S. ; and Jurney, E. Geochim. Cosmochim. Acta. , 44
(1980): 1945.
22. Andras, L. ; Balint, A. ; Csoke, A. ; and Nagy, A.Z. Radiochem. Radioanal. Lett., 40
(1979): 27.
23. Chang, P. ; Chung, C. ; Yuan, L. ; and Weng, P. J. Radioanal. Nucl. Chem. 92
(1985): 343.
24. Chung, C. ; and Yuan, L. Appl. Radiat. Isot. 39 (1988): 977.
25. Chen, W.K. ; and Chung, C. J. Radioanal. Nucl. Chem. 133 (1989): 349.
26. Boron, J.P. ; Barnavon, T. ; Alexandre, J. ; and Debray, L. On – Line Bluk Analysis
of Raw Material in a Cement Plant Using the Neutron Irradiation and
Capture Gamma – Ray Technique. Nuclear Techniques in the
Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources.
Proceeding of a Symposium VIENNA. 5-8 June 1990 (IAEA) : 569 – 583.
27. Das, H.A. ; Faanhof, A. ; and Van Der Sloot, H.A. Radioanalysis in Geochemistry.
Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.,1989.
28. แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis.
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ , 2534.
29. Eisler, P.L. ; Mathew, P.J. ; Youl, S.F. ; and Wylie, A.W. Nuclear Activation Logging
For Aluminium in Iron Ores and Coal. Geoexploration. , 17 (1979)
: 45 – 53.
30. Aylmer, J.A. ; Charbucinski, J. ; Eisler, P.L. ; and Youl, S.F. Quantitation Borehole
Logging of Manganese Ore by Prompt Neutron – Gamma and Neutron
Activation Methods. SPWLA 25th Annual Logging Symposium. , New
Orland: paper D, 1984.
31. Sadasivan, S. ; and Mureli, A.V. Symp. Radiochem. Radiation Chem. Puna: 1982.

31. Siegel, F.R. Applied Geochemistry. Wiley Interscience, J. New York: Wiley and Sons, 1974.
33. Boyle, R.W. Geol. Survey of Canada. (1974) : 74 – 75.
34. Lamash, John R. Introduction to Nuclear Engineering. 2nd edition. Massachusetts: Addison – Wesley, 1983.
35. Gilmore, Gordon. ; and Hemingway, John D. Practical Gamma – Ray Spectrometry. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.
36. Kanemasu, E.T. Soil Moisture Measurements for FIFE. Kansas: Kansas State University, 1989.
37. Caldwell, R.L. ; Mills, W.R. ; Allen, L.S. ; Bell, P.R. ; and Heath, R.C. Science. 152. No.3721 (1966): 457.
38. ภาวดี สราภัสสร. การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมโดยใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
39. Sakai, E. ; et al. Analytical Method of In Situ Measurement. JAERI – M 6498.,1976.



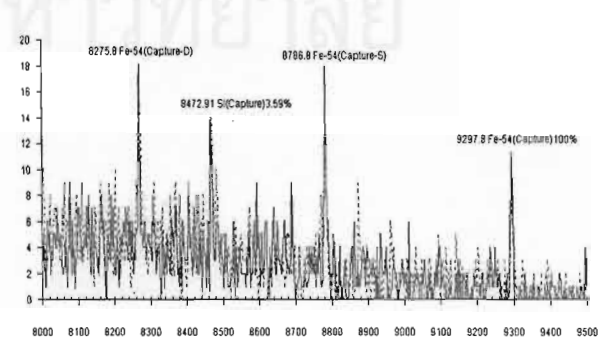
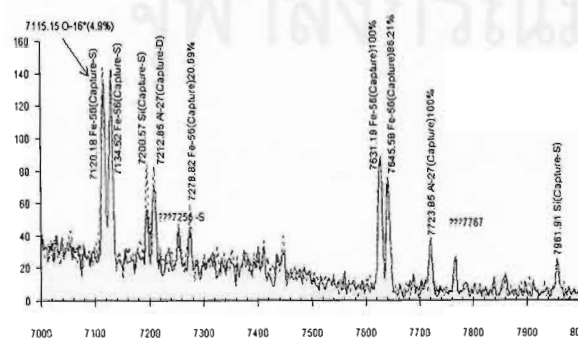
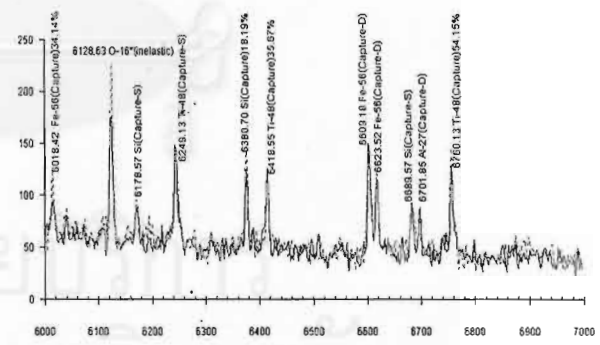
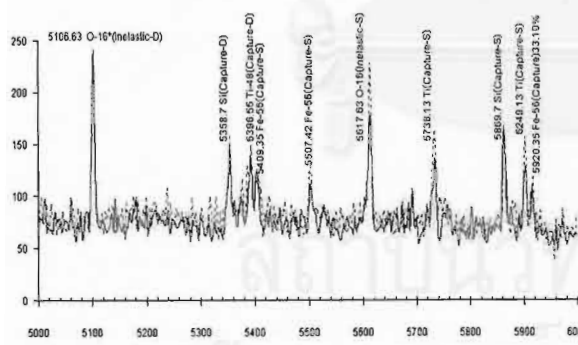
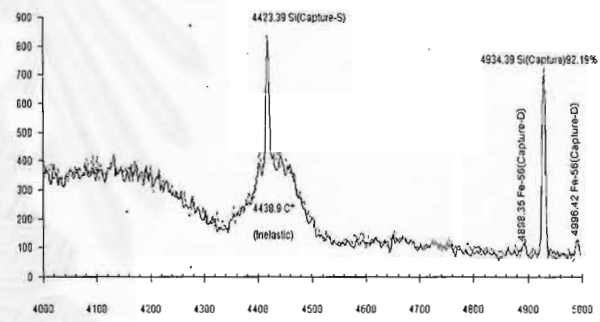
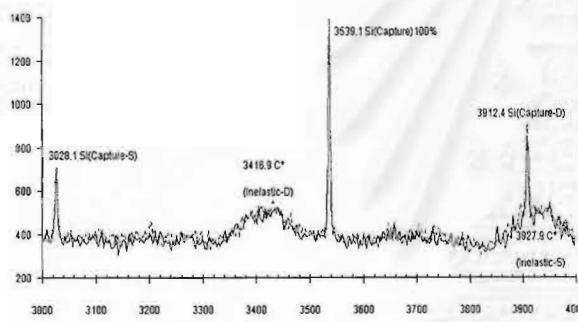
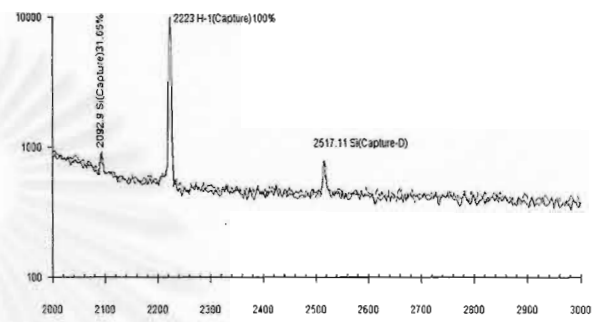
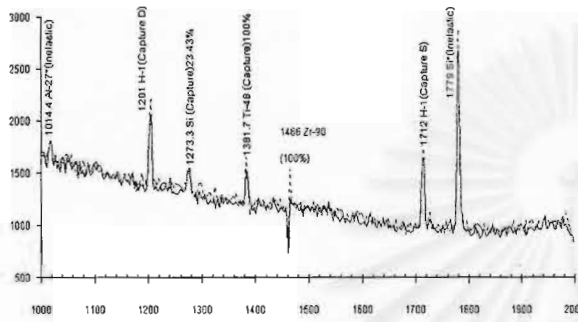
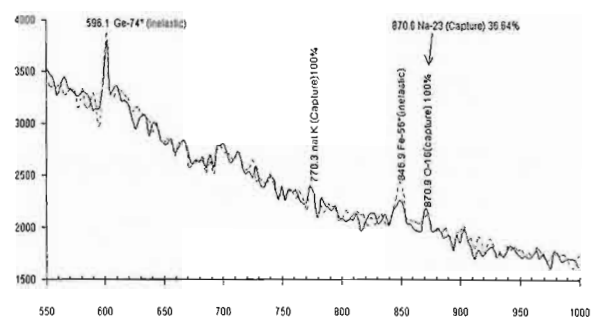
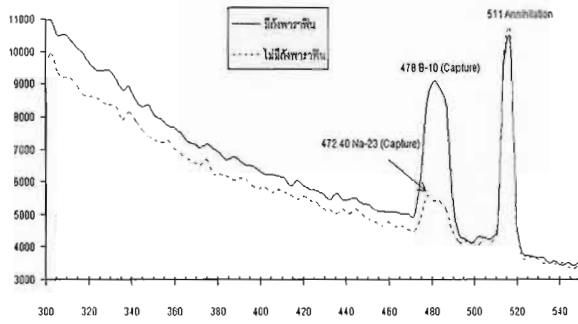
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

