

การวิเคราะห์ธาตุในโบราณวัตถุ ณ พื้นที่โดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคการวัดรังสีพร้อมตีแกมมา



นางพวงพร ศรีสมบุญ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NON-DESTRUCTIVE IN SITU ELEMENTAL ANALYSIS OF ANCIENT OBJECTS USING
PROMPT GAMMA-RAY MEASUREMENT TECHNIQUES

Mrs. Puangporn Srisomboon

สถาบันวิทยบริการ

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ธาตุในโบราณวัตถุ ณ พื้นที่โดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา
โดย	นางพวงพร ศรีสมบุญ
สาขาวิชา	นิเวศียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัณย์ศิริ)

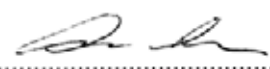
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสมันต์)

พวงพร ศรีสมบุญ : การวิเคราะห์ธาตุในโบราณวัตถุ ณ พื้นที่โดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา. (NON-DESTRUCTIVE IN SITU ELEMENTAL ANALYSIS OF ANCIENT OBJECTS USING PROMPT GAMMA-RAY MEASUREMENT TECHNIQUES) อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษา
ร่วม : ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล, 122 หน้า.

การวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพโบราณวัตถุ ณ พื้นที่ ส่วนสำคัญของระบบที่ใช้ทำการวิเคราะห์ คือต้นกำเนิดนิวตรอนอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม ความแรง 500 มิลลิวูรี่ (18.5 กิกะเบคเคอเรล) และหัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงแบบเคลื่อนย้ายได้ การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนสำหรับการห่วงพลังงานและกำบังนิวตรอนโดยใช้ถังพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตรเติมน้ำเต็ม มีกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร สอดเข้าไปในถังทางด้านข้างเพื่อนำนิวตรอนออกไปยังตัวอย่างที่ทดสอบ ส่วนที่สองคือระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา ซึ่งประกอบด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงที่มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 30 % และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Inspector 2000 ที่ต่อเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์แบบกระเป่าหิ้ว ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมี 12 ชนิด ได้แก่ แผ่นโลหะหรือก้อนโลหะ แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์ออกไซด์ ปูนโบราณ รวมทั้งพระพุทธรูป และระฆังสำริด ในภาคสนามได้ทำการวิเคราะห์องค์พระประธานภายในพระอุโบสถวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งพบว่ามียอดพลังงานของธาตุทองแดง ซิลิกอน คลอรีน และแคลเซียม แต่ไม่พบทองคำทั้งที่องค์พระประธานลงรักปิดทองคำไว้หนาประมาณ 0.5 ไมครอน ธาตุซิลิกอนและแคลเซียมที่พบคาดว่ามาจากปูนโบราณที่อยู่ภายใน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ธาตุบางชนิดได้ เช่น โบรอน อะลูมิเนียม ซิลิกอน คลอรีน แคลเซียม ทองแดง เหล็ก และตะกั่ว แต่ไม่มีความไวในการวิเคราะห์บางธาตุ เช่น ดีบุกและทองคำ

ภาควิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี
สาขาวิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต..... พวงพร ศรีสมบุญ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... นเรศร์ จันทน์ขาว
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ศิริชัย หวังเจริญตระกูล

4770374021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : NONDESTRUCTIVE ANALYSIS / ANCIENT OBJECT / NEUTRON TECHNIQUES / PROMPT GAMMA-RAYS

PUANGPORN SRISOMBOON : NON-DESTRUCTIVE IN SITU ELEMENTAL ANALYSIS OF ANCIENT OBJECTS USING PROMPT GAMMA-RAY MEASUREMENT TECHNIQUES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, THESIS CO-ADVISOR : SIRICHAJ WANGCHARENTRAKUL, Ph.D. 122 pp.

In this research, measurement of prompt gamma-rays from neutron capture and inelastic scattering of neutrons was experimentally investigated to be used for in situ qualitative analysis of elements in ancient objects. A 500 mCi (1.85 GBq) Am-241/Be neutron source and a portable high purity germanium detector were the major parts of the analysis system. This research could be divided into 2 parts. The first part was the design of a neutron source container for neutron moderation and shielding using a plastic drum of 32 cm diameter and 32 cm height filled with water. A stainless cone of 9 cm diameter and 18 cm length was inserted from the side of the source container in order to bring thermal neutrons out to the test specimen. The second part was a gamma-ray analysis system comprising a HPGe detector of 30 % relative efficiency and an Inspector 2000 spectrum analyzer connected to a portable microcomputer. In laboratory, 12 test specimens were analyzed including metal sheets or blocks, calcium chloride, zinc oxide, mortar, as well as Buddha images and a bronze bell. In the field, a Buddha image at Wat Naphramain in Ayuthaya Province was analyzed. Cu, Si, Cl and Ca were clearly seen in the spectrum obtained from the Buddha image. However, Au could not be seen even the Buddha image was covered with gold of about 0.5 μm thickness. Si and Ca most probably came from mortar inside. The results indicated that the technique was capable of analysing some elements such as B, Al, Si, Cl, Ca, Cu, Fe and Pb but was not sensitive to some elements like Sn and Au.

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2006

Student's signature.....*Puangporn Srisomboon*.....

Advisor's signature.....*Nares Chankow*.....

Co-advisor's signature.....*Sirichai Wangcharentrakul*.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำ ต่างๆทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล ที่ให้คำแนะนำในการเข้าศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีแห่งนี้ ทำให้ได้ความรู้มากมายในการนำไปใช้กับงานทางด้านศิลปวัฒนธรรม และให้ความกรุณา ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ในงานวิจัยภาคสนามและการจัดทำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่ให้ความรู้ตั้งแต่เข้ารับการศึกษา ทำให้ผู้เขียนได้รับความรู้เพิ่มขึ้นมากมาย และเป็นแนวทางในการศึกษา ค้นคว้าข้อมูลต่างๆให้เข้าใจมากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณเจ้าอาวาสวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความกรุณาใช้สถานที่เพื่อใช้ทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อุทยานประวัติศาสตร์ พระนครศรีอยุธยา ที่อำนวยความสะดวกงานวิเคราะห์ภาคสนาม

ขอขอบพระคุณ คุณบัญญัติ อุนพานิช สำหรับคำแนะนำในการออกแบบภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เจ้เต๋จ เย็นใจ คุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ดี คุณภูริต ควินรัมย์ สำหรับการช่วยเหลือที่ดีมากในการปฏิบัติงานภาคสนาม

ขอขอบพระคุณ โครงการวิจัย NORM ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ในการอนุญาตให้ใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและหัววัดรังสี HPGe

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณแม่ คุณพ่อ ที่ทุกๆคน ที่สนับสนุนการเรียนเพื่อให้ข้าพเจ้ามีความรู้ถึงทุกวันนี้ และคุณธนารัฐ ศรีสมบุรณ์ ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนในการศึกษา และวิทยานิพนธ์จนสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 อะตอม.....	6
2.2 นิวตรอน.....	7
2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน.....	7
2.1.2 พลังงานของนิวตรอน.....	8
2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	9
2.1.4 ปฏิกริยาของนิวตรอนกับตัวกลาง.....	12
2.1.5 นิวตรอนฟลักซ์.....	17
2.1.6 ภาคตัดขวางของนิวตรอน.....	18
2.1.7 เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกริยา การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น.....	20
2.1.8 เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกริยาการจับนิวตรอน.....	24

บทที่

2.3 หัววัดรังสีแกมมา.....	28
2.3.1 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน.....	28
2.3.2 หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ.....	29
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย	33
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	47
4.1 ผลการทดลองการออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาสำหรับออกงานภาคสนาม	47
4.2 ผลการทดลองจัดระบบที่เหมาะสมในการวัดความเข้มรังสีพรอมต์ แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ.....	49
4.3 ผลการทดลองการวัดความเข้มรังสีพรอมต์แกมมา จากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ.....	58
4.4 ผลการทดลองการวัดความเข้มรังสีพรอมต์แกมมา จากตัวอย่างโบราณวัตถุขนาดใหญ่ติดที่.....	78
5. วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบมวลและประจุของอนุภาคอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน.....	7
2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $Be(\alpha,n)$	10
2.3 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด $Be(\gamma,n)$	11
2.4 พลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นจากธาตุบางชนิด.....	22
2.5 พลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมาและขีดจำกัดในการวิเคราะห์จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของธาตุบางชนิด.....	23
2.6 ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดด้วยการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ)	26
2.7 ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดด้วยการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ)	27
4.1 จำนวนนับรังสีนิวตรอนที่ผ่านท่อส่งลำนิวตรอนความยาวขนาดต่างๆ.....	47
4.2 จำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนตำแหน่งต่างๆที่ห่างจากปลายของท่อส่งลำนิวตรอน.....	50
4.3 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีฟอพรอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้าหรือตามแกน X.....	51
4.4 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีฟอพรอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ติดกับท่อส่งลำนิวตรอนและห่างออกมาด้านข้าง(แกน Y) ที่ระยะต่างๆ.....	53
4.5 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีฟอพรอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า(แกน X) 2 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ.....	54

ตารางที่ 1

4.6	จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์(BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 4 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ	55
4.7	จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 6 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ	56
4.8	จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 8 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ	57
4.9	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากแบคทราเวตีในห้องปฏิบัติการ.....	59
4.10	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียม.....	60
4.11	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างแผ่นเหล็ก.....	61
4.12	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างทองแดง.....	62
4.13	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างดีบุก.....	63
4.14	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างทองเหลือง.....	64
4.15	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2).....	65
4.16	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างสารเคมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2).....	66
4.17	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างปูนโบราณ.....	67
4.18	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย.....	69
4.19	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะผสม.....	72
4.20	พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย.....	75

ตารางที่	หน้า
4.21	77
4.22	80
4.23	81
4.24	83
4.25	84
4.26	85
5.1	86

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างแผนภาพลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ และ ^{252}Cf ...	10
2.2 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดต่างๆ.....	12
2.3 ปฏิกริยาแบบต่างๆ ของนิวตรอน.....	16
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการดูดกลืนกับความเร็วของนิวตรอน.....	20
2.5 ตัวอย่าง Decay Schemes ของ $^{56}\text{Fe} (n,n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$	21
2.6 แผนภาพปฏิกริยาการจับนิวตรอน.....	24
2.7 โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน.....	28
2.8 ความสัมพันธ์ของชั้นความลึกที่ไวต่อรังสีกับไบอัสและความเข้มข้นของสารเจือ.....	30
3.1 อุปกรณ์หลักของระบบวัดรังสีแกมมา.....	32
3.2 ถังอคูมิเนียมสำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนในการออกภาคสนามพร้อมรถเข็น.....	32
3.3 เครื่องสำรวจปริมาณรังสีนิวตรอน.....	33
3.4 แผนภาพของระบบการทดลองเพื่อหาขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนที่เหมาะสม.....	34
3.5 แผนภาพท่อส่งลำนิวตรอนที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิเคราะห์.....	35
3.6 แผนภาพถังพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน.....	36
3.7 ภาพถ่ายถังพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนเพื่อใช้ในงานวิเคราะห์ ด้านนอก และภายใน.....	36
3.8 แผนภาพท่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ 500 มิลลิลิตรี.....	37
3.9 ภาพถ่ายท่อบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิลิตรี..	37
3.10 แผนภาพระบบที่ทำการทดลองเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์.....	38
3.11 แผนผังการจัดระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในห้องปฏิบัติการ.....	40
3.12 ภาพถ่ายระบบที่ทำการวิเคราะห์พระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัยขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49 ซม.....	41

รูปที่

3.13	ภาพถ่ายปูนโบราณ.....	42
3.14	ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 55.0 ซม.	42
3.15	ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49.0 ซม.	42
3.16	ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม. เลขทะเบียน LAY 264.....	43
3.17	ภาพถ่ายระฆังสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม.....	43
3.18	ภาพถ่ายพระพุทธรูปทรงเครื่อง พระนามว่า “พระพุทธรุณิมิตวิชิตมารโมลีศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ”.....	44
3.19	ภาพถ่ายการจัดเพื่อวิเคราะห์ด้านหลังพระพุทธรุณิมิตวิชิตมารโมลีศรีสรรเพชญ์ บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (ระยะใกล้).....	46
3.20	ภาพถ่ายการจัดเพื่อวิเคราะห์ด้านหลังพระพุทธรุณิมิตวิชิตมารโมลีศรีสรรเพชญ์ บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (ระยะไกล).....	46
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับความยาวของ ท่อส่งลำนิวตรอน.....	48
4.2	แผนภาพการจัดการทดลองหาตำแหน่งที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสม....	49
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างของต้นกำเนิด นิวตรอนจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน.....	50
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน X.....	52
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน Y.....	53
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (2,Y).....	54
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (4,Y).....	55

รูปที่

4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (6,Y).....	56
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจาก ท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (8,Y).....	57
4.10	ภาพพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 55.0	68
4.11	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลือง ช่วงพลังงาน 0 – 500 keV.....	68
4.12	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลือง ช่วงพลังงาน 500 – 1500 keV.....	69
4.13	ภาพพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49.0 ซม..	70
4.14	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ช่วงพลังงาน 0 –500 keV.....	71
4.15	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ช่วงพลังงาน 500 – 1500 keV.....	72
4.16	ภาพพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม.	73
4.17	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริดช่วงพลังงาน 0 - 500 keV	73
4.18	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริด ช่วงพลังงาน 500 - 1500 keV.....	74
4.19	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริด ช่วงพลังงาน 1500 - 3000 keV.....	74
4.20	ภาพพระซิ้งสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม.....	76
4.21	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระซิ้งสำริด ช่วงพลังงาน 0 - 500 keV.....	76
4.22	สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระซิ้งสำริด ช่วงพลังงาน 500 - 1500 keV...	77
4.23	ภาพพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จ.พระนครศรีอยุธยา.....	78

รูปที่

4.24 ภาพระบบที่จัดเพื่อวิเคราะห์ด้านหลังพระพุทธรูปนิมิตวิจิตรมารโมลีศรีสรรเพชญ์ บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ.....	78
4.25 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 1) ช่วงพลังงาน 0 - 500 keV.....	79
4.26 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 1) ช่วงพลังงาน 620 - 1500 keV.....	79
4.27 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 2) ช่วงพลังงาน 0 - 500 keV.....	82
4.28 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 2) ช่วงพลังงาน 620 - 1500 keV.....	83



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การศึกษาและตรวจสอบศิลปโบราณวัตถุก่อนการอนุรักษ์นั้นเป็นสิ่งจำเป็นมาก เพราะข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับวัตถุ เช่น ชนิดของเนื้อวัตถุ ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี เทคนิคโบราณของการผลิตวัตถุนั้นๆ ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการอนุรักษ์ศิลปโบราณวัตถุ เพราะสามารถจะดำเนินการได้โดยไม่ทำลายรูปแบบหรือลักษณะเดิมของศิลปโบราณวัตถุ ยังสามารถนำเอาข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อศึกษาทดลองหาวิธีการที่เหมาะสมในการอนุรักษ์ศิลปโบราณวัตถุเหล่านั้นได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ข้อมูลต่างๆ ดังกล่าว ยังจะนำไปใช้ประโยชน์ในงานทางด้านประวัติศาสตร์และโบราณคดีได้อีกด้วย เพราะจะเป็นหลักฐานอ้างอิงในทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันได้ตามหลักสากล การศึกษาและตรวจสอบโบราณวัตถุมีวิธีการที่ทันสมัยอยู่มากมายหลายวิธี อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ก็มีขีดจำกัดมากเมื่อนำมาประยุกต์กับงานด้านศิลปวัฒนธรรมและโบราณคดี เพราะศิลปโบราณวัตถุเหล่านั้นมีคุณค่ามหาศาล อาจจะมีอยู่เพียงชิ้นเดียวในโลกและโดยปกติการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์จะต้องเก็บมาจากศิลปโบราณวัตถุ ซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก โดยที่จะต้องไม่ทำให้เกิดการชำรุดเสียหายมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายวัตถุหรือการชำรุดที่จะเกิดขึ้นกับวัตถุตัวอย่างที่เก็บจะต้องมีปริมาณน้อยที่สุด แต่สามารถที่จะใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างวัตถุทั้งหมดและเพียงพอที่จะนำไปทำการศึกษาวิเคราะห์

การนำเทคโนโลยีทางด้านนิวเคลียร์มาใช้กับงานวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุนั้นในปัจจุบันนี้ นับว่ามีประโยชน์มากเนื่องจากปัญหาที่พบเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน คือมีการปลอมแปลงศิลปโบราณวัตถุขึ้นมากและเป็นการยากที่จะพิสูจน์ได้ว่าเป็นของแท้หรือไม่ ต้องมีการพิสูจน์ตามหลักฐานทางโบราณคดีและข้อมูลทางด้านวิทยาศาสตร์เข้ามาประกอบกันจะทำให้ข้อมูลน่าเชื่อถือ และเป็นที่ยอมรับจากทั่วโลก ในปัจจุบันหลายประเทศมีการนำเทคโนโลยีนิวเคลียร์เข้ามาใช้เพิ่มขึ้นซึ่งข้อดีของเทคนิคทางด้านนิวเคลียร์ที่นำมาใช้กับการวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุ นั้น คือบางเทคนิคสามารถวิเคราะห์ได้แม้มีจำนวนตัวอย่างน้อยและบางเทคนิคสามารถวิเคราะห์ได้ ณ ที่ (in situ) โดยไม่ต้องมีการเก็บตัวอย่าง หรือไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive) เหตุผลนี้เองที่เหมาะสมจะนำเทคนิคนี้มาใช้กับงานด้านโบราณคดี เทคโนโลยีนิวเคลียร์ที่มีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น เทคนิค X-ray fluorescence (XRF),

เทคนิค Neutron activation analysis (NAA), เทคนิค Prompt gamma-ray neutron activation analysis (PGNAA) เป็นต้น ซึ่งวิธีทั้งหมดเป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive Methods) และศิลปะโบราณวัตถุบางชนิดมีขนาดใหญ่ไม่สามารถทำการเคลื่อนย้ายเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้ หรือไม่สามารถนำส่วนใดส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้ ตัวอย่างเช่น พระประธานในพระอุโบสถ ดังนั้นจึงต้องมีการนำเครื่องมือเพื่อไปทำการวิเคราะห์ ณ สถานที่ตั้งนั้นและเทคโนโลยีทางด้านนิวเคลียร์จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดทางหนึ่ง มีความถูกต้อง เป็นที่ยอมรับจากสากล แต่บางเทคนิคมีข้อจำกัดของการวิเคราะห์ เช่น เทคนิค XRF สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบที่ผิวของตัวอย่างเท่านั้น การวิเคราะห์ในระดับที่ลึกจากผิวตัวอย่างลงไปต้องใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น เทคนิค PGNAA

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในโบราณวัตถุด้วยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากอันตรกิริยากับนิวตรอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนและกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมา เพื่อให้มีความสะดวก ปลอดภัย ในการใช้งานนอกสถานที่และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง
2. วิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างบางชนิด และโบราณวัตถุขนาดเล็กด้วยหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ประสิทธิภาพ 30% ในห้องปฏิบัติการ
3. วิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากโบราณวัตถุขนาดใหญ่ติดที่ประเภทต่างๆ ด้วยหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ประสิทธิภาพ 30% ในภาคสนาม

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษา และทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาของธาตุต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ
3. ออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนและกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมา เพื่อให้มีความสะดวก ปลอดภัย ในการใช้งานนอกสถานที่และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง
4. ทดลองจัดระบบที่เหมาะสมในการวัดความเข้มรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ
5. วิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างโบราณวัตถุขนาดใหญ่ติดที่
6. สรุปผล วิจัยกรณีผลการวิเคราะห์และจัดทำรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการ และอุปกรณ์ที่เหมาะสมของการใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของโบราณวัตถุเพื่อใช้หาข้อมูลองค์ประกอบของโบราณวัตถุที่อยู่ในระดับลึกลงไปจากผิวของวัตถุซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการศึกษาทางโบราณคดีและการอนุรักษ์ศิลปโบราณวัตถุ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ในปี 2547 อรวรรณ ตรรกนาถ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์วัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบเคลื่อนย้ายได้” [1] เป็นการวิเคราะห์ชิ้นงานโลหะ และโบราณวัตถุทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามโดยใช้เทคนิค XRF ที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปเป็นตัวกระตุ้น และใช้หัววัดรังสีชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมี 5 ชนิด ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ ทองเหลือง ตะกั่ว บัดกรี สักริดและพระพุทธรูปขนาดเล็ก โดยค่าผลต่างระหว่างปริมาณจริงกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ มีค่าสูงสุดไม่เกิน 3.53 % ในส่วนของการวิเคราะห์ภาคสนาม ได้ทำการวิเคราะห์พระพุทธรูปจำนวน 4 องค์ โดยวิเคราะห์ที่วัด ราชบพิธสถิตมหาสีมาราม กรุงเทพมหานคร จำนวน 2 องค์และวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จำนวน 2 องค์ พบว่าพระพุทธรูป 3 องค์แรก มีส่วนประกอบหลักคือทองแดงกับสังกะสี ส่วนประกอบรองคือ ดีบุก ตะกั่ว และเหล็ก ธาตุปริมาณน้อยคือเงินกับพลวง ส่วนพระพุทธรูปอีก 1 องค์ พบ ทอง เพียงธาตุเดียวเท่านั้น เนื่องจากได้มีการบูรณะปฏิสังขรณ์ด้วยการลงรักปิดทองพระองค์นี้แล้ว

1.6.2 ในปี 2002 M.Uda และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Amarna blue painted on ancient Egyptian pottery” [2] ซึ่งเป็นการศึกษารังสีวัตถุ ที่มีการทาบบนเครื่องปั้นดินเผาของชาวอียิปต์โบราณ ที่มีการใช้สีชนิดนี้เมื่อ 1200-1500 ปี ก่อนคริสตกาล โดยใช้เทคนิค PIXE (particle-induced x-ray emission analysis), XRF (X-ray fluorescence) and XRD (X-ray diffraction) โดยการวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการ ณ เมือง Tokyo จะใช้เทคนิค PIXE (particle-induced x-ray emission analysis), XRD (X-ray diffraction) และ XRF (X-ray fluorescence) ส่วนแหล่งขุดค้น Dahshur ใช้การวิเคราะห์ด้วย XRF (X-ray fluorescence) ผลการทดลองพบว่าการวิเคราะห์ด้วย X-ray spectroscopy สีฟ้าที่ทาประกอบด้วย Na, Al, S, Cl, Ca, Mn, Co, Ni และ Zn และเทคนิค X-ray diffraction พบธาตุ CaSO_4 , NaCl และ $\text{Co(M)Al}_2\text{O}_4$ ซึ่ง M แทน Mn, Fe, Ni และ Zn ผลสรุปคือ รังสีวัตถุสีฟ้าที่เคลือบบนเครื่องปั้นดินเผาของชาวอียิปต์โบราณ เป็นส่วนผสมของธาตุ CaSO_4 และ $\text{Co(M)Al}_2\text{O}_4$

1.6.3 ในปี 2004 T. Broekmans , A. Adriaens และ E. Pantos ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Analytical investigations of cooking pottery from Tell Beydar (NE-Syria)” [3] ซึ่งเป็นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและแร่ธาตุที่ประกอบในเครื่องปั้นดินเผาที่ใช้ในการประกอบอาหารจากแหล่งขุดค้นที่ทำการผลิตเครื่องปั้นดินเผาชนิดนี้ที่ Tell Beydar (NE-Syria) ในระหว่าง 3000 ปี ก่อนคริสต์ศักราช การวิเคราะห์ที่ใช้ polarizing microscopy, scanning electron microscopy ที่ต่อกับ energy dispersive X-ray detection (SEM-EDX) และ X-ray diffraction ด้วยวิธีของการใช้รังสี synchrotron (SR-XRD) ซึ่งข้อมูลที่ได้ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตเครื่องปั้นดินเผา เช่น การเตรียมดินเหนียว เทคโนโลยีการเผาเครื่องปั้นดินเผา ผลสรุปคือ แร่แคลไซต์ มีค่า thermal expansion coefficient คล้ายกับดินเหนียว ดังนั้นการผสมหินปูนขาวจำนวนมากทำให้ thermal stresses ลดลง ซึ่งเกิดในระหว่างการผลิตโดยใช้ความร้อน และทำให้เย็นตัว แร่ธาตุที่มีระบุนิวไวม์มีความสัมพันธ์ กับอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการเผา อุณหภูมิต่ำ (600-850 °C) นี้เป็นการป้องกันไม่ไห้แร่แคลไซต์ถูกทำลายและมีผลให้ thermal expansion coefficient ของแร่แคลไซต์ ไม่คล้ายกับ ดินเหนียว

1.6.4 ในปี 2542 พรรณี เสถียรศรี ได้ทำการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ธาตุหนักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน” [4] ซึ่งในงานนี้ได้ทดลองใช้เทคนิคนิวตรอนในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ เทคนิคที่ใช้มีสามเทคนิคคือเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ส่วนสำคัญของระบบที่ใช้ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนอะเมริเซียม-241 / เบริลเลียม ความแรง 1 คูรี (37 กิกะเบคเคอเรล) และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงชนิดรีเวอร์สอิเล็คโตรดแบบที่ใช้งานในภาคสนามผลการวิจัยพบว่ามีจำนวน 8 ธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน คือ ไฮโดรเจน โบรอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม คลอรีน และแมงกานีส การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ ณ พื้นที่ ได้ผลการวิเคราะห์ดินโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันในห้องปฏิบัติการมาตรฐานกราฟเปรียบเทียบ และใช้พีคแกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอนของอินเดียมในหัววัดรังสีในการปรับแก้ความเข้มรังสีแกมมาของธาตุต่างๆ ผลการทดลองวิเคราะห์ธาตุ 5 ธาตุ เชิงปริมาณ ณ พื้นที่ 8 แห่ง ได้ผลดังนี้คือ จากเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนได้ปริมาณ ซิลิกอน ไททาเนียม และเหล็ก อยู่ในช่วง 256.53 - 453.75 , 3.54 - 8.75 และ 10.95 - 65.97 g/kg ตามลำดับ จากเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ณ พื้นที่ ได้ปริมาณอะลูมิเนียม และแมงกานีส อยู่ในช่วง 11.26 - 67.11 และ 0.11 - 2.28 g/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวัดรังสีแกมมาโดยตรง ณ พื้นที่จาก ไปแตส-

เซียม - 40 ได้ปริมาณอยู่ในช่วง 0.23 - 1.26 % ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนยังได้ผลไม่แน่นอนเนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 อะตอม[5]

อะตอมของธาตุประกอบด้วยอนุภาคต่างๆคือ อิเล็กตรอน และนิวเคลียส อนุภาคอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ มีประจุเท่ากับ 1.16×10^{16} คูโลมบ์ และมีมวลเท่ากับ 9.10908×10^{-31} กิโลกรัม อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียส จำนวนของอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมเท่ากับจำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียส และเท่ากับเลขอะตอมของธาตุนั้นๆ (atomic number, Z) ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน มีการจัดเรียงตัวเป็นวงชั้นพลังงาน (shell) และจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ภายในแต่ละวง น้อยกว่าหรือเท่ากับ $2n^2$ เมื่อ n คือ ควอนตัมที่มีค่าประจำสำหรับวงชั้นพลังงานแต่ละชั้น โดยวงชั้นในสุดหรือ K-shell มีเลขควอนตัม 1 วง ชั้นถัดไปเรียกว่า L, M, N, O และ P-shell ตามลำดับ ถัดจากวงชั้นอิเล็กตรอนในสุดเข้าไป เป็นส่วนที่เรียกว่านิวเคลียส นิวเคลียสของแต่ละอะตอมจะอยู่ที่กึ่งกลางภายในอะตอมนั้นๆ มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-13} เซนติเมตร ภายในนิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ อีก 2 ชนิด คือโปรตอน และนิวตรอน โปรตอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นบวก มีประจุเท่ากับ 1.16×10^{16} คูโลมบ์ และมีมวล 1.67252×10^{-27} กิโลกรัมหรือเท่ากับ 1.007276 u (atomic mass unit) นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ แต่มีมวลเท่ากับ 1.68×10^{-27} กิโลกรัมหรือเท่ากับ 1.008665 u (ดังตารางที่ 2.1) โปรตอน และนิวตรอนอยู่รวมกันภายในนิวเคลียสโดยมีแรงนิวเคลียร์ (nuclear force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวซึ่งมีค่ามาก ตามปกตินิวเคลียสจะอยู่ในสภาวะเสถียร แต่ถ้ามีสิ่งรบกวนในนิวเคลียส ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับนิวตรอนและโปรตอน นิวเคลียสจะปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งมีระดับสูงมาก อยู่ในช่วงมากกว่าล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) เรียกว่า “พลังงานนิวเคลียร์” (nuclear energy)

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบมวลและประจุของอนุภาคอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน

อนุภาค	มวล (u)	ประจุ (Coulomb)
อิเล็กตรอน	0.000549	-1.16×10^{16}
โปรตอน	1.007276	$+1.16 \times 10^{16}$
นิวตรอน	1.008665	-

2.2 นิวตรอน (Neutron)

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

2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน

ก) ประจุไฟฟ้า (Charge) นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง ทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถเดินทางผ่านอะตอมตัวกลางได้โดยไม่เกิดคู่อิออน หรืออิออนแพร์ (ion pair) เนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมป์ (coulomb force) ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

ข) มวล (Mass) มวลของนิวตรอนมีค่ามากกว่ามวลของโปรตอนเพียงเล็กน้อย

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

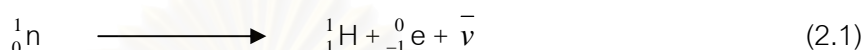
$$m({}_1^1H) = 1.007825 \text{ u}$$

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

ง) คลื่นและคุณสมบัติโพลาไรเซชัน (Wave and Polarization) นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นเช่นเดียวกับอนุภาคเบาๆอื่นโดย ที่คุณสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงให้เห็นจากปรากฏการณ์การหักเหของนิวตรอน (neutron diffraction) ส่วนคุณสมบัติ

โพราไรเซชัน นิวตรอนจะแสดงปรากฏการณ์เมื่อวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูง เนื่องจากนิวตรอนมีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก

จ) การสลายตัวให้กัมมันตรังสี (Radioactive decay) นิวตรอนอิสระเมื่อพลังงานสูงระดับหนึ่งจะแตกตัวให้โปรตอน (${}^1_1\text{H}$) อิเล็กตรอน (${}^0_{-1}\text{e}$) และแอนตินิวตริโน (Antineutrino, $\bar{\nu}$) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV ดังสมการที่ 2.1 โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที



2.1.2 พลังงานของนิวตรอน[6]

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งประเภทได้ 3 กลุ่มใหญ่ ตามลำดับพลังงานดังนี้

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

- โคลด์นิวตรอน (Cold neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะมีพลังงานจลน์ต่ำตามการกระจายพลังงานของแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) คือ พลังงานเฉลี่ย (E) เท่ากับ $(3/2)kT$

- เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ พลังงานจลน์เฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพัทธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนที่พบมากที่สุด ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า เทอร์มัลนิวตรอนในช่วงระหว่าง 0.3 - 10 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่า "Resonance absorption"

ข) อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 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

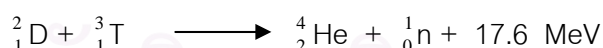
ก) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวของไอโซโทปของธาตุหนักบางตัว เช่น ยูเรเนียม-235 เมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอนหนึ่งตัวแล้วนิวเคลียสนั้นแตกตัวเป็นสองส่วนพร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2 หรือ 3 ตัว จากนั้นนิวตรอนเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันที่ต่อเนื่องไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จึงทำให้ได้นิวตรอนพลักซ์สูงกว่าวิธีอื่นๆ พลังงานของนิวตรอนที่ได้นี้มีค่าตั้งแต่เทอร์มาลนิวตรอนถึง 18 MeV แต่มีพลังงานเฉลี่ยแล้ว ประมาณ 2.5 MeV

ข) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยเร่งให้อนุภาคหรือนิวเคลียสของธาตุชนิดหนึ่ง เช่น ดิวเทรียม หรือโปรตอน ให้มีพลังงานสูงแล้วไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งซึ่งเรียกว่าเป้า (target) มักเป็นธาตุเบา แล้วเกิดปฏิกิริยาการรวมตัว (fusion reaction) ขึ้น ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่

ปฏิกิริยา D - D (DD reaction)



ปฏิกิริยา D - T (DT reaction)



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

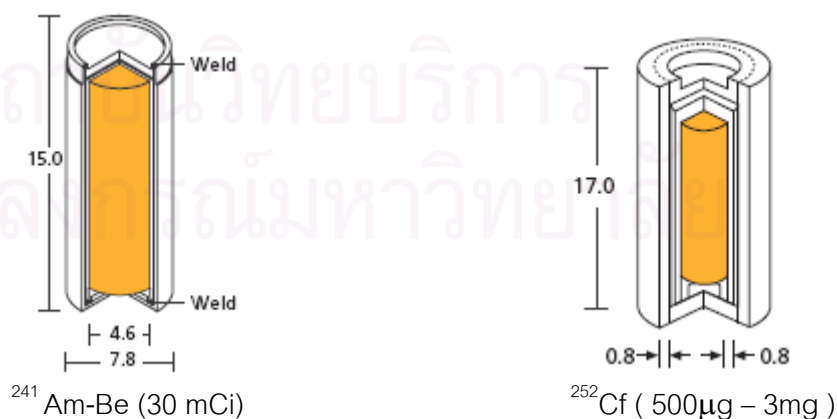
ค) ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (Alpha emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาอัลฟา - นิวตรอน (α, n) โดยมีไอโซโทปที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น ${}^{241}\text{Am}$ ${}^{238}\text{U}$ และ ${}^{239}\text{Pu}$ ผสมกับเป้าที่เป็นธาตุเบาบางชนิดที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนต่ำ เช่น ${}^9\text{Be}$ ${}^{10}\text{B}$ และ ${}^2\text{D}$ นิยมใช้เบริลเลียม (${}^9\text{Be}$) เนื่องจากเป็นธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยว

นิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำที่สุด และให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดประมาณ 80 ตัวต่อการชนของอนุภาคอัลฟาจำนวน 1 ล้านตัว ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ ${}^9\text{Be}(\alpha,n){}^{12}\text{C}$ นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 4 - 5 MeV และมีความเข้มข้นนิวตรอนในช่วง $10^5 - 10^7$ นิวตรอนต่อคูรีต่อวินาที คุณสมบัติของไอโซโทปที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $\text{Be}(\alpha,n)$

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



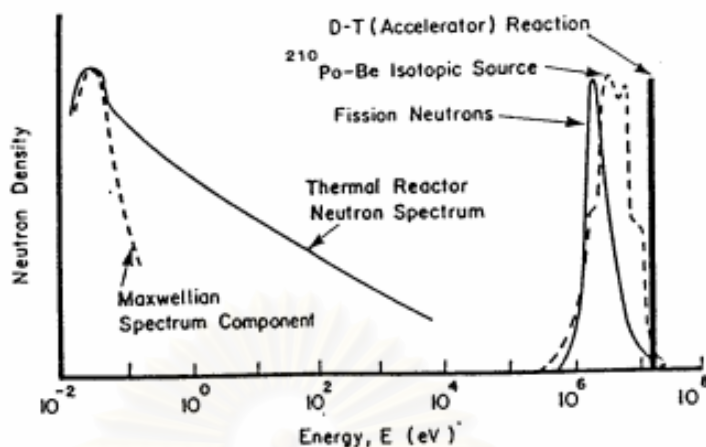
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแผนภาพลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน ${}^{241}\text{Am-Be}$ และ ${}^{252}\text{Cf}$
(จาก Catalog ของบริษัท AEA Technology, USA)

- 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 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิดนี้มีใช้ทั่วไปเพียงชนิดเดียวคือ $^{124}\text{Sb} - ^9\text{Be}$ ซึ่ง ^{124}Sb สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.691 MeV และ 2.091 MeV (6%) ทำให้เกิดนิวตรอนที่มีพลังงาน 24 keV ซึ่งต่ำกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด (α, n) และเมื่อใช้ไอโซโทป ^{124}Sb ที่มีกัมมันตภาพรังสีแกมมา 1 คูรี สามารถผลิตนิวตรอนประมาณ 3×10^6 นิวตรอนต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด Be(γ, n)

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

-ไอโซโทปชนิดที่มีการแตกตัวของนิวเคลียส (Spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสีบางชนิด เช่น คาร์ลิวเฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมาโดยเฉลี่ยประมาณ 3.75 ตัว ต่อการแตกตัวของนิวเคลียส 1 ครั้ง โดยที่นิวตรอนมีพลังงานเฉลี่ย 2.14 MeV มีความเข้มนิวตรอนประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม ข้อได้เปรียบของไอโซโทปชนิดนี้คือ ต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf มีขนาดเล็กให้จำนวนฟลักซ์ของนิวตรอนสูง มีราคาถูกเมื่อเทียบกับต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอื่นๆ แต่อายุการใช้งานสั้นเนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตเพียง 2.646 ปี ในการใช้งานจะต้องเปลี่ยนต้นกำเนิดเมื่อความแรงรังสีลดลง



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดต่างๆ[6]

2.1.4 ปฏิกริยาของนิวตรอนกับตัวกลาง [7]

นิวตรอนสามารถเกิดปฏิกริยาในตัวกลางได้หลายแบบโดยขึ้นกับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและตัวกลาง ดังนี้

ก) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่เพียงแค่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น คือมีการถ่ายเทพลังงานจลน์จากนิวตรอนให้นิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แต่ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนนั้นยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนที่เข้าทำปฏิกริยาจะกระเจิงออกมาโดยที่ทิศทางและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสก่อนและหลังชนมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ปฏิกริยาแบบนี้บางที่เรียกว่าการกระเจิงแบบโพเทนเชียล (potential scattering) ปฏิกริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็ว สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกริยาแบบนี้คือ (n,n)