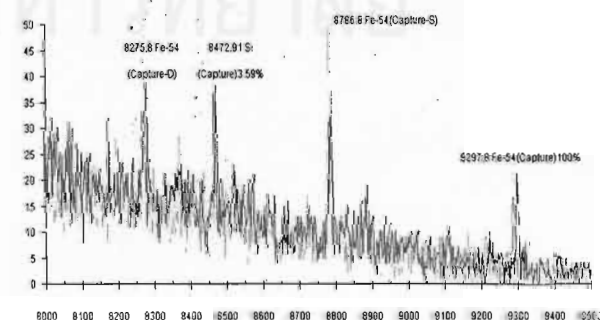
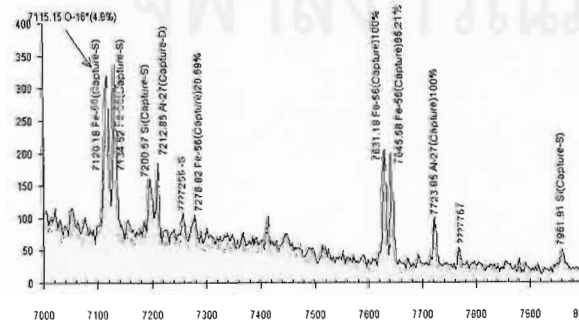
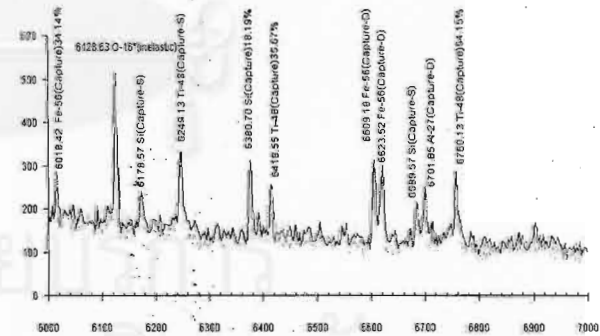
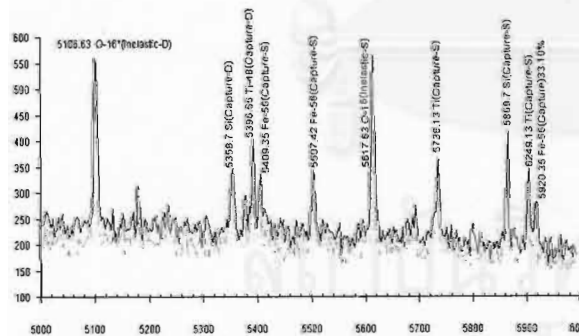
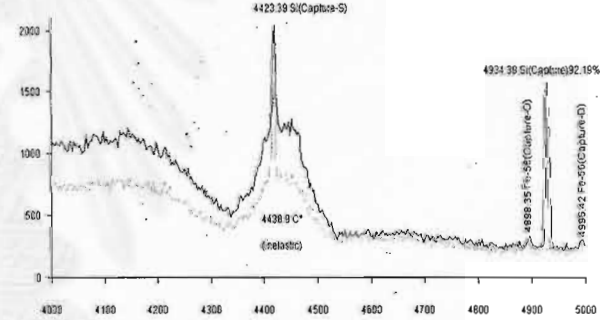
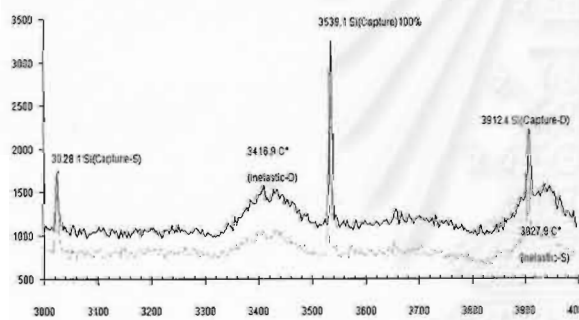
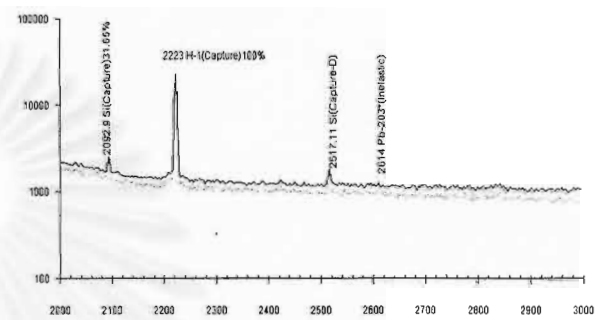
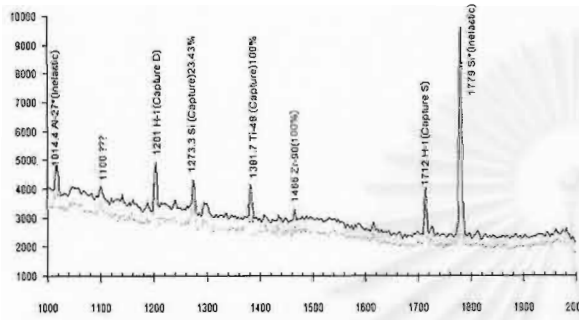
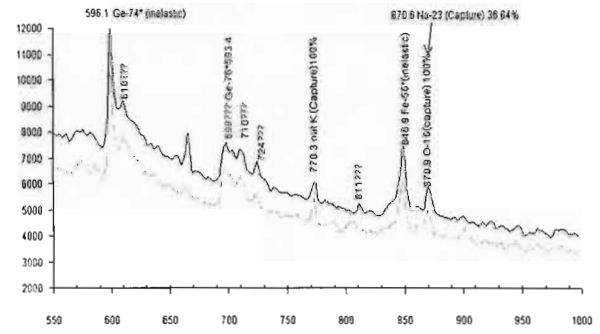
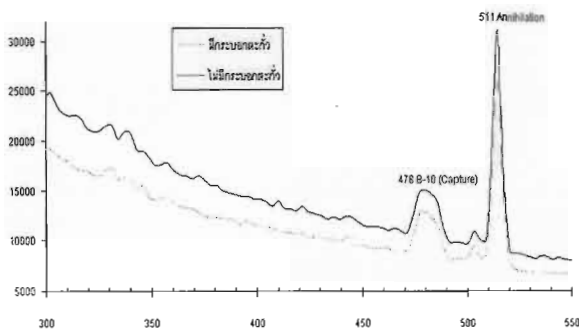


ภาคผนวก ก

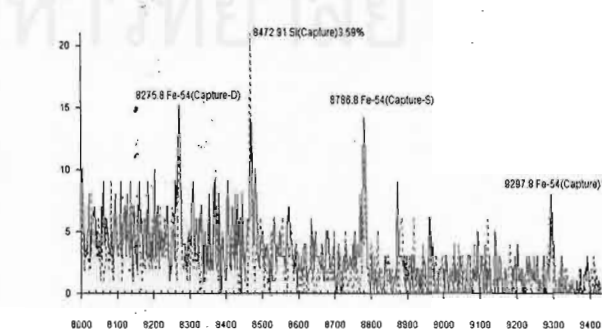
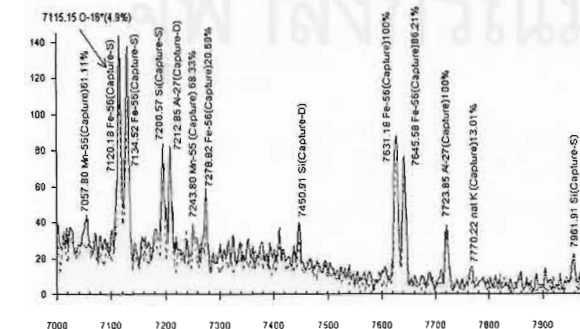
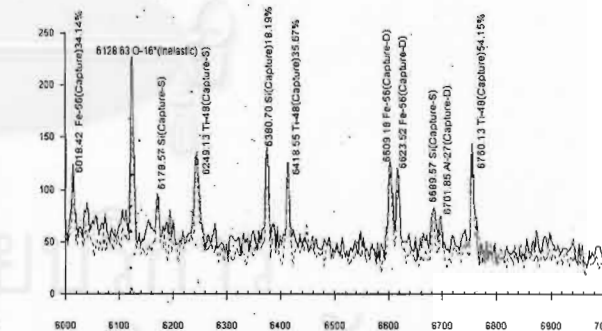
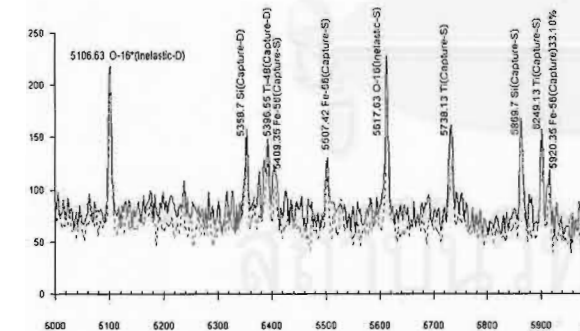
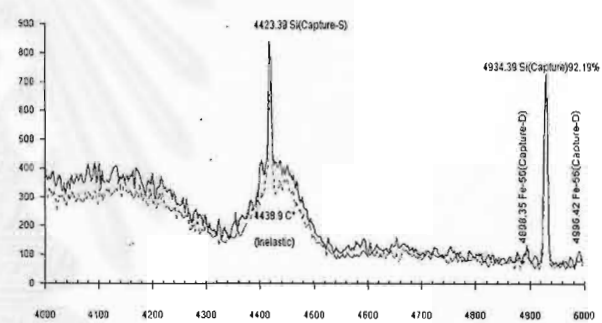
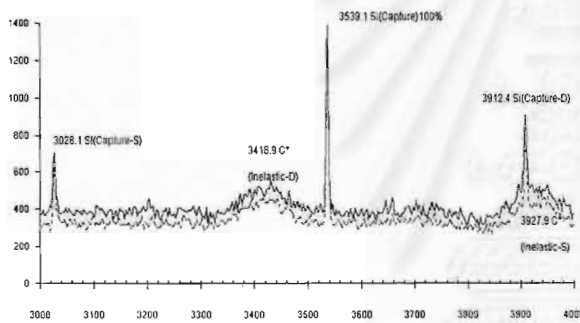
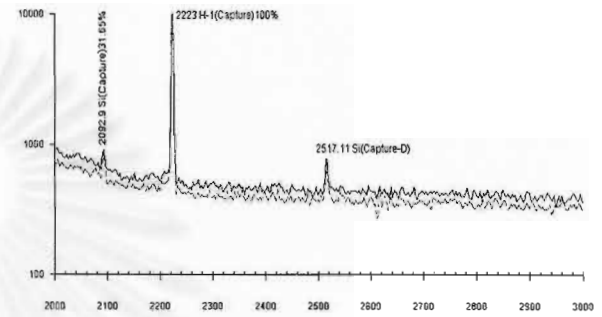
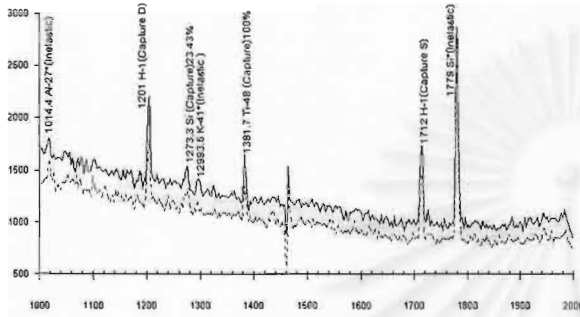
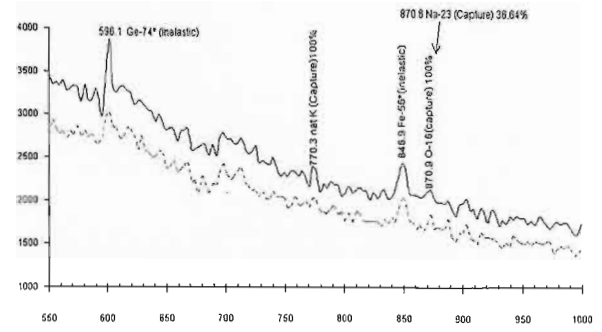
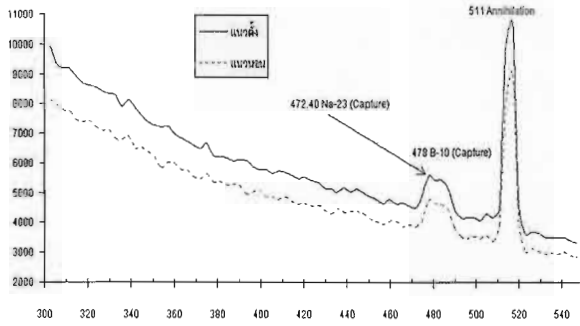
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



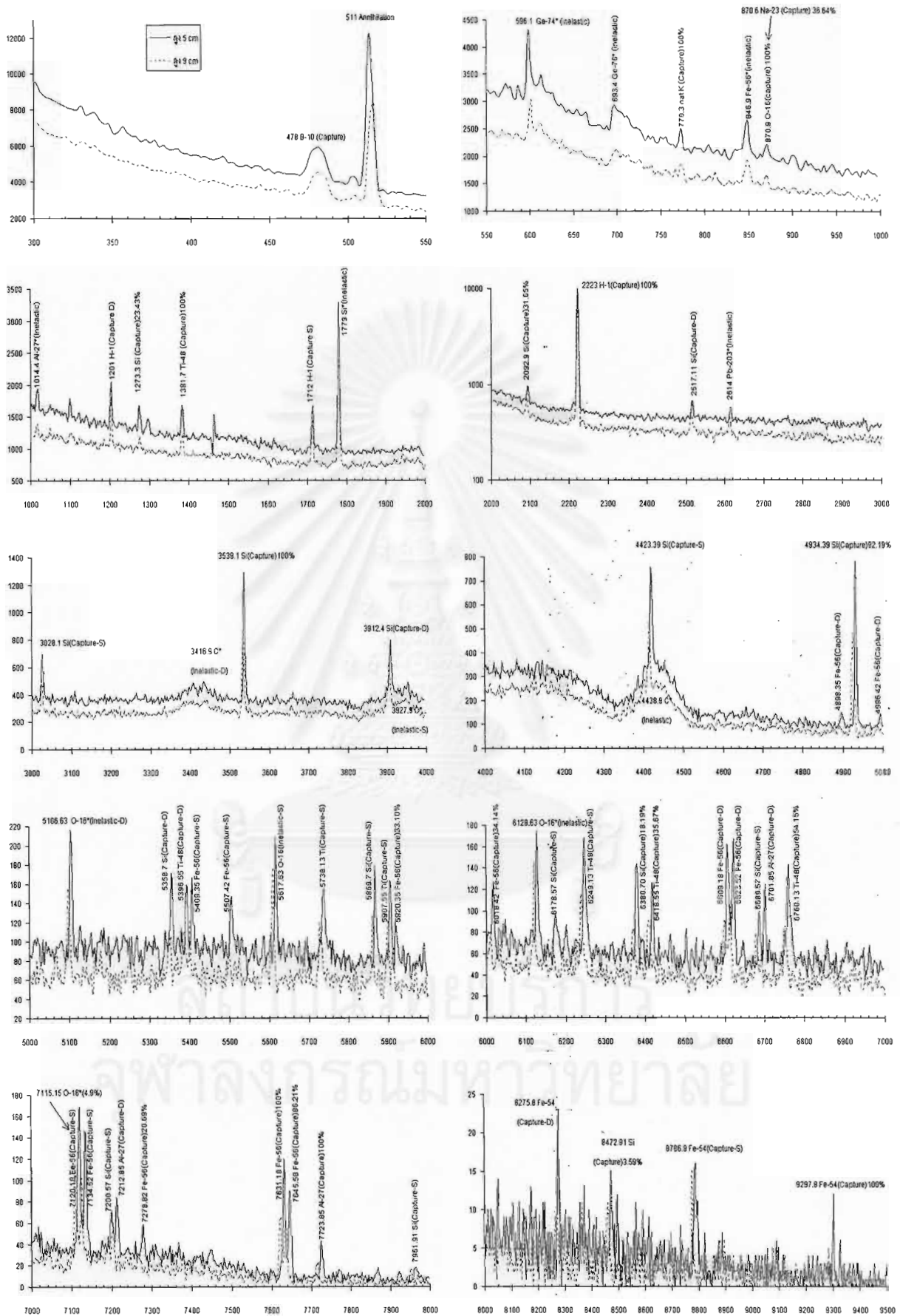
รูปที่ ก.1 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมา เมื่อมีและไม่มีถังเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนวางบนหลุม



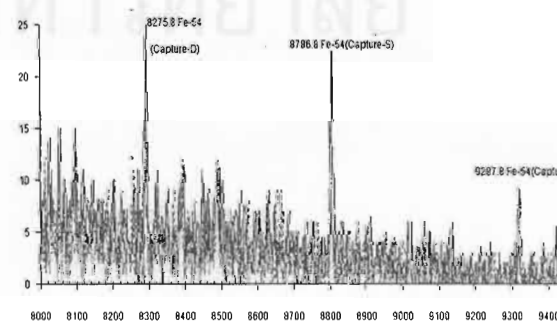
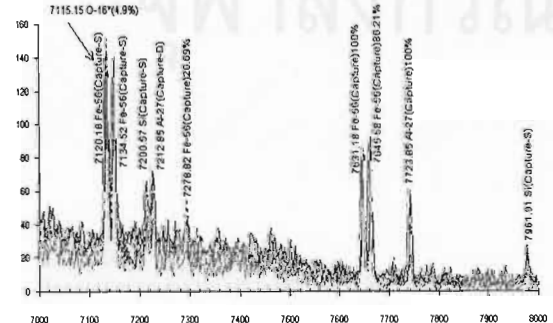
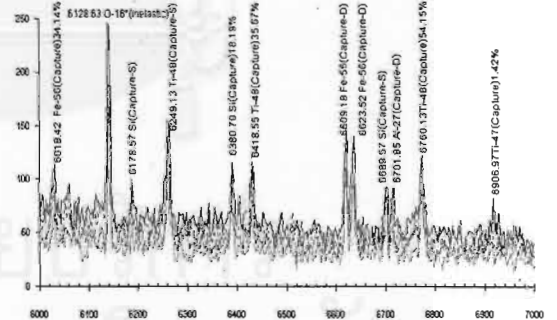
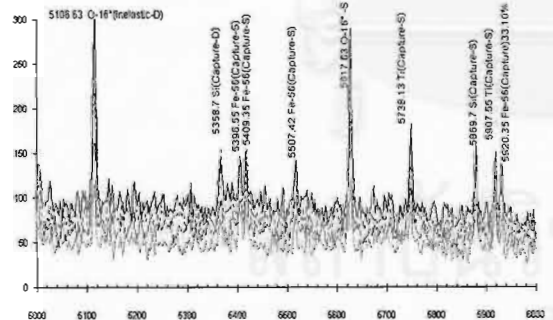
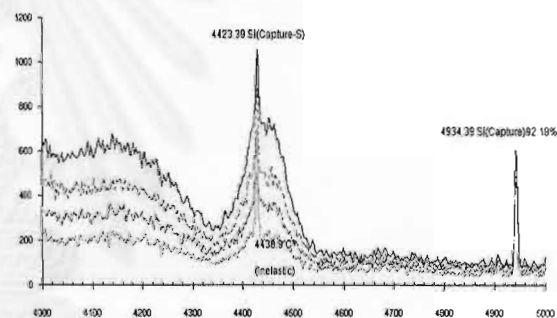
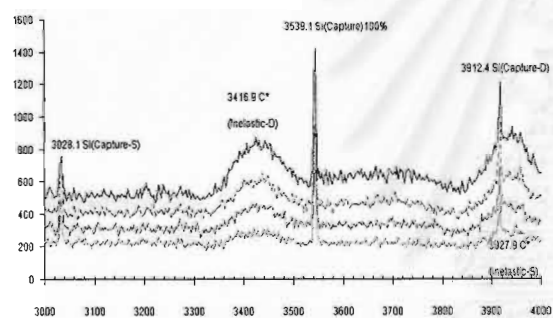
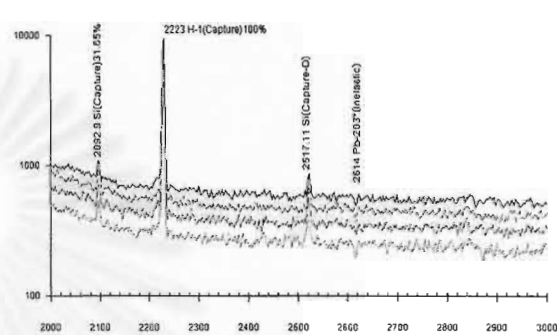
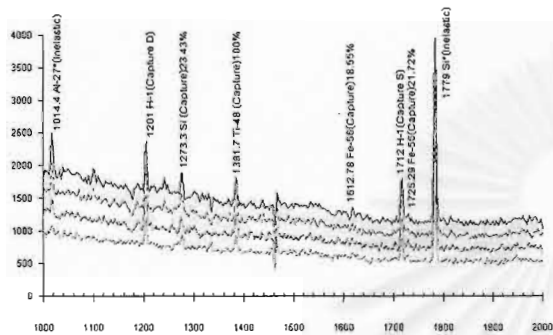
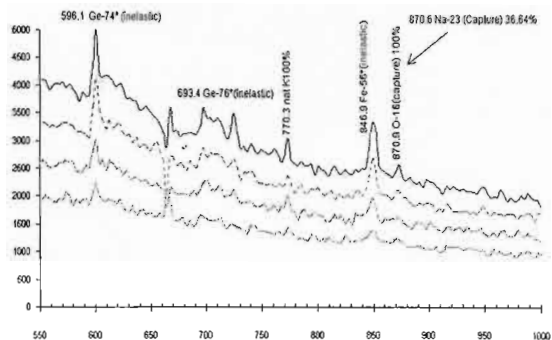
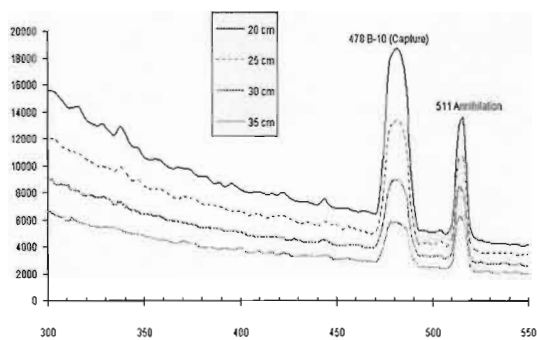
รูปที่ ก.2 สเปกตรัมรังสีแกมมา เมื่อมีและไม่มีกระบอกตะกั่วกำบังรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอน



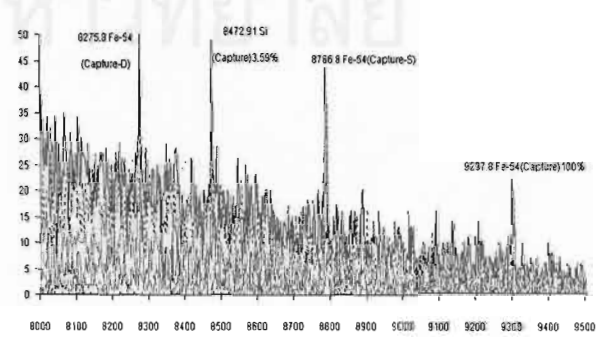
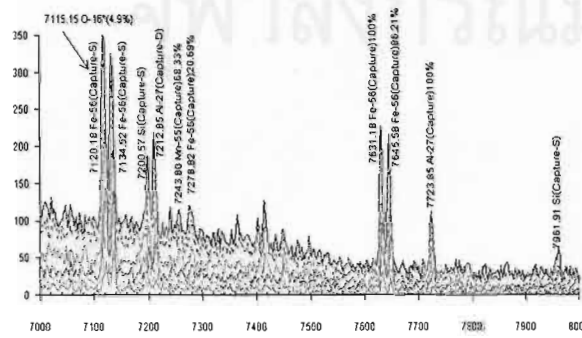
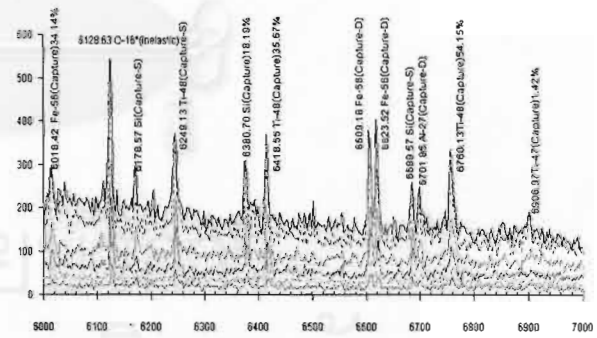
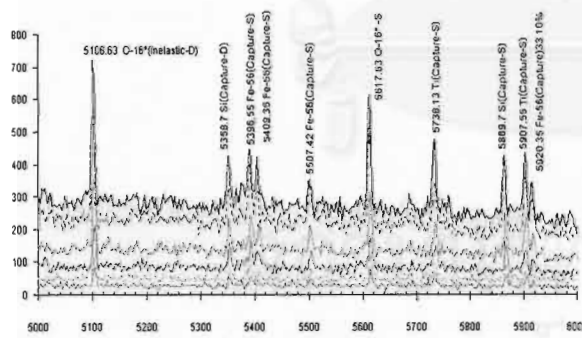
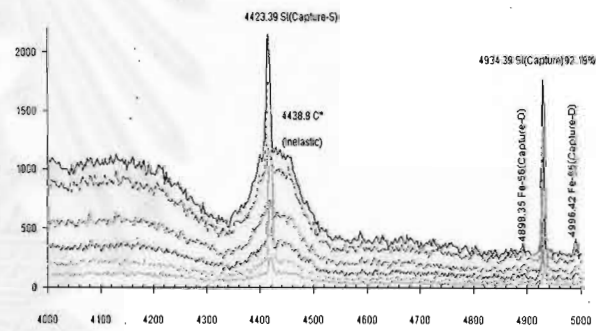
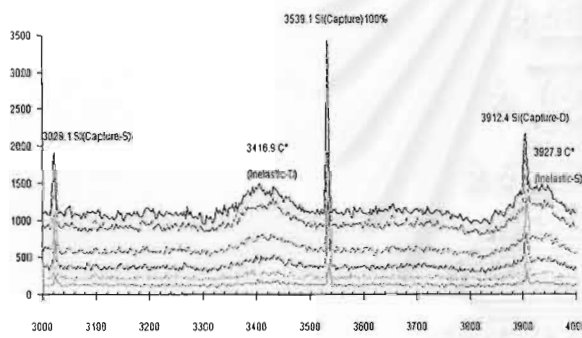
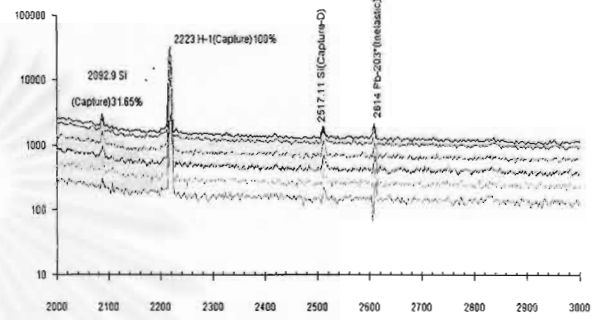
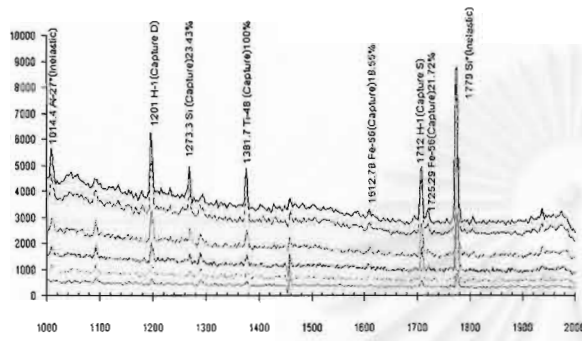
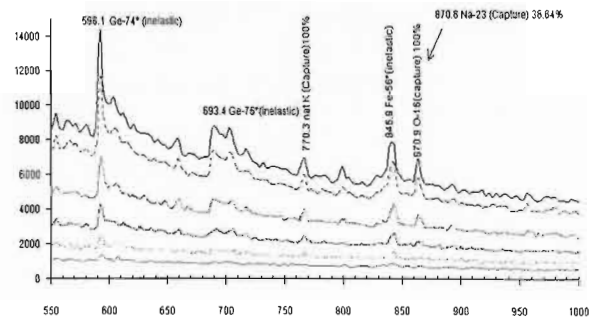
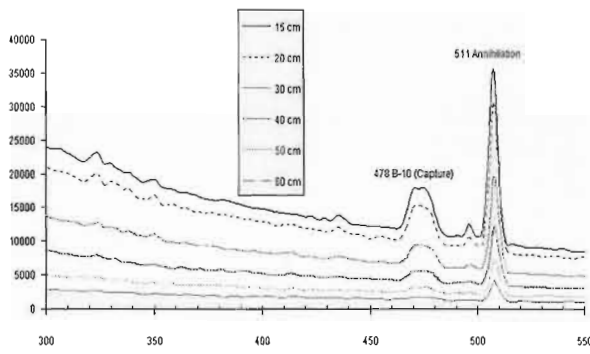
รูปที่ ก.3 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนดแกมมา เมื่อวางหัววัดรังสีในแนวตั้งและในแนวนอน



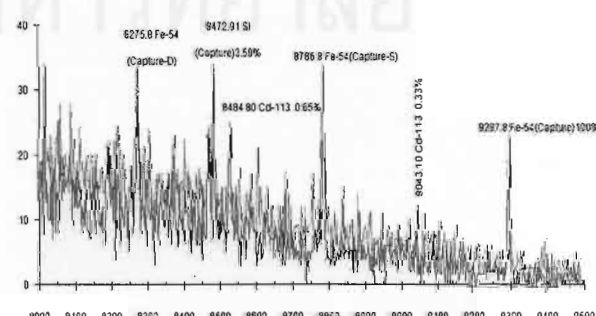
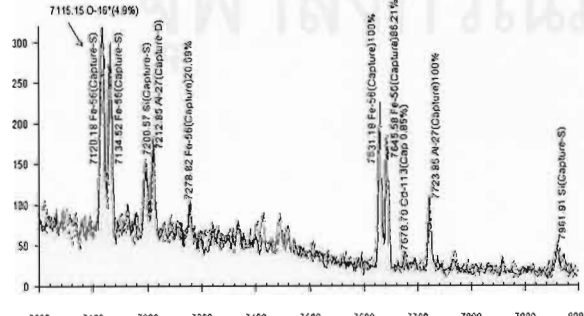
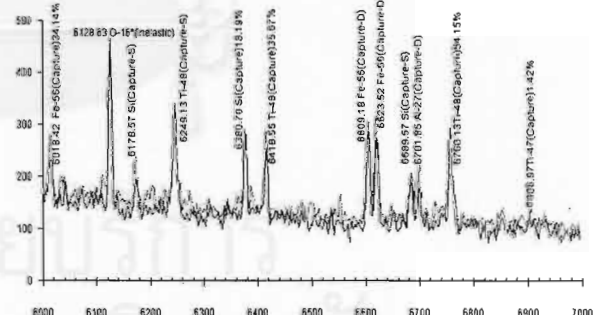
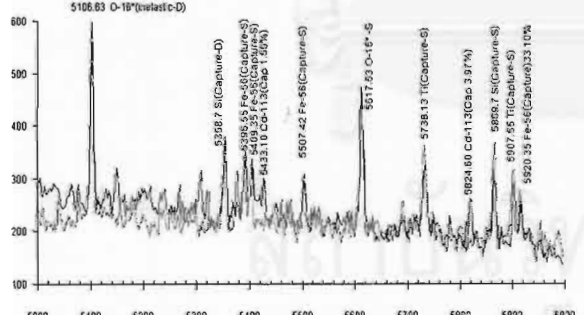
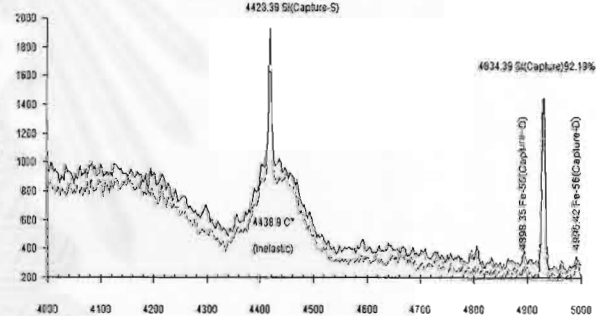
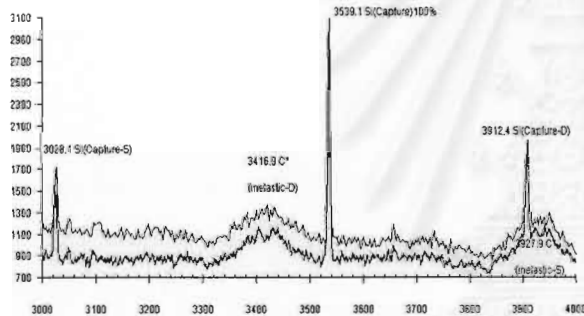
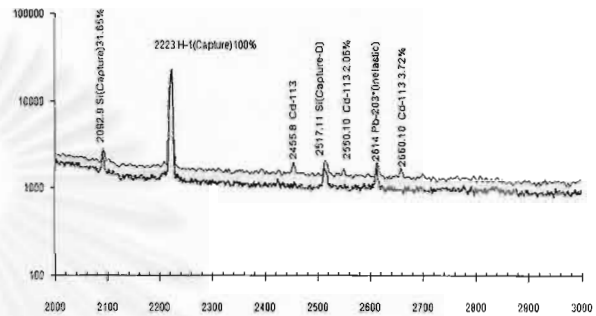
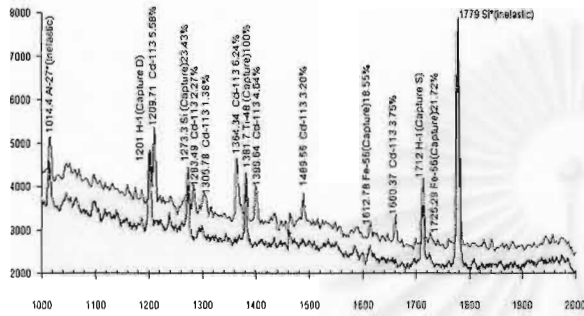
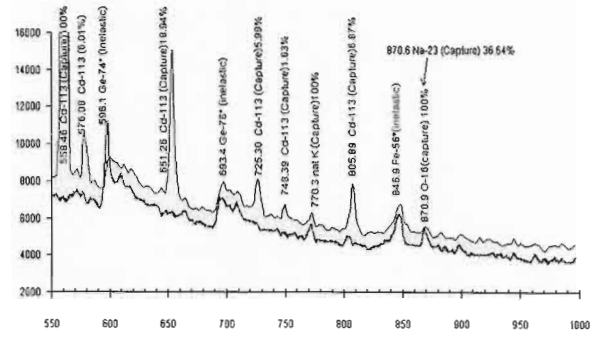
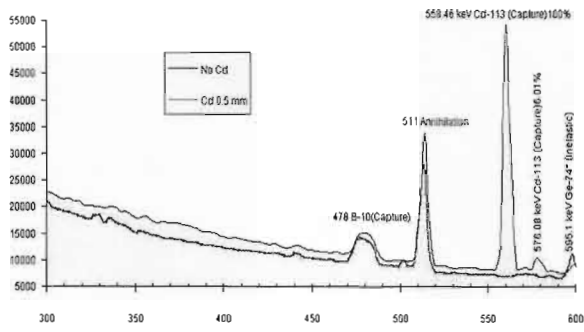
รูปที่ ก.4 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนแม่ื่อระยะห่างของหัววัดรังสีจากพื้นดินต่างกัน