สมการของปฏิกริยา คือ



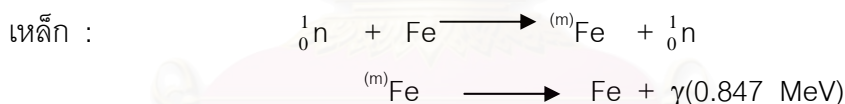
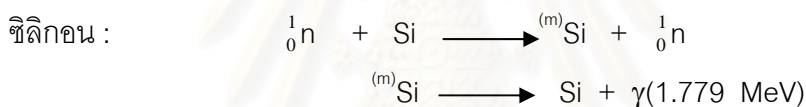
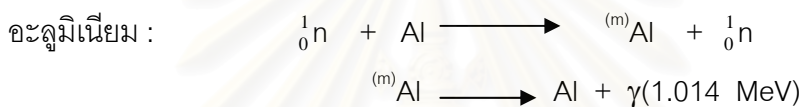
ข) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลางแล้วรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) จากนั้นนิวตรอนตัวหนึ่งจะถูกปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสของอะตอมตัวกลางยังคง

อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ทำให้พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์ของระบบหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้นิวตรอนต้องมีพลังงานสูงพอ ที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงต้องมีพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) มักเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป เป็นปฏิกิริยาแบบดูดกลืนพลังงาน (endothermic interaction) ปฏิกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ $(n,n'\gamma)$

สมการของปฏิกิริยา คือ

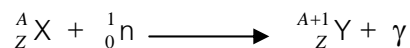


ตัวอย่างเช่น



ค) ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture reaction) หรือปฏิกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) หรือจับนิวตรอน (radiative capture) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอน กับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วถูกจับไว้กลายเป็นนิวเคลียสที่มีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่าก็ได้ หรือเรียกว่ารังสีแกมมาที่เกิดจากการจับนิวตรอน (Neutron captured gamma-ray) เป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน (exothermic interaction) เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิม รวมกับนิวตรอนอิสระเสมอ หรืออีกนัยหนึ่งคือ มวลของนิวตรอนเดิมรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระนั้นมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ ปฏิกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสี และการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้ เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA) สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ (n,γ)

สมการของปฏิกิริยา คือ



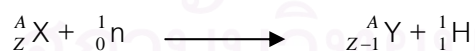
ง) ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาแตกตัวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโตเนียม-239 เป็นต้น แล้วรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะเกิดการแตกตัวออกเป็นสองส่วน ได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิมพร้อมกับมีนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วย ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญมากในการเกิดพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ (n,f)

ตัวอย่างเช่น



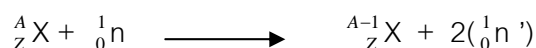
จ) ปฏิกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charged particle emission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด แล้วรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา อนุภาคโปรตอน ส่วนนิวเคลียสของธาตุเดิมนั้นกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ (n,α) หรือ (n,p) ตัวอย่างของปฏิกิริยาแบบนี้คือ ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ ซึ่งมีความสำคัญมากในเรื่องการวัดนิวตรอน และการกำบังนิวตรอน และ ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ เป็นต้น

สมการของปฏิกิริยา คือ



ฉ) ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron producing reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาแบบดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาแบบนี้ทำให้ได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ (n,2n) หรือ (n,3n)

สมการของปฏิกิริยา คือ



เมื่อ A_ZX : ไอโซโทปรังสีเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A

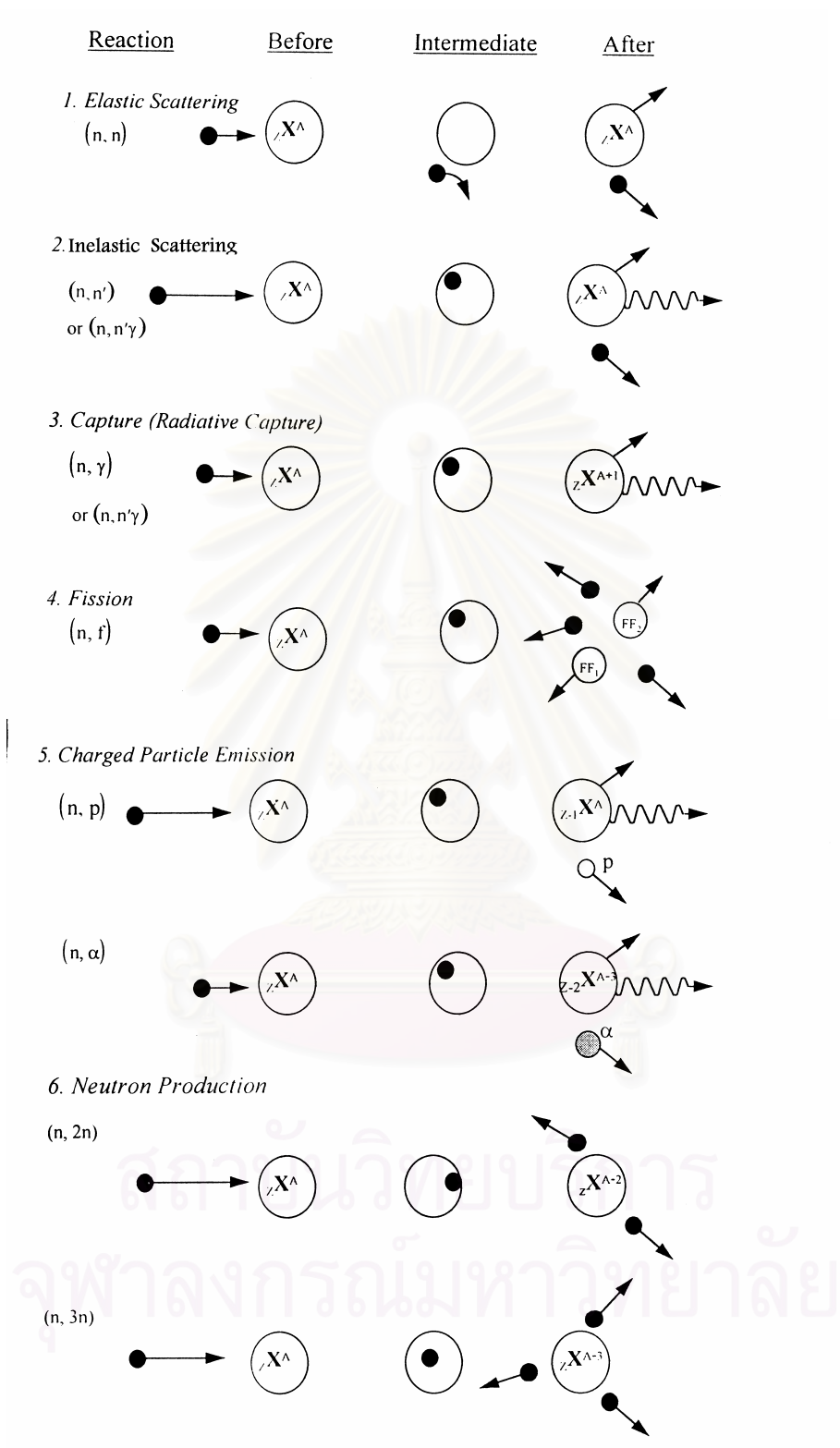
1_0n : อนุภาคนิวตรอน

${}^{A(m)}_ZX$, ${}^{A+1}_ZX$, ${}^{A-1}_ZX$, ${}^A_{Z-1}Y$, ${}^{A-3}_{Z-2}Y$: ไอโซโทปรังสีของธาตุเดิม (X) และ
ธาตุใหม่ (Y) ซึ่ง m แสดงถึง metastable state

1_1H , 4_2He และ γ : อนุภาคโปรตอน อนุภาคอัลฟา และรังสีแกมมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาแบบต่างๆ ของนิวตรอน[7]

2.1.5 นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux)

หมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆกัน และผ่านพื้นที่ 1 ตร.ซม. ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัว นิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับ ความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน ซึ่งเรียกว่า ฟลักซ์รวม (total flux)

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ $N(v)$ เป็นความหนาแน่นของนิวตรอน ในช่วงความเร็วที่ v นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v นั้นมีค่าเป็น

$$\Phi(v) = N(v)v \quad (2.2)$$

ดังนั้น $\Phi(v)dv$ จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v และ $v+dv$ ฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่างๆกันมีค่าเท่ากับ

$$\Phi_{\text{total}} = \int_0^{\infty} \Phi(v) dv \quad (2.3)$$

ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} vN(v) dv}{\int_0^{\infty} N(v) dv} \quad (2.4)$$

ฟลักซ์ทั้งหมดมีค่า

$$\Phi_{\text{total}} = N\bar{v} \quad (2.5)$$

เมื่อ $N = \int_0^{\infty} N(v)dv$ คือความหนาแน่นของนิวตรอนทุกค่าความเร็ว

นั่นคือนิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่ง คูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน

2.1.6 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

นิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง ซึ่งสามารถมีโอกาส (Probability) ในการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 6 แบบนี้มาน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสนั้นและพลังงานของนิวตรอน สามารถอธิบายเชิงปริมาณได้ในเทอมของ “ภาคตัดขวาง (cross section)” แบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

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

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (2.6)$$

$$\sigma_s = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,\gamma)} \quad (2.7)$$

$$\sigma_a = \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} \quad (2.8)$$

โดยที่	σ_s	คือภาคตัดขวางของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)
	σ_a	คือภาคตัดขวางของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)
	$\sigma_{(n,n)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น
	$\sigma_{(n,\gamma)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น
	$\sigma_{(n,\gamma)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
	$\sigma_{(n,\alpha)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา
	$\sigma_{(n,p)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน
	$\sigma_{(n,f)}$	คือภาคตัดขวางของปฏิกิริยาฟิชชัน

ข) ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section, Σ) หมายถึง โอกาสที่นิวตรอนจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางต่อระยะทาง มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) นิยมใช้เมื่อตัวกลางมีความหนา สามารถคำนวณได้จากผลคูณของจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กับค่าภาคตัดขวางจุลภาค ดังสมการที่ (2.9)

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.9)$$

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

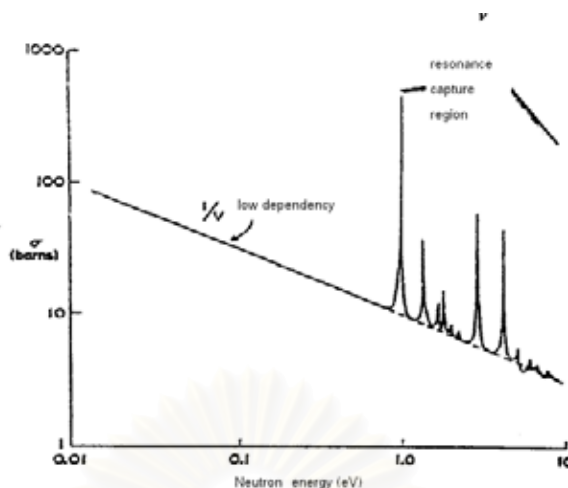
$$\Sigma_{\text{mix}} = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \quad (3.0)$$

$$\Sigma_{\text{mix}} = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \quad (3.1)$$

เมื่อ Σ_{mix} คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3,... ตามลำดับ
 N_1, N_2, N_3, \dots คือ ความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3,... ตามลำดับ
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3,... ตามลำดับ

ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับนิวไคลด์หนึ่งๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำปฏิกิริยาด้วย ภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนนั้นจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับความเร็วผสม $1/v$ (เมื่อ v คือความเร็วของนิวตรอน) ($\sigma_{\text{th}} \propto 1/v$) ดังแสดงดังรูปที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



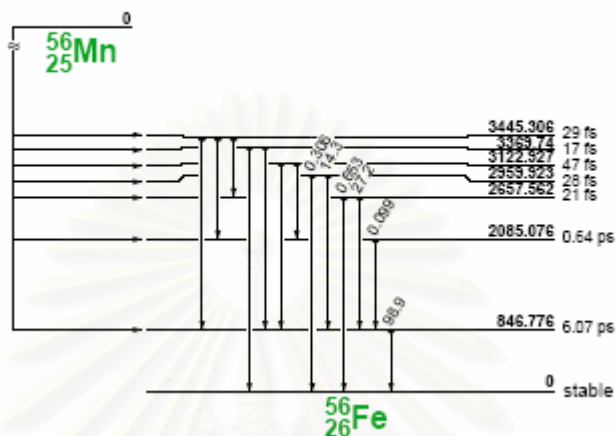
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการดูดกลืนกับความเร็วนิวตรอน

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิค prompt gamma-ray activation analysis เป็นเทคนิคที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอน กับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางในวัสดุที่สนใจ นิวตรอนสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบดังได้กล่าวมาแล้ว สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสรวมกับนิวตรอนและมีการปลดปล่อยรังสีฟอรอมต์แกมมา ออกมา ปฏิกิริยาดังกล่าวคือ การเกิดปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ($n, n\gamma$) และการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ)

2.1.7 เทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น

การวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากการเกิดปฏิกิริยาการกระเจิง แบบไม่ยืดหยุ่นนิวตรอน ($n, n\gamma$) เมื่อนิวตรอนเร็วซึ่งมีพลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชน กับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วนิวตรอนทำปฏิกิริยาโดยถูกจับเข้าไปรวมตัวเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวตรอนตัวใหม่ถูกปลดปล่อยออกมาในทิศทางที่กระเจิงออกไปจากเดิมพร้อมกับมีพลังงานลดลง เนื่องจากได้ถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นจึงปลดปล่อยรังสีฟอรอมต์แกมมาออกมาเพื่อกลับสู่สภาวะปกติ นิวเคลียสอาจจะถูกกระตุ้น ยกกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้หลายระดับ เช่น สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 1 (1^{st} excited state) สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 2 (2^{nd} excited state) สภาวะถูกกระตุ้นระดับ 3 (3^{rd} excited state) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานสูงมากพอ ตัวอย่างนิวไคลด์ของธาตุที่ให้รังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ได้แก่

เหล็ก $^{56}\text{Fe} (n,n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$ มีสถานะกระตุ้นระดับ 1 ลงสู่ระดับ 0 เท่ากับ 0.847 MeV
 มีสถานะกระตุ้นระดับ 2 ลงสู่ระดับ 1 เท่ากับ 1.239 MeV
 มีสถานะกระตุ้นระดับ 3 ลงสู่ระดับ 1 เท่ากับ 1.811 MeV



รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง Decay Schemes ของ $^{56}\text{Fe} (n,n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$

ทองแดง $^{63}\text{Cu} (n,n'\gamma) ^{63}\text{Cu}$ มีสถานะกระตุ้นระดับ 1 ลงสู่ระดับ 0 เท่ากับ 0.669 MeV
 มีสถานะกระตุ้นระดับ 2 ลงสู่ระดับ 0 เท่ากับ 0.962 MeV
 สังกะสี $^{64}\text{Zn} (n,n'\gamma) ^{64}\text{Zn}$ มีสถานะกระตุ้นระดับ 1 ลงสู่ระดับ 0 เท่ากับ 0.990 MeV
 มีสถานะกระตุ้นระดับ 2 ลงสู่ระดับ 1 เท่ากับ 0.807 MeV
 ดีบุก $^{120}\text{Sn} (n,n'\gamma) ^{120}\text{Sn}$ มีสถานะกระตุ้นระดับ 1 ลงสู่ระดับ 0 เท่ากับ 1.170 MeV
 มีสถานะกระตุ้นระดับ 2 ลงสู่ระดับ 1 เท่ากับ 0.703 MeV

ตัวอย่างของธาตุบางชนิดที่ให้รังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น แสดงไว้ในตารางที่ 2.4, 2.5

ตารางที่ 2.4 พลังงานของรังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นจากธาตุ
บางชนิด [8], [9]

Element	Isotope	E_{γ} (MeV)
Silicon	^{28}Si n(1,0)	1.77
Iron	^{56}Fe n(1,0)	0.847
Nickel	^{58}Ni n(1,0)	1.45
Copper	^{63}Cu n(2,0)	0.96
Zinc	^{64}Zn n(1,0)	0.99
Carbon	^{12}C n(1,0)	4.44
Oxygen	^{16}O n(1,0)	6.14
Lead	^{206}Pb n(1,0)	0.803
Nitrogen	^{14}N n(1,0)	2.31
Aluminium	^{27}Al n(1,0)	0.84
	^{27}Al n(2,0)	1.01

หมายเหตุ : n(1,0) หมายถึง สภาวะกระตุ้นระดับ 1 ลงสู่ระดับพลังงานปกติ
n(2,0) หมายถึง สภาวะกระตุ้นระดับ 2 ลงสู่ระดับพลังงานปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

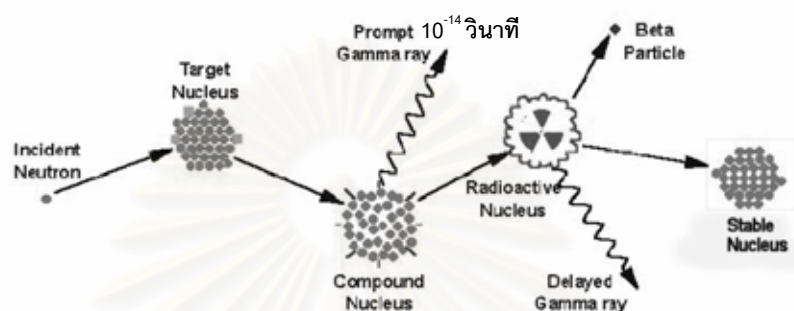
ตารางที่ 2.5 พลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมาและขีดจำกัดในการวิเคราะห์จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของธาตุบางชนิด [10]

ธาตุ	พลังงานรังสีแกมมา (keV)	ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (กรัม)	ธาตุ	พลังงานรังสีแกมมา (keV)	ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (กรัม)
Na	440	0.18	Bi	869	3.13
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	Y	1745	0.65

หมายเหตุ ขีดจำกัดของการวิเคราะห์เมื่อใช้นิวตรอนพลังงาน 2.5 MeV

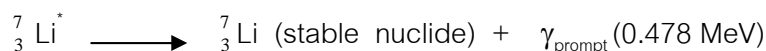
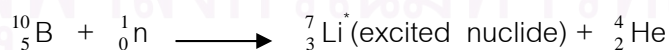
เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นนี้เหมาะกับธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) ต่ำจนถึงปานกลาง

2.1.8 เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาการจับนิวตรอน[9]

เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) เป็นปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งรังสีฟอสมต์แกมมาเกิดจากนิวเคลียส ที่รวมอยู่ในสภาวะกระตุ้นแล้วพยายามลดพลังงานลง จึงปล่อยรังสีฟอสมต์แกมมาออกมาภายในเวลา 10^{-14} วินาที โดยส่วนมากแล้วปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) มักเกิดขึ้นได้ดีกับนิวตรอนพลังงานต่ำ ได้แก่ เทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน ตัวอย่างของนิวไคลด์ที่เกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) ได้แก่



ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน (exothermic reaction) มีค่า Q (Q-value) เป็นบวก เนื่องจากมวลของนิวไคลด์เริ่มต้นรวมกับมวลของนิวตรอน คือมวลก่อนเกิดปฏิกิริยามี

ค่ามากกว่ามวลของนิวไคลด์หลังเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 3.2 รังสีพรอมต์แกมมาที่ได้จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) นี้ มีพลังงานค่อนข้างสูงจนถึงระดับ 10 MeV มักปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมาหลายระดับพลังงานเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน (Natural Si) ให้รังสีพรอมต์แกมมาหลายพลังงาน ได้แก่ 1.273 2.092 3.539 4.935 6.381 และ 7.201 MeV เป็นต้น และบางนิวไคลด์มีเพียงพลังงานเดียว เช่น ไฮโดรเจน (^1_1H) ให้รังสีพรอมต์แกมมา 2.223 MeV ตัวอย่างของธาตุที่สามารถวิเคราะห์ โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน(n,γ) แสดงในตารางที่ 2.6 2.7 และสำหรับธาตุอื่นๆสามารถดูได้จาก www.nndc.bnl.gov[11]

$$Q = ((M_A + M_N) - (M_{A+1})) C^2 > 0 \quad (3.2)$$

ปริมาณการให้รังสีพรอมต์แกมมา (Yield of prompt γ -ray) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield} = N\Phi t\sigma(E_n) \quad (3.3)$$

โดยที่ Yield : จำนวนรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา

N : จำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์ atom/cm³

Φ : นิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) หน่วย n/(cm².s)

t : เวลาที่ใช้การอบรังสี

$\sigma(E_n)$: ค่าภาคตัดขวางของการเกิดอันตรกิริยาขณะที่นิวตรอนมีพลังงาน E_n

แต่ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่หรือประกอบด้วยธาตุหลาย ๆ ชนิด (multi-element) พบว่าภาคตัดขวางรวม (Total neutron cross section, σ_T) ของแต่ละธาตุมีผลทำให้ค่านิวตรอนฟลักซ์ลดลง ดังนั้นจำนวนรังสีพรอมต์แกมมาที่ได้จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ ($1-e^{-f}$) ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Yield} = N\Phi t\sigma(E_n) \times (1-e^{-f}) \quad (3.4)$$

โดยที่ $f = \sum_i N_i (\sigma_{T,i}) \quad (3.5)$

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุบางชนิด ด้วยการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจาก ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ)[12]

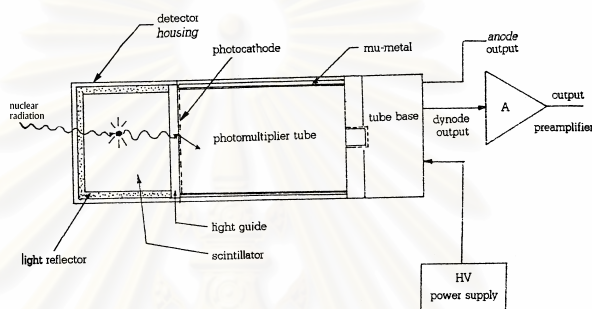
Element	Cross section (barns)	Atomic mass (A)	Energy (MeV)	Intensity (photons/100 neutron)	Sensitivity (Iσ/A)
B	752	10.811	0.478	47	3269
Na	0.534	22.989	6.395	25.69	0.592
			5.617	5.99	0.139
			3.982	21.58	0.501
			3.879	6.23	0.148
			3.588	17.31	0.402
			3.371	4.03	0.094
			3.098	9.67	0.225
			3.062	4.01	0.093
Al	0.235	26.981	7.724	20.10	0.175
			7.694	4.71	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
Ag	63	107.87	0.200	35.15	20.50

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุบางชนิด ด้วยการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจาก
ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ)[13]

Element	Cross section (barns)	Atomic mass (A)	Energy (MeV)
Cu	3.78	63.546	0.159
			7.915
Sn	0.63	118.710	1.293
Pb	0.168	207.2	7.368
Ni	4.46	58.6934	0.465
			8.999
Ca	0.431	40.078	1.942
			6.420
K	2.06	39.0983	0.770
Si	0.171	28.0855	3.539
			4.934
Zn	0.90	65.39	0.115
			1.077
Au	99	196.9665	0.2149
			0.2475
			0.16833
			0.09725
C	0.00351	12.0107	4.945
			3.683
			1.261

2.3 หัววัดรังสีแกมมา[14]

2.3.1 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน เป็นหัววัดรังสีที่มีกระบวนการวัดรังสีทางอ้อม มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่รับปฏิกิริยาและเกิดประกายแสง (scintillator) ต่อเชื่อมกับส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และทวีปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ (Photomultiplier tube, PMT) ซึ่งห่อหุ้มไว้ด้วยภาชนะปิดป้องกันแสงสว่างจากภายนอกและบริเวณหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) จะห่อหุ้มด้วยแผ่นกั้นสนามแม่เหล็ก (mu-metal) เพื่อป้องกันการรบกวนสนามแม่เหล็กเพื่อจะทำให้กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์เบี่ยงเบนจากกลุ่มไดโนด (dynode) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

ขั้นตอนการทำงานของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

1. เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์ตกกระทบซินทิลเลเตอร์จะเกิดประกายแสงขึ้น ณ บริเวณที่มีการถ่ายโอนพลังงาน
2. แสงที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับโดยตัวสะท้อน (Reflector) และส่วนหนึ่งจะส่งตรงไปยังตัวนำแสง (light guide) ผ่านไปยังโฟโตแคโทด (photocathode) ภายในหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์
3. โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectrons) จะถูกปลดปล่อยจากโฟโตแคโทดตรงไปยังไดโนดและถูกทวีคูณด้วยส่วนทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ (electron multiplier)
4. ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกรวบรวมบนแอโนดจะสร้างพัลส์ ของกระแสขึ้นที่อินพุทของภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า (preamplifier)

ปริมาณประจุ Q ที่ปรากฏบนส่วนแอโนดหรือไดโนดตัวสุดท้ายของหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ เนื่องจากความเข้มของประกายแสงแต่ละครั้งขึ้นกับพลังงานที่ถ่ายโอนให้ซินทิลเลเตอร์ ดังนั้นถ้าให้ n_0 เป็นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากโฟโต

แคโทด และ M เป็นค่าที่วัดคุณอิเล็กทรอนิกส์ของหลอดที่วัดรังสีแต่ละครั้ง Q จะมีค่าตามสมการที่ 3.6

$$Q = Mq_e n_e \quad (3.6)$$

2.3.2 หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ

หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลักการการทำงานคล้ายกับหัววัดบรรจุก๊าซชนิดไอออนไนเซชันแชนเบอร์ ต่างที่ตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานอยู่ในสถานะของแข็ง การไอออนไนเซชันในตัวกลางภาวะของแข็ง (solid ionization) จะทำให้เกิดปริมาณคู่ของอิเล็กตรอน - โฮล ขึ้น เป็นประจุพาหะในการสร้างสัญญาณไฟฟ้า ในบริเวณปลดพาหะของโครงสร้างไอโอด (semiconductor diode) ในสถานะไบอัสกลับทาง (reverse biasing) หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำจะตอบสนองการวัดพลังงานเป็นเชิงเส้นในช่วงกว้าง มีประสิทธิภาพในการวัดสูง เวลาในการตอบสนองการวัดสั้น ไม่มีปัญหาเรื่องการรบกวนของสนามแม่เหล็ก และยังสามารถทำงานในภาวะสุญญากาศได้ ที่สำคัญคือต้องการพลังงานในการกำเนิดคู่ของอิเล็กตรอน - โฮล (W-value) ต่ำเพียง 2 - 3 eV จึงทำให้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานสูงกว่าหัววัดรังสีชนิดอื่น

หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

2.3.2.1 หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำสำหรับวัดอนุภาคที่มีประจุ

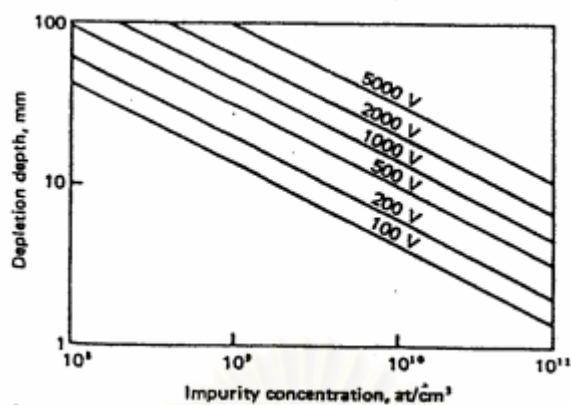
2.3.2.2 หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำสำหรับวัดโฟตอน

ก. หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำแบบลิเทียมดริฟ (Lithium drifted)

ข. หัววัดรังสีกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe)

หัววัดรังสีชนิดนี้ใช้ผลึกกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มาก เจือลิเทียมที่ความเข้มข้นต่ำ 10^{10} atom/cm³ โดยไม่มีการทำลิเทียมดริฟ ชั้นความลึกของบริเวณไวต่อรังสีขึ้นกับไบอัสกลับทางที่จ่ายให้ และความเข้มข้นของสารที่ทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.8 ขึ้นตอนการสร้างรอยต่อจะเหมือนกับหัววัดกึ่งตัวนำแบบ Ge(Li) แต่ไม่มีการทำไอออนดริฟเท่านั้น ในทางปฏิบัติจะทำรูปโครงสร้างผลึกใน 2 รูปแบบคือ แบบฟลานาร์ และโคแอกเซียล สามารถเก็บไว้โดยไม่ต้องการอุณหภูมิต่ำขณะไม่ใช้งาน และต้องการ LN₂ เมื่อใช้งานเท่านั้น

- ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีกึ่งตัวนำ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีกึ่งตัวนำจะขึ้นกับปริมาตรของผลึกวัด รูปทรงของผลึกวัด และพลังงานของรังสี ตามปกติ ประสิทธิภาพของหัววัดเจอร์มาเนียมมักจะเทียบกับหัววัดรังสีแบบ NaI(Tl) ที่พลังงานเดียวกัน หรืออาจจะวัดประสิทธิภาพการวัดรังสีสัมบูรณ์ (absolute efficiency) หรือประสิทธิภาพที่ full energy peak ของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของชั้นความลึกที่ไวต่อรังสีกับไบอัสและความเข้มข้นของสารเจือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ธาตุในโบราณวัตถุ ณ พื้นที่ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา เป็นงานวิจัยในภาคสนาม ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้งานจึงจำเป็นต้องเคลื่อนย้ายได้ไม่ยุ่งยาก และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้จึงต้องมีความแรงรังสีที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนย้ายนำไปทดลองภาคสนามได้

อุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity germanium, HPGe) แบบเคลื่อนย้ายได้ ของ Canberra รุ่น GC3020 มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV เท่ากับ 30 %

3.1.2 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) รุ่น Inspector 2000 ของ Canberra

3.1.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Genie 2000 ของ Canberra

3.1.4 คอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว (Notebook) สำหรับบันทึกข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

3.1.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูรี

3.1.6 ฝาครอบลิเทียมคาร์บอเนต (LiCO_3) ใช้ครอบหัววัดรังสี สำหรับดูดจับนิวตรอนเข้าไม่ให้ผ่านไปถึงหัววัดรังสี HPGe

3.1.7 ถังพลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 ซม. สูง 32 ซม. ใช้บรรจุน้ำภายในมีกรวยสแตนเลส ขนาดปากกว้าง 9 ซม. ยาว 16 ซม. ยื่นออกมาจากผิวของถัง 2 ซม. หนา 0.08 ซม. และมีท่อ PVC เพื่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน

3.1.8 ถังอะลูมิเนียมทรงกระบอกบรรจุฟารินผสมบอแรกซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 ซม. สูงประมาณ 40 ซม. สำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนในการออกภาคสนามพร้อมรถเข็น

3.1.9 ตะกั่ว ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 10.5 ซม. หนา 5 ซม. สำหรับป้องกันรังสีแกมมาจากภายนอก และบังคัมภ์ของรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรง

3.1.10 ก้อนโพลีเอทีลีนขนาดกว้าง 32 ซม. ยาว 32 ซม. หนา 10 ซม. สำหรับกำบังรังสีนิวตรอน ในขณะที่ทำการวิเคราะห์



ก) หัววัดรังสีแกมมาแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง
วิเคราะห์พร้อมที่ครอบหัววัดรังสี LiCO_3

ข) คอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้วและ
หลายช่องรุ่น Inspector 2000

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์หลักของระบบวัดรังสีแกมมา

แท่งบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน

ถังพาราฟินผสมบอแรกซ์



รถเข็น

รูปที่ 3.2 ถังอะลูมิเนียมสำหรับเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนในการออกภาคสนาม พร้อมรถเข็น



รูปที่ 3.3 เครื่องสำรวจปริมาณรังสีนิวตรอน

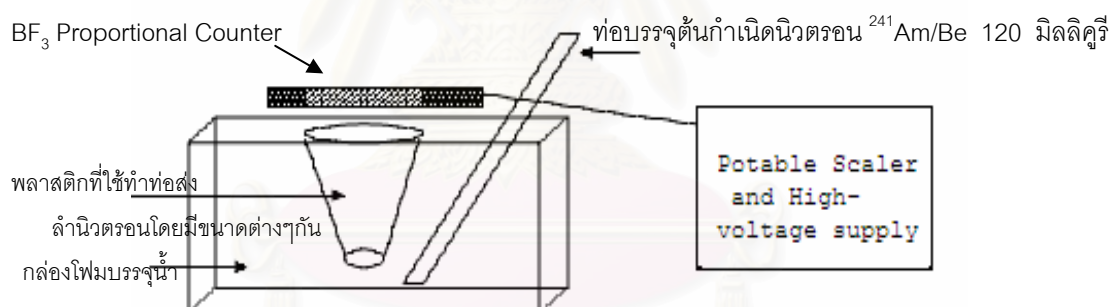
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาสำหรับออกงานภาคสนาม เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่แหล่งโบราณสถาน ดังนั้นในการออกแบบภาชนะต้นกำเนิดนิวตรอนต้องคำนึงถึงความสะดวกในการเคลื่อนย้าย สะดวกในการใช้งาน มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงบุคคลที่อยู่บริเวณนั้น และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง ซึ่งแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ก) การหาขนาดและความยาวของท่อส่งลำนิวตรอนหรือคอลลิเมเตอร์(collimator) ในการวิจัยนี้จะใช้นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ หรือเทอร์มัลนิวตรอนเพื่อใช้ในการทำให้เกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอนและวัดรังสีพรอมต์แกมมา แต่นิวตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีพลังงานสูง และกระจายออกไปทุกทิศทาง ดังนั้นจึงออกแบบกรวยกลมเพื่อให้มีการบังคับลำนิวตรอนไปสู่จุดที่ต้องการวิเคราะห์พร้อมกับครอบคลุมพื้นที่ของตัวอย่าง ซึ่งปลายด้านที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดนิวตรอนมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้านที่อยู่ใกล้ชิ้นงาน ท่อส่งลำนิวตรอนลักษณะนี้ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่วิ่งออกจากท่อบังคับลำนิวตรอนในลักษณะบานออก และลำนิวตรอนที่มีพลังงานสูงจะวิ่งไปกระทบน้ำที่อยู่รอบๆ ทำให้ถูกหน่วงพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนที่มีความเข้มข้น นิวตรอนฟลักซ์มากขึ้นวิ่งไปกระทบชิ้นงาน ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์ คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอน และความยาวของท่อส่งลำนิวตรอน ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

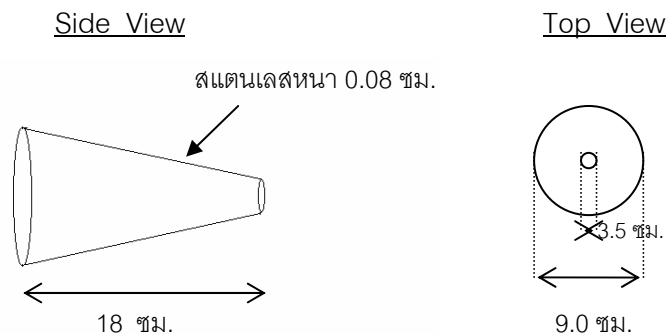
ในการทดลองใช้พลาสติกทำกรวยขนาดต่างๆกัน เพื่อใช้แทนท่อส่งลำนิวตรอน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความยาวตั้งแต่ 15 17 20 22 เซนติเมตร วัดจำนวนนับด้วยหัววัดรังสีพรอมพอร์

ชั้นแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ว่าแต่ละขนาดท่อส่งลำนิวตรอน มีปริมาณ thermal flux ต่างกันอย่างไร เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะใช้ขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนเท่าไร ให้ได้ปริมาณ thermal flux ที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากภาพที่ 3.4 แสดงถึงการใช้กล่องโคมขนาดกว้าง 33.5 ซม. ยาว 22.0 ซม. สูง 29.5 ซม. เพื่อหวนวงนิวตรอนพลังงานสูงจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 120 มิลลิวูรี มีกรวยทำด้วยพลาสติกขนาดต่างๆกันวางอยู่กึ่งกลางของกล่องโคม ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับปลายของท่อส่งลำนิวตรอน โดยนิวตรอนจะผ่านน้ำเข้าสู่ท่อส่งลำนิวตรอน ระยะห่างระหว่างหัววัดโบรอนไตรฟลูออไรด์ ถึงผิวน้ำคือ 4.0 เซนติเมตร คัดคาไฟฟ้า 2250 โวลต์ แล้วนับจำนวนนับรังสีนิวตรอน ใช้เวลานับ 120 วินาที ภาพท่อส่งลำนิวตรอนที่มีขนาดเหมาะสมหลังจากทำการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 โดยใช้โลหะสแตนเลสที่มีความหนา 0.08 ซม. ทำกรวยหรือท่อส่งลำนิวตรอน มีความยาว 18.0 ซม. ปากกรวยกว้าง 9.0 ซม. ปลายกรวยกว้าง 3.5 ซม. และปลายกรวยปิดเพื่อไม่ให้น้ำเข้าได้



ใช้แทนแผ่นแคดเมียมสำหรับหุ้มที่ปลายทั้งสองด้านของหัววัด BF_3 Proportional Counter

รูปที่ 3.4 แผนภาพการจัดระบบการทดลองเพื่อหาขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนที่เหมาะสม

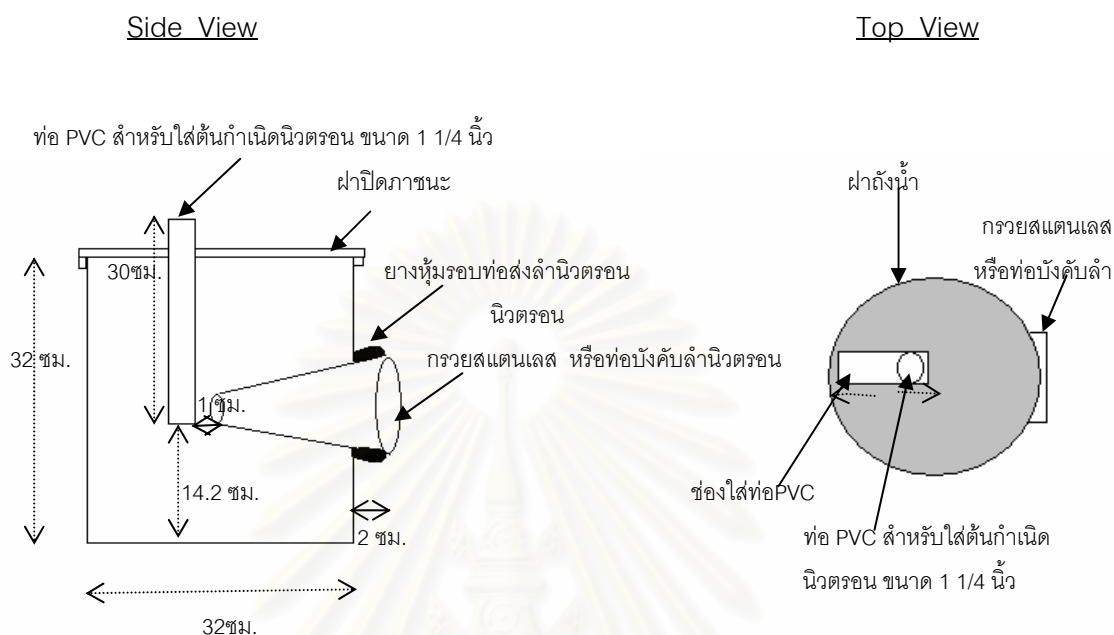


รูปที่ 3.5 แผนภาพท่อส่งลำนิวตรอนที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิเคราะห์

ข) การออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และ กำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมา โดยศึกษาเบื้องต้นจากงานวิจัยของ A.J. Cow, P.E. Francois and R.P. Gatrell [15] ในงานวิจัยจะใช้น้ำเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอนให้เป็น นิวตรอนพลังงานต่ำเพื่อนำมาใช้ในงานวิเคราะห์ โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจาก ปฏิริยาการจับนิวตรอน และน้ำยังใช้ป้องกันอันตรายจากนิวตรอนได้ด้วย ด้านความปลอดภัย ได้ใช้มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาต่อการขนส่ง หรือสิ่งของที่มีสารกัมมันตรังสีในระดับปานกลาง เป็นบรรทัดฐาน โดยกำหนดไว้ว่าปริมาณรังสีที่ผิวของวัสดุไม่ควรเกิน 50 มิลลิเรมต่อชั่วโมง (mrem/h) หรือ 0.5 มิลลิซีเวิร์ตต่อชั่วโมง (0.5 mSv/h) และที่ระยะห่างออกไปจากตัววัสดุ 1 เมตร มีปริมาณรังสีไม่เกิน 1 มิลลิเรมต่อชั่วโมง หรือ 10 ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง[16] หรือ ตามหลักของสากลตามเอกสารของ International Commission on Radiological Protection ฉบับที่ 60 (ICRP 60) ที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีทั่วร่างกายได้ไม่เกิน 20 mSv หรือ 2 rem ต่อปี (1 mrem ต่อชั่วโมง) เป็นหลักออกแบบในด้านความปลอดภัย การคำนวณ ปริมาณนิวตรอนพลังงานต่ำที่ผ่านน้ำที่มีความหนาเท่ากับถังพลาสติกที่ใช้ ได้แสดงอยู่ใน ภาคผนวก ก.

ในการออกแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ถังพลาสติกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 ซม. สูง 32 ซม. มีฝาปิด บนฝาได้เจาะช่องขนาดกว้าง 1 1/4 นิ้ว ยาว 4 เซนติเมตร มีท่อ PVC ขนาด 1 1/4 นิ้ว ไว้สำหรับใส่ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว ที่บรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิคูรี เมื่อจะทำการวิเคราะห์ และมีกรวยสแตนเลส เป็นท่อบังคับลำนิวตรอนใส่ไว้ กึ่งกลางของตัวถังยื่นออกมาจากตัวถัง 2 ซม. เพื่อให้คลุมตัวอย่างได้ในขณะทำการวิเคราะห์ และมีการหุ้มส่วนที่ยื่นออกมาด้วยยางเพื่อกันไม่ให้นิวตรอนทะลุออก ได้ทำส่วนที่ใส่ต้นกำเนิด นิวตรอนโดยเมื่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนแล้วจะอยู่ในแนวเดียวกับปลายกรวยสแตนเลส และห่าง ออกมาอย่างน้อย 1 ซม. เพื่อให้ห่วงนิวตรอนพลังงานสูงและกลายเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำเข้าสู่

ท่อบังคับลำนิวตรอน ซึ่งช่องที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนสามารถเลื่อนออกในระยะที่มากกว่า 1 ซม. ได้ ดังภาพที่ 3.6

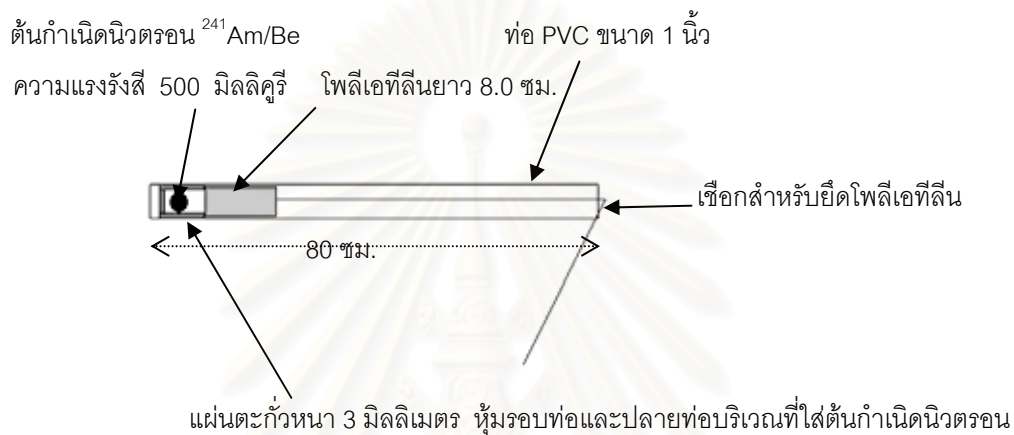


รูปที่ 3.6 แผนภาพถังพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายถังพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนเพื่อใช้ในงานวิเคราะห์ด้าน นอกและภายในตามลำดับ

สำหรับท่อใส่ต้นกำเนิดรังสี $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูร์ ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยที่ใช้ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว ความยาว 80 เซนติเมตร ปลายท่อได้หุ้มตะกั่วหนา 3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ที่ให้พลังงาน 60 keV ไม่ให้รบกวนสเปกตรัมในขณะทำการวิเคราะห์ ด้านบนของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูร์ มีโพลิเอทิลีนความยาว 8.0 เซนติเมตร ปิดเพื่อไม่ให้ลำนิวตรอนออกไปทางด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



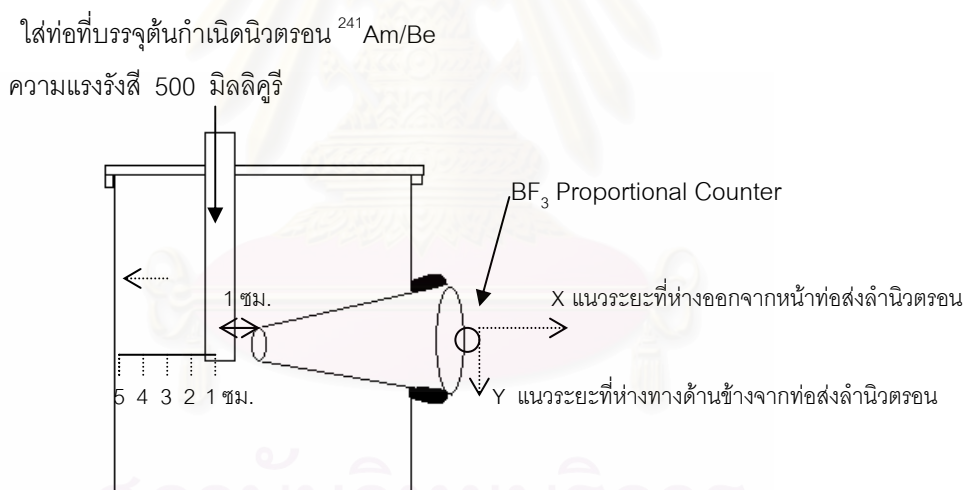
รูปที่ 3.8 แผนภาพท่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ 500 มิลลิวูร์



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายท่อบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูร์

โดยท่อที่บรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิคูรี นี้ได้ถูกเก็บอยู่ในถังอะลูมิเนียมบรรจุพาราฟินผสมบอแรกซ์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 45 ซม. สูงประมาณ 40 ซม. มีท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ที่ตรงกลางสำหรับใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน และมีแท่งอะลูมิเนียมซึ่งมีเกลียวชั้น เพื่อยึดให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ตรงกลางถึงขณะเก็บสามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยรถเข็นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งานในภาคสนาม ภาพของถังพาราฟินผสมบอแรกซ์นี้แสดงในรูปที่ 3.2

3.2.3 ทดลองจัดระบบที่เหมาะสมในการวัดความเข้มรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ เมื่อออกแบบภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกัมมันตรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาได้แล้ว จึงทำการทดลองหาระบบการวิเคราะห์ที่เหมาะสมว่าจะจัดวางตัวอย่างในระยะที่เท่าไร ให้ได้รับปริมาณเทอร์มินัลนิวตรอนที่มากเกินไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีพรอมต์แกมมาออกมา โดยการทดลองวัดจำนวนนับนิวตรอนด้วยหัววัดพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) จัดระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า ด้านข้าง และในแนวแกน X-Y ดังแสดงในภาพที่



รูปที่ 3.10 แผนภาพระบบที่ทำการทดลองเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

ก) การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

- จัดวางถึงพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน พร้อมกับใส่ทำให้เต็ม นำหัววัดพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) มาวางหน้ากรวยสแตนเลส หรือท่อส่งลำนิวตรอน ดังภาพที่ 3.10 นำต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูรี มาใส่ในท่อด้านบนดังรูป เริ่มจากตำแหน่งที่ 1 ที่มีระยะห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน 1 ซม. และเลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งออกไปครั้งละ 1 ซม. เป็น 2 3 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ นับจำนวนนับรังสีตำแหน่งละ 120 วินาที

ข) การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างตัวอย่างและท่อส่งลำนิวตรอน

- จัดวางถึงพลาสติกบรรจุน้ำสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน พร้อมกับใส่ทำให้เต็ม บรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูรี ไว้ห่างจากปลายของท่อส่งลำนิวตรอน 1 ซม. นำหัววัดพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) มาวางหน้ากรวยสแตนเลส หรือท่อส่งลำนิวตรอน ดังภาพที่ 3.10 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของหัววัดพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ดังนี้

- ตามแนวแกน X คือตำแหน่งที่ห่างออกจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า โดยห่างออกไป 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. และ 8 ซม. ตามลำดับ นับจำนวนนับรังสีตำแหน่งละ 120 วินาที

- ตามแนวแกน Y คือตำแหน่งที่ห่างออกจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านข้าง โดยห่างออกไป 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. และ 8 ซม. ตามลำดับ นับจำนวนนับรังสีตำแหน่งละ 120 วินาที

- ตามแนวแกน X - Y คือตำแหน่งที่ห่างออกจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า และด้านข้าง ดังนี้

X เท่ากับ 2 ซม.

และ Y เท่ากับ 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. 8 ซม. ตามลำดับ

X เท่ากับ 4 ซม.

และ Y เท่ากับ 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. 8 ซม. ตามลำดับ

X เท่ากับ 6 ซม.

และ Y เท่ากับ 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. 8 ซม. ตามลำดับ

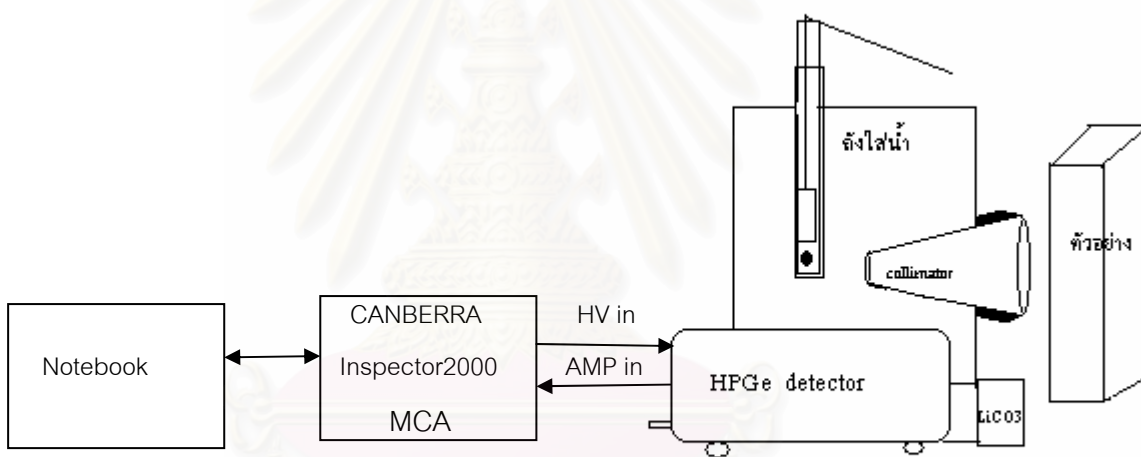
X เท่ากับ 8 ซม.

และ Y เท่ากับ 2 ซม. 4 ซม. 6 ซม. 8 ซม. ตามลำดับ

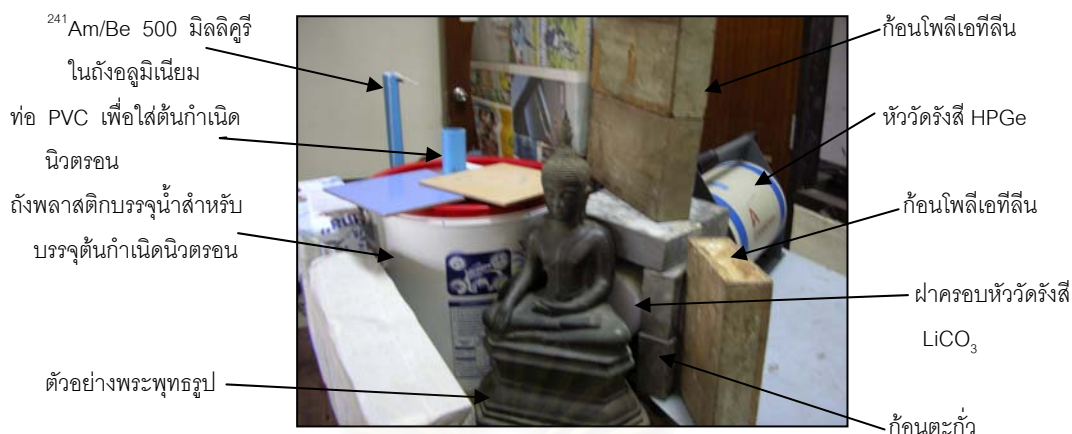
และนับจำนวนนับรังสีตำแหน่งละ 120 วินาที

3.2.3 ทดลองวัดความเข้มรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

เมื่อทำการทดลองหาตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ตัวอย่างได้รับปริมาณเทอร์มัลนิวตรอนที่เพียงพอทำให้เกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนและให้รังสีพรอมต์แกมมา หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ และหนาพอสมควร มาทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น จัดวางดังภาพที่ 3.11 และ 3.12 โดยจัดวางกอนโพลีเอทิลีน ไว้บริเวณรอบๆระบบวิเคราะห์ เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดจากนิวตรอน



รูปที่ 3.11 แผนผังการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายระบบที่ทำการวิเคราะห์พระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49 ซม.

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการมีดังนี้

1. อะลูมิเนียม ขนาดกว้าง 25.0 ซม. สูง 20.0 ซม.หนา 1.0 ซม.
2. แผ่นเหล็ก ขนาดกว้าง 30.0 ซม. สูง 30.0 ซม.หนา 0.6 ซม.
3. ทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.0 ซม. สูง 9.0 ซม.
4. ดีบุก น้ำหนัก 2600 กรัม
5. ทองเหลือง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.5 ซม. สูง 13.0 ซม.
6. สารเคมีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) น้ำหนัก 500 กรัม
7. สารเคมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) น้ำหนัก 100 กรัม
8. ปูนโบราณ ขนาดกว้าง 23.0 ซม. สูง 22.0 ซม.หนา 6.0 ซม.
9. พระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 55.0 ซม
10. พระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49.0 ซม.
11. พระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม. (เลขทะเบียน LAY 264)
12. ระฆังสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม.



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายปูนโบราณ



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม.
สูง 55.0 ซม.



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม.สูง 49.0 ซม.



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม.
(เลขทะเบียน LAY 264)



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายระฆังสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 วิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างโบราณวัตถุขนาดใหญ่ติดที่

การทดลองภาคสนามเพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็น องค์ประกอบในโบราณวัตถุขนาดใหญ่ ณ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นพระพุทธรูปทรงเครื่องที่สร้างขึ้นสมัยอยุธยาตอนต้น ประดิษฐานอยู่ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ มีพระนามว่า “พระพุทธรูปนิมิตวิจิตรมารโมลีศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ” ดังรูปที่ 3.18 มีขนาดหน้าตัก 9 ศอก สูง 6.0 เมตร



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายพระพุทธรูปทรงเครื่อง พระนามว่า “ พระพุทธรูปนิมิตวิจิตรมารโมลีศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ ”

การทดลองได้ทำการวิเคราะห์ 2 จุด ทางด้านหลังของพระพุทธรูปดังนี้

- จุดที่ 1 คือด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระประธาน เริ่มจากการจัดวางระบบที่เหมาะสม โดยจัดให้ปากท่อส่งลำนิวตรอนที่ประกอบอยู่ในภาชนะสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนเข้าทางด้านที่จะวิเคราะห์ตัวอย่างให้ใกล้กับตัวอย่างมากที่สุด พร้อมการจัดวางหัววัดรังสี HPGe ให้ทำมุมกับท่อส่งลำนิวตรอนประมาณ 90 องศา[17] ทำการล้อมหัววัดรังสี HPGe ด้วยก้อนตะกั่วเพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่มาจากภายนอกระบบวิเคราะห์ และป้องกันอันตรายที่เกิดจากนิวตรอนต่อผู้ทำการวิเคราะห์และบุคคลบริเวณรอบๆ ด้วยก้อนโพลีเอทิลีนวางไว้รอบๆระบบวิเคราะห์ เมื่อจัดระบบวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วจึงเติมน้ำในภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนให้เต็ม ปิดฝาใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิวินาที ในภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4000 วินาที วิเคราะห์พลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) บันทึกข้อมูลพลังงานที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง ด้วย Program Genie 2000 และเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอน

²⁴¹Am/Be ความแรงรังสี 500 มิลลิวินาที ออกจากภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน ทำการวัดรังสีแกมมาที่ออกมาทันทีเมื่อมีการจับนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาตามเวลาอัตราการสลายตัว (neutron activation) และวัดแบบคร่าวๆ ที่มีในระบบ

2. จุดที่ 2 คือ การวิเคราะห์ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระประธานที่สูงขึ้นจากจุดแรก 40.0 เซนติเมตร จัดระบบวิเคราะห์ให้เหมาะสมโดยจัดให้ปากท่อส่งลำนิวตรอนที่ประกอบอยู่ในภาชนะสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน เข้าทางด้านที่จะวิเคราะห์ตัวอย่างให้ใกล้กับตัวอย่างมากที่สุด พร้อมการจัดวางหัววัดรังสี HPGe ให้ทำมุมกับท่อส่งลำนิวตรอนประมาณ 90 องศา[17]ทำการล้อมหัววัดรังสี HPGe ด้วยก้อนตะกั่วเพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่มาจากภายนอกระบบวิเคราะห์และป้องกันอันตรายที่เกิดจากนิวตรอนต่อผู้ทำการวิเคราะห์และบุคคลบริเวณรอบๆ ด้วยก้อนโพลิเอทีลินวางไว้รอบๆระบบวิเคราะห์ เมื่อจัดระบบวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วจึงเติมน้ำในภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนให้เต็มปิดฝา ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹Am/Be ความแรงรังสี 500 มิลลิวินาที ในภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4000 วินาที วิเคราะห์พลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) บันทึกข้อมูลพลังงานที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องด้วยโปรแกรม Genie 2000 และเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹Am/Be ความแรงรังสี 500 มิลลิวินาที ออกจากภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน ทำการวัดรังสีแกมมาที่ออกมาทันที เมื่อมีการจับนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาตามเวลาอัตราการสลายตัวและวัดแบบคร่าวๆ ที่มีในระบบ

ระบบวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระประธาน



รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายการจัดเพื่อการวิเคราะห์ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระพุทธรูปนิมิตวิจิตร มารโมลีศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (ระยะใกล้)



รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายการจัดเพื่อการวิเคราะห์ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระพุทธรูปนิมิตวิจิตร มารโมลี ศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (ระยะไกล)

บทที่ 4

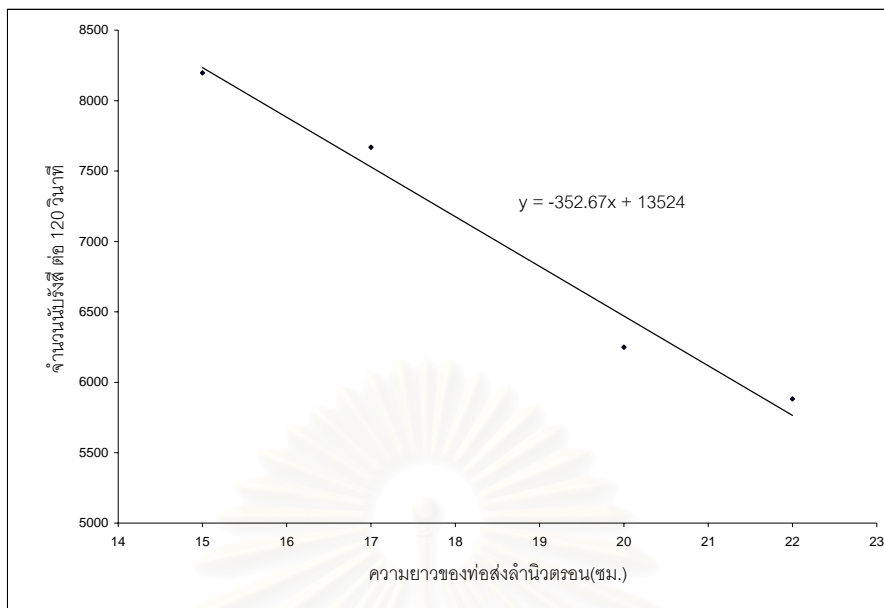
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองการออกแบบสร้างภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาสำหรับออกงานภาคสนาม

4.1.1 ผลการหาความยาวของท่อส่งลำนิวตรอนหรือคอลลิเมเตอร์ (collimator) ในการทดลองใช้กรวยพลาสติกในการทำท่อส่งลำนิวตรอนที่มีความยาวขนาดต่างๆกัน วัดปริมาณเทอร์มินัลนิวตรอนที่ออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนผ่านท่อส่งลำนิวตรอน ด้วยหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ศักดาไฟฟ้า 2250 โวลต์ เวลานับ 120 วินาที ผลแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนนับรังสีนิวตรอนที่ผ่านท่อส่งลำนิวตรอนความยาวขนาดต่างๆ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	ความยาว (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
		1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
8.90	22.0	6194	6331	6244	6256
8.90	20.0	6651	6759	6627	6679
8.90	17.0	8278	8095	8078	8150
8.90	15.0	8880	8799	8783	8820

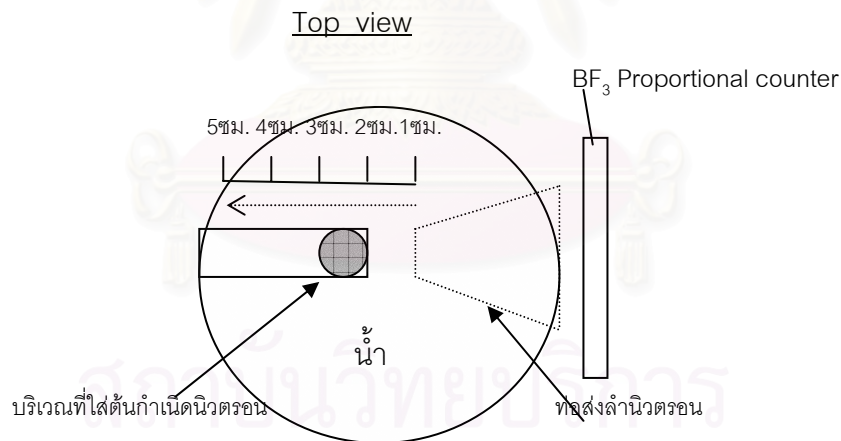


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนต่อวินาทีกับความยาวของท่อส่งลำนิวตรอน

ผลการหาขนาดและความยาวของท่อส่งลำนิวตรอนหรือคอลลิเมเตอร์ (collimator) จากสมการที่ใช้ในการหานิวตรอนฟลักซ์ (Φ_E) สำหรับท่อส่งลำนิวตรอนที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. นั้น ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ (Φ_E) คือความยาวของท่อส่งลำนิวตรอนและทางเข้าของต้นกำเนิดนิวตรอน จึงได้ทำการทดลองหาความยาวของท่อส่งลำนิวตรอนที่เหมาะสม เพื่อให้เหมาะสมกับภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน เนื่องจากเป็นงานที่ออกภาคสนามจึงใช้ภาชนะที่ไม่ใหญ่เกินไป ง่าย และการวิเคราะห์ให้ครอบคลุมขนาดตัวอย่างที่มีพื้นที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9.0 ซม. จากการทดลองวัด thermal neutron ของกรวยพลาสติกขนาดต่างๆ พบว่าเมื่อท่อส่งลำนิวตรอนมีความยาวเพิ่มขึ้น จำนวนนิวตรอนลดลงเชิงเส้น การออกแบบท่อส่งลำนิวตรอนจึงเลือกความยาว และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อส่งลำนิวตรอนโลหะสแตนเลสหนา 0.08 ซม. ความยาว 18.0 ซม. ปากกรวยกว้าง 9.0 ซม. ปลายกรวยกว้าง 3.5 ซม. ใช้ขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนขนาดนี้เนื่องจากภาชนะที่บรรจุมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32.0 ซม. สูง 32.0 ซม. ซึ่งขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนที่เลือกนั้นมีปริมาณ thermal neutron ไม่น้อยเกินไปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ และมีส่วนของท่อส่งลำนิวตรอนยื่นออกมานอกภาชนะ 2 ซม. เพื่อให้คลุมตัวอย่างในขณะที่ทำการวิเคราะห์ หุ้มส่วนที่ยื่นออกมาด้วยแผ่นยางเพื่อไม่ให้นิวตรอนเล็ดลอดออกไปจากบริเวณด้านข้างของท่อส่งลำนิวตรอน ทำการยึดให้ติดกับภาชนะด้วยการซิลิโคน และแผ่นพลาสติกอะคริลิก

4.2 ผลการทดลองจัดระบบที่เหมาะสมในการวัดความเข้มรังสีฟอรอมต์แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

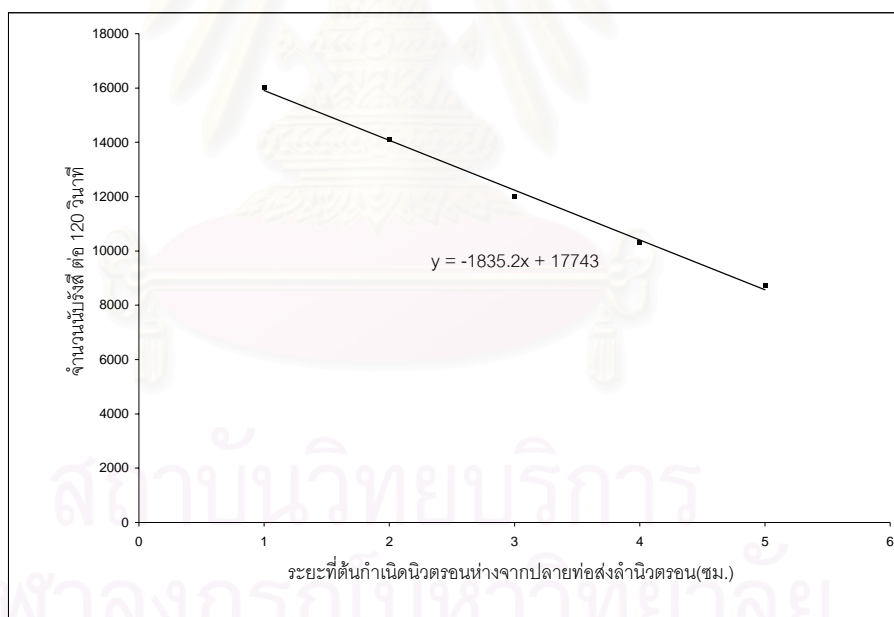
4.2.1 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน หลังจากที่ได้ทำการทดลองหาขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนที่เหมาะสม และออกแบบภาชนะที่ใส่ท่อส่งลำนิวตรอน ซึ่งสามารถบรรจุน้ำเพื่อลดทอนนิวตรอนเร็วได้ ขนาดของท่อส่งลำนิวตรอนที่เหมาะสมมีความยาว 18.0 ซม. ปากกรวยกว้าง 9.0 ซม. ปลายกรวยกว้าง 3.5 ซม. ดังภาพที่ 3.5 และภาชนะที่ใส่ดังรูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนถูกบังคับให้ห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอนอย่างน้อย 1 เซนติเมตร จึงทำการทดลองหา thermal flux ที่ระยะห่างออกไปมากกว่า 1 ซม. เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความเข้มรังสี 500 มิลลิคูรี ที่ตำแหน่งใดด้วยหัววัดรังสีฟอรอพรชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) คักดาไฟฟ้า 2250 โวลต์ ใช้เวลานับ 120 วินาที



รูปที่ 4.2 แผนภาพการจัดการทดลองหาตำแหน่งที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.2 จำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนตำแหน่งต่างๆที่ห่างจากปลายของท่อส่งลำนิวตรอน

ระยะห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
1	16074	16046	16170	16096
2	14144	14018	14319	14160
3	12162	12133	11984	12093
4	10430	10368	10301	10366
5	8584	8902	8965	8817



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน

ผลการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน เนื่องจากการออกแบบระบบวิเคราะห์รังสีพรอมต์เกมมาจากปฏิบัติการจับนิวตรอน จึงจำเป็นต้องหาพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูรี่ โดยใช้น้ำที่อยู่ในภาชนะ

ดังนั้นต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานสูงต้องมีการผ่านน้ำก่อน จึงเข้าสู่ท่อส่งลำนิวตรอนและมีการเพิ่มความเข้มข้นนิวตรอนพลังงานต่ำ ภายในท่อส่งลำนิวตรอนที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยกลมกลายเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง ในการทดลองได้เปลี่ยนแปลงระยะห่างของท่อที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนให้ห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน ออกไปเป็นระยะ 1 2 3 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนห่างออกไปจำนวนนับรังสีนิวตรอนลดลงเชิงเส้น ดังนั้นระยะที่เหมาะสมที่ให้ thermal flux คือที่ระยะท่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน ห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน 1 ซม. และทำการยึดไม่ให้ท่อที่ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนมีการเคลื่อนที่ และใช้ตำแหน่งนี้ในการทดลองหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบวิเคราะห์ต่อไป

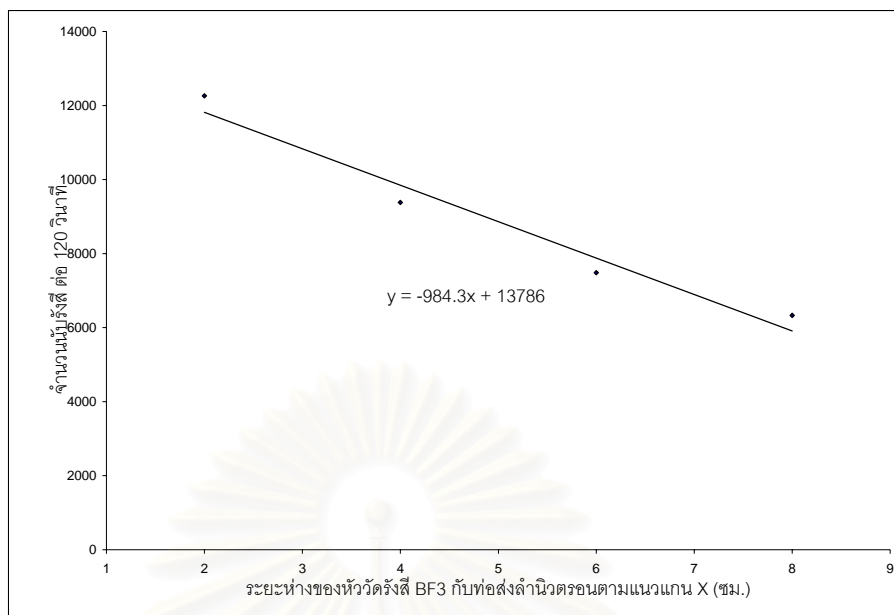
4.2.2 ผลการทดลองการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างตัวอย่างและท่อส่งลำนิวตรอน ในการทดลองวางต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแฉะรังสี 500 มิลลิคูรี ให้ห่างจากปลายท่อส่งลำนิวตรอน 1 เซนติเมตร ได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะทางด้านหน้าของท่อส่งลำนิวตรอน และด้านข้างของท่อส่งลำนิวตรอน หรือตามแกน X - Y ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยใช้หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) คัดดาไฟฟ้า 2250 โวลต์ ใช้เวลานับ 120 วินาที แทนการวางตำแหน่งของตัวอย่าง

4.2.2.1 จัดระยะของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนออกมาทางด้านหน้าหรือตามแกน X ที่ระยะต่างๆ ผลแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า หรือตามแกน

X

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน X) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	12199	12097	12488	12261
4	9444	9436	9264	9381
6	7420	7543	7484	7482
8	6340	6343	6313	6332



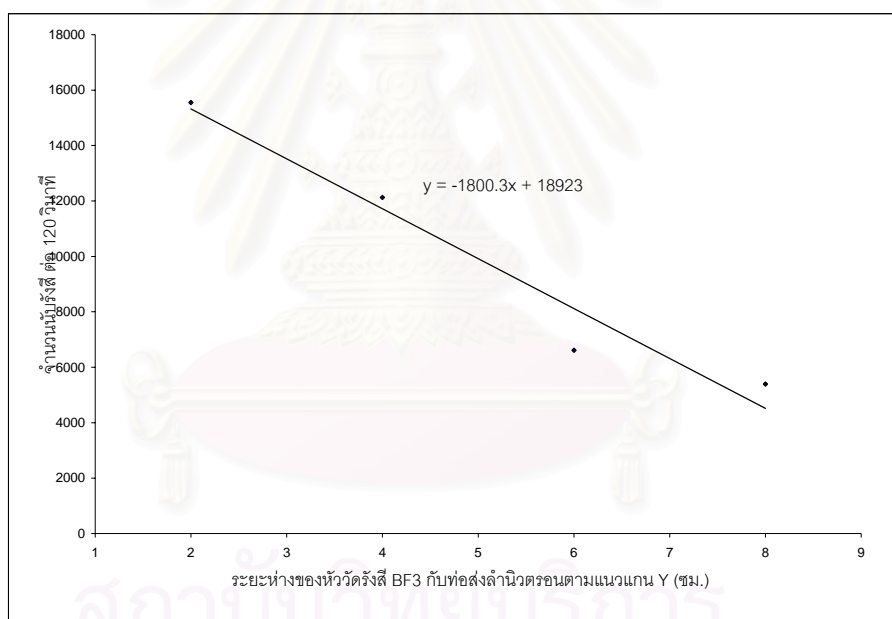
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน X

4.2.2.2 ผลการจัดระยะของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนออกมาทางด้านข้าง หรือตามแกน Y ที่ระยะต่างๆ โดยกำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ที่จุดใดจุดหนึ่ง

- กำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ติดกับท่อส่งลำนิวตรอน ผลแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ติดกับท่อส่งลำนิวตรอน และห่างออกมาด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน Y) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	15632	15451	15581	15554
4	12152	12177	12050	12126
6	6626	6558	6653	6612
8	5364	5535	5273	5390



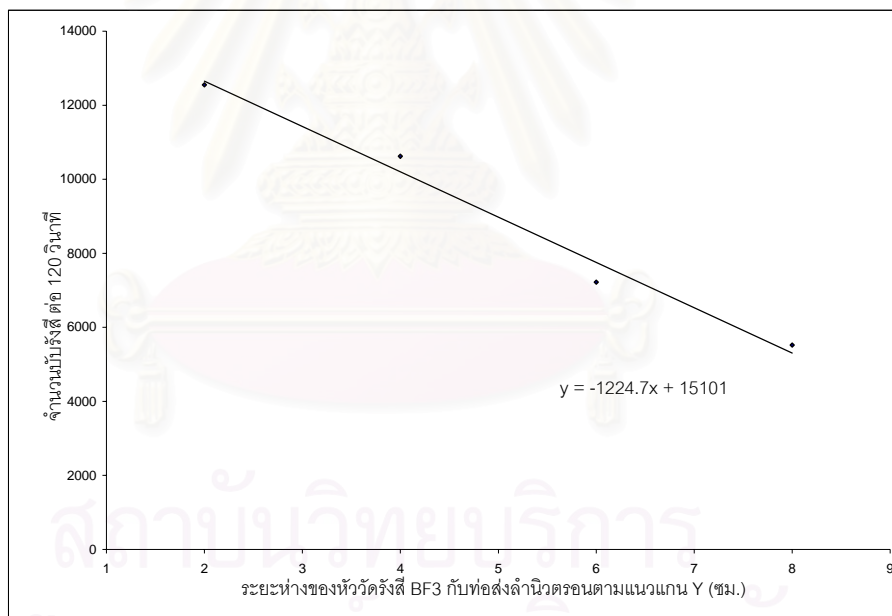
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน Y

- กำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ที่ระยะ 2 เซนติเมตร ผลแสดงใน

ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 2 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน Y) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	12448	12620	12587	12551
4	10452	10672	10737	10620
6	7263	7202	7186	7217
8	5632	5309	5625	5522