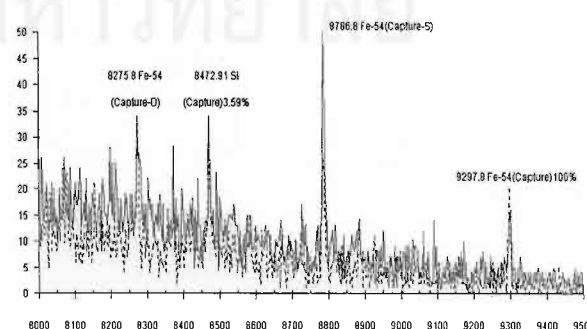
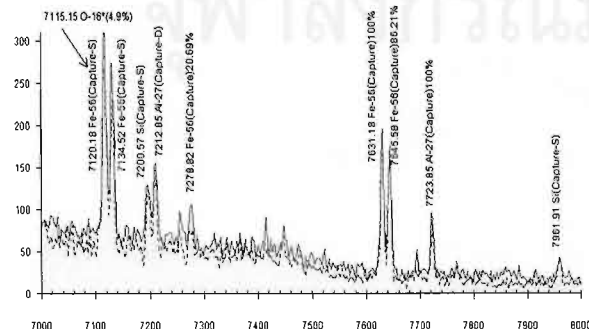
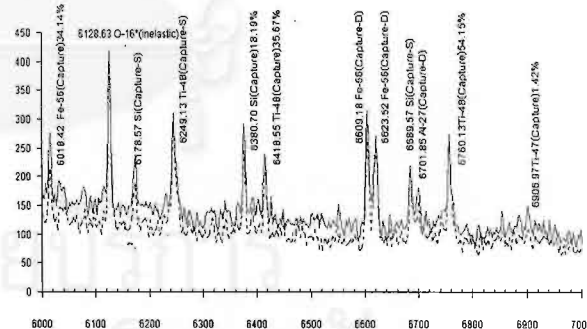
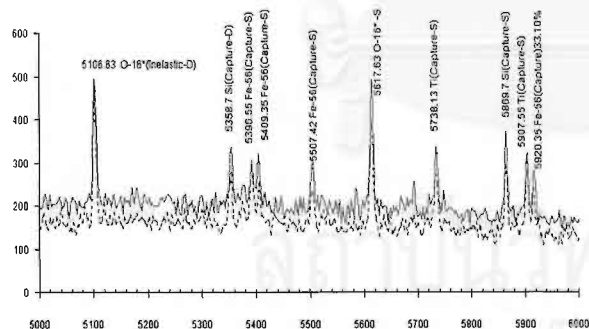
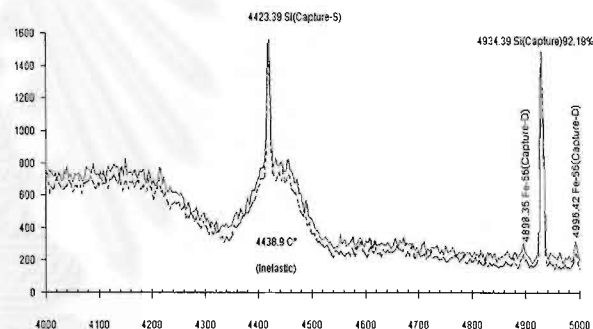
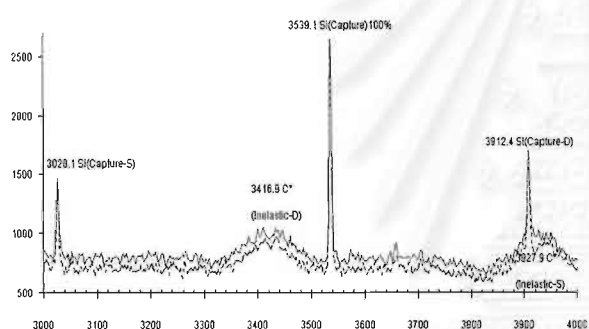
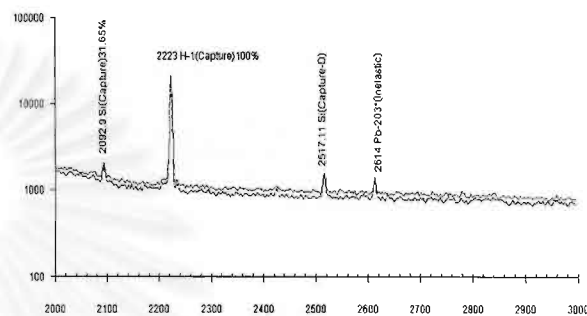
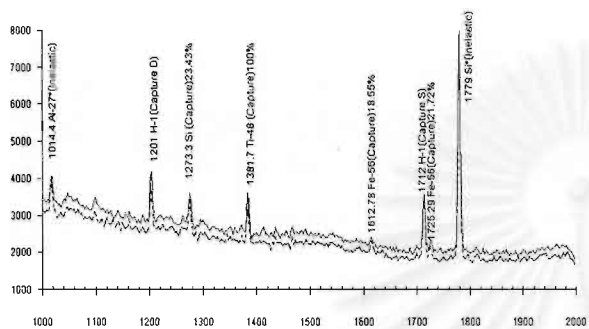
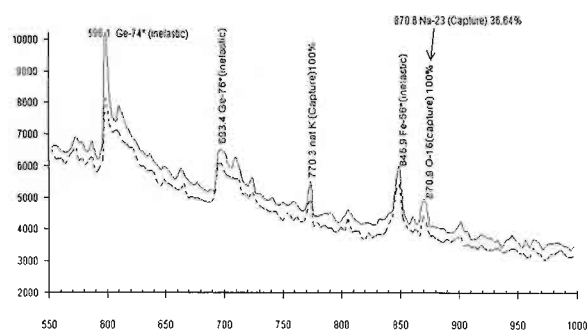
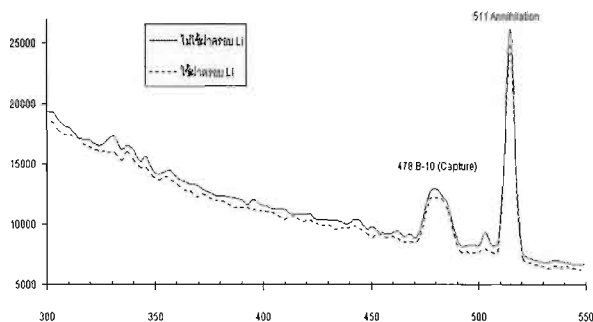
รูปที่ ก.5 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ระดับลิแกต่างๆ



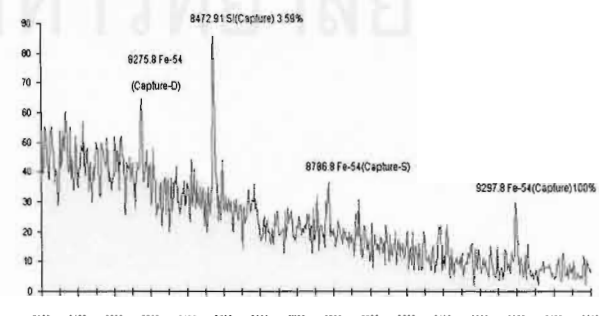
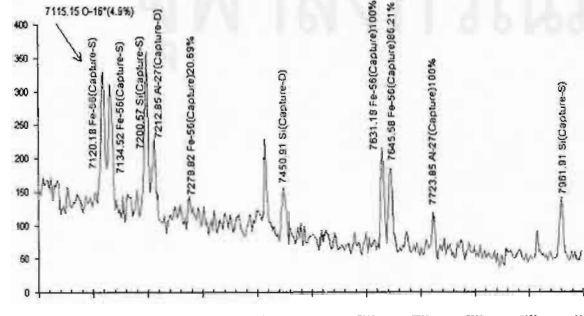
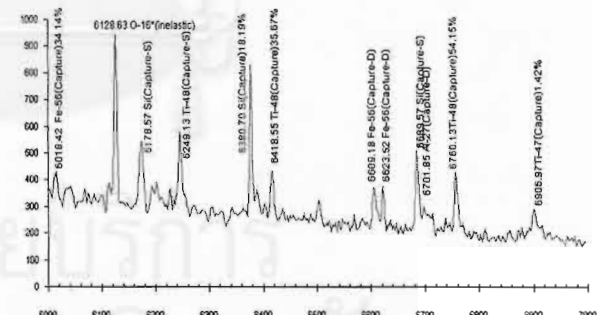
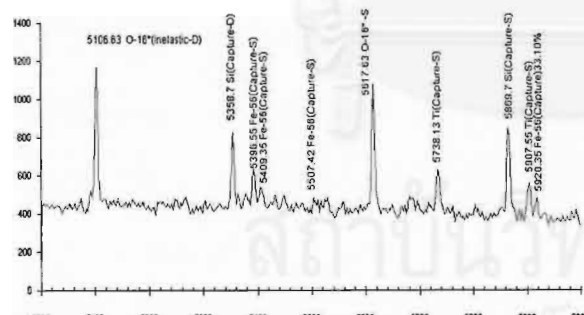
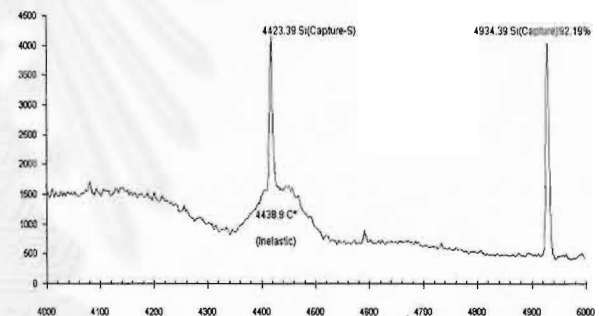
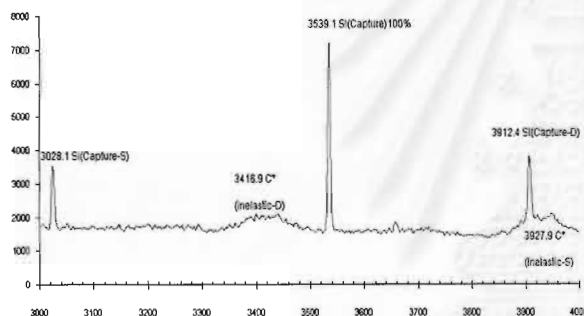
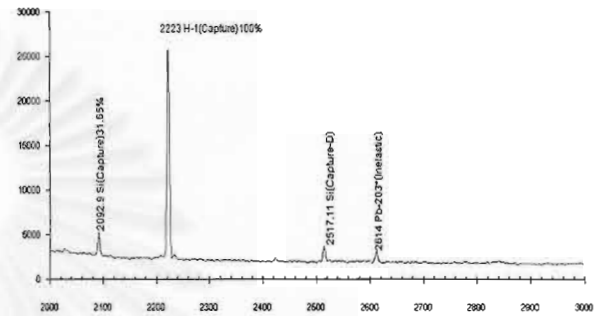
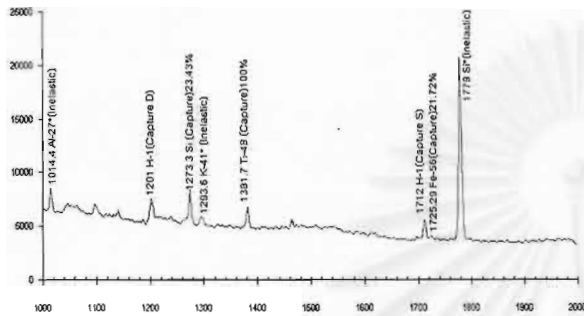
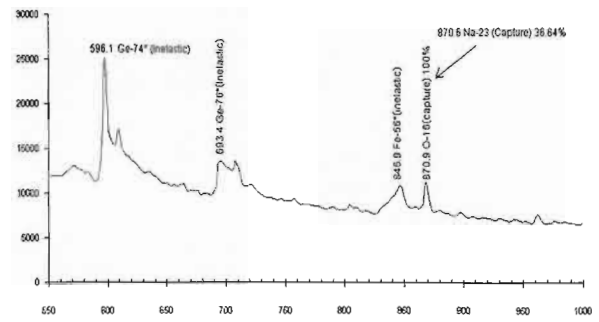
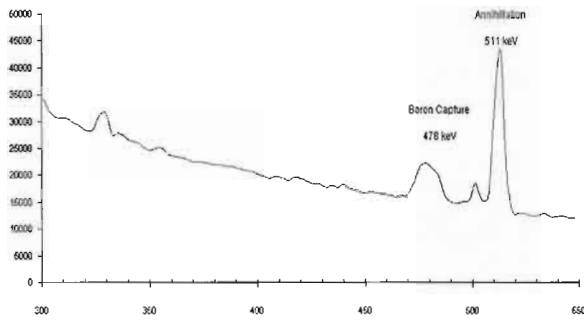
รูปที่ ก.6 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาที่ระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสีต่าง ๆ



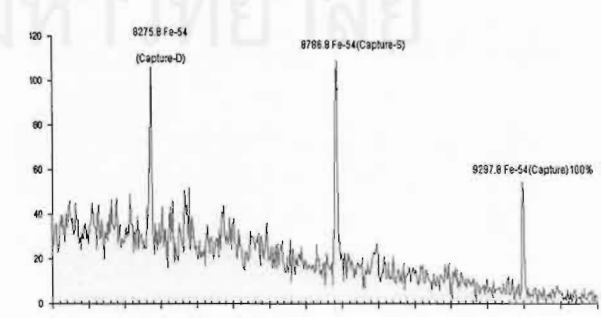
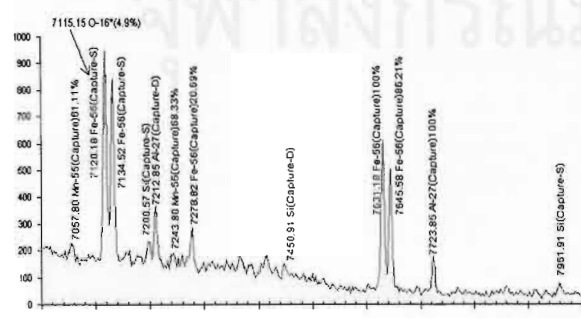
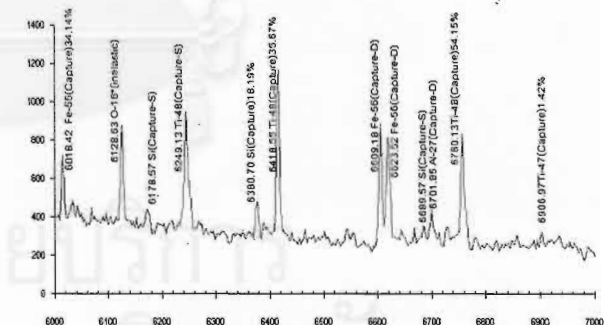
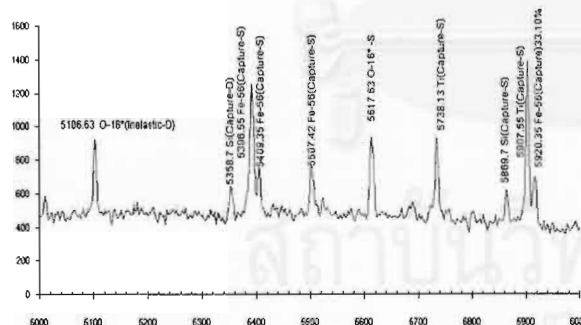
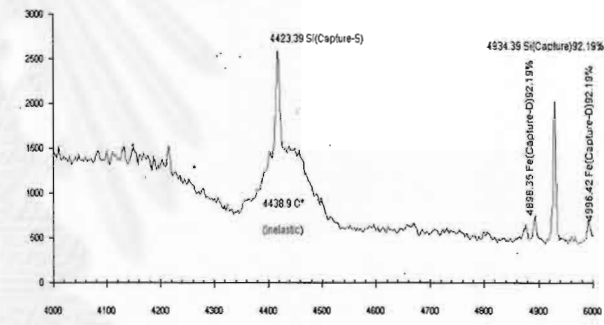
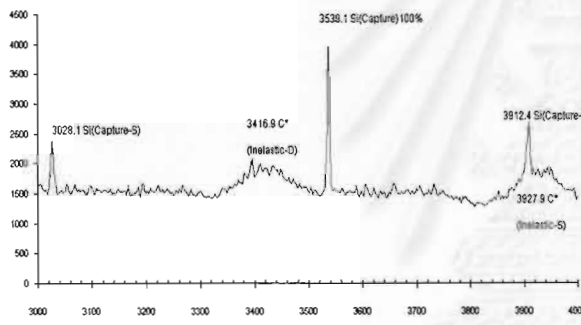
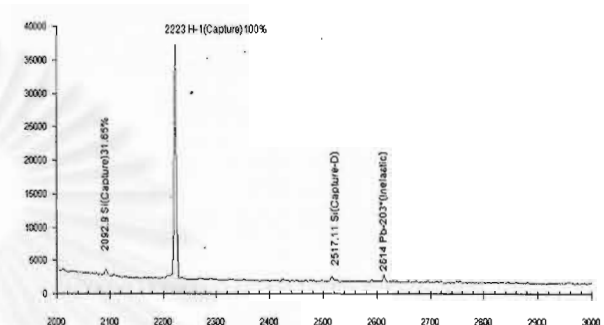
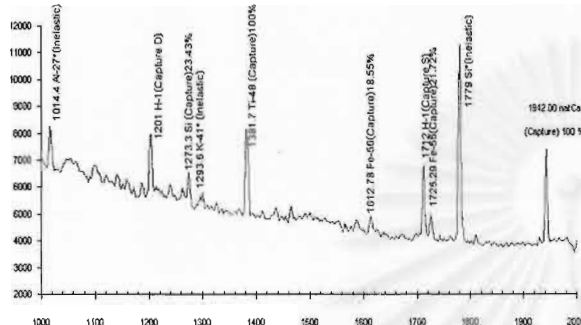
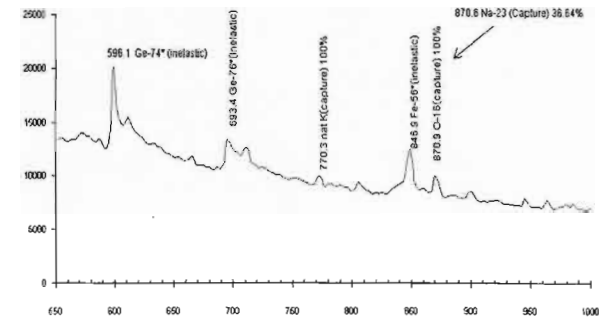
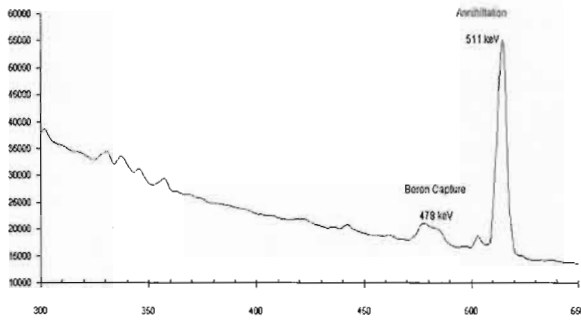
รูปที่ ก.7 สเปกตรัมของรังสีฟอรอมต์แกมมาเมื่อใช้และไม่ใช้แผ่นแคดเมียมกำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี



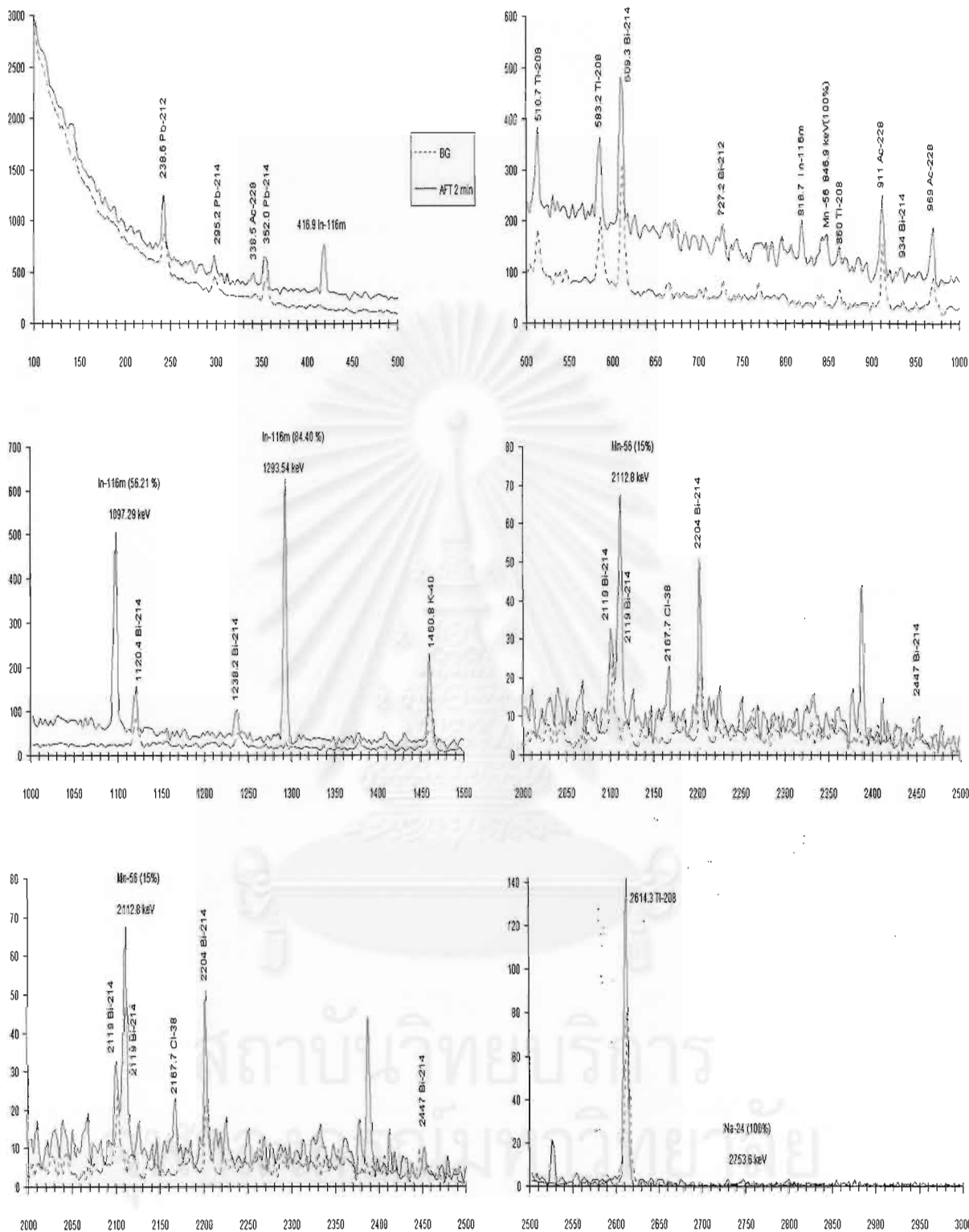
รูปที่ ก.8 สเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมาเมื่อใช้และไม่ใช้ LiCO_3 กำบังนิวตรอนให้หัววัดรังสี