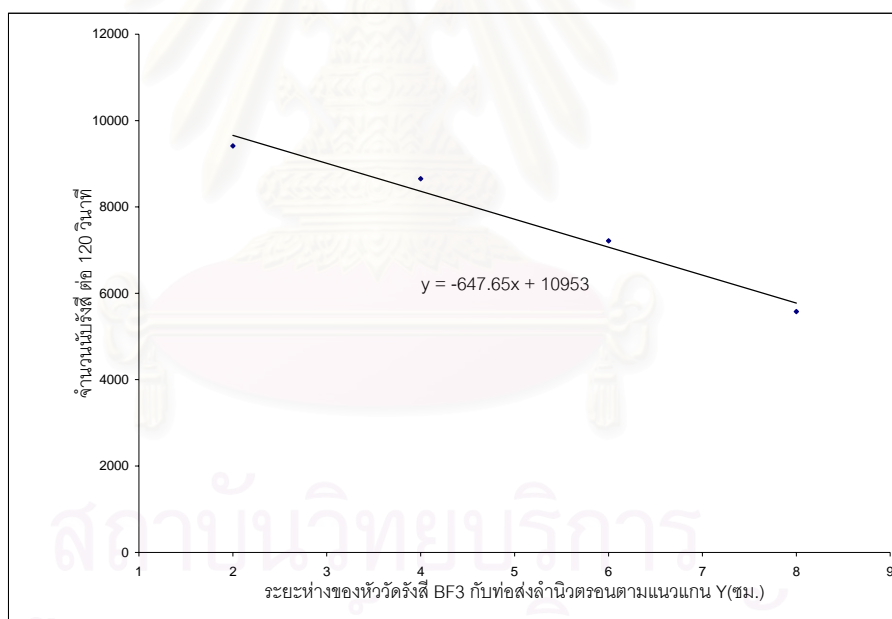
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (2,Y)

- กำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ที่ระยะ 4 เซนติเมตร ผลแสดงใน

ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 4 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน Y) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	9436	9437	9364	9412
4	8691	8583	8689	8654
6	7469	7120	7066	7218
8	5585	5603	5531	5573



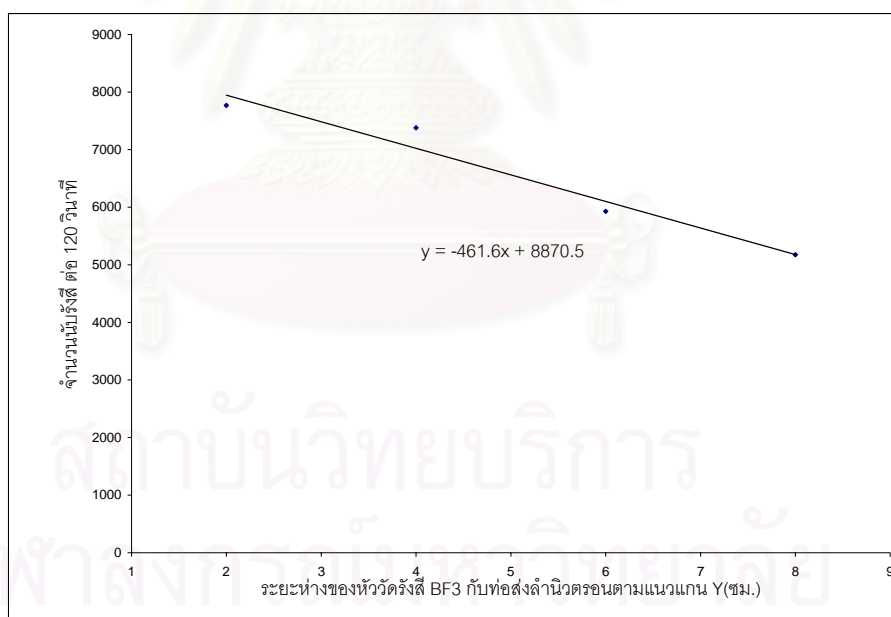
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอน กับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (4,Y)

- กำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ที่ระยะ 6 เซนติเมตร ผลแสดงใน

ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 6 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน Y) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	7774	7780	7753	7769
4	7341	7395	7399	7378
6	5940	5940	5904	5928
8	5146	5241	5138	5175



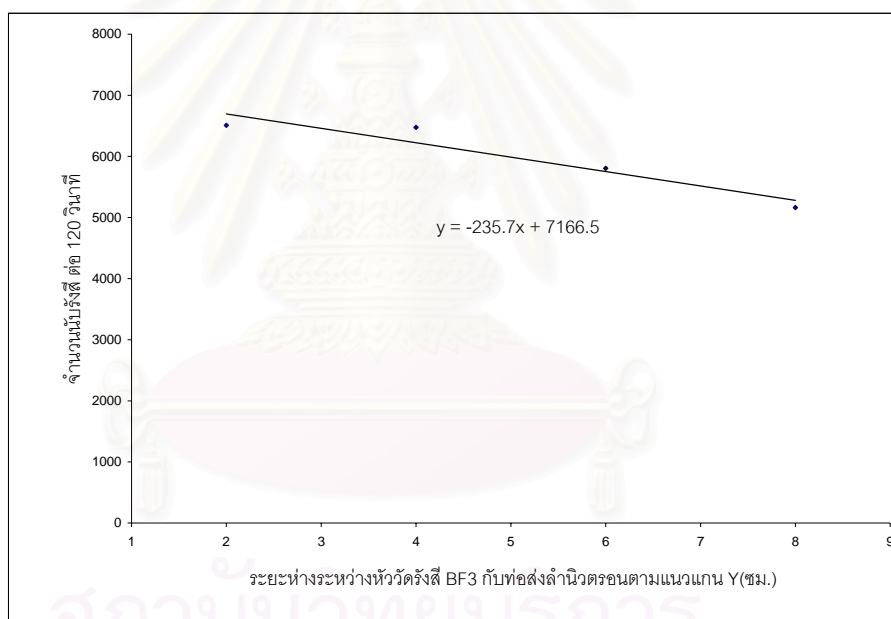
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (6,Y)

- กำหนดระยะด้านหน้า (แกน X) ที่ระยะ 8 เซนติเมตร ผลแสดงใน

ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 จำนวนนับรังสีเมื่อจัดหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 -Proportional counter) ให้ห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนทางด้านหน้า (แกน X) 8 ซม. และด้านข้าง (แกน Y) ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของหัววัด BF_3 จากท่อส่งลำนิวตรอน (แกน Y) (ซม.)	จำนวนนับ (ต่อ 120 วินาที)			
	1	2	3	จำนวนนับสุทธิ (ต่อ 120 วินาที)
2	6493	6563	6475	6510
4	6451	6390	6584	6475
6	5937	5717	5761	5805
8	5137	5162	5187	5162



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับระยะห่างจากท่อส่งลำนิวตรอนตามแนวแกน (8,Y)

ผลการทดลองการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างตัวอย่าง และท่อส่งลำนิวตรอน ความสำคัญที่ต้องมีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมเนื่องจากปริมาณ thermal neutron ที่ออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนและผ่านท่อส่งลำนิวตรอนมีปริมาณระดับหนึ่ง ถ้าระยะของตัวอย่างไม่เหมาะสมแล้วอาจทำให้ตัวอย่างได้รับปริมาณ thermal neutron น้อยเกินไปทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเพื่อทำให้เกิดรังสีพรอมต์แกมมาน้อย เพื่อต้องการให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงวัด thermal neutron ที่ตำแหน่งของตัวอย่างในแนวแกน X

แกน Y และแกน (X,Y) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ผลการทดลองปรากฏว่า เมื่อตำแหน่งที่จะใช้วางตัวอย่างห่างออกไปไม่ว่าตามแนวแกน X Y หรือ (X,Y) จำนวนนับรังสีนิวตรอนจะลดลงเชิงเส้นทำให้ทราบว่า ในการวิเคราะห์วัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ควรวางตัวอย่างให้ใกล้กับท่อส่งลำนิวตรอนมากที่สุดเนื่องจากตัวอย่างมีโอกาสได้รับ thermal neutron หรือได้รับนิวตรอนฟลักซ์ (Φ_n) มากกว่าอยู่ระยะไกล การวิเคราะห์จึงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3 ผลการทดลองการวัดความเข้มข้นรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

โดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่าง ซึ่งมีการจัดระบบการวิเคราะห์ดังแผนภาพในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ใช้ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิวูรี่ เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เพื่อความปลอดภัยบริเวณรอบๆระบบจะมีกอนโพลีเอทิลีนเพื่อป้องกันรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมา ได้สเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา ดังรูปในภาคผนวก ข. ซึ่งธาตุที่ทำการวิเคราะห์ได้แสดงในตารางต่อไป นี้ ในงานวิจัยนี้เป็นงานที่วิเคราะห์ตัวอย่างขนาดใหญ่ติดที่ ณ ภาคสนาม ดังนั้นความปลอดภัยจากการวิเคราะห์โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนจึงต้องมีความสำคัญมาก ในงานวิจัยนี้เน้นที่ปฏิกิริยาจับนิวตรอนเป็นหลัก จึงต้องหวนพลังงานของนิวตรอนด้วยน้ำแต่ทางปฏิบัติปรากฏว่ารังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น เกิดจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นด้วย ซึ่งกลับเป็นข้อดีของงานวิจัยครั้งนี้ เพราะบางธาตุสามารถเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนทั้งแบบจับนิวตรอนและชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนเร็วทำให้สามารถเห็นพีครังสีพรอมต์แกมมาได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และในภาคสนามนั้นได้ทำการวิเคราะห์โลหะต่างๆ ที่คาดว่าจะพบได้ในตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เพื่อศึกษาสเปกตรัมพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งหมดจากโลหะนั้นๆ และทำการวัดแบบคร่าวๆซึ่งไม่มีตัวอย่างแต่มีต้นกำเนิดนิวตรอน

4.3.1 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากแบบคร่าวๆในห้องปฏิบัติการ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 พีคพลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่พบจากแบคกราวด์ในห้องปฏิบัติการ

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
477.6	^{10}B (Capture)	842.3	^{27}Al (Inelastic)
510.7	Annihilation	879.7	^{206}Pb (Inelastic)
537.1	^{206}Pb (Inelastic)	910.3	^{228}Ac
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1013.1	^{27}Al (Inelastic)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1199.3	^1H (Capture, D)
595.7	^{74}Ge (Inelastic)	1457.7	^{40}K
608.5	^{214}Bi	1708.5	^1H (Capture, S)
655.2	^{206}Pb (Inelastic)	1775.7	^{28}Al (decay)
662.9	^{206}Pb (Inelastic)	2221.1	^1H (Capture)
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	2608.8	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากมีการจับนิวตรอน

ผลการวิเคราะห์รังสีฟอตอนต์แกมมาจากแบคกราวด์ไม่พบพลังงานที่ 866 keV จากปฏิกิริยาชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนกับเจอร์มาเนียม - 74 ในหัววัดรังสี แต่พบในการวิเคราะห์ตัวอย่างเนื่องจากว่า เมื่อทำการวางตัวอย่างทำให้นิวตรอนที่ออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนสามารถกระเจิงไปกระทบกับหัววัดรังสี HPGe ได้มากกว่าเมื่อไม่มีตัวอย่าง ทำให้พบพลังงานของรังสีฟอตอนต์แกมมาที่ 866 keV จาก Ge-74 เมื่อมีตัวอย่างวางอยู่หน้าหัววัดรังสี HPGe

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียม ขนาดกว้าง 25.0 ซม. สูง 20.0 ซม. หน้า 1.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 พีกพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียม

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	หมายเหตุ	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	หมายเหตุ
510.8	Annihilation		880.2	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	
537.3	²⁰⁶ Pb (Inelastic)		910.3	²²⁸ Ac	
569.9	²⁰⁷ Pb (Inelastic)		1013.2*	²⁷ Al (Inelastic)	
582.5	²⁰⁸ Pb (Inelastic)		1199.7	¹ H (Capture, D)	จำนวนนับ มากขึ้น
595.8	⁷⁴ Ge (Inelastic)		1459.0	⁴⁰ K	
608.4	²¹⁴ Bi		1709.9	¹ H (Capture, S)	
802.4	²⁰⁶ Pb (Inelastic)		1776.0*	²⁸ Al (decay)	จำนวนนับ มากขึ้น
843.4*	²⁷ Al (Inelastic)	จำนวนนับ มากขึ้น	2220.1	¹ H (Capture)	
866.8	⁷⁴ Ge (Inelastic)		2610.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl	

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากมีการจับนิวตรอน

ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียมพบว่า พลังงานที่นอกเหนือจากแบคกราวด์ (มีต้นกำเนิดนิวตรอนแต่ไม่มีตัวอย่าง) คือ Al - 27 จากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงาน 843.4, 1013.2 keV และ อะลูมิเนียม-28 จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนและปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาตามอัตราการสลายตัว มีพลังงาน 1776.0 keV สังเกตได้จากจำนวนนับมีจำนวนมากขึ้นกว่าแบคกราวด์มาก เนื่องจากในระบบที่ทำการวิเคราะห์มีโลหะอะลูมิเนียมประกอบอยู่ที่ส่วนห่อหุ้มหัววัดรังสี HPGe

4.3.3 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างแผ่นเหล็ก ขนาดกว้าง 30.0 ซม. สูง 30.0 ซม. หนา 0.6 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างแผ่นเหล็ก

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
122.4 *	⁵⁶ Fe (Capture)	1459.0	⁴⁰ K
352.5*	⁵⁶ Fe(Capture)	1590.3	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl (D)
537.3	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1610.4*	⁵⁶ Fe (Capture)
510.8	Annihilation	1709.9	¹ H (Capture, S)
569.1	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1723.3*	⁵⁶ Fe (Capture)
582.5	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1776.0	²⁸ Al (decay)
595.8	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1807.8*	⁵⁶ Fe (Inelastic)
608.4	²¹⁴ Bi	2220.1	¹ H (Capture)
802.4	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	2610.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
845.9*	⁵⁶ Fe (Inelastic)	4892.4*	⁵⁶ Fe (Capture, D)
867.2	⁷⁴ Ge (Inelastic)	4990.3*	⁵⁶ Fe (Capture, D)
879.4	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	5401.8*	⁵⁶ Fe (Capture, S)
1013.2	²⁷ Al (Inelastic)	5501.3*	⁵⁶ Fe (Capture, S)
1199.7	¹ H (Capture, D)	5914.5*	⁵⁶ Fe (Capture)
1236.5*	⁵⁶ Fe (Inelastic)	6021.2*	⁵⁶ Fe (Capture)

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

4.3.4 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.0 ซม. สูง 9.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างทองแดง

พลังงาน(keV)	ธาตุ(ปฏิกิริยา)	พลังงาน(keV)	ธาตุ(ปฏิกิริยา)
160.5 *	⁶³ Cu(Capture)	879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)
278.7*	⁶³ Cu (Capture)	910.3	²²⁸ Ac
477.6	¹⁰ B(Capture)	961.3*	⁶³ Cu (Inelastic)
510.7	Annihilation	1013.1	²⁷ Al (Inelastic)
537.1	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1113.4*	⁶⁵ Cu(Inelastic)
569.4	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1199.3	¹ H(Capture, D)
583.0	²⁰⁸ Pb(Inelastic)	1324.3*	⁶³ Cu(Inelastic)
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1457.7	⁴⁰ K
608.5	²¹⁴ Bi	1709.4	¹ H(Capture, S)
669.7*	⁶³ Cu(Inelastic)	1775.2	²⁸ Al (decay)
802.3	²⁰⁶ Pb(Inelastic)	2218.6	¹ H(Capture)
842.3	²⁷ Al (Inelastic)	2608.8	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
866.9	⁷⁴ Ge (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

4.3.5 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างดีบุก น้ำหนัก 2600 กรัม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 พิคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างดีบุก

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
478.4	^{10}B (Capture)	1013.1	^{27}Al (Inelastic)
510.7	Annihilation	1169.6*	^{120}Sn (Inelastic)
537.1	^{206}Pb (Inelastic)	1199.3	^1H (Capture, D)
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1227.4*	^{118}Sn (Inelastic)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1291.1*	^{116}Sn (Inelastic)
596.7	^{74}Ge (Inelastic)	1458.6	^{40}K
608.5	^{214}Bi	1588.7	^{208}Pb (Inelastic, D)
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	1709.4	^1H (Capture, S)
843.6	^{27}Al (Inelastic)	1775.7	^{28}Al (decay)
879.7	^{206}Pb (Inelastic)	2216.9	^1H (Capture)
910.3	^{228}Ac	2608.8	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl
968.13*	^{120}Sn (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.6 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างทองเหลือง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.5 ซม. สูง 13.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างทองเหลือง

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
278.7 *	⁶³ Cu (Capture)	1013.1	²⁷ Al (Inelastic)
478.4	¹⁰ B (Capture)	1113.4*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
510.7	Annihilation	1199.3	¹ H (Capture, D)
537.1	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1324.3*	⁶³ Cu (Inelastic)
569.4	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1409.3*	⁶³ Cu (Inelastic)
583.0	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1457.7	⁴⁰ K
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1479.0*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
608.5	²¹⁴ Bi	1543.6*	⁶³ Cu (Inelastic)
668.8*	⁶³ Cu (Inelastic)	1588.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl(D)
769.2*	⁶⁵ Cu (Inelastic)	1708.5	¹ H (Capture, S)
802.5	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1774.8	²⁸ Al (decay)
843.1	²⁷ Al (Inelastic)	1858.1*	⁶³ Cu (Inelastic)
879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	2099.6	²⁰⁸ Pb (Inelastic, S), ²⁰⁸ Tl(S)
909.4	²²⁸ Ac	2218.6	¹ H (Capture)
960.4*	⁶³ Cu (Inelastic)	2607.9	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
991.0*	⁶⁴ Zn (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

4.3.7 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) น้ำหนัก 500 กรัม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
478.4	^{10}B (Capture)	879.7	^{206}Pb (Inelastic)
510.7	Annihilation	910.4	^{228}Ac
516.7*	^{35}Cl (Capture)	1013.8	^{27}Al (Inelastic)
537.1	^{206}Pb (Inelastic)	1162.8*	^{35}Cl (Capture)
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1199.3	^1H (Capture, D)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1458.6	^{40}K
595.7	^{74}Ge (Inelastic)	1708.5	^1H (Capture, S)
608.5	^{214}Bi	1775.7	^{28}Al (decay)
787.9*	^{35}Cl (Capture)	1947.4*	^{40}Ca (Capture)
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	1955.4*	^{35}Cl (Capture)
843.1	^{27}Al (Inelastic)	2221.1	^1H (Capture)
866.9	^{74}Ge (Inelastic)	2609.6	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.8 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างสารเคมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) น้ำหนัก 100 กรัม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 3600 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 พิกพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างสารเคมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2)

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
510.2	Annihilation	910.5	^{228}Ac
536.6	^{206}Pb (Inelastic)	990.6*	^{64}Zn (Inelastic)
568.9	^{207}Pb (Inelastic)	1013.6	^{27}Al (Inelastic)
582.6	^{208}Pb (Inelastic)	1075.6*	^{67}Zn (Capture)
595.3	^{74}Ge (Inelastic)	1200.1	1H (Capture, D)
608.1	^{214}Bi	1459.6	^{40}K
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	1591.9	^{208}Pb (Inelastic, D), ^{208}Tl (D)
843.2	^{27}Al (Inelastic)	1711.2	1H (Capture, S)
845.8*	^{56}Fe (Inelastic)	1778.5	^{28}Al (decay)
867.6	^{74}Ge (Inelastic)	2222.3	1H (Capture)
879.8	^{206}Pb (Inelastic)	2613.3	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.9 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยโบรอน ขนาดกว้าง 23.0 ซม. สูง 22.0 ซม. หนา 6.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 พิกพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างปุ๋ยโบรอน

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
478.4	^{10}B (Capture)	910.3	^{228}Ac
510.7	Annihilation	1013.1	^{27}Al (Inelastic)
537.1	^{206}Pb (Inelastic)	1589.5	^{208}Pb (Inelastic, D), ^{208}Tl (D)
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1709.4	^1H (Capture, S)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1775.7*	^{28}Al (decay), ^{28}Si (Inelastic)
595.7	^{74}Ge (Inelastic)	1935.9*	^{28}Si (Inelastic)
608.5	^{214}Bi	1948.2*	^{40}Ca (Capture)
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	2098.7	^{208}Pb (Inelastic, S), ^{208}Tl (S)
843.1	^{27}Al (Inelastic)	2219.4	^1H (Capture)
867.8	^{74}Ge (Inelastic)	2609.6	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl
880.5	^{206}Pb (Inelastic)	3532.8*	^{28}Si (Capture)

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

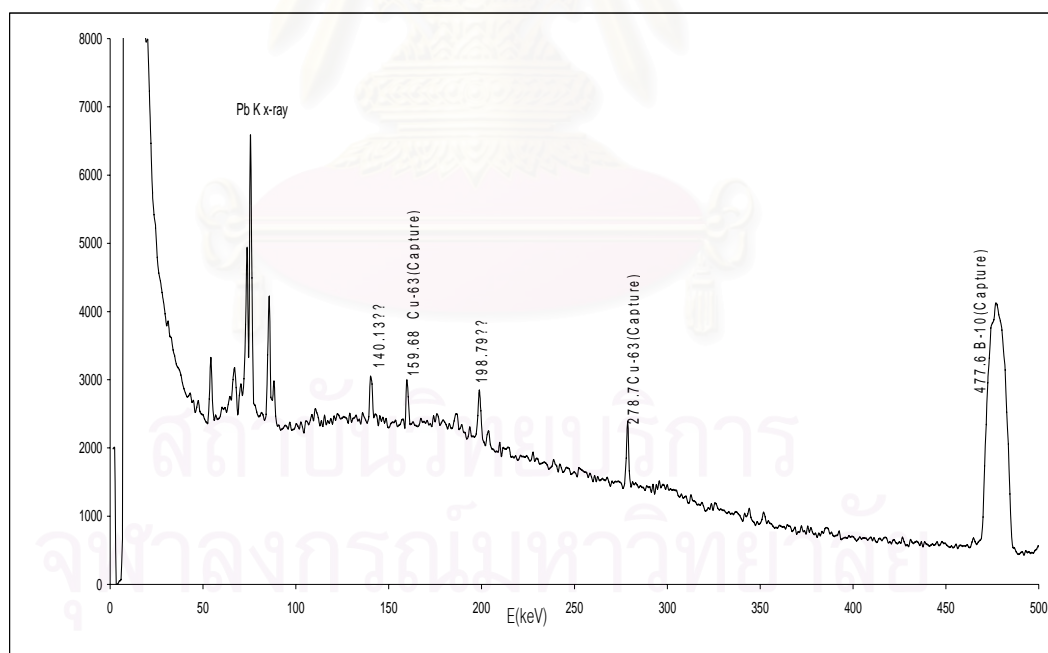
decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

ผลการทดลองพบว่าในปุ๋ยโบรอนประกอบไปด้วยซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ และมีแคลเซียมปริมาณหนึ่ง ทำให้ทราบว่าถ้าภายในตัวอย่างมีปุ๋ยโบรอนประกอบอยู่จะพบธาตุซิลิกอน กับแคลเซียม ซึ่งพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาของ Si-28 ที่ 1775.7 keV เป็นพลังงานค่าเดียวกับ Al-28 (ที่อยู่ในแบคกราวด์) แต่สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีค่าจำนวนนับมากขึ้นกว่าแบคกราวด์ และมีพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่ค่าอื่นๆ ของซิลิกอนมาช่วยยืนยันทำให้แน่ใจมากขึ้น

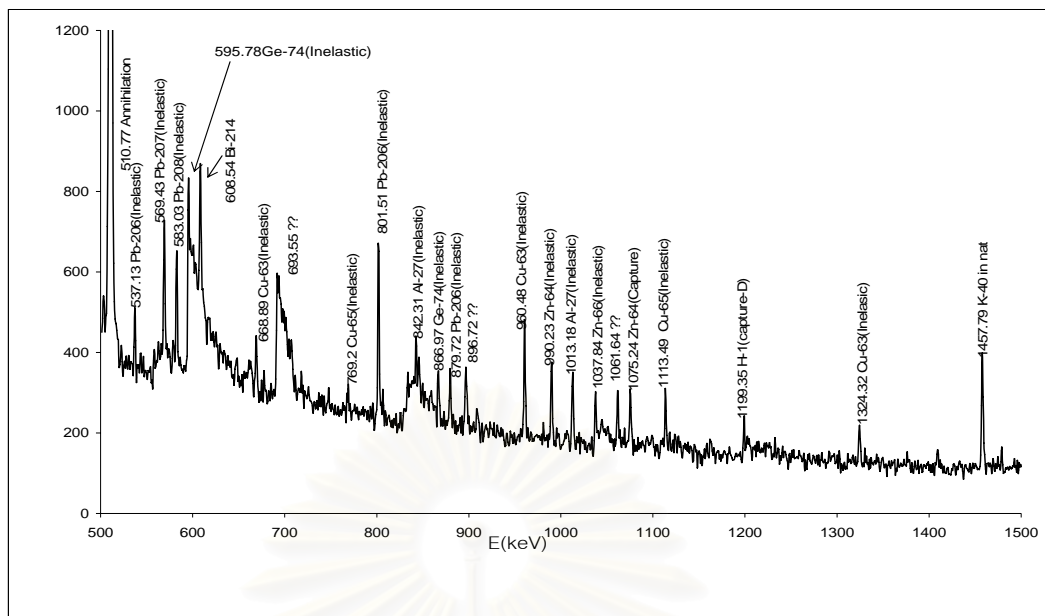
4.3.10 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 55.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.10 ภาพพระพุทธรูปโลหะทองเหลืองปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม.
สูง 55.0 ซม.



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลือง ช่วงพลังงาน 0 – 500 keV



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลือง ช่วงพลังงาน 500 – 1500 keV

ตารางที่ 4.18 พิกัดพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะทองเหลือง

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
159.6 *	⁶³ Cu (Capture)	960.4*	⁶³ Cu (Inelastic)
278.7*	⁶³ Cu (Capture)	990.2*	⁶⁴ Zn (Inelastic)
477.6	¹⁰ B (Capture)	1013.1	²⁷ Al (Inelastic)
510.7	Annihilation	1037.8*	⁶⁶ Zn (Inelastic)
537.1	²⁰⁶ Pb(Inelastic)	1075.2*	⁶⁷ Zn (Capture)
569.4	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1113.4*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
583.0	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1199.3	¹ H (Capture, D)
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1324.3*	⁶³ Cu (Inelastic)
608.5	²¹⁴ Bi	1457.7	⁴⁰ K
668.8*	⁶³ Cu (Inelastic)	1588.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl (D)
693.5	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1709.4	¹ H (Capture, S)
769.2*	⁶⁵ Cu (Inelastic)	1774.8	²⁸ Al (decay)
801.5	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	2098.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic, S), ²⁰⁸ Tl (S)
842.3	²⁷ Al (Inelastic)	2218.6	¹ H (Capture)
866.9	⁷⁴ Ge (Inelastic)	2608.8	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับ

นิวตรอน

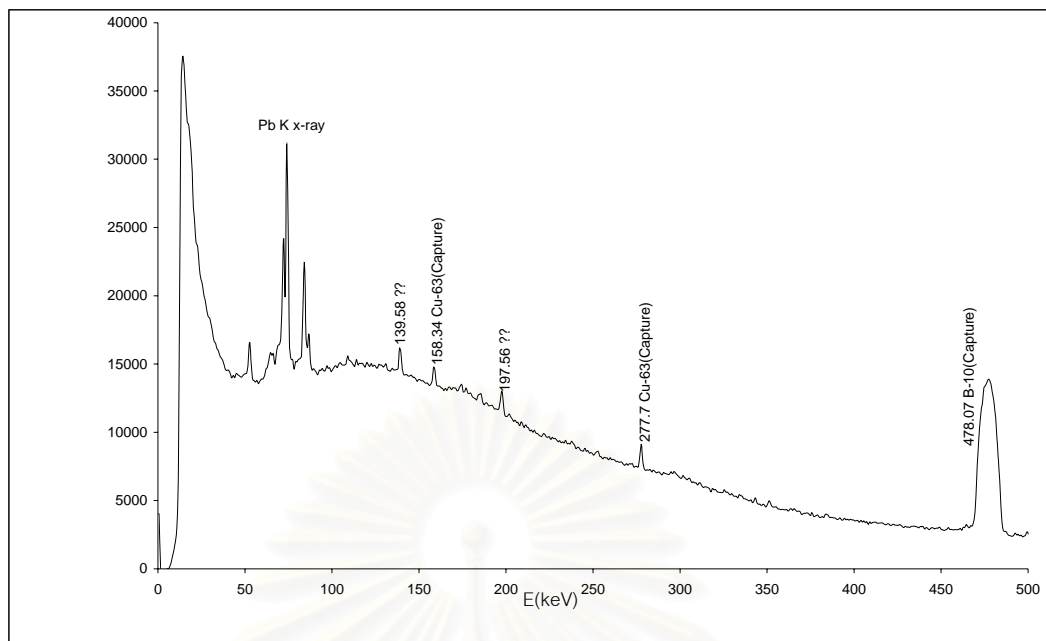
จากพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่าตัวอย่างพระพุทธรูป ประกอบด้วย โลหะทองแดง และสังกะสี โลหะทั้งสองรวมกันเรียกว่าโลหะทองเหลือง ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่า พระพุทธรูปองค์นี้คือพระพุทธรูปทองเหลือง

4.3.11 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4000 วินาที ผลของการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4.19

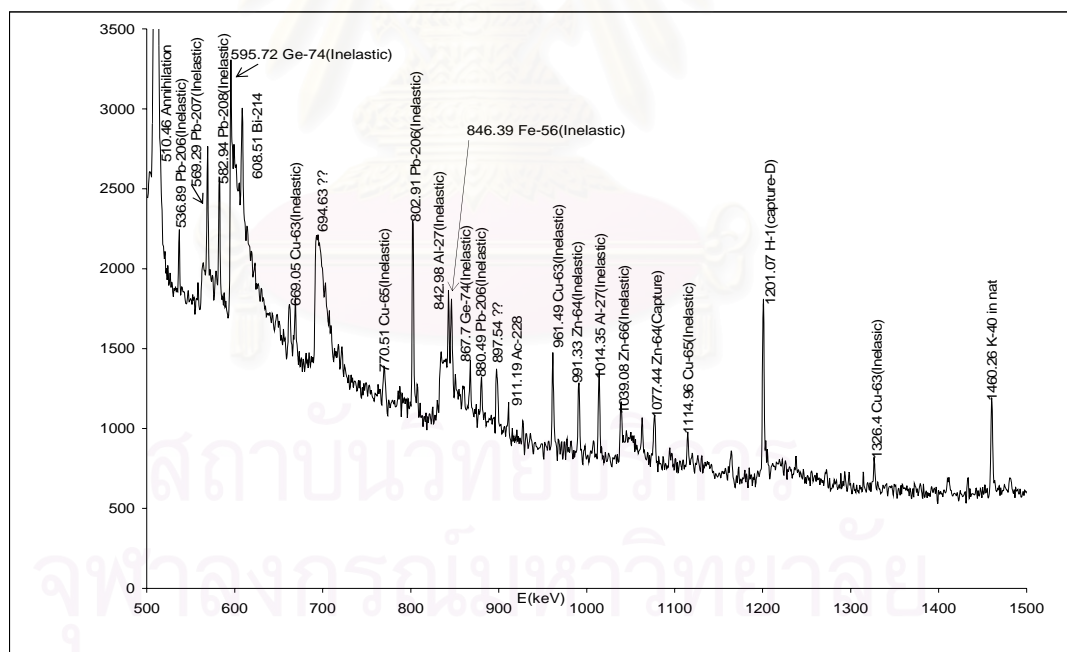


รูปที่ 4.13 ภาพพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 22.0 ซม. สูง 49.0 ซม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ช่วงพลังงาน 0 – 500 keV



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะผสมปางมารวิชัย ช่วงพลังงาน 500 – 1500 keV

ตารางที่ 4.19 พีคพลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะผสม
ปางมารวิชัย

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
158.3 *	⁶³ Cu (Capture)	911.1	²²⁸ Ac
277.7*	⁶³ Cu (Capture)	961.4*	⁶³ Cu (Inelastic)
478.0	¹⁰ B (Capture)	991.3*	⁶⁴ Zn (Inelastic)
510.4	Annihilation	1014.5	²⁷ Al (Inelastic)
536.8	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1039.0*	⁶⁶ Zn (Inelastic)
569.2	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1077.4*	⁶⁷ Zn (Capture)
582.9	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1114.9*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1201.0	¹ H (Capture, D)
608.5	²¹⁴ Bi	1326.4*	⁶³ Cu (Inelastic)
669.0*	⁶³ Cu (Inelastic)	1460.2	⁴⁰ K
770.5*	⁶⁵ Cu (Inelastic)	1592.4	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl (D)
802.9	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1711.7	¹ H(Capture, S)
842.9	²⁷ Al (Inelastic)	1779.1	²⁸ Al (decay)
846.3*	⁵⁶ Fe (Inelastic)	2223.3	¹ H (Capture)
867.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	2614.6	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
880.4	²⁰⁶ Pb (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

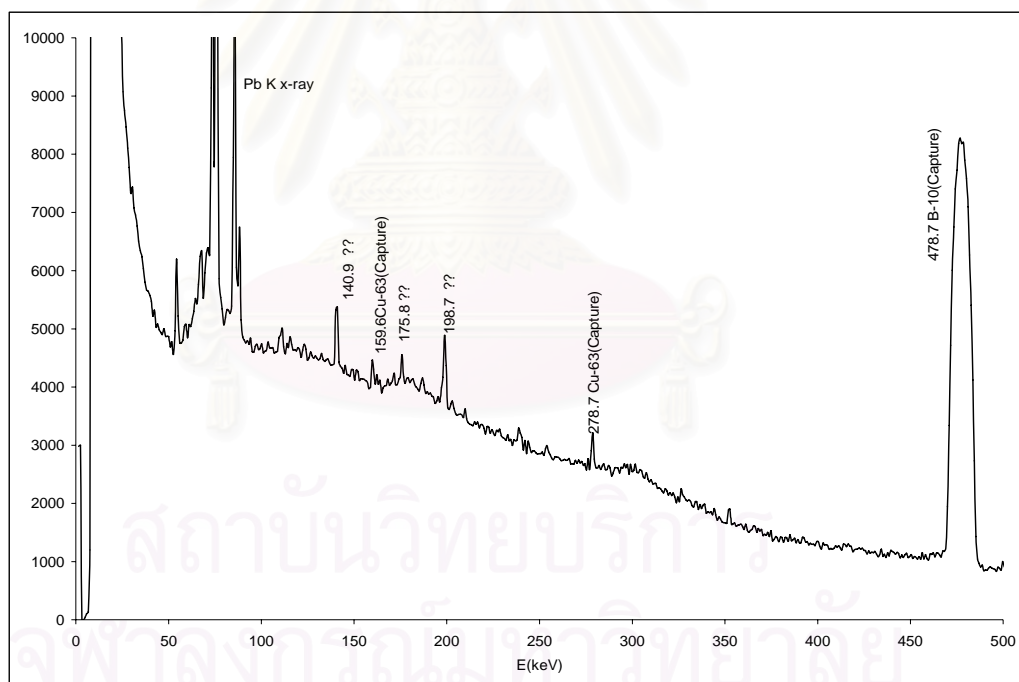
S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับ
นิวตรอน

จากพลังงานรังสีฟอตอนต์แกมมาที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่าตัวอย่างพระพุทธรูป ประกอบด้วยโลหะทองแดง สังกะสี เป็นส่วนประกอบหลักและมีเหล็กในปริมาณหนึ่ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าพระพุทธรูปองค์นี้เป็นโลหะทองเหลือง เพราะมีโลหะทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก แต่จากการสังเกตรูปลักษณะของโลหะภายนอกของพระพุทธรูปแล้ว ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นโลหะประเภทใด เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีฟอตอนต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นแล้ว สามารถระบุถึงประเภทของโลหะได้อย่างแน่นอน

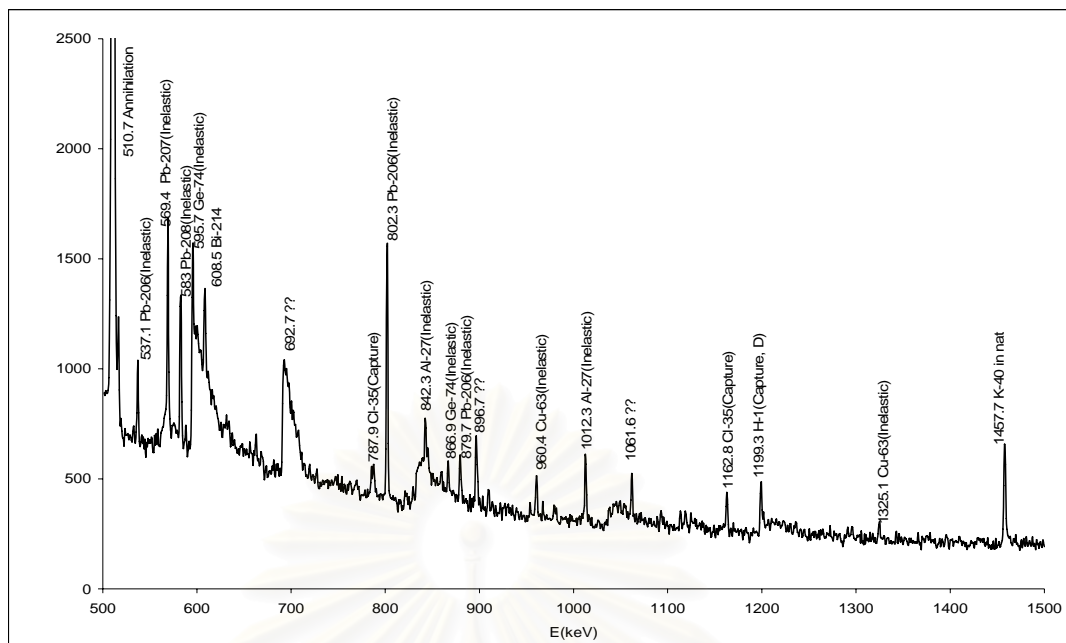
4.3.12 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 3000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.20



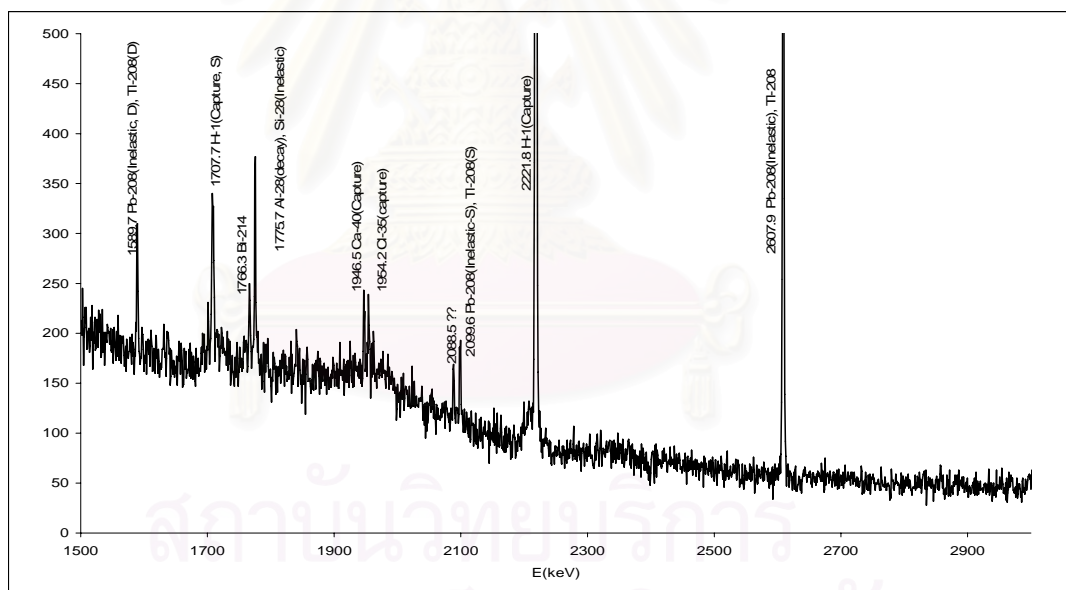
รูปที่ 4.16 ภาพพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย ขนาดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม.



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริดช่วงพลังงาน 0 - 500 keV



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมรังสีฟอตอนดีแกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริดช่วงพลังงาน 500 - 1500 keV



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมรังสีฟอตอนดีแกมมาของพระพุทธรูปโลหะสำริดช่วงพลังงาน 1500 - 3000 keV

ตารางที่ 4.20 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะสำริดปางมารวิชัย

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
159.6 *	⁶³ Cu (Capture)	1012.3	²⁷ Al (Inelastic)
278.7*	⁶³ Cu (Capture)	1162.8*	³⁵ Cl (Capture)
478.7	¹⁰ B (Capture)	1199.0	¹ H (Capture, D)
510.7	Annihilation	1325.1*	⁶³ Cu (Inelastic)
537.1	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1457.7	⁴⁰ K
569.4	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1589.7	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl (D)
583.0	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1707.7	¹ H (Capture, S)
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1775.7	²⁸ Al (decay)
608.5	²¹⁴ Bi	2223.3	¹ H (Capture)
787.9*	³⁵ Cl (Capture)	1946.5*	⁴⁰ Ca (Capture)
802.0	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1954.2*	³⁵ Cl (Capture)
842.3	²⁷ Al (Inelastic)	2099.6	²⁰⁸ Pb (Inelastic, S), ²⁰⁸ Tl (S)
866.9	⁷⁴ Ge (Inelastic)	2223.3	¹ H (Capture)
879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	2614.6	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
960.4*	⁶³ Cu (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

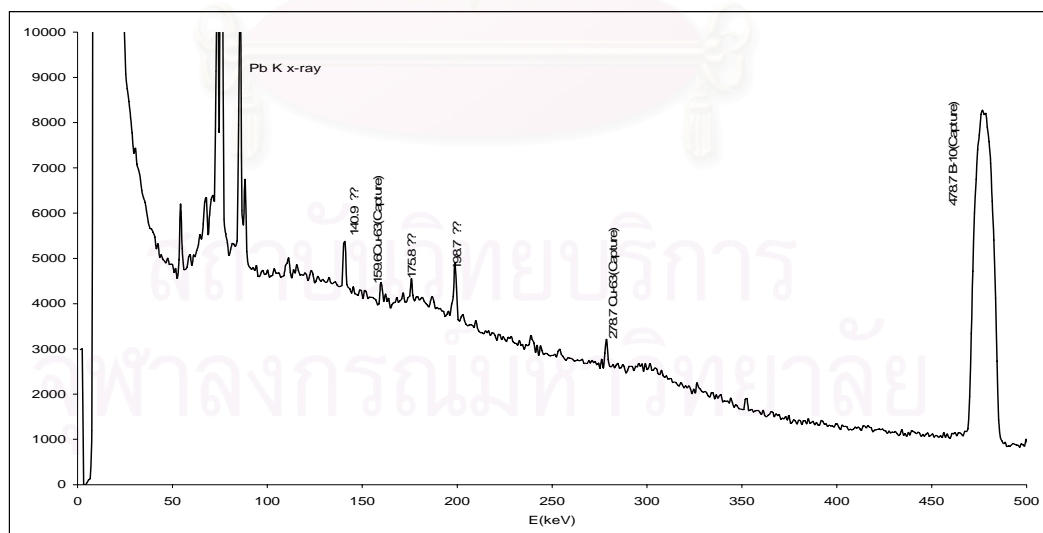
จากพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่าตัวอย่างพระพุทธรูป ประกอบด้วยโลหะทองแดง เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ตามประวัติที่มีการบันทึกไว้ว่าเป็นพระพุทธรูปสำริดสมัยอยุธยา ดังนั้นควรมีโลหะดีบุกผสมอยู่ด้วย แต่ในการวิเคราะห์ไม่สามารถวัดพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น และการจับนิวตรอนของโลหะดีบุกได้ สาเหตุที่ไม่พบพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมา คืออัตราส่วนผสมของโลหะดีบุกในโลหะผสมนี้มีปริมาณน้อยประกอบกับค่าภาคตัดขวาง ของการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโลหะดีบุกมีค่าน้อยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนมีโอกาสเกิดน้อยกว่า โอกาสในการเกิดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโลหะทองแดง สำหรับพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาของคลอรีนที่พบในตัวอย่างพระพุทธรูปสำริดนั้น เกิดจากอนุภาคมูลคโลไรด์ที่อยู่ในดินภายในองค์พระพุทธรูปหรืออนุภาคมูลคโลไรด์ในบริเวณที่วัตถุฝังอยู่ทำปฏิกิริยา กับโลหะทองแดงแล้วกลายเป็น

สารประกอบ copper chlorides เป็นสนิมสีเขียวอ่อนที่เกิดขึ้นได้ กับศิลปโบราณวัตถุประเภทสำริด จะสังเกตเห็นที่ผิวของวัตถุเป็นขุยสีเขียวอ่อนเกิดขึ้นเป็นจุดๆ และภายในพระพุทธรูปสำริดได้ขึ้นโลหะนั้นเป็นดิน เพราะพบพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาของธาตุซีลีเนียม และธาตุแคลเซียม

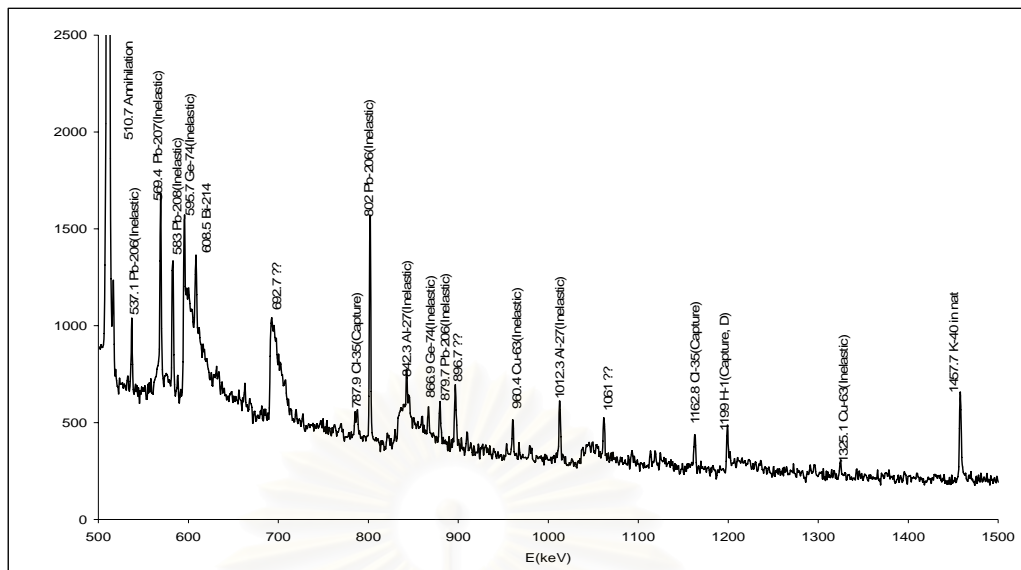
4.3.13 การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างระฆังสำริด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 2000 วินาที ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.21



รูปที่ 4.20 ภาพระฆังสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม. สูง 8.0 ซม.



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของระฆังสำริดช่วงพลังงาน 0 - 500 keV



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของระฆังสำริดช่วงพลังงาน 500 - 1500 keV

ตารางที่ 4.21 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากระฆังสำริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 ซม

สูง 8.0 ซม.

พลังงาน (keV)	ธาตุ (อันตรกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (อันตรกิริยา)
278.7 *	^{63}Cu (Capture)	879.2	^{206}Pb (Inelastic)
477.6	^{10}B (Capture)	960.4*	^{63}Cu (Inelastic)
510.7	Annihilation	1013.1	^{27}Al (Inelastic)
537.1	^{206}Pb (Inelastic)	1113.4*	^{65}Cu (Inelastic)
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1198.5	^1H (Capture, D)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1457.7	^{40}K
595.7	^{74}Ge (Inelastic)	1709.4	^1H (Capture, S)
608.5	^{214}Bi	1760.4	^{214}Bi
661.2	^{206}Pb (Inelastic)	1774.8	^{28}Al (decay)
668.8*	^{63}Cu (Inelastic)	2098.7	^{208}Pb (Inelastic, S), ^{208}Tl (S)
802.3	^{206}Pb (Inelastic)	2218.6	^1H (Capture)
842.3	^{27}Al (Inelastic)	2608.8	^{208}Pb (Inelastic), ^{208}Tl
866.9	^{74}Ge (Inelastic)		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับ

นิวตรอน

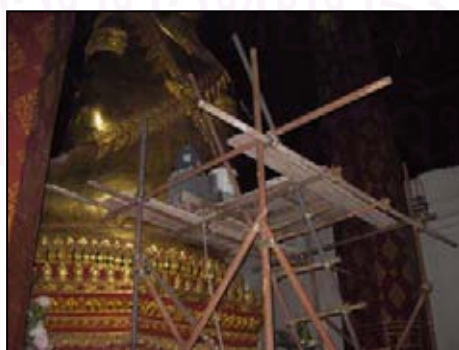
จากพลังงานรังสีพหุสเปกตรัมที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่าตัวอย่างระฆังสำริด ประกอบด้วย โลหะทองแดงเป็นส่วนประกอบใหญ่ แต่ไม่สามารถวิเคราะห์โลหะดีบุกที่เป็นส่วนผสมในโลหะ สำริดได้ ผลการทดลองเหมือนกับตัวอย่างพระพุทธรูปโลหะสำริด และเหตุผลที่ไม่สามารถ วิเคราะห์โลหะดีบุกได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4 ผลการทดลองการวัดความเข้มข้นรังสีพหุสเปกตรัมจากตัวอย่างโบราณวัตถุขนาดใหญ่ติดที่

การทดลองภาคสนามเพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ในโบราณวัตถุ ขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นพระประธานที่ประดิษฐานในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จังหวัด พระนครศรีอยุธยา ที่มีขนาดหน้าตัก 9 ศอก สูง 6.0 เมตร เป็นพระพุทธรูปทรงเครื่อง พระมหากษัตริย์ปางมารวิชัย หล่อด้วยทองสำริดภายนอกฉาบด้วยปูนโบราณ ลงรักปิดทอง พระองค์อินทร์ในสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 2 รัชกาลที่ 10 แห่งกรุงศรีอยุธยา ทรงสร้างเมื่อพ.ศ. 2046 สมัยอยุธยาตอนต้น ซึ่งทำการวิเคราะห์ 2 จุด ได้ผลการทดลองดังนี้

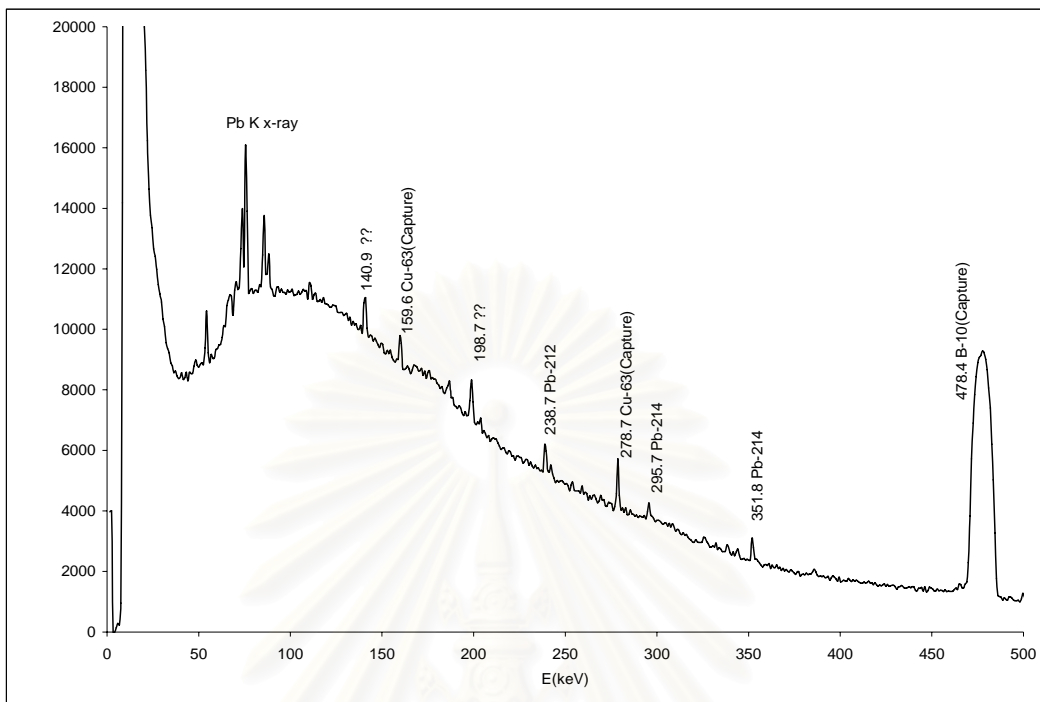


รูปที่ 4.23 ภาพพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จ.พระนครศรีอยุธยา

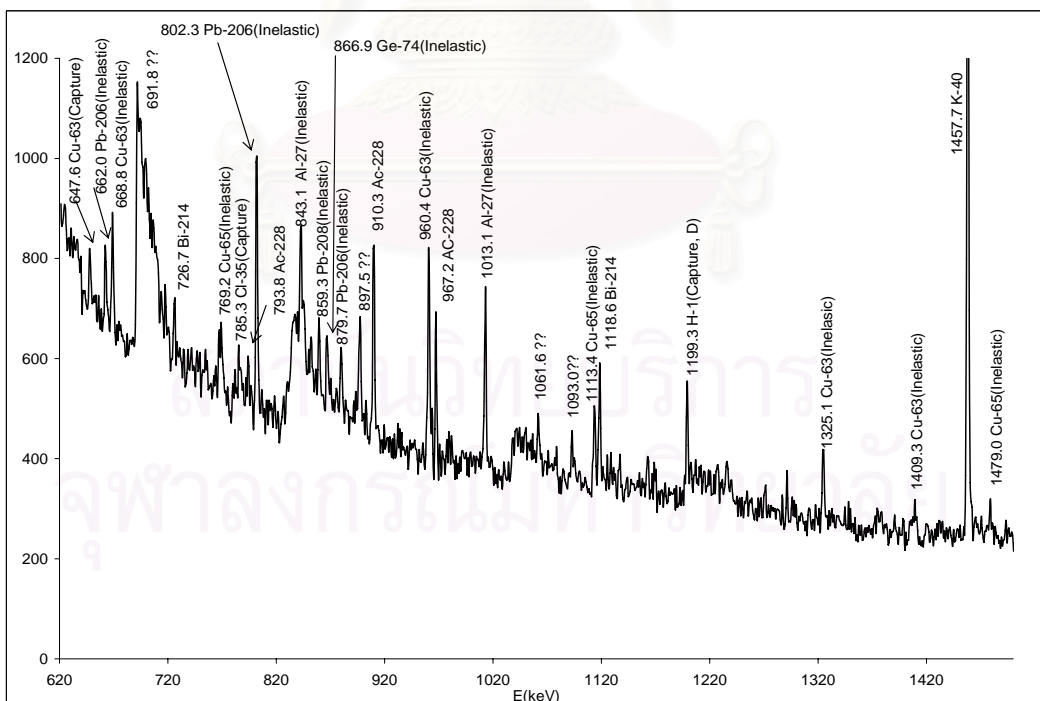


รูปที่ 4.24 ภาพระบบที่จัดเพื่อวิเคราะห์ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) พระพุทธรูปนิมิตวิชิตมารโมลีศรี สรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ ในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ

4.4.1 จุดที่ 1 การวิเคราะห์วัดรังสีฟอตอนต์แกมมา ด้านพระปฐมภูก (หลัง) ของพระประธาน ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4000 วินาที ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.22



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 1) ช่วงพลังงาน 0 - 500 keV



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 1) ช่วงพลังงาน 620 - 1500 keV

ตารางที่ 4.22 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายใน พระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จ.พระนครศรีอยุธยา (จุดที่ 1)

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
159.6 *	⁶³ Cu (Capture)	879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)
238.7	²¹² Pb	910.3	²²⁸ Ac
278.7*	⁶³ Cu (Capture)	960.4*	⁶³ Cu (Inelastic)
295.7	²¹⁴ Pb	967.2	²²⁸ Ac
351.8	²¹⁴ Pb	1013.1	²⁷ Al (Inelastic)
478.4	¹⁰ B (Capture)	1113.4*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
510.7	Annihilation	1118.6	²¹⁴ Bi
569.4	²⁰⁷ Pb (Inelastic)	1199.3	¹ H (Capture, D)
583.0	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	1325.1*	⁶³ Cu (Inelastic)
595.7	⁷⁴ Ge (Inelastic)	1409.3*	⁶³ Cu (Inelastic)
608.5	²¹⁴ Bi	1457.7	⁴⁰ K
647.6*	⁶³ Cu (Capture)	1479.0*	⁶⁵ Cu (Inelastic)
662.0	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1589.5	²⁰⁸ Pb (Inelastic, D), ²⁰⁸ Tl (D)
668.8*	⁶³ Cu (Inelastic)	1708.5	¹ H (Capture, S)
726.7	²¹⁴ Bi	1761.2	²¹⁴ Bi
769.2*	⁶⁵ Cu (Inelastic)	1775.7	²⁸ Al
785.3*	³⁵ Cl (Capture)	1938.9*	²⁸ Si (Inelastic)
793.8	²²⁸ Ac	1948.2*	⁴⁰ Ca (Capture)
802.3	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	2097.9	²⁰⁸ Pb (Inelastic, S), ²⁰⁸ Tl (S)
842.3	²⁷ Al (Inelastic)	2221.1	¹ H (Capture)
859.3	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	2608.8	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
866.9	⁷⁴ Ge (Inelastic)	3532.0*	²⁸ Si (Capture)

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับ

นิวตรอน

จากพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นมีโลหะทองแดง เป็นส่วนประกอบหลักใน ตัวอย่างที่อยู่ลึกเข้าไปได้ชั้นที่ทำการลงรักปิดทอง จากประวัติของพระพุทธรูปองค์นี้ระบุว่าเป็น พระพุทธรูปสำริดมีการโอบกปูนก่อนที่จะลงรักปิดทองการวิเคราะห์ด้วย เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์

แกมมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เป็นการยืนยันได้ว่าภายใต้ทองคำที่ปิดองค์อยู่มีโลหะทองแดง แต่ไม่พบพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาของโลหะดีบุก การที่โลหะดีบุกมีความไวต่อเทคนิคนี้ต่ำ เนื่องจากปริมาณโลหะดีบุกในตัวอย่างมีน้อยทราบได้ จากประวัติการผลิตพระพุทธรูปสมัยโบราณ จะมีการเติมโลหะดีบุกเพื่อผสมกับโลหะทองแดงให้เป็นสำริด เพียงไม่เกิน 20 % เท่านั้น เมื่อทำการคำนวณหาอัตราการผลิตปฏิกิริยาการจับนิวตรอนจึงน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะทองแดง ดังแสดงการคำนวณในภาคผนวก ก. และภายในองค์พระพุทธรูปพบซิลิกอน กับแคลเซียม ทำให้เป็นการยืนยันว่ามีการขบปูนโบราณ แต่โลหะทองคำที่ปิดองค์พระพุทธรูปนั้นไม่พบพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาในสเปกตรัม เพราะว่าทองคำที่ปิดนั้นบางมาก ทำให้นิวตรอนทะลุผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาภายใน นิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวขององค์พระพุทธรูป

4.4.2 วิเคราะห์รังสีแกมมาหลังจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หลังจากนำต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรงแรงรังสี 500 มิลลิวูรี่ ออกจากภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันที ของจุดวิเคราะห์ที่ 1 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 พีกพลังงานของรังสีแกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากจุดวิเคราะห์ที่ 1

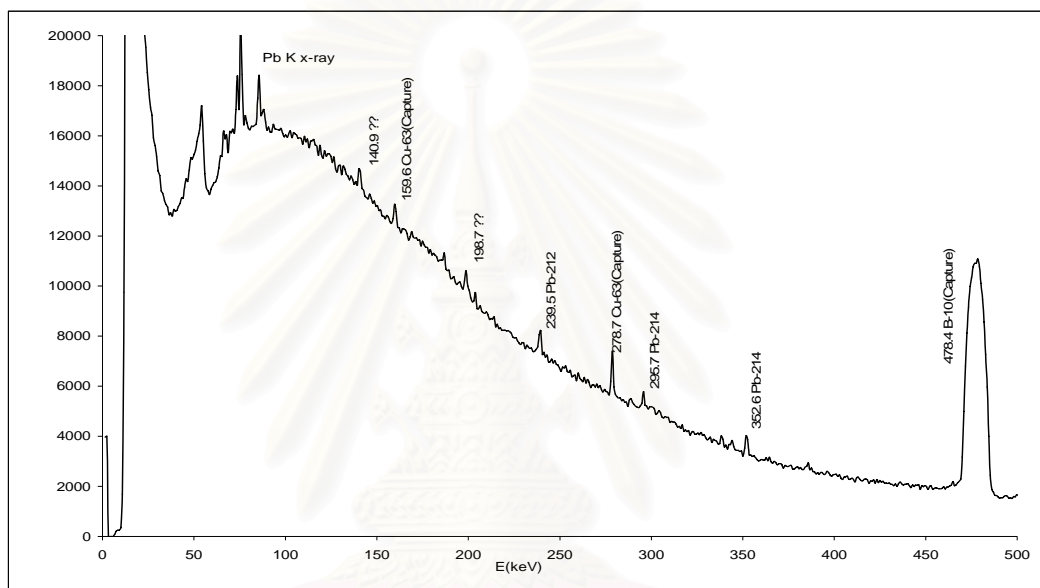
พลังงาน (keV)	ธาตุ	พลังงาน (keV)	ธาตุ
239.5	^{212}Pb	963.0	^{228}Ac
295.7	^{214}Pb	968.1	^{228}Ac
338.2	^{228}Ac	1037.8*	^{66}Cu
351.8	^{214}Pb	1118.6	^{214}Bi
510.7	Annihilation	1236.7	^{214}Bi
583.0	^{208}Tl	1375.3	^{214}Bi
608.5	^{214}Bi	1457.7	^{40}K
726.7	^{212}Bi	1585.3	^{228}Ac
767.5	^{214}Bi	1589.7	^{208}Tl (D)
793.8	^{228}Ac	1761.2	^{214}Bi
860.1	^{208}Tl	1775.7	^{28}Al
843.1	^{228}Ac	2101.3	^{208}Tl (S)
909.4	^{228}Ac	2608.8	^{208}Tl

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

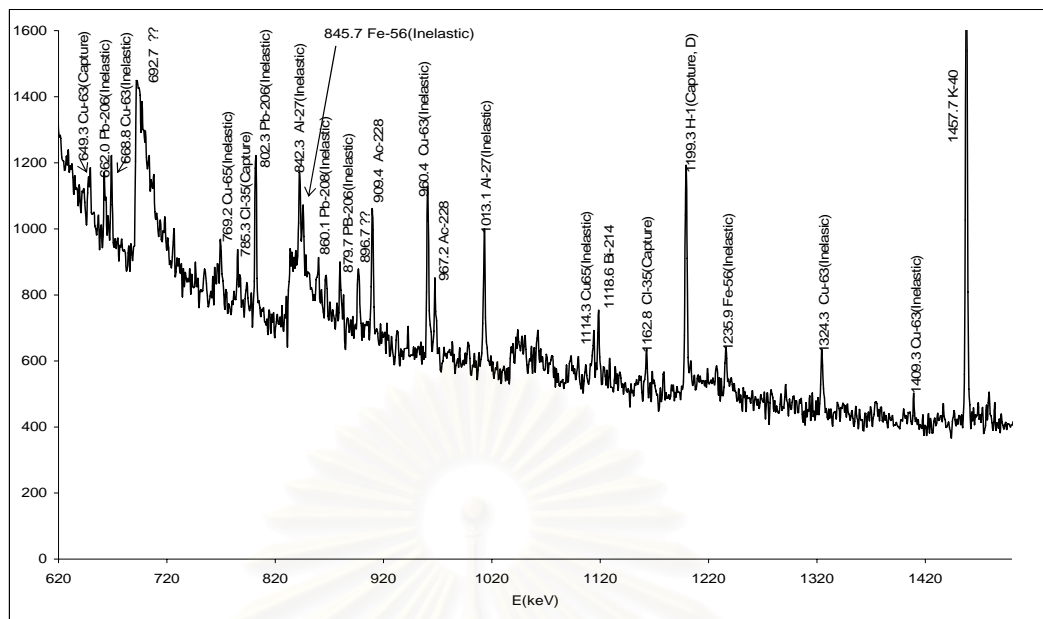
พลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจาก Neutron activation ที่พบคือ Cu-66 มาจากโลหะทองแดงที่เป็นส่วนประกอบของโลหะภายใต้ชั้นทอง และช่วยยืนยันพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปพลังงานรังสีแกมมาเป็นของรังสีแกมมาจากอัตราการสลายตัวที่พบในธรรมชาติ ได้แก่อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม

4.4.3 จุดที่ 2 การวิเคราะห์วัดรังสีพรอมต์แกมมา ด้านพระปฤษฎางค์ (หลัง) ของพระประธาน ซึ่งสูงขึ้นมาจากจุดแรก 40.0 เซนติเมตร ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4000 วินาที ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 2) ช่วงพลังงาน 0 - 500 keV

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ (จุดที่ 2) ช่วงพลังงาน 620 - 1500 keV

ตารางที่ 4.24 พิกัดพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายในพระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จ.พระนครศรีอยุธยา (จุดที่ 2)

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
159.6 *	^{63}Cu (Capture)	960.4*	^{63}Cu (Inelastic)
239.5	^{212}Pb	967.2	^{228}Ac
278.7*	^{63}Cu (Capture)	1013.1	^{27}Al (Inelastic)
295.7	^{214}Pb	1114.3*	^{65}Cu (Inelastic)
351.6	^{214}Pb	1118.6	^{214}Bi
478.4	^{10}B (Capture)	1162.8*	^{35}Cl (Capture)
510.7	Annihilation	1199.3	^1H (Capture, D)
569.4	^{207}Pb (Inelastic)	1235.9*	^{56}Fe (Inelastic)
583.0	^{208}Pb (Inelastic)	1324.3*	^{63}Cu (Inelastic)
595.7	^{74}Ge (Inelastic)	1409.3*	^{63}Cu (Inelastic)
608.5	^{214}Bi	1457.7	^{40}K
649.3*	^{63}Cu (Capture)	1588.7	^{208}Pb (Inelastic, D), ^{208}Tl (D)

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak

ตารางที่ 4.25 พีคพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่างพระพุทธรูปทรงเครื่อง ภายใน พระอุโบสถ วัดหน้าพระเมรุ จ.พระนครศรีอยุธยา (จุดที่ 2)

พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)	พลังงาน (keV)	ธาตุ (ปฏิกิริยา)
662.0	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1708.5	¹ H (Capture, S)
668.8*	⁶³ Cu (Inelastic)	1761.2	²¹⁴ Bi
769.2*	⁶⁵ Cu (Inelastic)	1774.8	²⁸ Al(decay)
785.3*	³⁵ Cl (Capture)	1938.9*	²⁸ Si (Inelastic)
802.3	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	1948.2*	⁴⁰ Ca (Capture)
842.3	²⁷ Al (Inelastic)	1955.0*	³⁵ Cl (Capture)
845.7*	⁵⁶ Fe(Inelastic)	2221.1	¹ H (Capture)
860.1	²⁰⁸ Pb (Inelastic)	2608.8	²⁰⁸ Pb (Inelastic), ²⁰⁸ Tl
879.7	²⁰⁶ Pb (Inelastic)	3532.0*	²⁸ Si (Capture)
909.4	²²⁸ Ac		

* แทนพลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่พบจากตัวอย่าง

S = single escape peak, D = double escape peak, decay = การสลายตัวหลังจากจับนิวตรอน

จากพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่วิเคราะห์ได้นั้นพบเพียงโลหะทองแดง แต่ไม่พบโลหะดีบุก เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ผลการทดลองใกล้เคียงกัน จุดที่ 2 พบว่าภายใต้ทองคำที่ปิดองค์พระเป็นโลหะทองแดงเป็นส่วนใหญ่ มีปูนฉาบโบราณอยู่ภายใน แต่ที่แตกต่างจากจุดที่ 1 คือพบเหล็ก และคลอรีนปริมาณหนึ่ง ความเป็นไปได้ที่จะพบธาตุทั้งสองคือ คลอรีนอาจปะปนอยู่ในดินภายในองค์พระพุทธรูป หรือส่วนประกอบที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิตองค์พระพุทธรูป ส่วนเหล็กนั้นอาจมาจากส่วนประกอบในโลหะใต้ชั้นผิวทองคำ การผลิตมีการใช้แกนเหล็ก หรืออาจปะปนในดินที่เป็นส่วนประกอบที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิตองค์พระพุทธรูป

4.4.4 วิเคราะห์รังสีแกมมาหลังจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หลังจากนำต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิคูรี ออกจากภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันทีของจุดวิเคราะห์ที่ 2 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 พิกพลังงานของรังสีแกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากจุดวิเคราะห์ที่ 2

พลังงาน (keV)	ธาตุ	พลังงาน (keV)	ธาตุ
238.7	^{212}Pb	932.4	^{214}Bi
295.7	^{214}Pb	963.0	^{228}Ac
338.2	^{228}Ac	967.2	^{228}Ac
351.8	^{214}Pb	1118.6	^{214}Bi
510.7	Annihilation	1235.9	^{214}Bi
583.0	^{208}Tl	1375.3	^{214}Bi
608.5	^{214}Bi	1457.7	^{40}K
726.7	^{212}Bi	1584.4	^{228}Ac
767.5	^{214}Bi	1589.5	^{208}Tl (D)
793.8	^{228}Ac	1761.2	^{214}Bi
859.3	^{208}Tl	2099.6	^{208}Tl (S)
909.4	^{228}Ac	2608.8	^{208}Tl

S = single escape peak, D = double escape peak

รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นไม่พบจาก Neutron activation พบเพื่อแต่รังสีแกมมาจากอัตราการสลายตัวที่พบในธรรมชาติ ได้แก่อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 วิจารณ์ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา หลังจากเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในระดับที่ลึกลงไปจากผิวของตัวอย่าง แต่ความไวในการวิเคราะห์ของธาตุแต่ละตัวขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของธาตุนั้นๆ และปริมาณที่มีอยู่ในโลหะผสมนั้น

การวิเคราะห์โลหะสำริดทั้งในห้องปฏิบัติการ และภาคสนามไม่สามารถวิเคราะห์โลหะดีบุกได้เนื่องจากโลหะดีบุกที่มีการเติมลงไปโลหะผสมมีปริมาณน้อย และจากการค้นคว้าพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปการเติมดีบุกจะถูกลดปริมาณลง ซึ่งตัวอย่างสำริดสมัยแรกๆที่ได้จากโนนนกทา และจากบ้านเชียงมีปริมาณดีบุกประมาณ 6 % ถึง 20 % [18]

ตารางที่ 5.1 ปริมาณโลหะทองแดงและโลหะดีบุกในตัวอย่างศิลปโบราณวัตถุสำริดของประเทศไทย [19]

โลหะ	ปริมาณ (%)			
	ศิลปแบบเขมร พุทธศตวรรษที่ 17-18	ศิลปะทางเหนือของไทย พุทธ ศตวรรษที่ 20	พระพุทธรูปปางมารวิชัย สมัยอยุธยาพุทธ ศตวรรษที่ 20-21	พระพุทธรูป สมัยใหม่
ทองแดง	75.4	76.4	72.4	65.1
ดีบุก	17.1	11.7	8.7	0.6

การวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งสองจุดนั้นไม่สามารถวิเคราะห์ทองคำที่ปิดที่ผิวของพระพุทธรูปได้ เนื่องจากทองคำที่ปิดนั้นใช้ทองคำเปลวที่มีความหนาเพียง 0.1 ไมโครเมตร ปิดประมาณ 4 - 5 ชั้น ความหนาทั้งหมดคือ 0.5 ไมโครเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้ เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งถ้าได้มี

การศึกษาต่อไปจะมีประโยชน์มาก เนื่องจากเทคนิคนี้ไม่ทำลายตัวอย่างจึงเหมาะสมมากที่สุดที่นำมาใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นศิลปโบราณวัตถุที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง จึงมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้คือ

5.2.1 การออกแบบภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาสำหรับออกงานภาคสนาม มีจุดประสงค์เพื่อลดทอนพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีโดยใช้น้ำ เนื่องจากสาเหตุความปลอดภัยที่จะนำไปใช้งานในภาคสนาม คือพระอุโบสถ หน้าวัดพระเมรุ ซึ่งมีผู้เข้าชมตลอดเวลา ทำให้ปฏิกิริยาที่สนใจจึงเป็นปฏิกิริยาการจับนิวตรอน แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแล้ว พบว่ามีพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นด้วย แสดงว่าพลังงานของนิวตรอนไม่ได้ถูกกลดลงทั้งหมด แต่มีพลังงานสูงวิ่งออกมาจากท่อส่งลำนิวตรอนด้วย ซึ่งเป็นข้อดีคือมีพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นเข้ามาช่วยยืนยันธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง การออกแบบภาชนะที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ถังพลาสติก ทำให้ในการใช้งานวิเคราะห์ต้องระมัดระวังในการเคลื่อนย้าย เนื่องจากท่อส่งลำนิวตรอนที่ยึดอยู่ด้วยกาวซิลิโคนอาจหลุดออกจากกันทำให้น้ำรั่วออกมาได้ จึงควรหาภาชนะที่แข็งแรง เช่นใช้โลหะและต่อเชื่อมกับท่อส่งลำนิวตรอนโดยการบัดกรี

5.2.2 งานวิเคราะห์ที่ภาคสนาม พบปัญหาที่เกิดขึ้นจากความสูงของพระประธาน จึงต้องทำนั่งร้านสูง 2 เมตร ทำให้การจัดระบบการวิเคราะห์เกิดปัญหาขึ้นคือ ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์มีน้ำหนักมากทำให้ต้องทำนั่งร้านที่แข็งแรงรับน้ำหนักได้ทั้งหมด และการทำงานต้องปีนขึ้นไปทำให้ไม่สะดวกในการทำงานดังนั้นควรใช้รถยกไฮดรอลิค ซึ่งสามารถจัดระบบวิเคราะห์และความปลอดภัยให้เรียบร้อยมีการใส่ต้นกำเนิดนิวตรอนในภาชนะบรรจุแล้วจึงยกขึ้นไปวิเคราะห์ ณ จุดที่ต้องการ

5.2.3 ปัญหาที่พบในการวิเคราะห์พลังงานรังสีพรอมต์แกมมา ที่ไม่สามารถพบโลหะดีบุก อาจต้องมีการเปลี่ยนต้นกำเนิดนิวตรอนให้มีความแรงรังสีเพิ่มขึ้น เพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอนนั้นมีนิวตรอนฟลักซ์ (Φ_n) มากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดของรังสีพรอมต์แกมมา (R_p) จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเพิ่มขึ้นสามารถวิเคราะห์โลหะที่มีปริมาณน้อยได้ สำหรับการแก้ปัญหาของการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เพื่อให้สามารถวัดโลหะดีบุกได้ อาจต้องมีการออกแบบระบบวิเคราะห์ใหม่เพื่อให้ลำนิวตรอนที่ออกมา มีปริมาณนิวตรอนพลังงานสูงมากขึ้นโดยเปลี่ยนท่อส่งลำนิวตรอนจากโลหะสแตนเลสเป็นโลหะตะกั่ว ที่มีความหนาเพื่อทำให้โลหะตะกั่วทำหน้าที่เพิ่มความเข้มของนิวตรอนพลังงานสูงที่มาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ที่ไม่มีการลดทอนพลังงานให้มีความเข้มมากขึ้นเข้าทำปฏิกิริยา กับโลหะดีบุกในตัวอย่างทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น หรือออกแบบให้การวิเคราะห์สามารถใช้ได้ทั้งสองเทคนิค คือสามารถเปลี่ยนท่อส่งลำนิวตรอนจากสแตนเลสที่บางเป็นโลหะตะกั่วที่มีความหนาและ

เลื่อนต้นกำเนิดนิเวศรอนซิดกับท่อส่งลำนิเวศรอนได้ เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น

5.2.4 งานวิเคราะห์ศิลปะโบราณวัตถุที่มีขนาดใหญ่ และทำการลงรักปิดทองนั้น ควรอย่างยิ่งที่ต้องนำเทคนิควิเคราะห์เข้ามาใช้มากกว่าสองเทคนิค คือเมื่อวิเคราะห์ที่ผิวของทองคำว่ามีองค์ประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากทองคำหรือไม่ควรใช้เทคนิควิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง (XRF) แบบเคลื่อนย้ายได้ และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา (PGNAA) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบได้ชั้นผิวทองคำ ส่วนต้องการรู้โครงสร้างภายในว่ามีส่วนประกอบของดินหรือภายในพระพุทธรูปเป็นโพรงควรใช้เทคนิคการสแกนด้วยรังสีแกมมา (Gamma-ray scan) จะทำให้รายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบทั้งหมดของศิลปะโบราณวัตถุชิ้นนั้นครอบคลุมและชัดเจนมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] อรรถวรรณ ตรรกนถ. การวิเคราะห์วัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบเคลื่อนย้ายได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] M. Uda ,M. ; Nakamura. ; S. Yoshimura. ; J. Kondo. ; M. Saito. ; Y. Shirai. ; S. Hasegawa. ; Y. Baba. ; K. Ikeda. ; Y. Ban. ; A. Matsuo. ; M. Tamada. ; H. Sunaga. ; H. Oshio. ; D. Yamashita. ; Y. Nakajima. ; T. Utaka. “Amarna blue” painted on ancient Egyptian potter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 189 (2002) : 382–386.
- [3] T. Broekmans. ; A. Adriaens. ; E. Pantos. Analytical investigations of cooking pottery from Tell Beydar (NE-Syria). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 226 (2004) : 92–97.
- [4] พรรณี เสถียรศรี. การวิเคราะห์ธาตุหนักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [5] Chadwick, J. The existence of a neutron. TROc. Roy. Soc. A136(May 10, 1932) : 692 – 708.
- [6] Curtiss, L.F. Introduction to Neutron Physics. New Delhi : Affiliated East – West Prees, 1959.
- [7] นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. เอกสารการสอน. กรุงเทพฯ : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [8] J.B.Cunningham. ; B.D.Sowerby. ; P.T.Rafter. ; and R.Greenwood-Smith. International Journal Applied Radiation and Isotope. 35, 7 (1984) : 635-643.
- [9] Robert B.Day. Gamma ray from Neutron Inelastic Scattering. Physical Review. 102, 3 (1956) : 767-787.

- [10] 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. 46 (1978) : 343-355.
- [11] Tuli, J.K. Thermal Neutron Capture Gamma – ray. National Nuclear Data Center. New York : Brookhaven National Laboratory, 1998.
- [12] Das, H.A. ; Faanhof , A. ; and Van Der Sloot, H.A. Radioanalysis in Geochemistry. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
- [13] E.A. Mackey. ; D.L. Anderson. ; P.J. Liposky.; R.M. Lindstrom. ; H. Chen-Mayer. ; G.P. Lamaze. New thermal neutron prompt γ -ray activation analysis instrument at the National Institute of Standards and Technology Center for Neutron Research. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 226 (2004) : 426–440.
- [14] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ. การตรวจวัดรังสีนิวเคลียร์และอุปกรณ์วัดนิวเคลียร์. เอกสารการสอน. กรุงเทพฯ : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] A.J. Cow. ; P.E. Francois. ; R.P. Gatrell. The Design of Neutron Howitzers. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 19 (1968) : 541-544.
- [16] International Atomic Energy Agency-Technical Reports Series No.130 Commercial Portable Gauges for Radiometric Determination of the Density and Moisture Content of Building Materials Vienna, 1971.
- [17] A.G.C. Nair. ; K. Sudarshan. ; N. Raje. ; A.V.R. Reddy. ; S.B. Manohar. ; A. Goswami. Analysis of alloys by prompt gamma-ray neutron activation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 516 (2004) : 143–148.
- [18] สนิมกัดกร่อนของสํารัดและวิธีการรักษา (กรุงเทพมหานคร : กรมศิลปากร, 2518), หน้า 17-18.
- [19] M.A.Gomaa. ; B.A.Henaish. ; E.M.Ali. Calculated Neutron and Gamma Dose Rates Around a Moderated Am-Be Neutron Source. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 44 (1993) : 638-640.
- [20] R.M.Lindstrom, Journal of Research of National Institute of Standard and Technology, 98, 127 (1998).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณปริมาณ neutron dose rates

ในงานวิจัยนี้ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และบุคคลที่อยู่รอบๆ เนื่องจากเป็นงานที่ออกภาคสนาม ความปลอดภัยจึงต้องเป็นสิ่งสำคัญมากซึ่งการกำหนดระดับรังสีต่อบุคคลจะยึดหลักของสากลตามเอกสารของ International Commission on Radiological Protection ฉบับที่ 60 (ICRP 60) ที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีที่ทั่วร่างกายได้ไม่เกิน 20 mSv หรือ 2 rem ต่อปี (1 mrem ต่อชั่วโมง) จึงได้ทำการคำนวณถึงปริมาณรังสีที่ผ่านออกมาจากน้ำ หลังจากที่ทำกรใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิวูรี่ ในถังที่บรรจุน้ำเพื่อจะทำการวิเคราะห์ โดยการคำนวณได้ยึดวิธีตามเอกสารของ M.A.Gomaa, B.A.Henaish และ E.M.Ali[19] ที่ได้ทำการคำนวณปริมาณ neutron dose rates และ gamma dose rates รอบๆต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 5 คูรี่ และใช้น้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอน

$$\Phi = \{Y \times \beta \times \exp(-\Sigma rX)\} / 4\pi R^2 \quad (\text{ก.1})$$

Φ คือนิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux) ของนิวตรอนพลังงานสูง

Y คือผลผลิตของนิวตรอนที่มาจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$

β คือ neutron build up factor สำหรับน้ำที่ความหนาแน่นมากกว่า 20 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 5

Σr คือภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) = 0.103 cm^{-1}

X คือความหนาของน้ำ

R คือระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนถึงจุดที่คำนวณนิวตรอนฟลักซ์

ตารางที่ ก.1 การคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ และdose rate (per Ci) หลังจากที่ถูกหน่วงพลังงาน (ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงแรังสี 5 คูรี่)

ความหนาของน้ำ(cm)	นิวตรอนฟลักซ์พลังงานสูง ($\text{ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) R = 1 เมตร	DR* ที่ 1 เมตร ($\mu\text{Sv/hr}$)	DR* (mSv/yr)
0	14.332	22.40	44.80
20	9.000	14.00	28.00
30	3.300	5.000	10.00
40	1.146	1.800	3.600
50	0.430	0.672	1.340
60	0.144	0.226	0.450
70	0.050	0.078	0.156
80	0.014	0.022	0.044

DR* = dose equivalent rate

ตารางที่ ก.2 dose rate (per Ci) หลังจากที่ถูกห่อวงพลังงาน (ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิคูรี เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัย)

ความหนาของน้ำ (cm)	DR* (mSv/yr)
0	4.480
20	2.800
30	1.000
40	0.3600
50	0.1340
60	0.0450
70	0.0156
80	0.0044

จากตารางที่ ก.2 ทำให้ทราบว่าอันตรายที่เกิดจากรังสีนิวตรอนอยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานสากลที่ ICRP กำหนด เนื่องจากภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน และกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสีแกมมาสำหรับออกงานภาคสนาม มีระยะจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิคูรี ออกมาทางด้านหน้าท่ส่งลำนิวตรอน 17 เซนติเมตร และด้านหลัง 12.5 เซนติเมตร

ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์[6]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่ส่งลำนิวตรอนที่มีลักษณะรูปกรวยที่เรียกว่า “ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (divergent collimator)” ซึ่งมีลักษณะปลายด้านที่อยู่ในตัวห่อวงนิวตรอนมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้านนอกที่อยู่ใกล้ชิ้นงานโดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ได้ลำนิวตรอนในลักษณะบานออกวิ่งไปกระทบชิ้นงาน ซึ่งนิวตรอนฟลักซ์ (Φ) ที่ปลายท่บังคับลำนิวตรอนตรงตำแหน่งชิ้นงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\Phi = \Phi_0 A / 4\pi L^2 \quad (\text{ก.2})$$

L คือ ความยาวของท่ส่งลำนิวตรอน

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนในตัวห่อวงนิวตรอน ซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าสู่ท่ส่งลำนิวตรอน ในงานวิจัยหน้าตัดมีลักษณะกลมดังนั้น

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (ก.3)$$

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางเข้าของนิวตรอนสู่ท่อส่งลำนิวตรอน ทำให้ได้นิวตรอนฟลักซ์ (Φ) ดังนี้

$$\Phi = (\Phi_0/16) \times (D/L)^2 \quad (ก.4)$$

$$\frac{\text{นิวตรอนฟลักซ์ } (\Phi) \text{ ที่ตำแหน่งทางเข้าท่อส่งลำนิวตรอน}}{\text{นิวตรอนฟลักซ์ } (\Phi) \text{ ที่ตำแหน่งทางออกท่อส่งลำนิวตรอน}} = \frac{\Phi_0}{\Phi} = 16(L/D)^2 \quad (ก.5)$$

จากสมการที่ ก.5 จะเห็นว่านิวตรอนฟลักซ์ (Φ) ลดลงเมื่อท่อส่งลำนิวตรอนมีความยาว (L) เพิ่มขึ้นและเมื่อทางเข้าของนิวตรอน (D) มีขนาดเล็กลง

การคำนวณอัตราการเกิดรังสีฟอสมต์แกมมาของโลหะทองแดง และโลหะดีบุก

1. อัตราการเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron Capture Reaction Rate)[20]

อัตราการเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอนที่เกิดขึ้น เมื่อวางตัวอย่างไว้ในแนวของลำนิวตรอนสามารถแสดงเป็นสมการดังนี้

$$R = N\Phi_{(E)}\sigma_{(E)} \quad (ก.6)$$

R คือ อัตราการเกิดอันตรกิริยา

N คือ จำนวนอะตอมของโลหะที่วิเคราะห์ = N_0WI / M

N_0 คือ Avogadro's Number มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} อะตอม/โมล

W คือ น้ำหนักของธาตุ (กรัม)

I คือ Isotopic abundance

M คือ Atomic Weight

$\sigma_{(E)}$ คือ ภาคตัดขวางการจับนิวตรอน (neutron cross section) ขึ้นอยู่กับ

พลังงานของนิวตรอน (E)

$\Phi_{(E)}$ คือ นิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ตารางเมตรวินาที)

ถ้า Γ เป็นสัดส่วนของรังสีฟอรอมต์แกมมาของพลังงานที่สนใจต่อการจับนิวตรอน (จำนวนรังสีฟอรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นต่อการจับนิวตรอน 100 ครั้ง) ดังนั้นอัตราการเกิดของรังสีฟอรอมต์แกมมา (R_p) คือ

$$R_p = N\Phi_{(E)}\sigma_{(E)}\Gamma \quad (\text{ก.7})$$

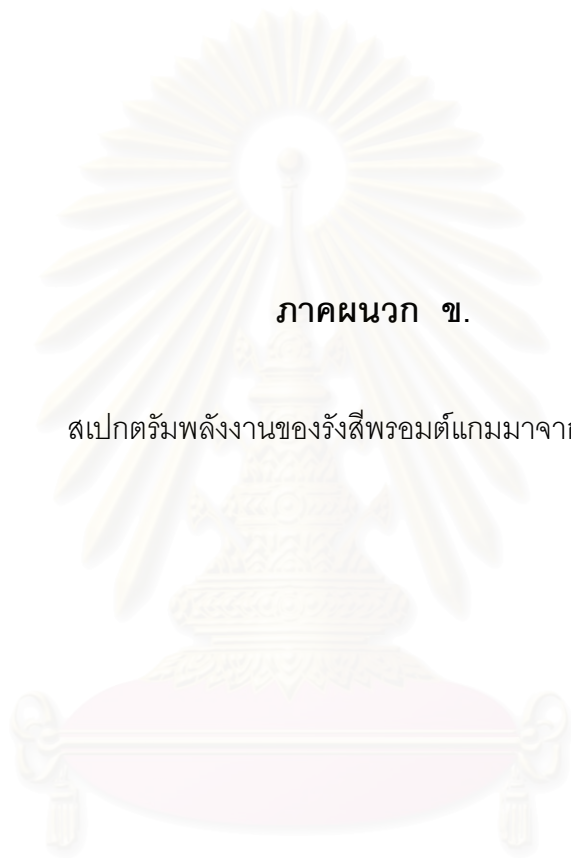
หรือ $R_p = R \times \Gamma$

2. การคำนวณอัตราการเกิดของรังสีฟอรอมต์แกมมา (R_p) ของโลหะทองแดง และโลหะดีบุก

ธาตุ (พลังงานของฟอรอมต์แกมมา)	น้ำหนักอะตอม	%ที่พบในธรรมชาติ	%ที่พบในตัวอย่าง	cross section (barn)[13]	Γ	$R_p/\Phi_{(E)}$
^{63}Cu (E=278.3 keV)	63.546	69.17	70	3.79	0.327	5.68×10^{-3}
^{115}Sn (E=1293.3 keV)	118.71	0.34	20	0.63	0.128	2.78×10^{-7}

$\Phi_{(E)}$ = นิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ตารางเมตร/วินาที) ของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูรี

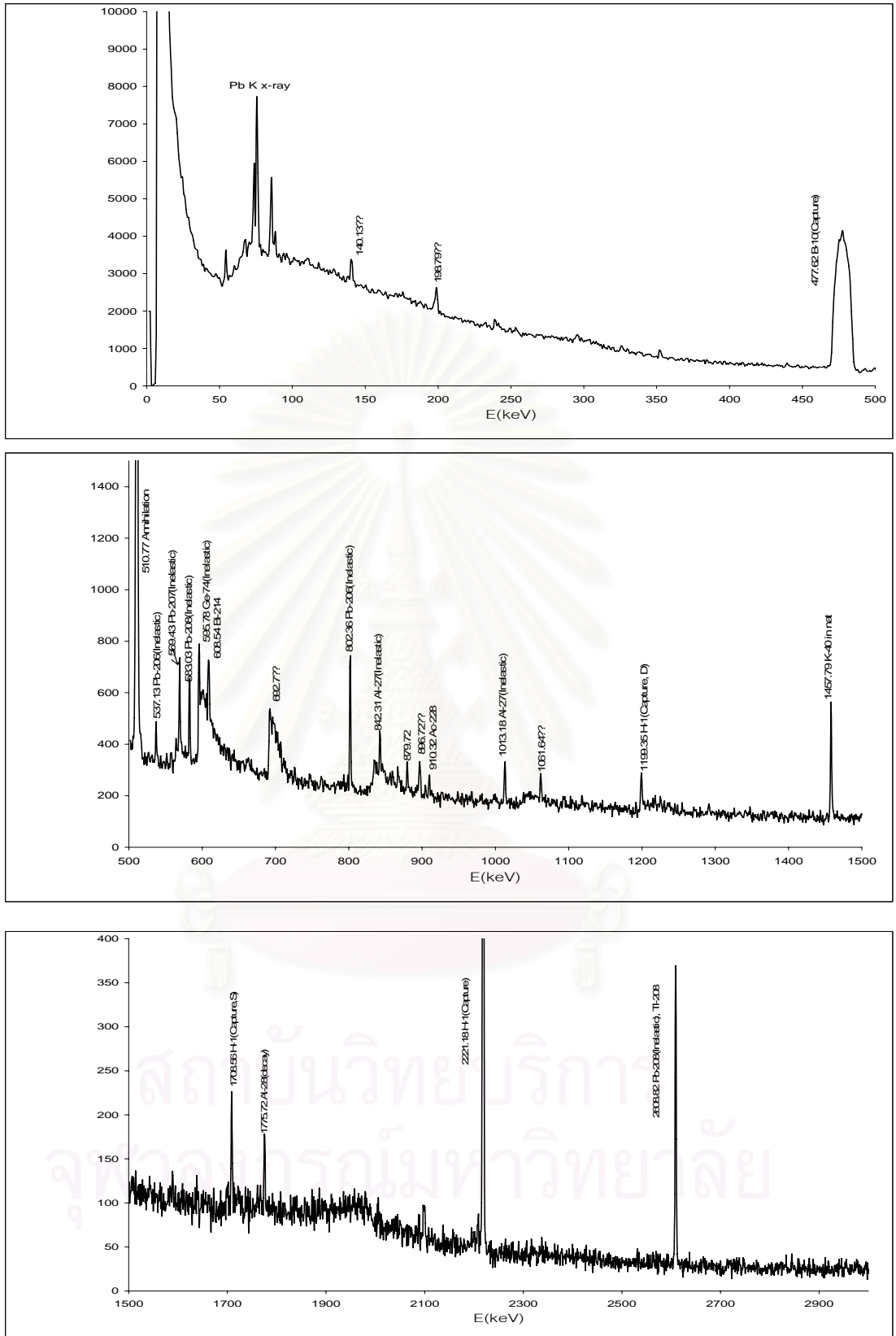
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



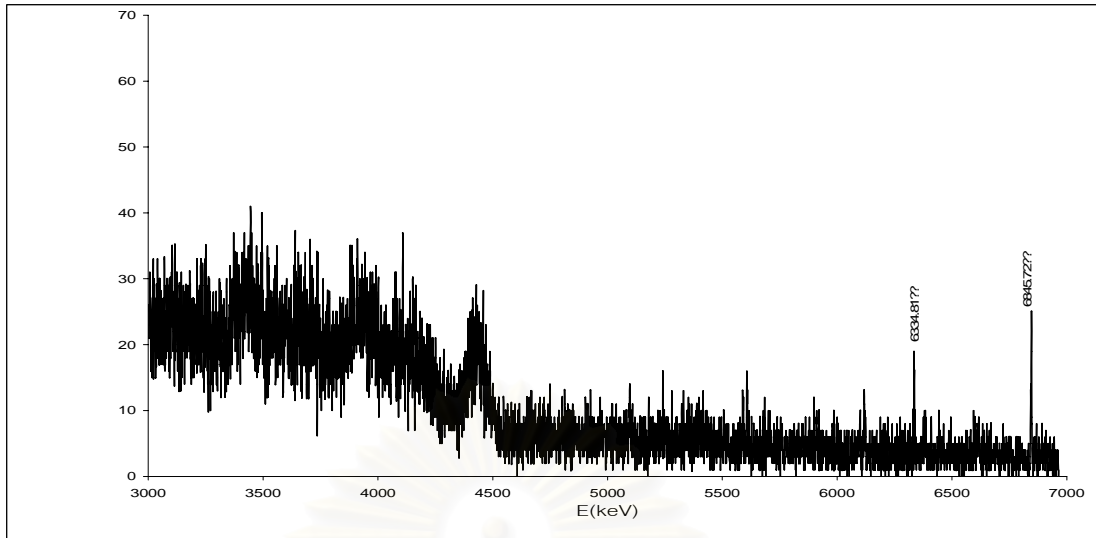
ภาคผนวก ข.

สเปกตรัมพลังงานของรังสีพหุองค์ประกอบมาจากตัวอย่าง

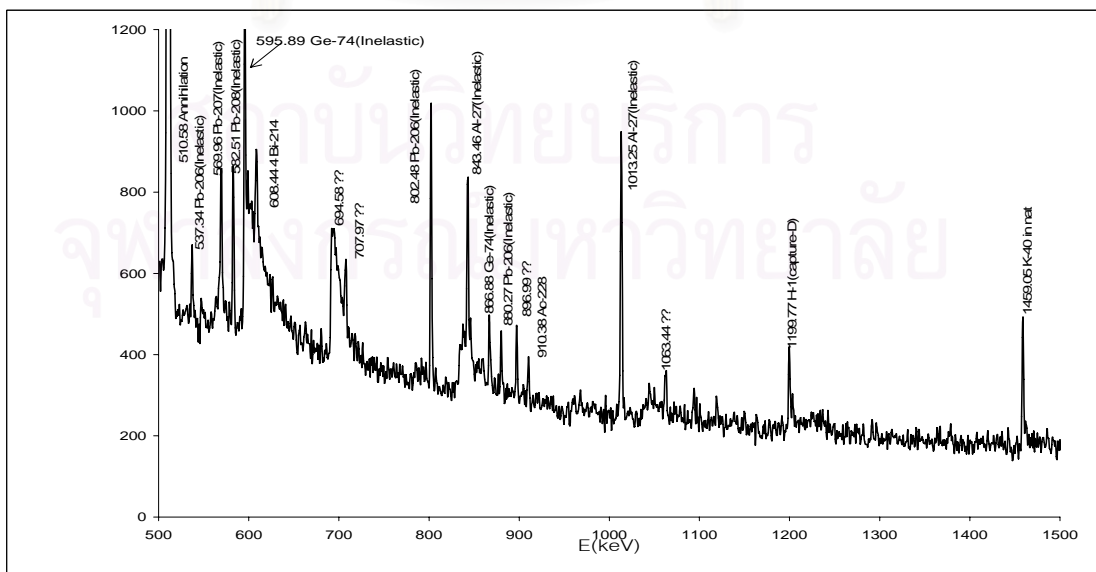
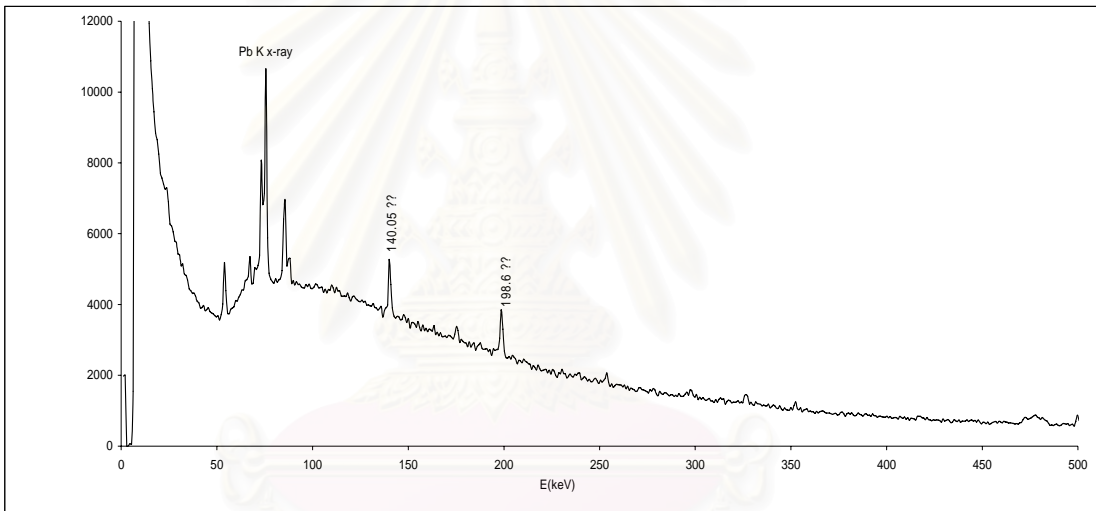
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



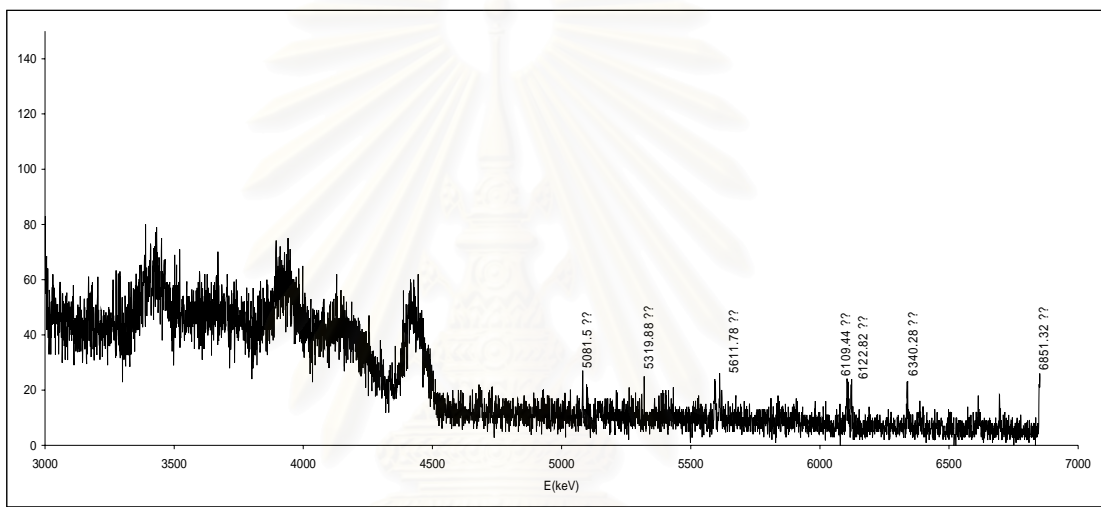
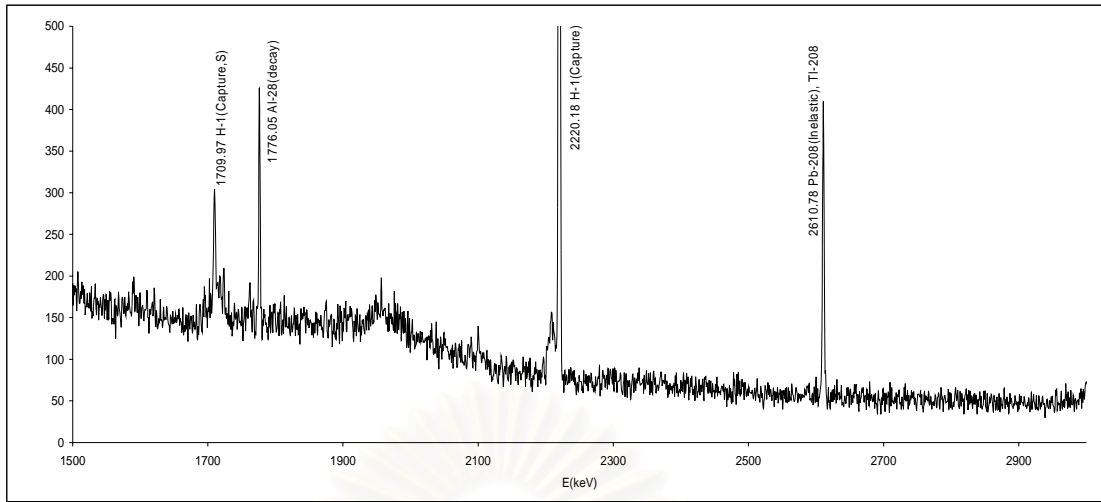
รูปที่ ข.1 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของแบคกราวด์ในห้องปฏิบัติการ



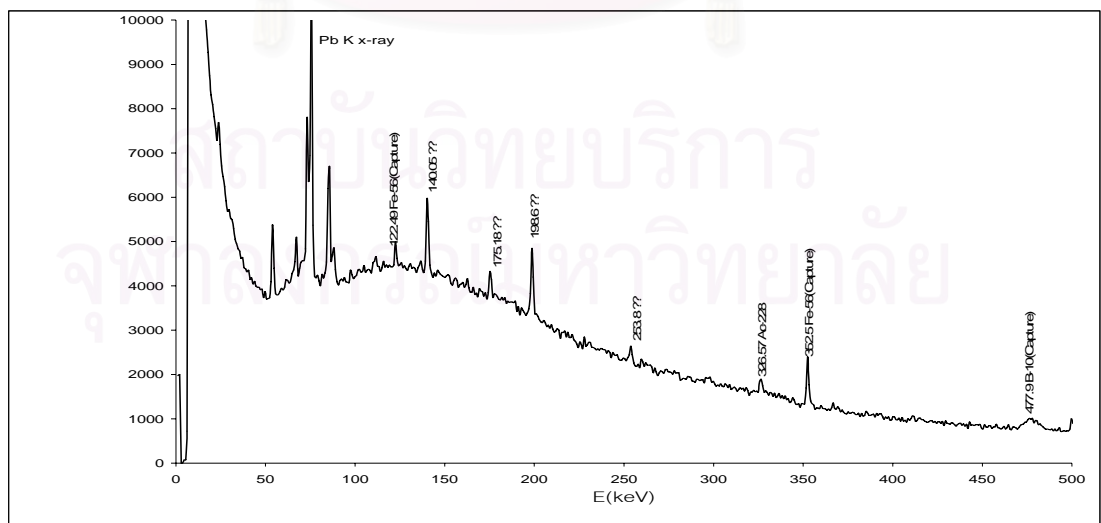
รูปที่ ข.2 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของแบคกราวด์ในห้องปฏิบัติการ



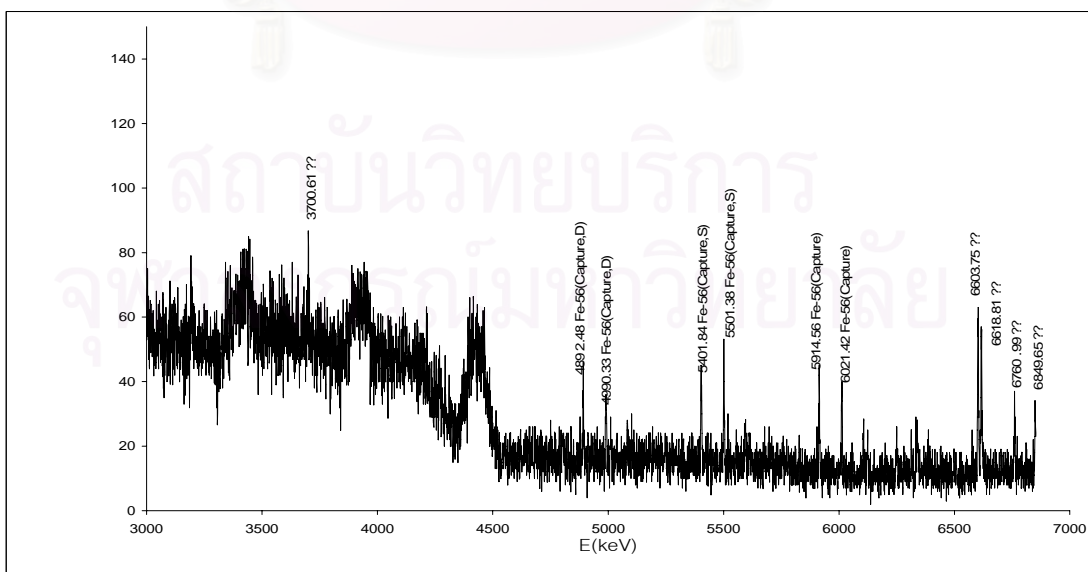
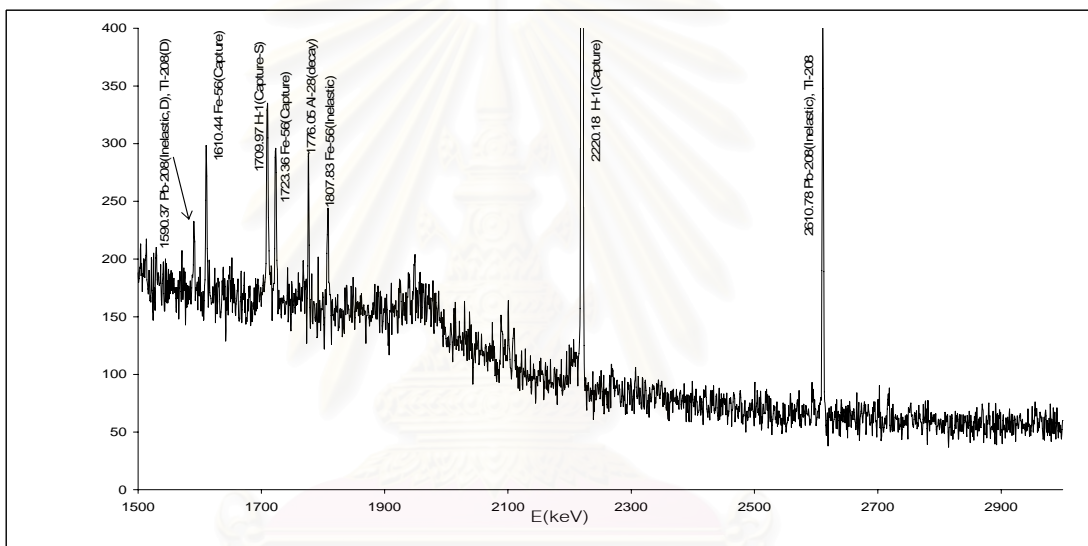
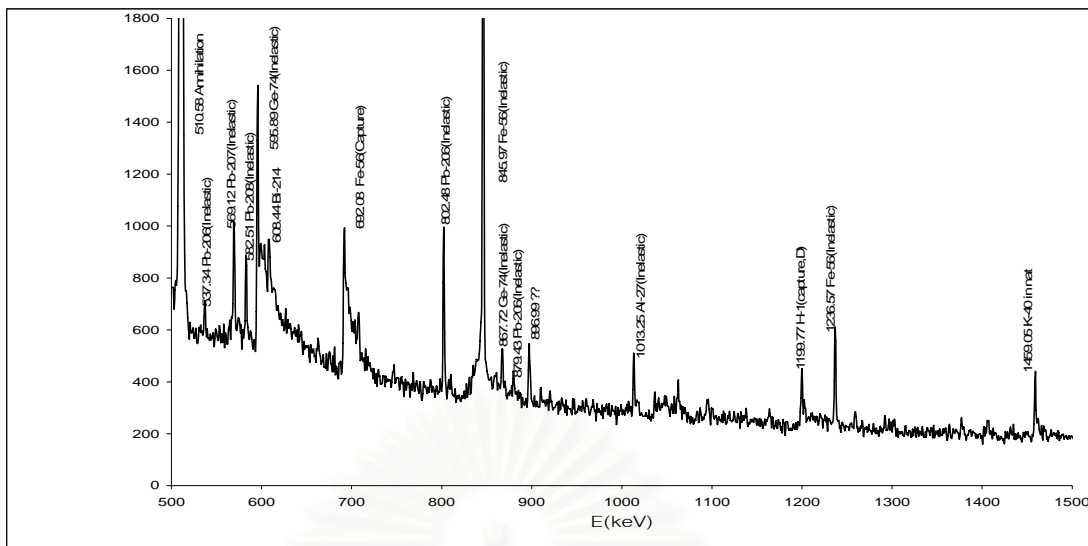
รูปที่ ข.3 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของโลหะอลูมิเนียม



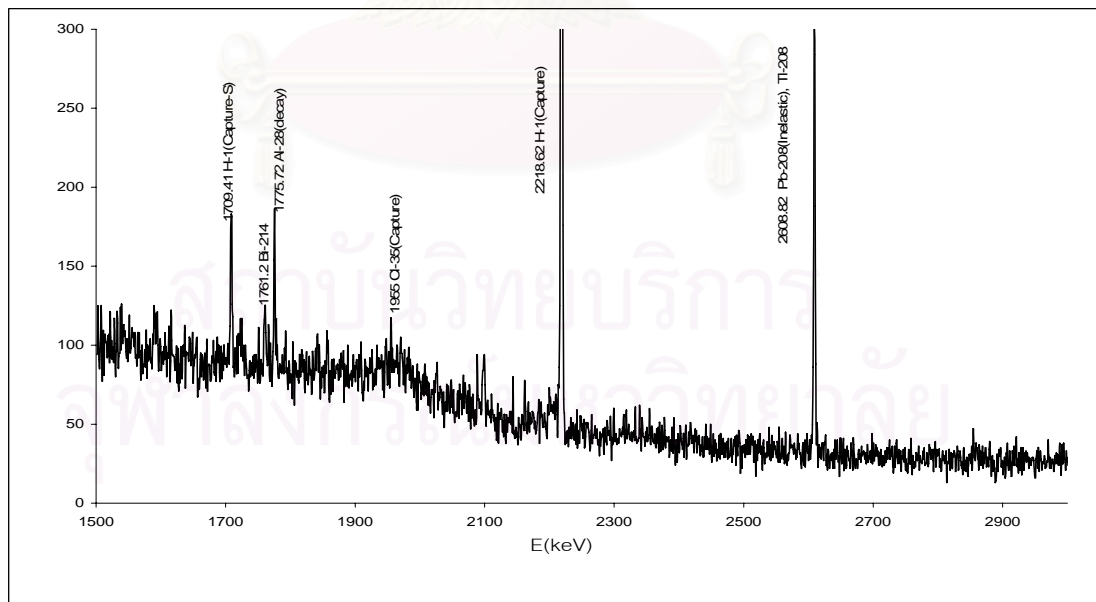
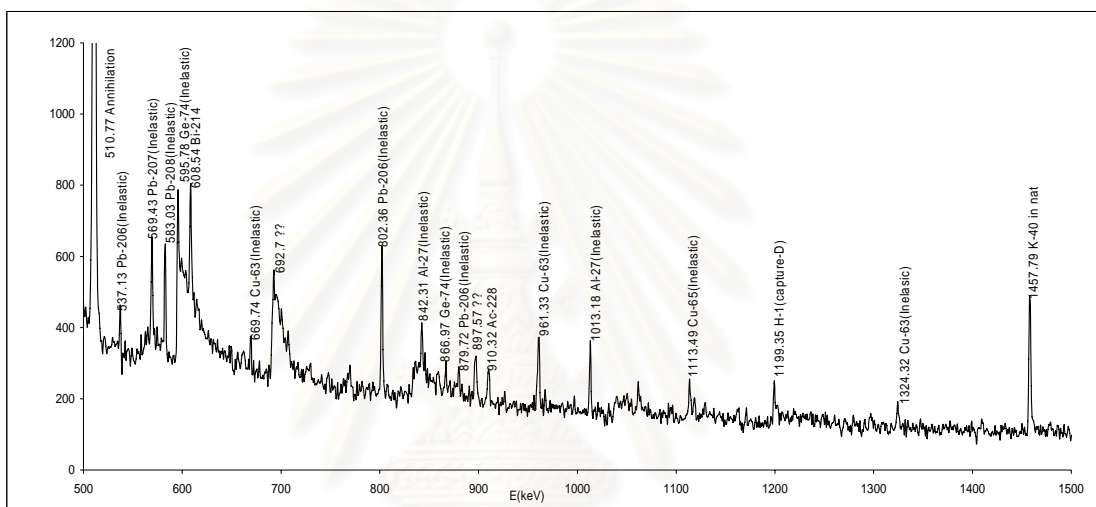
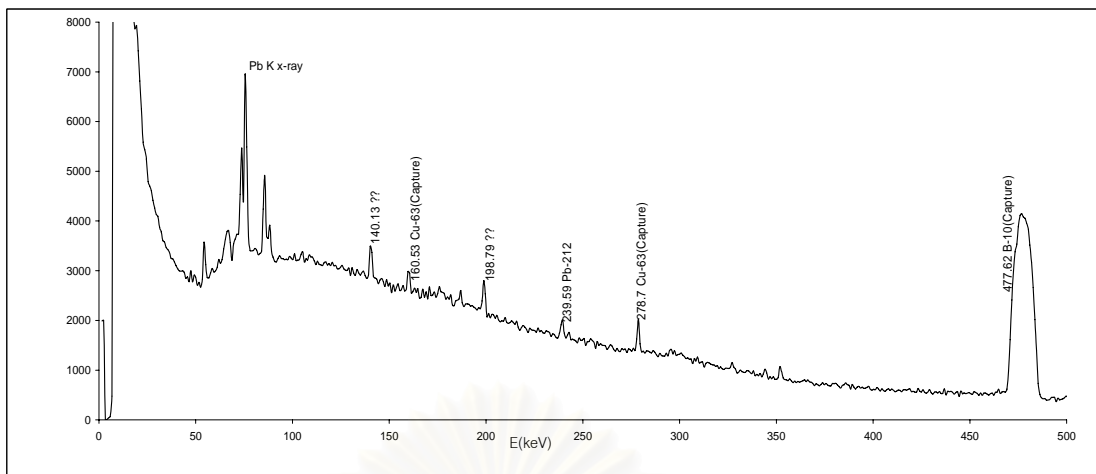
รูปที่ ข.4 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของโลหะอลูมิเนียม



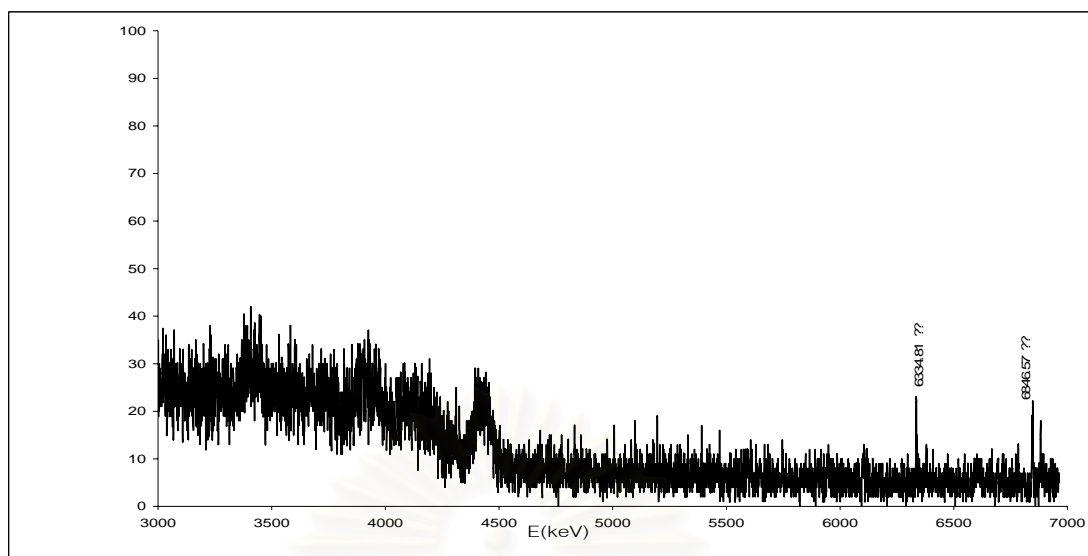
รูปที่ ข.5 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของโลหะเหล็ก



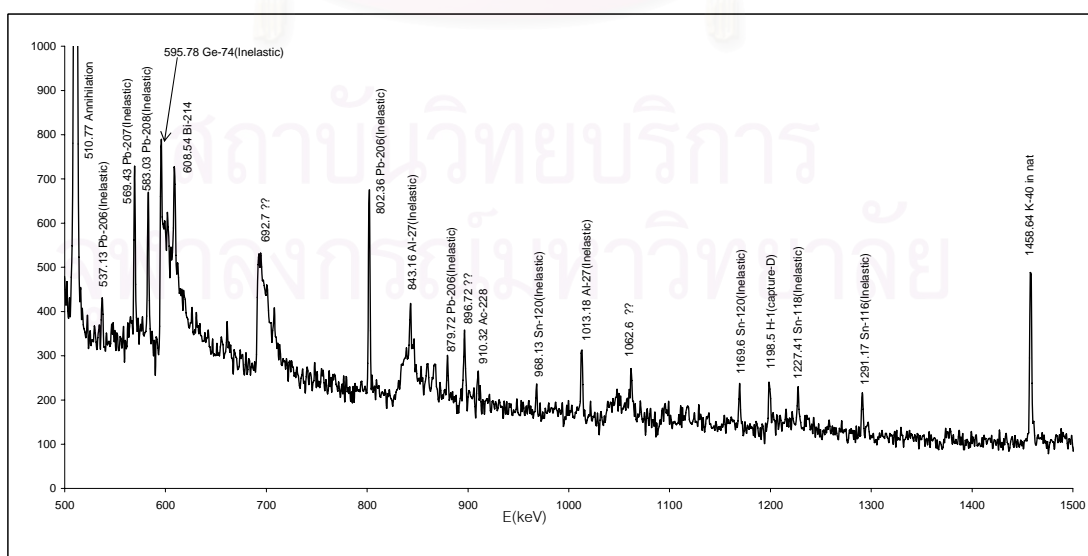
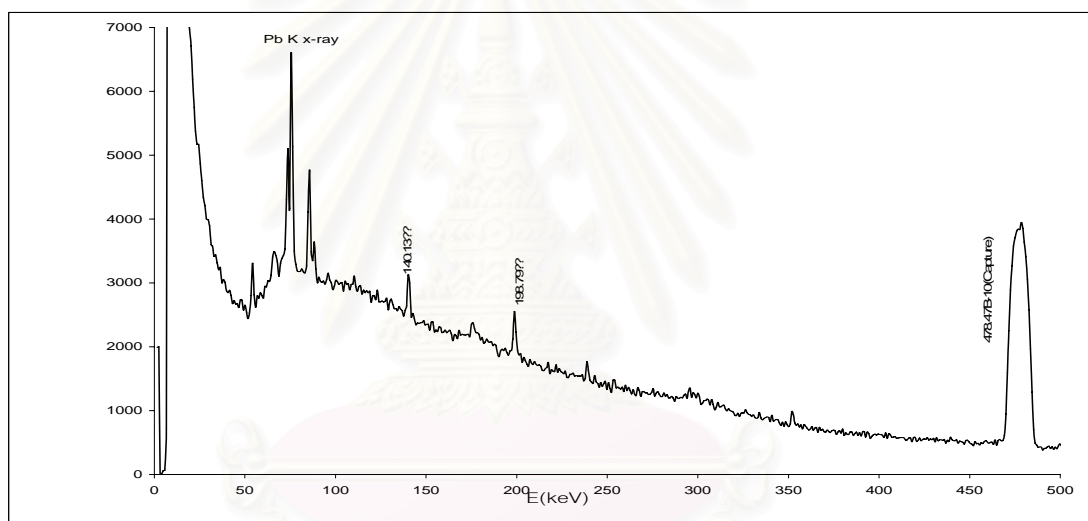
รูปที่ ข.6 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของโลหะเหล็ก



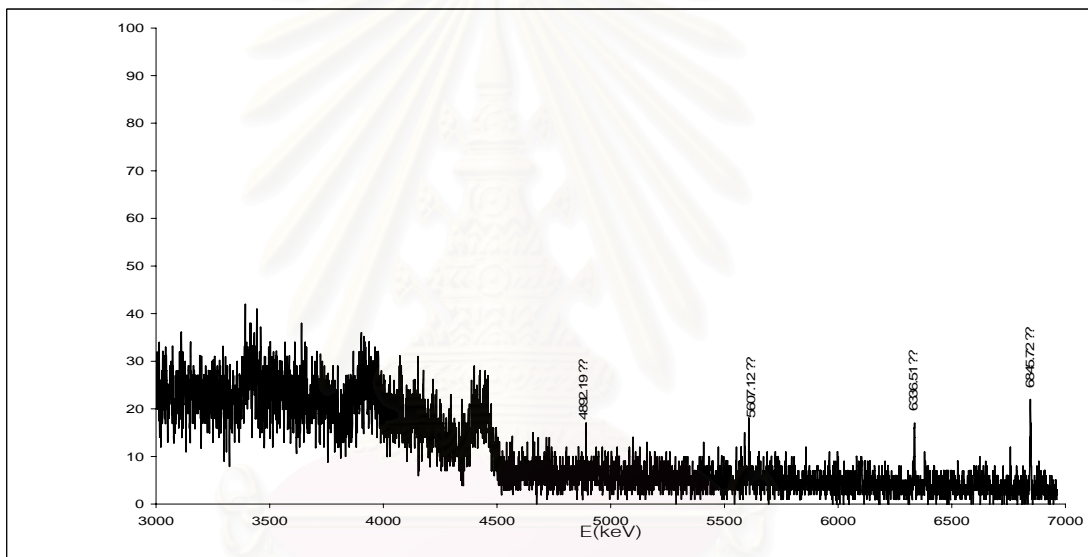
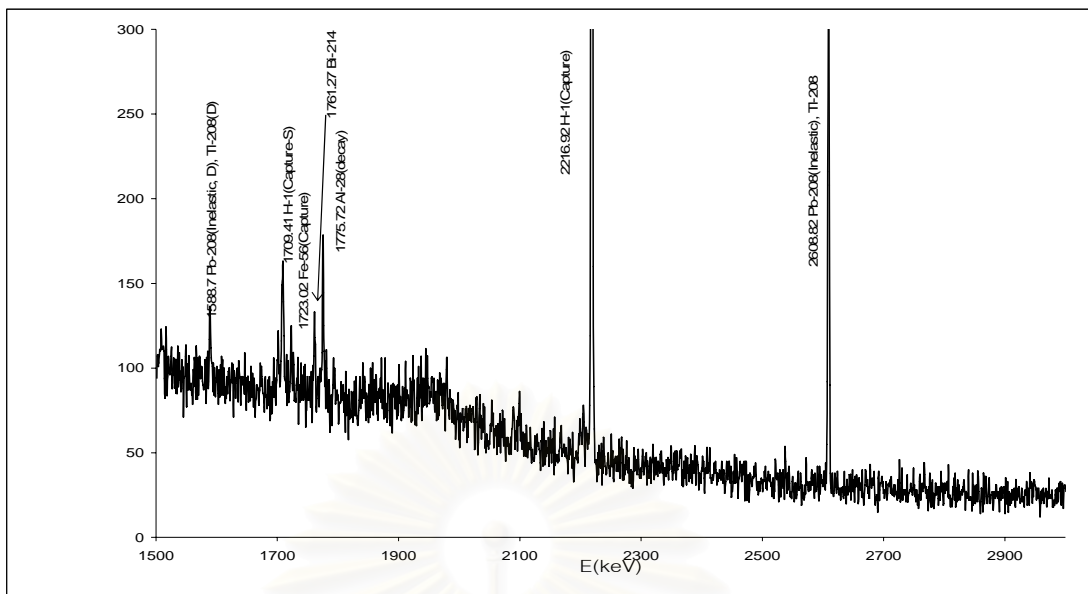
รูปที่ ๗.7 สเปกตรัมรังสีฟลูออโรสโคปของโลหะทองแดง



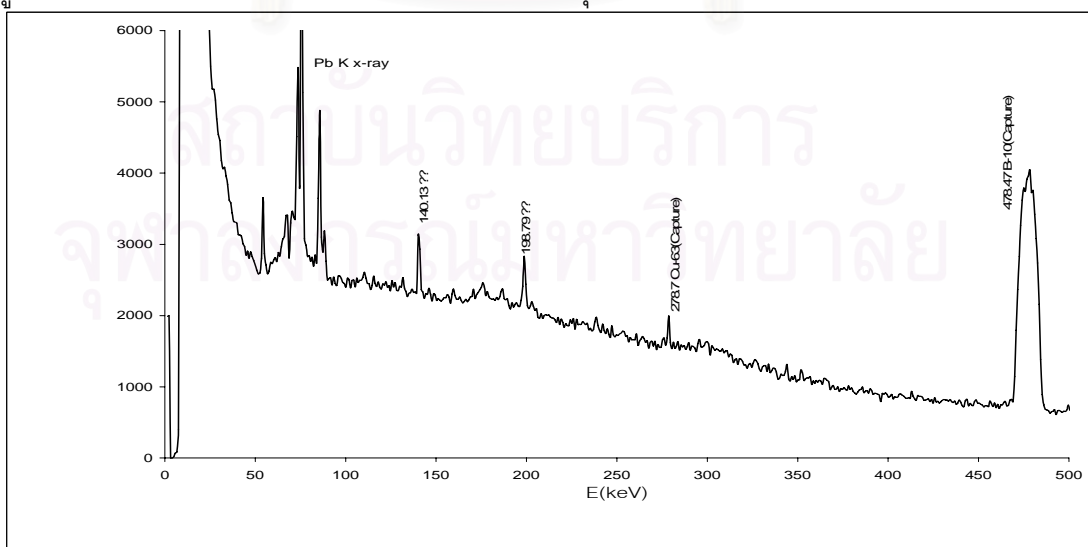
รูปที่ ๗.๘ สเปกตรัมรังสีฟรอมต์แกมมาของโลหะทองแดง



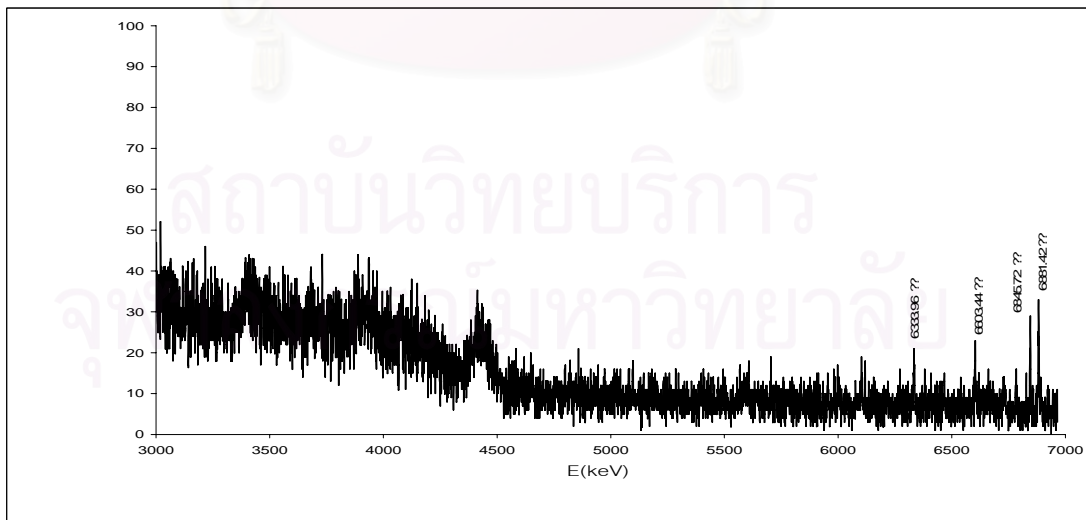
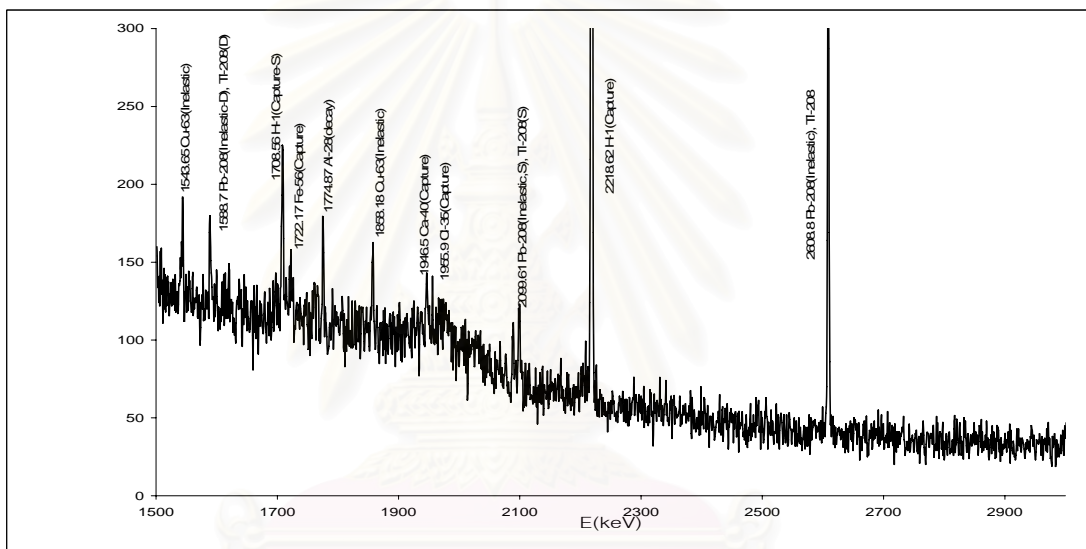
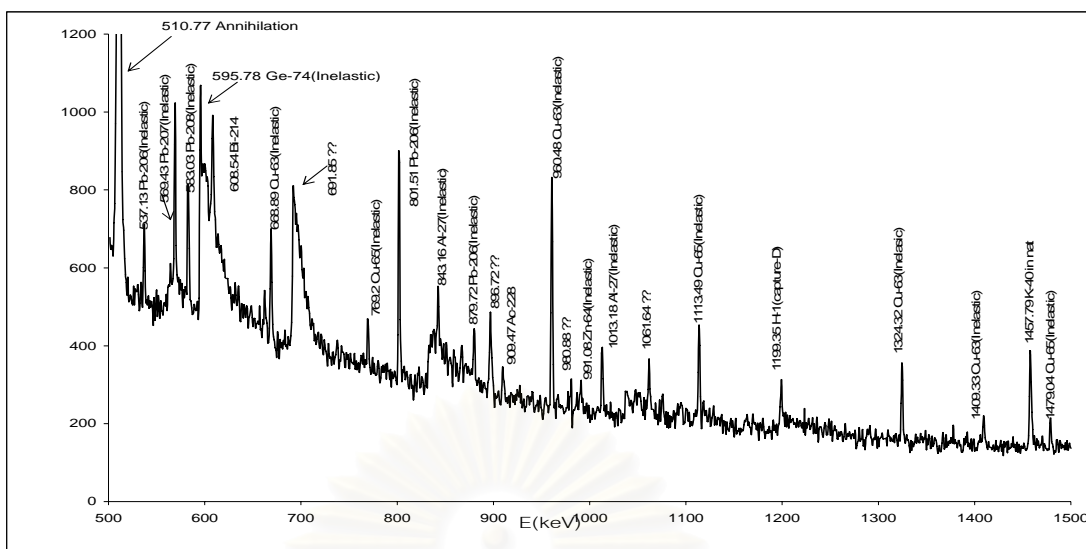
รูปที่ ๗.๙ สเปกตรัมรังสีฟรอมต์แกมมาของโลหะดีบุก



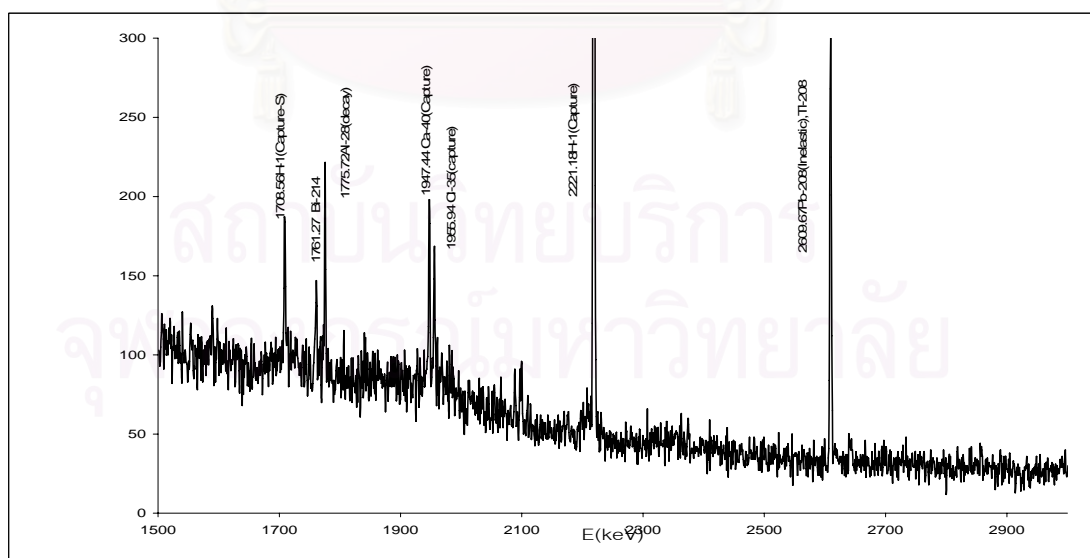
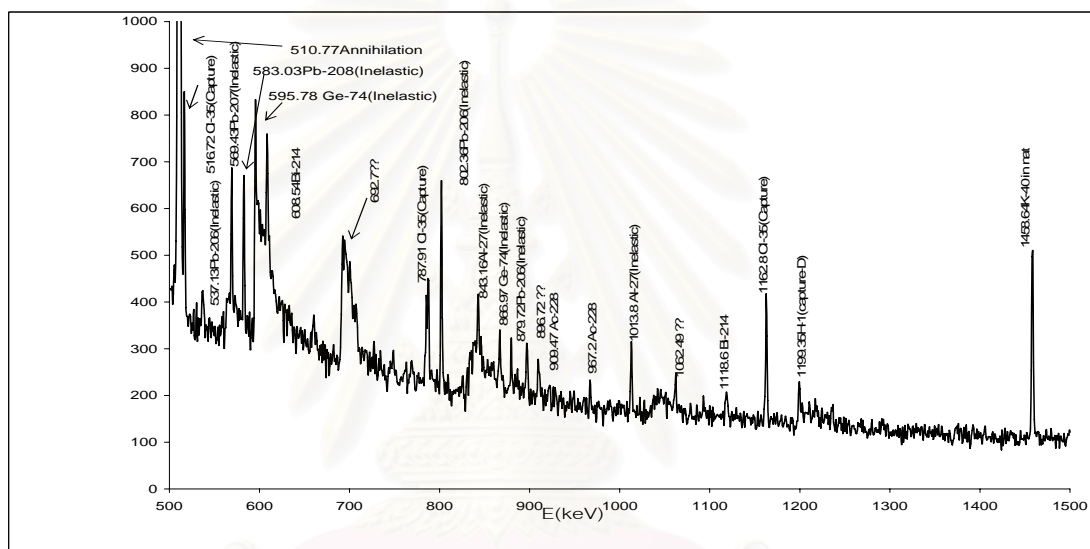
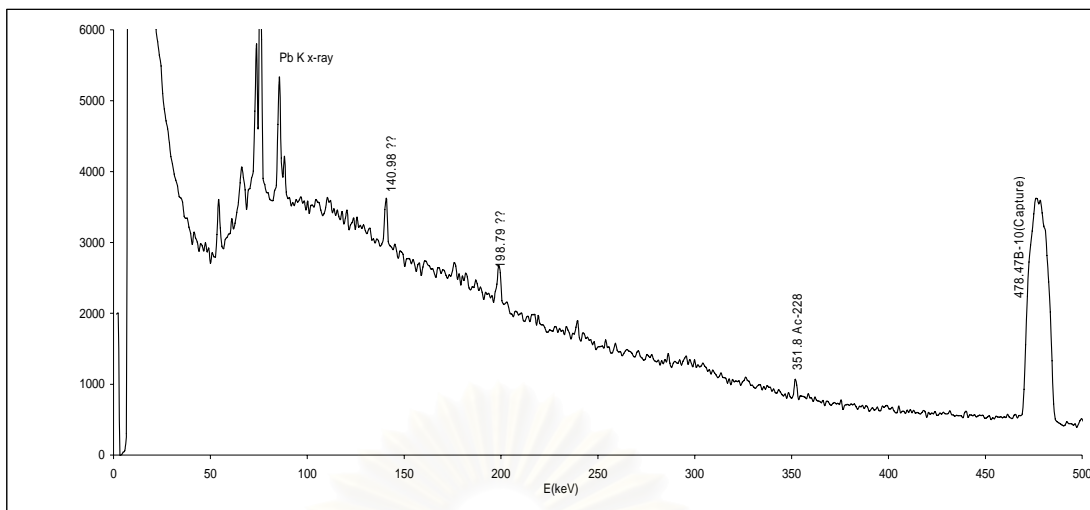
รูปที่ ข.10 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของโลหะดีบุก



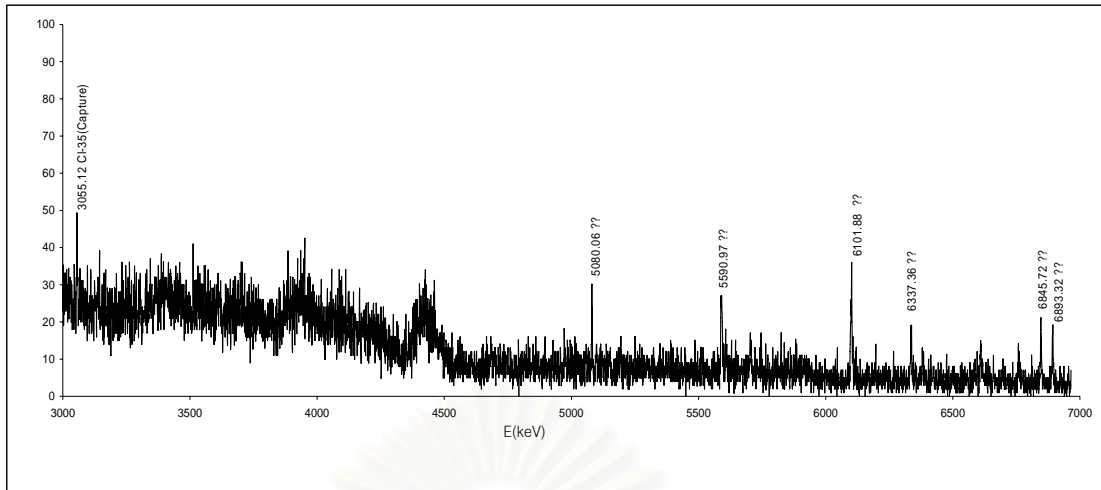
รูปที่ ข.11 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของโลหะทองเหลือง



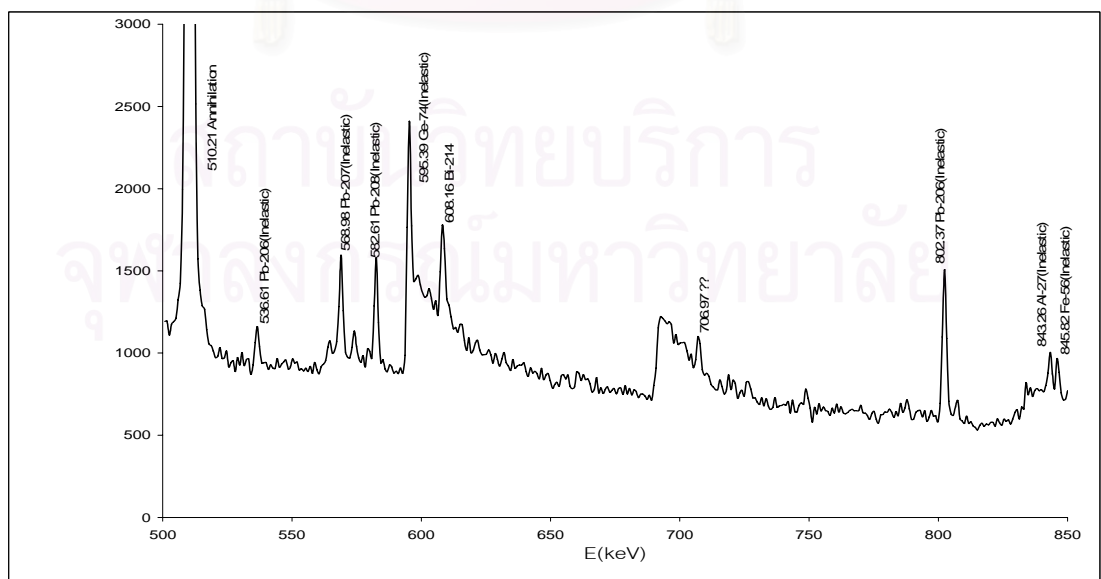
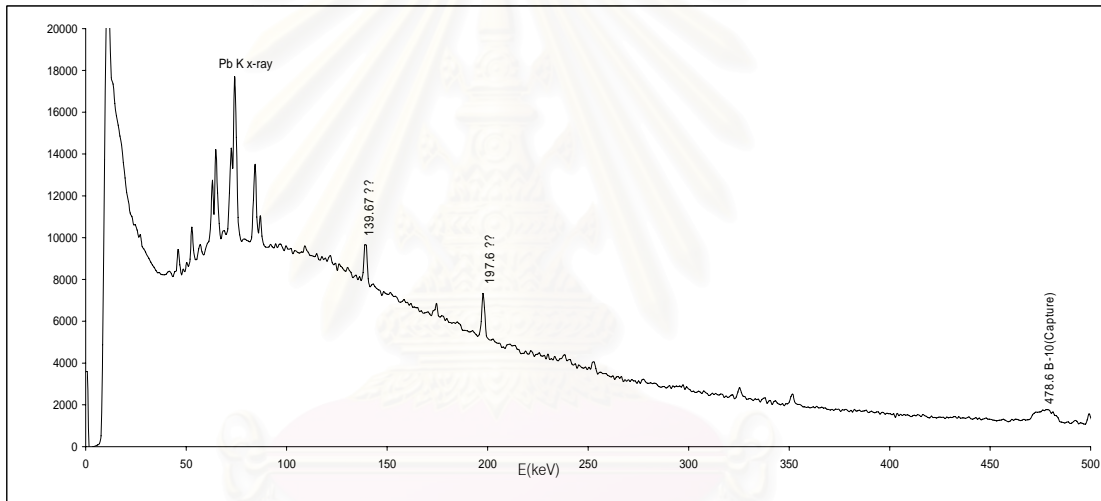
รูปที่ ข.12 สเปกตรัมรังสีฟรอมต์แกมมาของโลหะทองเหลือง



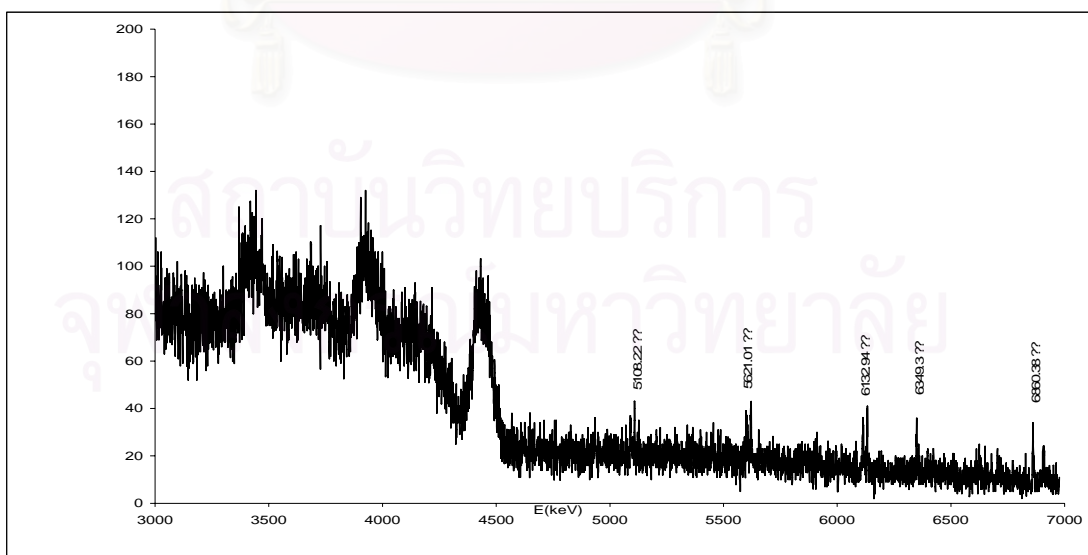
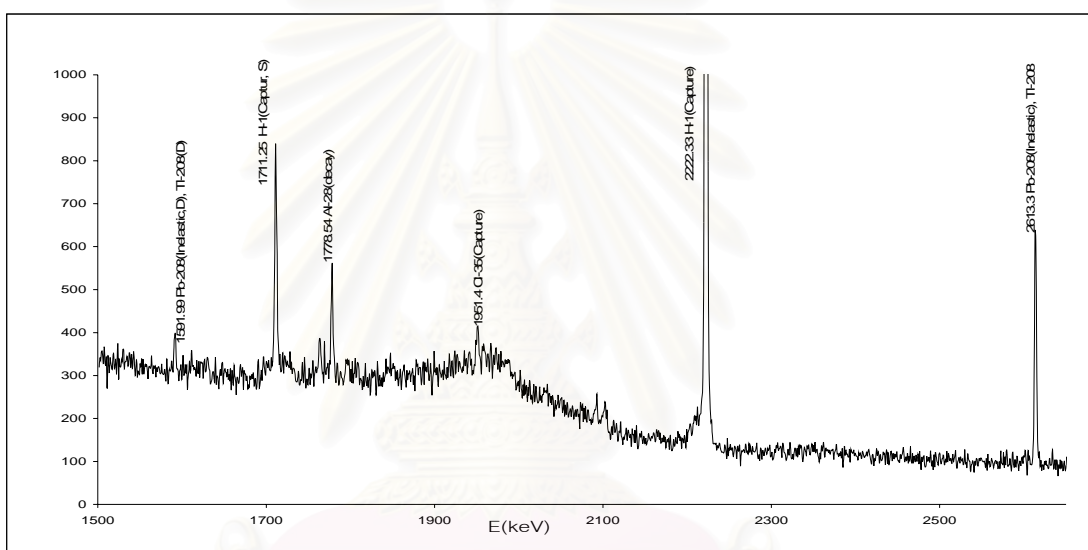
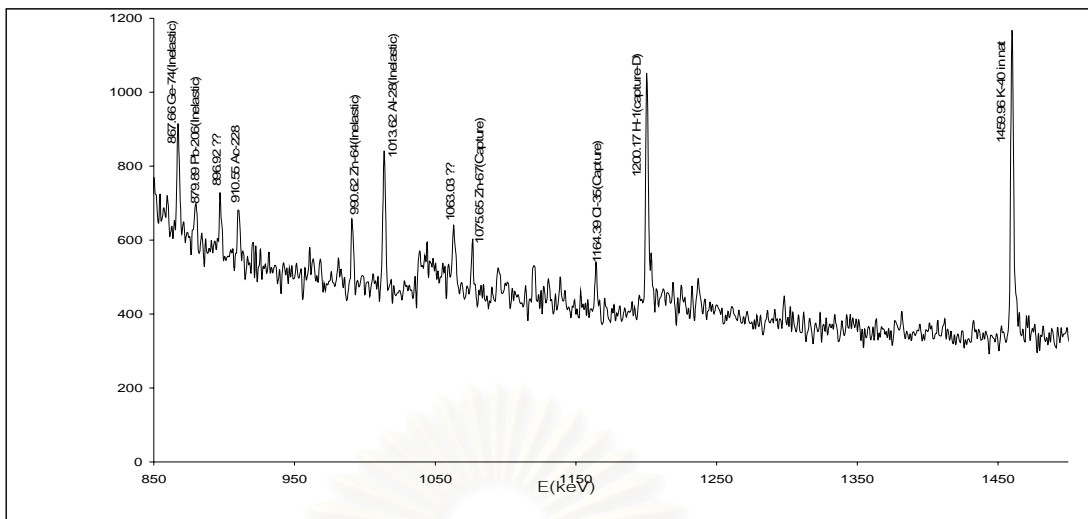
รูปที่ ข.13 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์



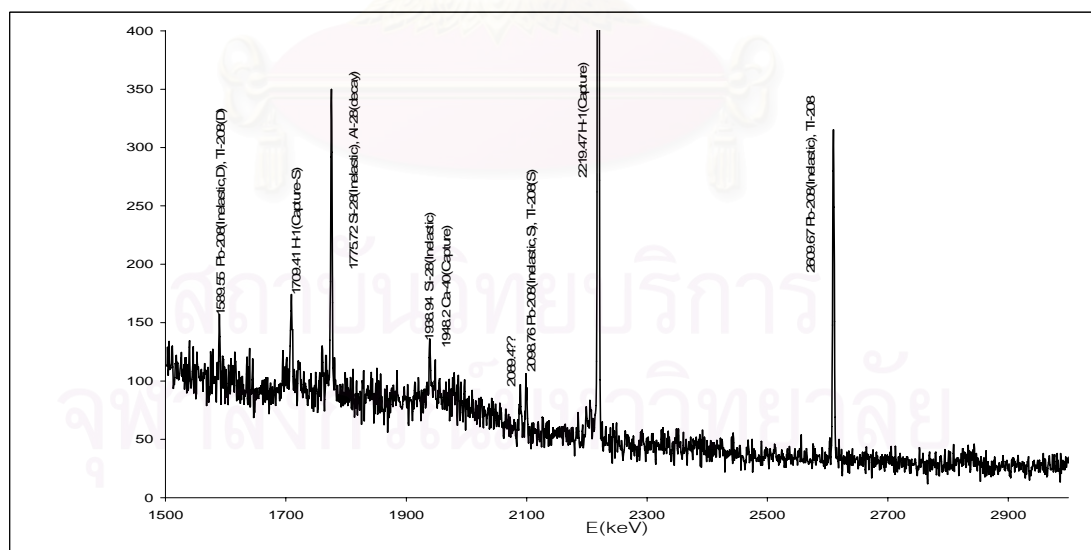
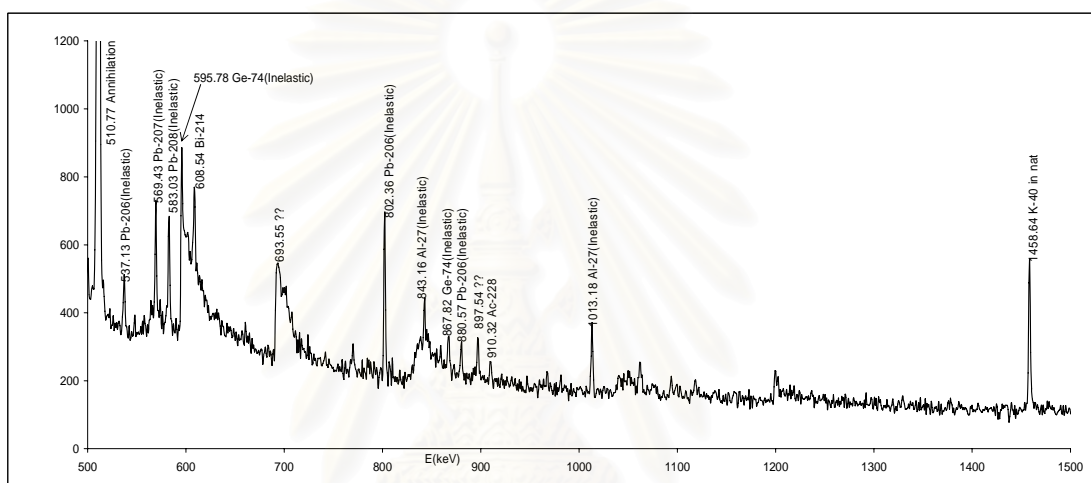
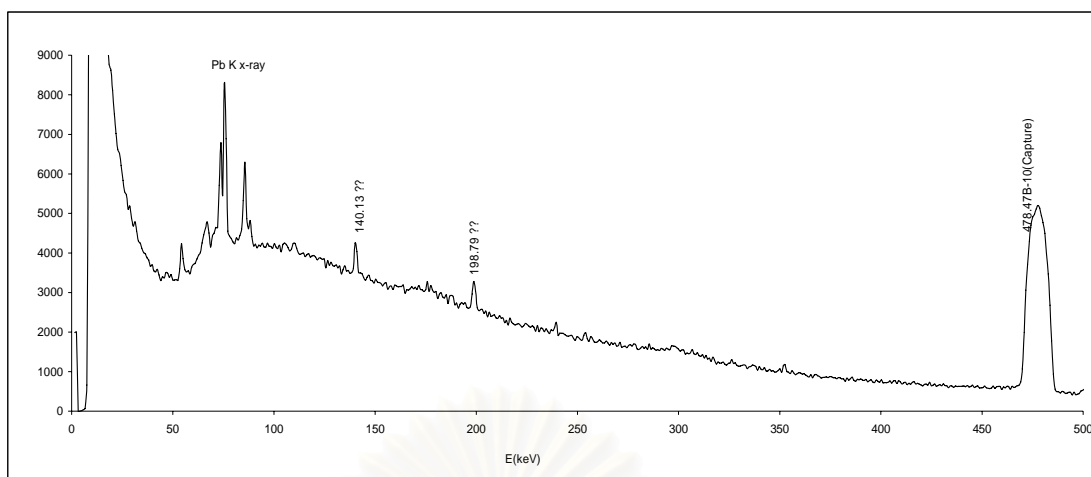
รูปที่ ข.14 สเปกตรัมรังสีฟอตอนตีแถมมาของสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์



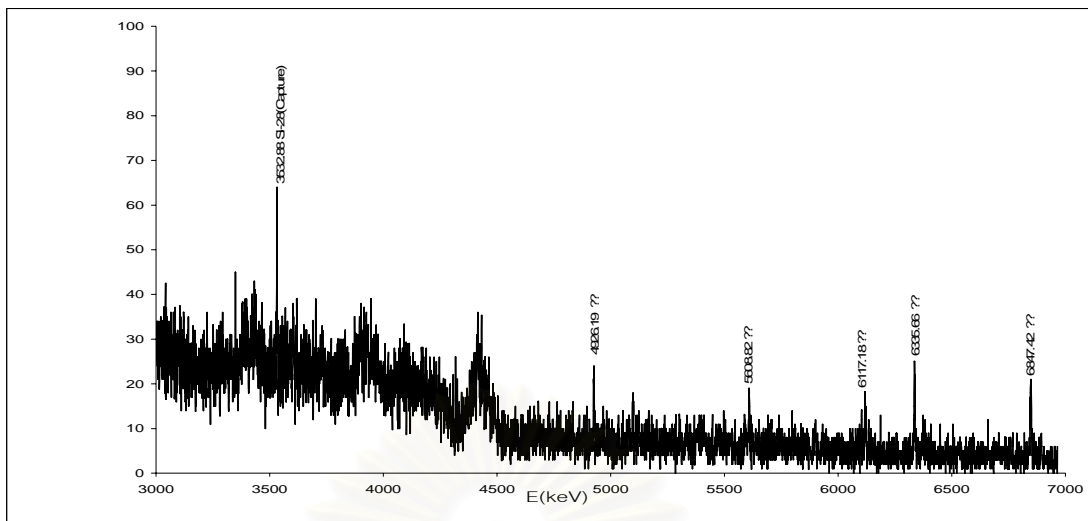
รูปที่ ข.15 สเปกตรัมรังสีฟอตอนตีแถมมาของสารเคมีซิงค์ออกไซด์



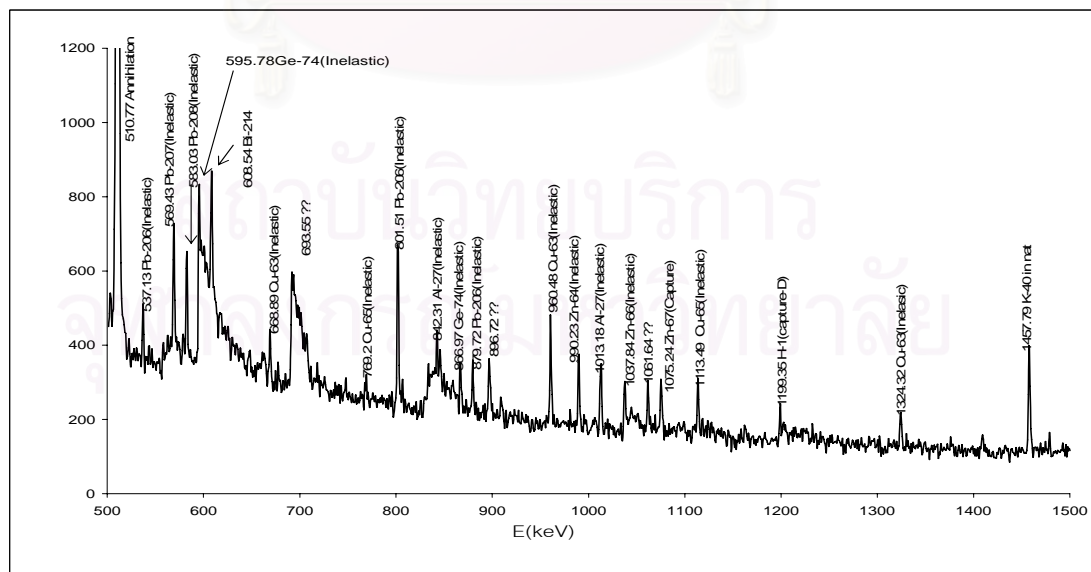
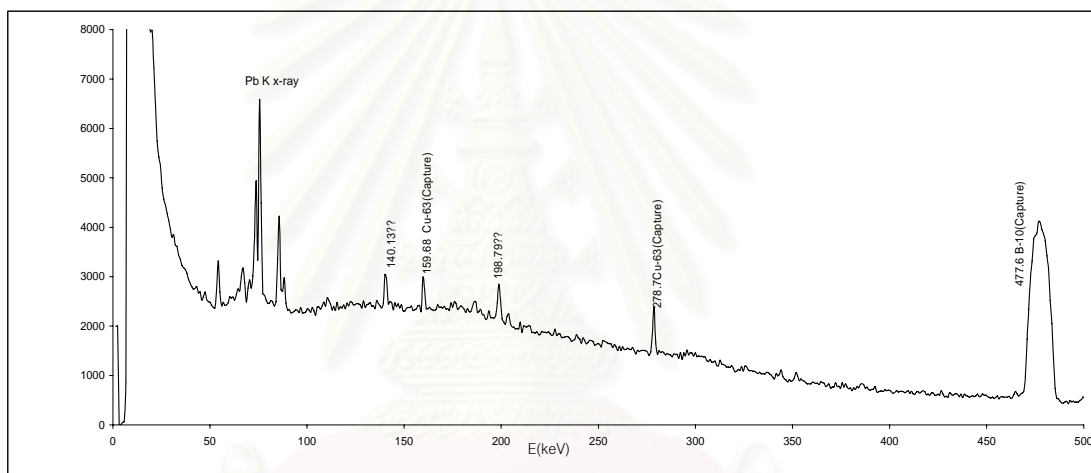
รูปที่ ข.16 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของสารเคมีซึ่งค้ออกไซด์



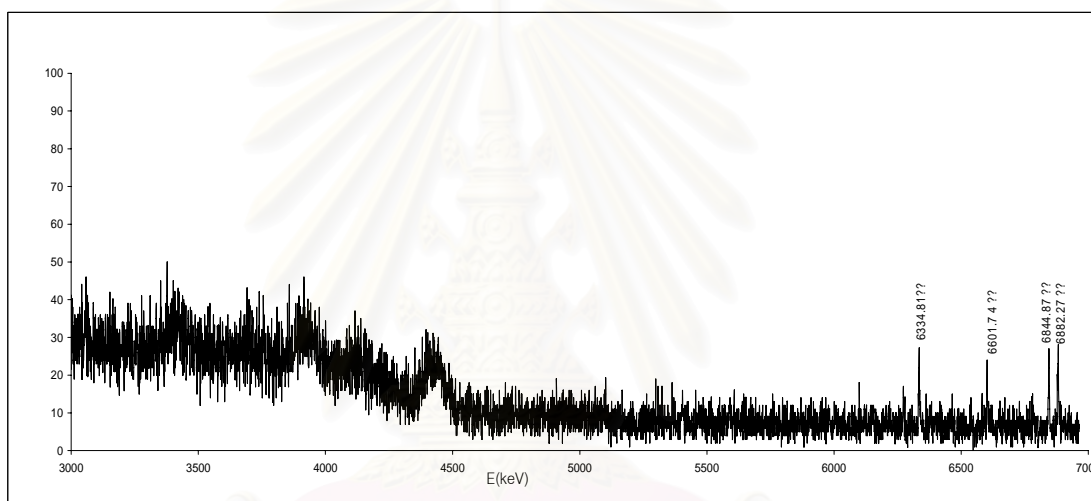
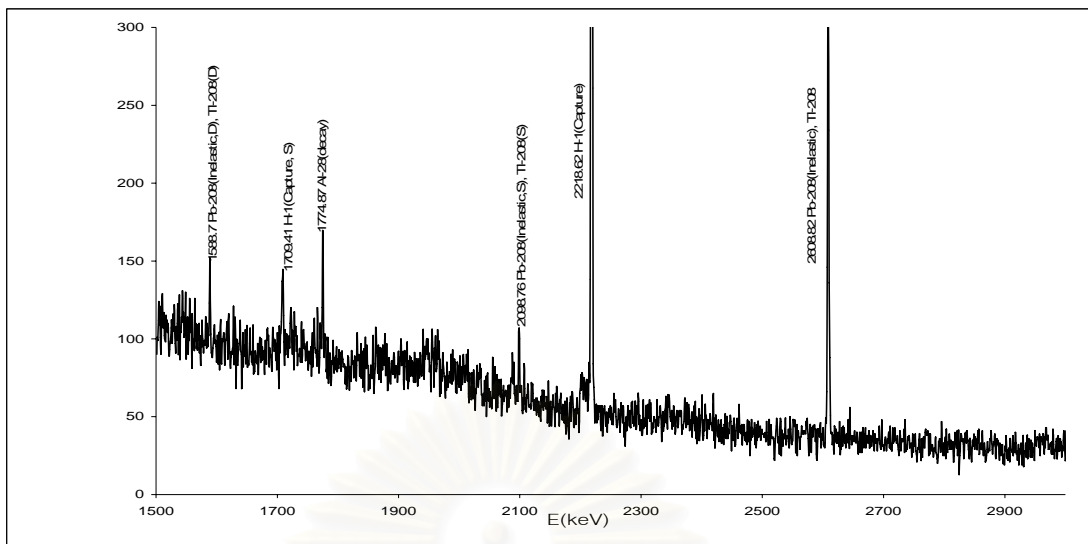
รูปที่ ข.17 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของปูนหมักโบราณ



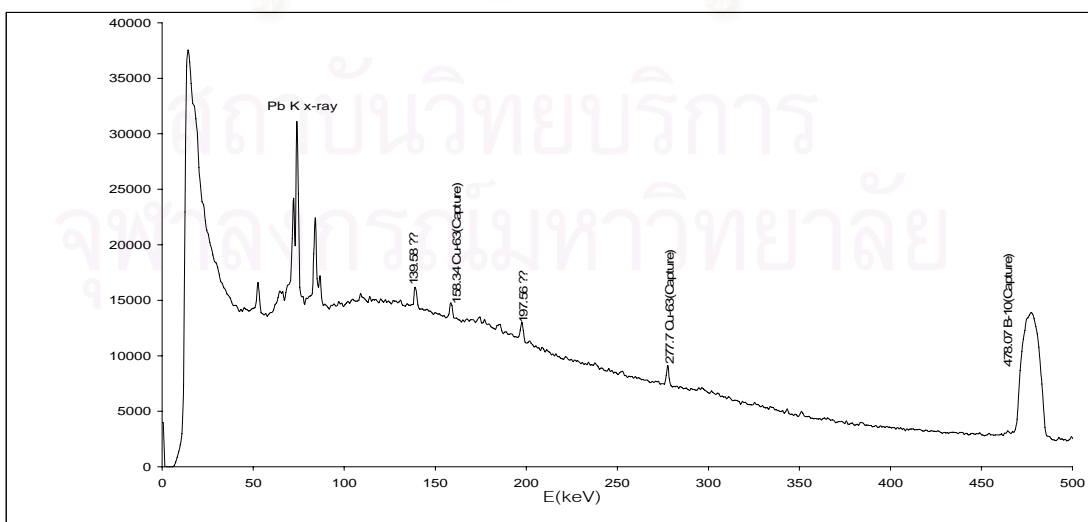
รูปที่ ข.18 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของปูนหมักโบราณ



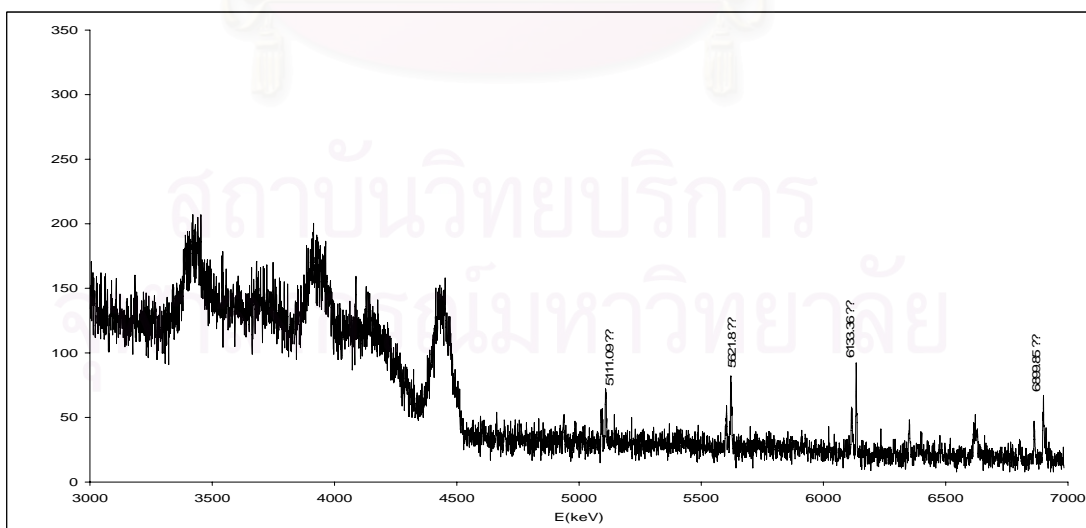
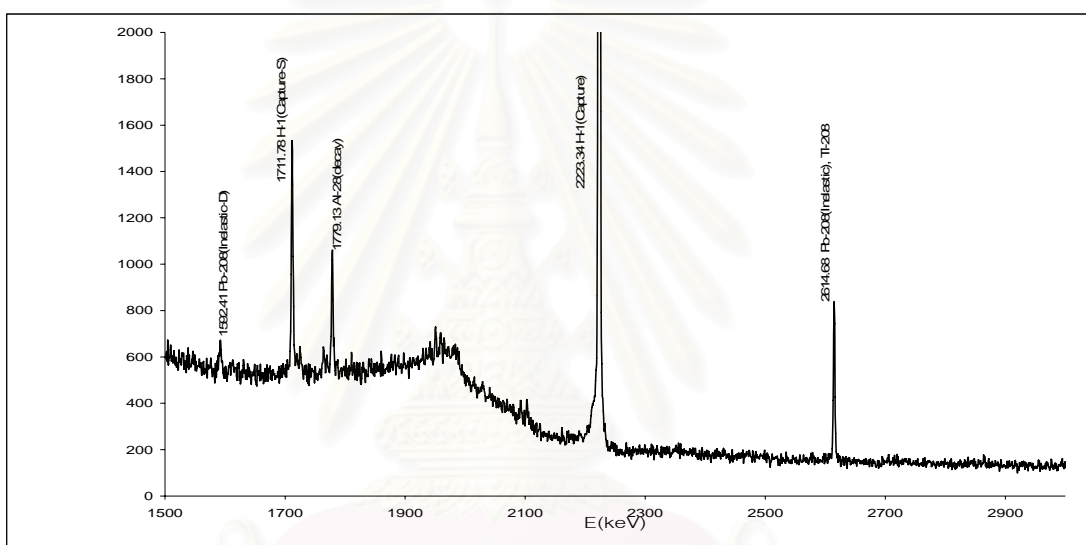
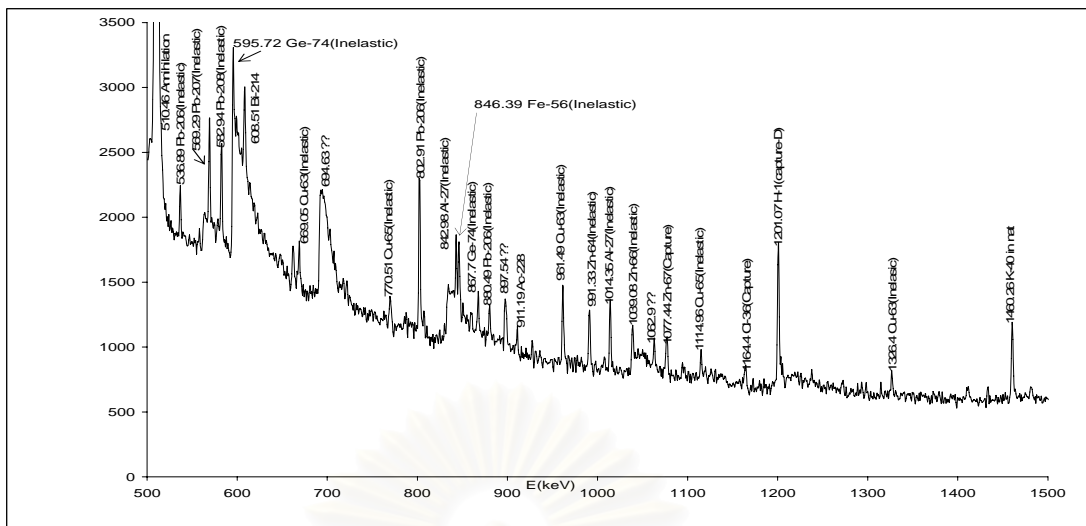
รูปที่ ข.19 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลืองหน้าตัก 22 ซม. สูง 55 ซม.



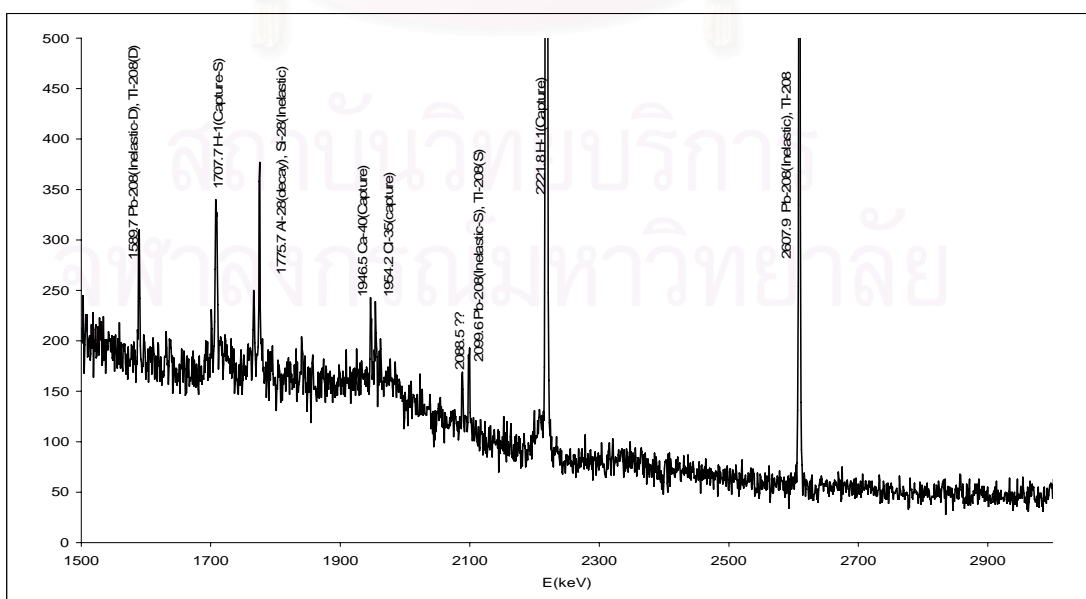
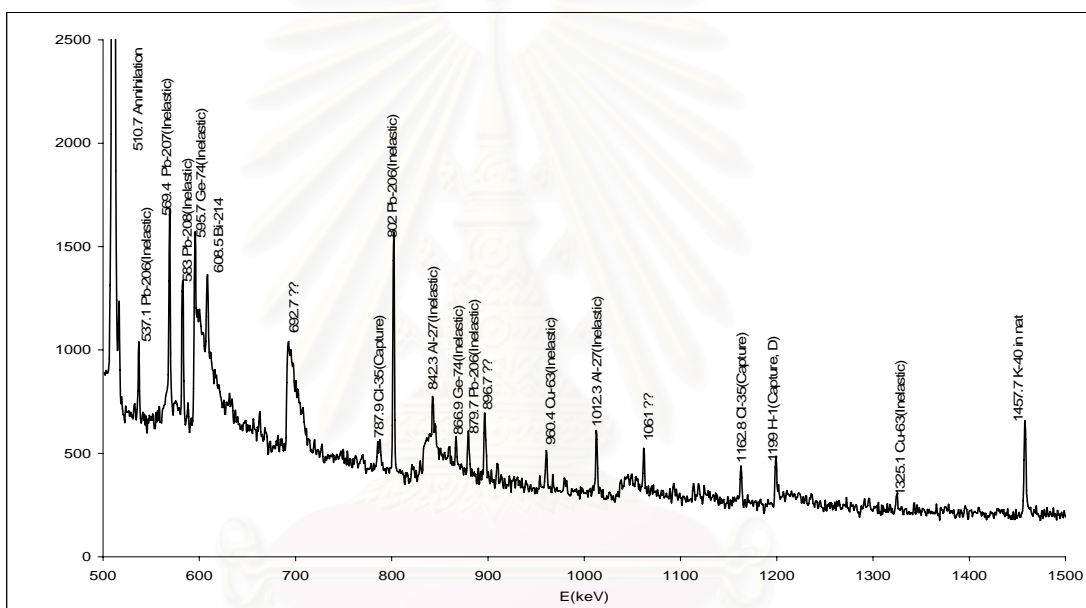
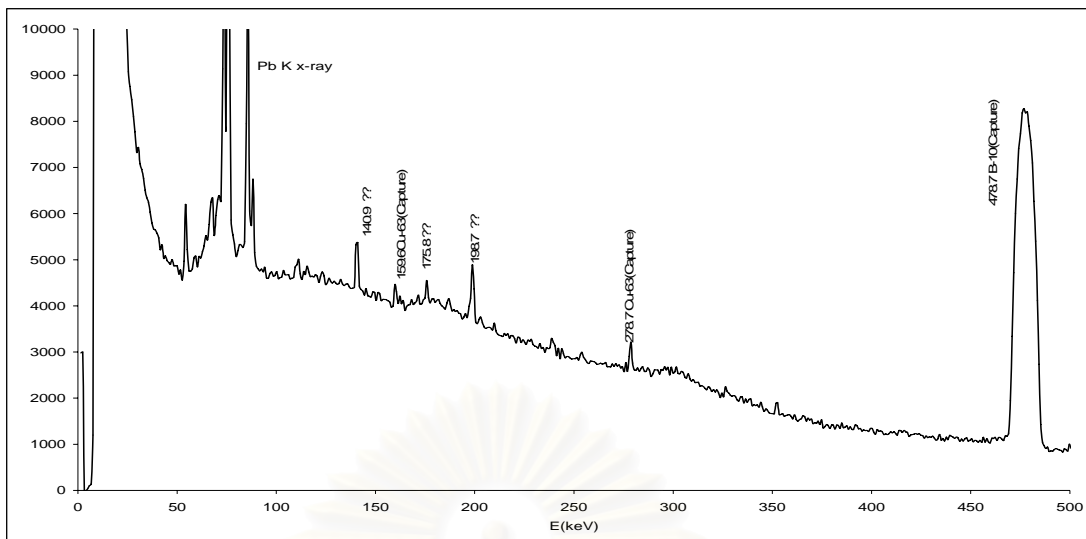
รูปที่ ข.20 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลืองหน้าตัก 22 ซม. สูง 55 ซม.



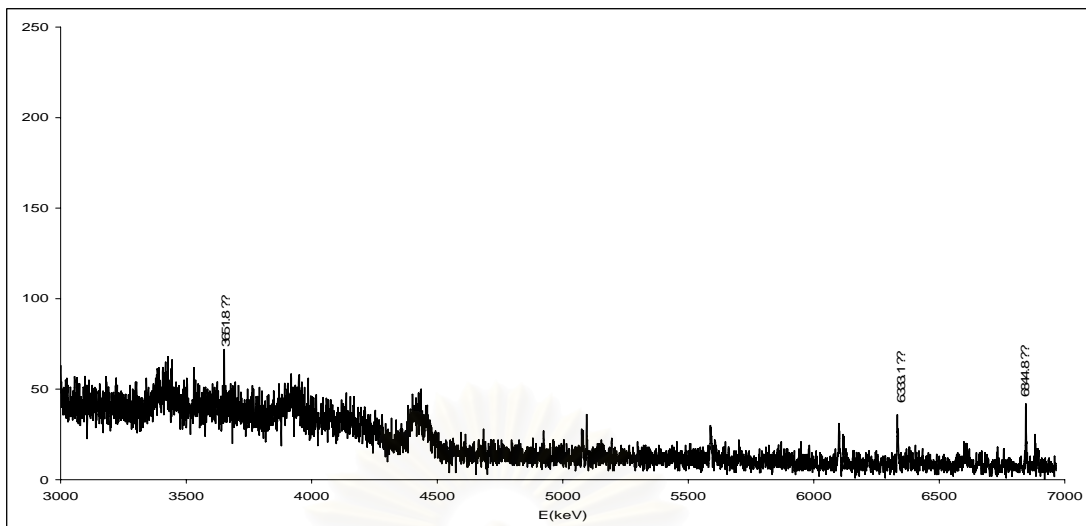
รูปที่ ข.21 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลืองหน้าตัก 22 ซม. สูง 49 ซม.



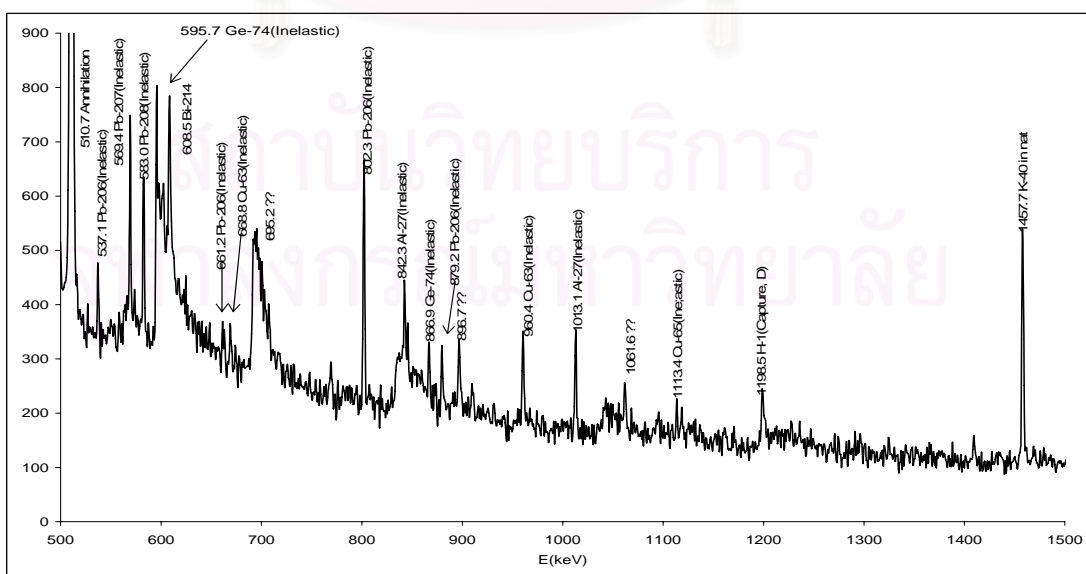
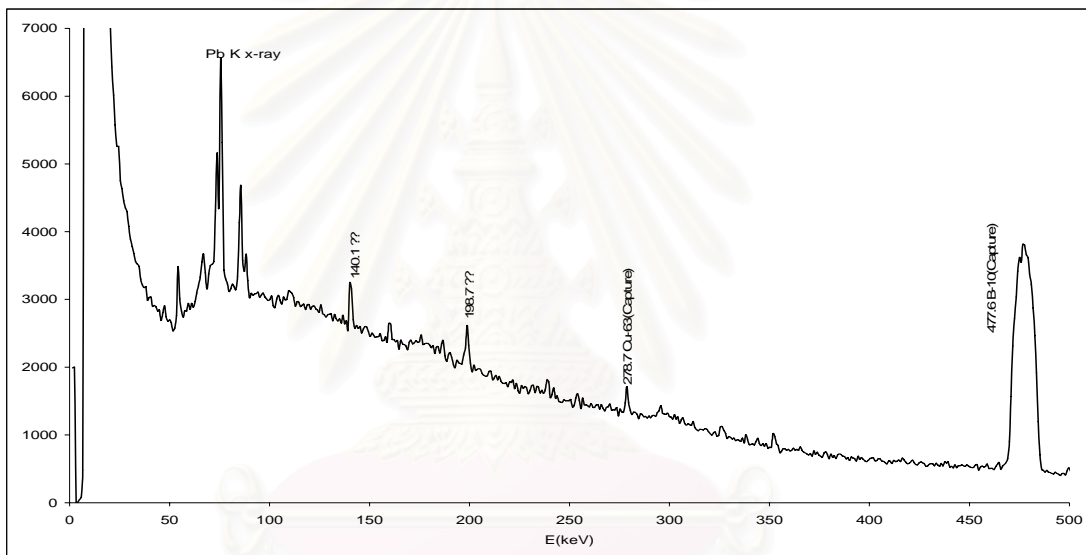
รูปที่ ข.22 สเปกตรัมรังสีฟรอมต์แกมมาของพระพุทธรูปทองเหลืองหน้าตัก 22 ซม. สูง 49 ซม.



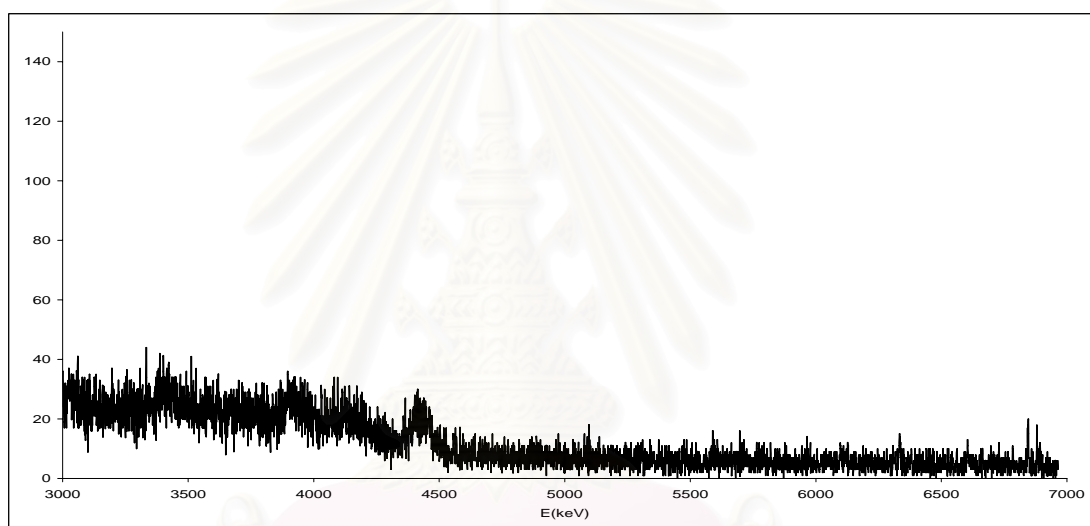
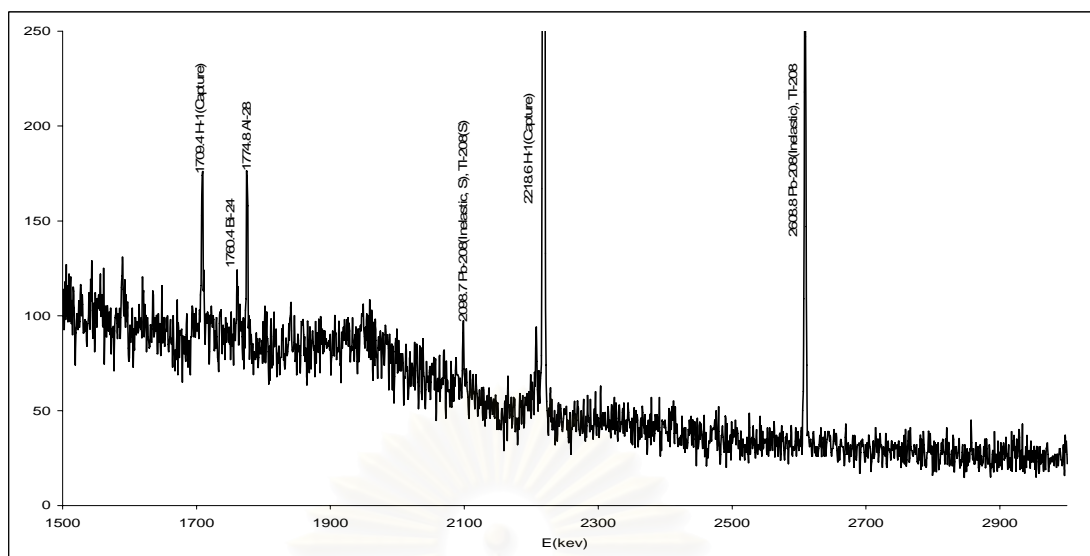
รูปที่ ข.23 สเปกตรัมรังสีฟอตอนตีเกมมาของพระพุทธรูปสำริดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม.



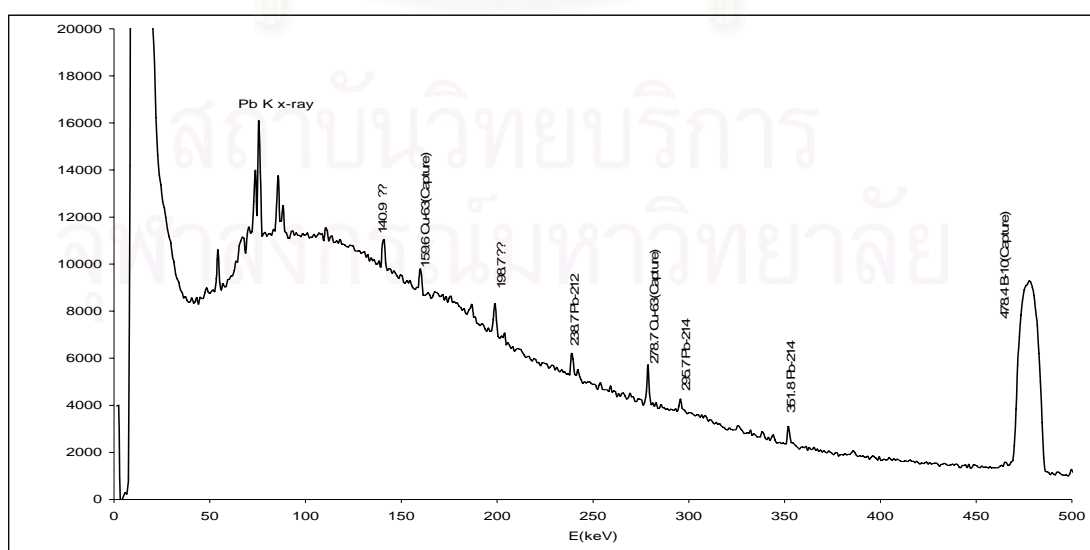
รูปที่ ข.24 สเปกตรัมรังสีฟลูออโรสโคปของพระพุทธรูปสำริดหน้าตัก 16.0 ซม. สูง 23.0 ซม.