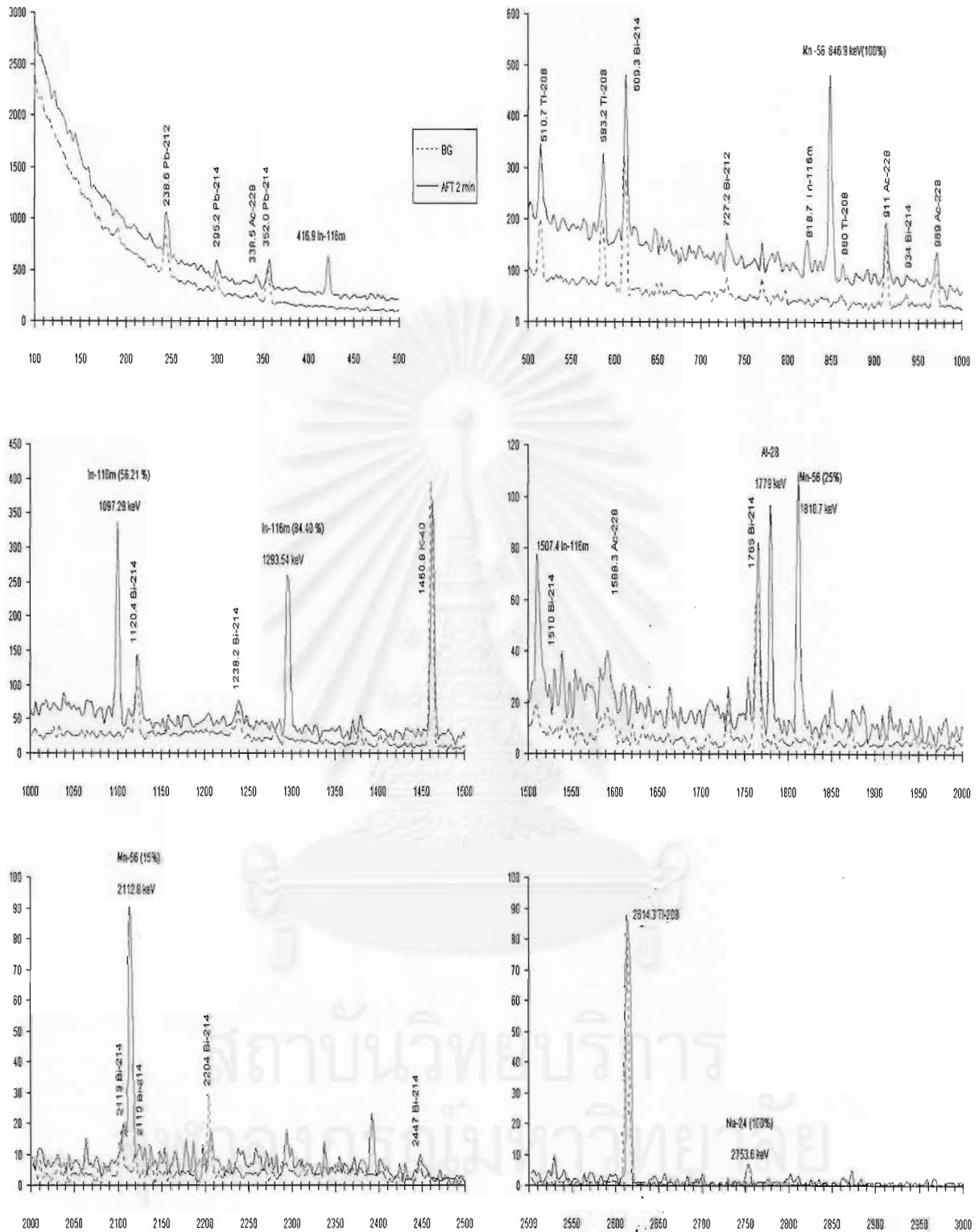
รูปที่ ก.9 สเปกตรัมพลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมา ณ พื้นที่ จากพื้นที่ 3



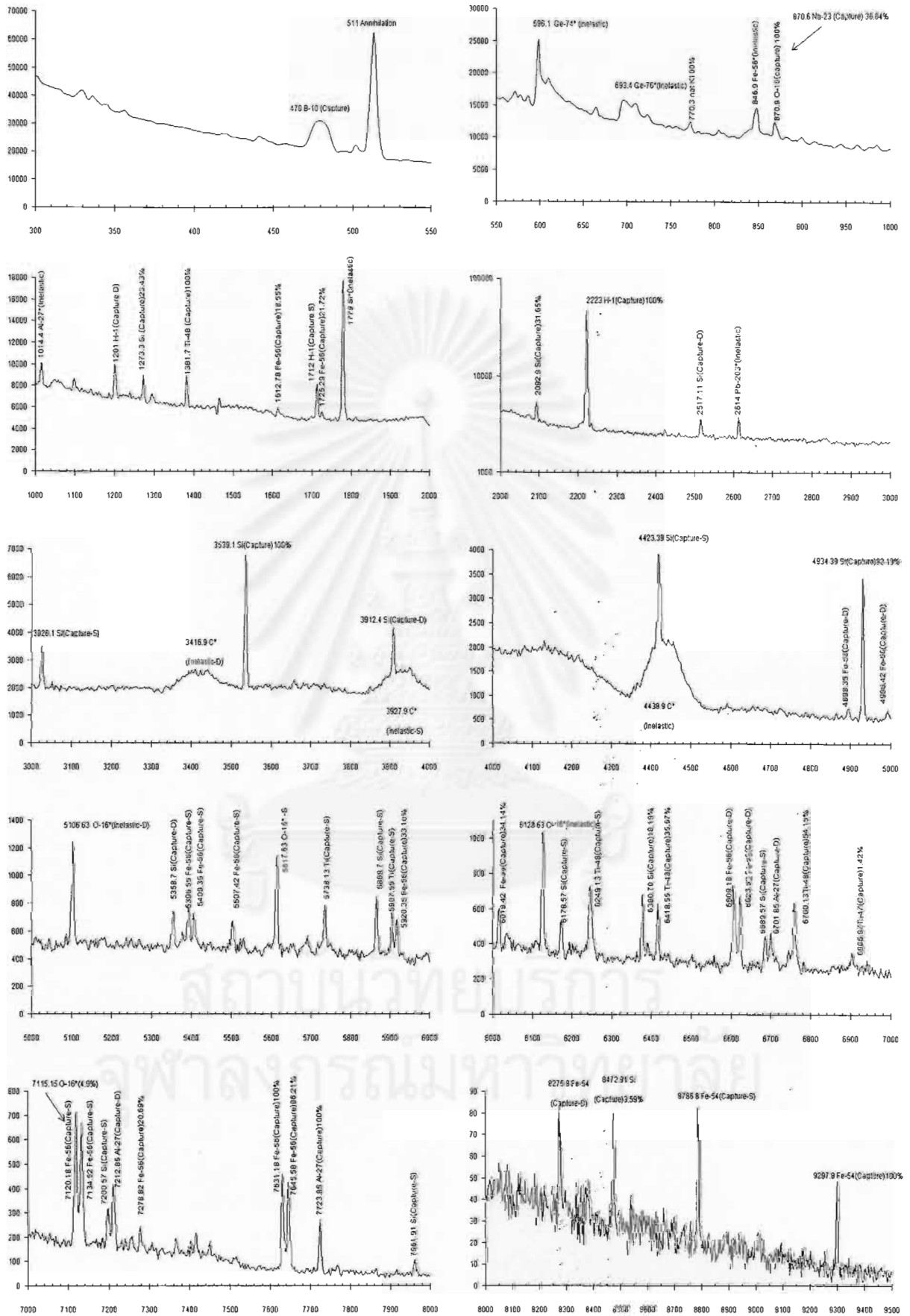
รูปที่ ก.10 สเปกตรัมพลังงานของรังสีฟรอมต์แกมมา ณ พื้นที่ จากพื้นที่ 7



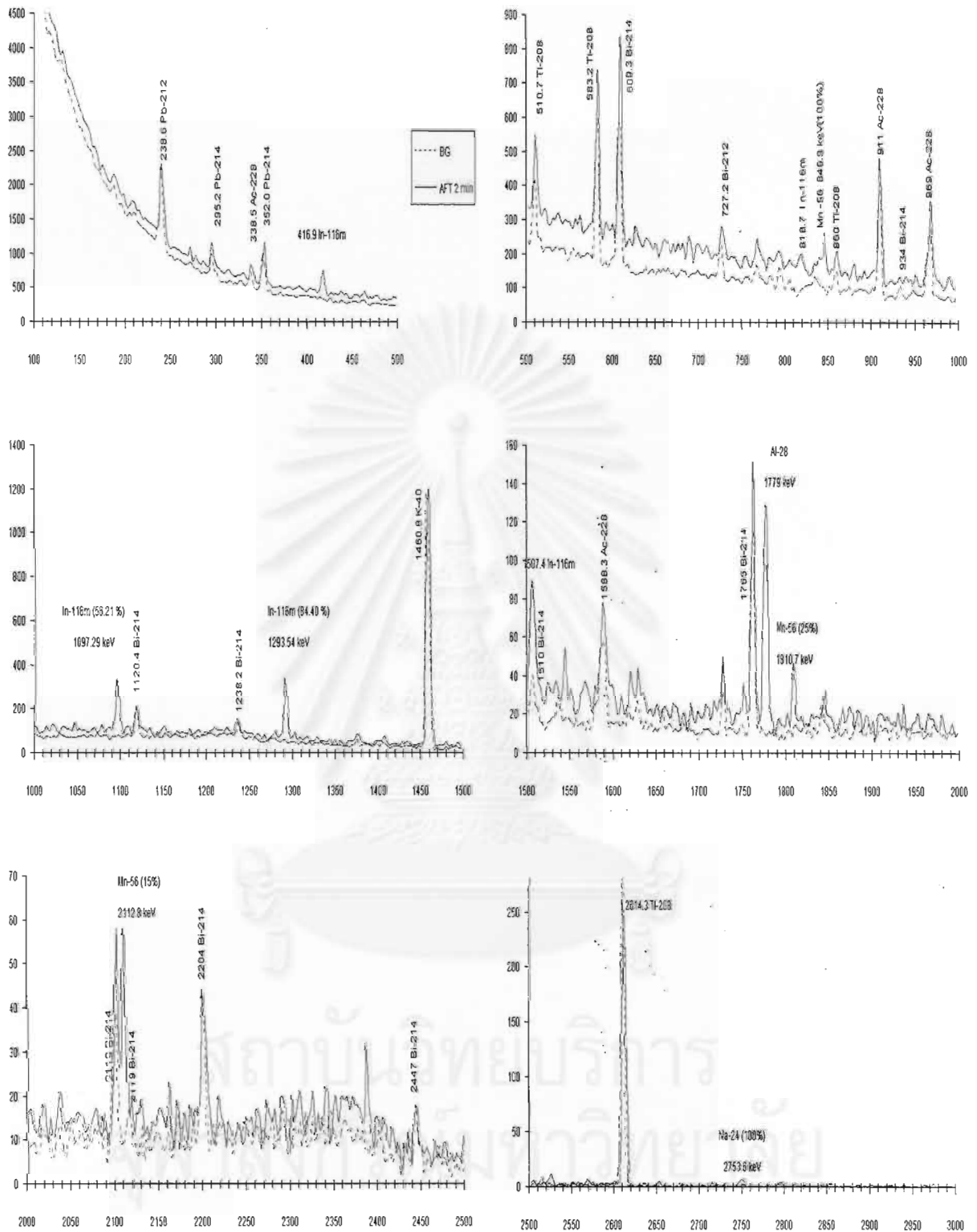
รูปที่ ก.11 สเปกตรัมพลังงานของรังสีดีเลย์แกมมา ณ พินท์ จากพินท์ 3



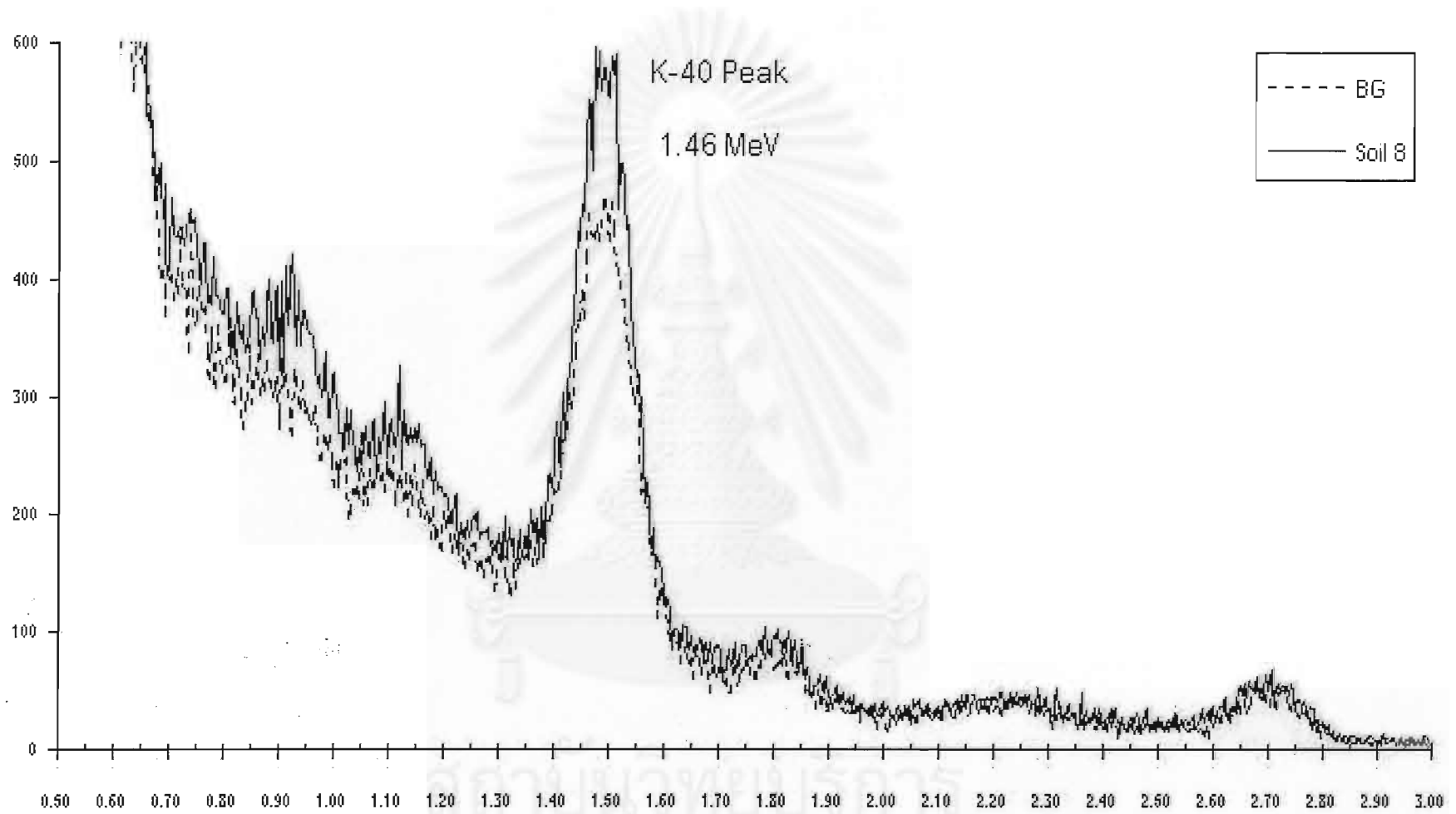
รูปที่ ก.12 สเปกตรัมพลังงานของรังสีดีเลย์แกมมา ณ พื้นที่ จากพื้นที่ 7



รูปที่ ก.13 สเปกตรัมพลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมา ณ พื้นที่ จากพื้นที่ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.14 สเปกตรัมพลังงานของรังสีดีเลย์แกมมา ณ พื้นที่ จากพื้นที่ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.15 สเปกตรัมพลังงานของโพแทสเซียม - 40 จากเทคนิคการวัดรังสีแกมมาตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการ ของดินจากพื้นที่ 8



ภาคผนวก ข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1

Specifications

DETECTOR MODEL GR2521 SERIAL NUMBER 3986121
CRYOSTAT MODEL 7935SL-7 PREAMPLIFIER MODEL 2002CSL

The purchase specifications, and therefore the warranted performance, of this detector are as follows:
(Electric cooling may degrade performance by as much as 10%.)

Active Volume cc Relative Efficiency 25 %
Resolution 2.1 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWTM) at 1.33 MeV
 keV (FWHM) at
 keV (FWTM) at

Peak/Compton 50 :1 Cryostat well diameter mm Cryostat well depth mm

Cryostat description (if special)

Physical Characteristics

Geometry Reverse Electrode Closed-end coaxial
Diameter 52.5 mm Active Volume cc
Length 53.5 mm Well Depth mm
Distance from window 5 mm Well Diameter mm

Electrical Characteristics

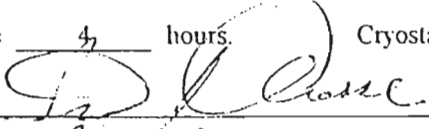
Depletion voltage (-3000) V dc
Recommended bias voltage (-3000) V dc
Leakage current at recommended bias 0.01 nA
Preamplifier test point voltage at recommended voltage (-0.95) V dc
Capacitance at recommended bias ~24 pF

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 microseconds

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			109Cd Ratio
Energy (keV)	122	1332			22:88
FWHM (keV)	0.90	1.89			
FWTM (keV)	1.62	3.48			
Peak/Compton		56.5:1			
Rel. Efficiency %		27.4			21.4:1

Cool Down Time 4 hours Cryostat Liquid Nitrogen Consumption Rate <1.4 Liters per Day.

Tested by:  Date: 03/02/98

Approved by:  Date: 03/02/98

Reverse-Electrode Coaxial Ge Detectors

Features

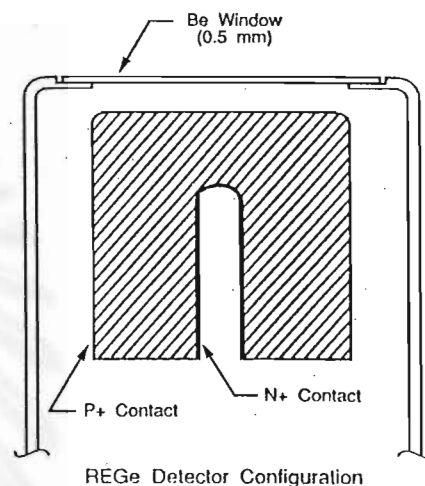
- Ultra-thin ion implanted contacts
- Spectroscopy from 3 keV up
- Radiation damage resistant
- Excellent timing resolution
- High energy rate capability
- Diode FET protection
- Warm-up/HV shutdown
- High rate indicator

Description

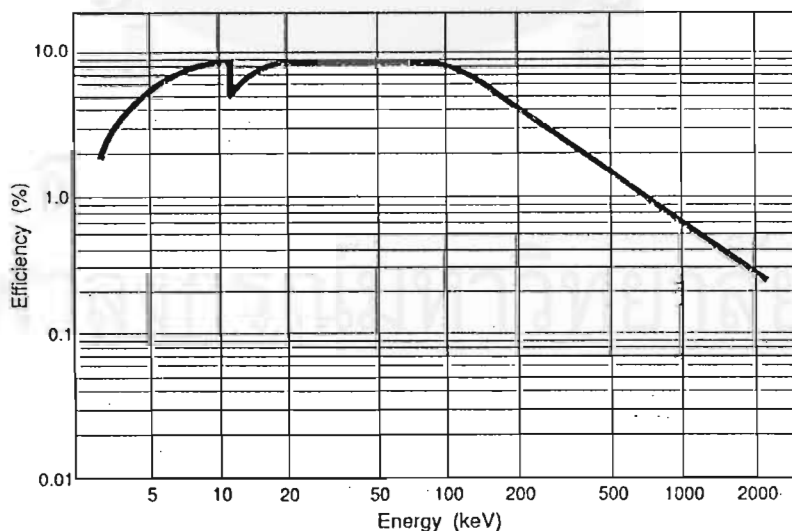
The Reverse-Electrode detector (REGe) is similar in geometry to other coaxial germanium detectors with one important difference. The electrodes of the REGe are opposite from the conventional coaxial detector in that the p-type electrode, (ion-implanted boron) is on the outside, and the n-type contact (diffused lithium) is on the inside. There are two advantages to this electrode arrangement – window thickness and radiation damage resistance.

The ion-implanted outside contact is extremely thin ($0.3\ \mu\text{m}$) compared to a lithium-diffused contact. This, in conjunction with a thin cryostat window, extends the response to below 5 keV, giving this detector a dynamic range of 2000:1. Needless to say, this dynamic range exceeds the 100:1 offered by most analysis systems so the detector is unlikely to be covering the range of 5 keV to 10 MeV at once.

The radiation damage resistance properties of the REGe detector come about for the following reason. It has been found that radiation damage, principally due to neutrons or charged particles, causes hole trapping in germanium. Unlike the case of the conventional coaxial detector, holes are collected by the outside electrode of the REGe detector. Since a much greater amount of the active detector volume is situated within a given distance, ΔR , of the outside contact, than of



the inside contact (Volume $\propto R^2$) it follows that, on average, holes have less distance to travel if they are attracted to the outside contact than if they are attracted to the inside contact. With less distance to travel, they are less likely to be trapped in radiation damaged material. The extent of the improved resistance to radiation damage depends on other facts, of course, but experimental evidence suggests that the REGe detector may be 10 times as resistant to damage as conventional Coaxial Ge detectors.



Typical Absolute Efficiency Curve for 15% Detector
(2.5 cm detector to source spacing)



ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรรณิ เสดิยศรี เกิดวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ.2517 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จาก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย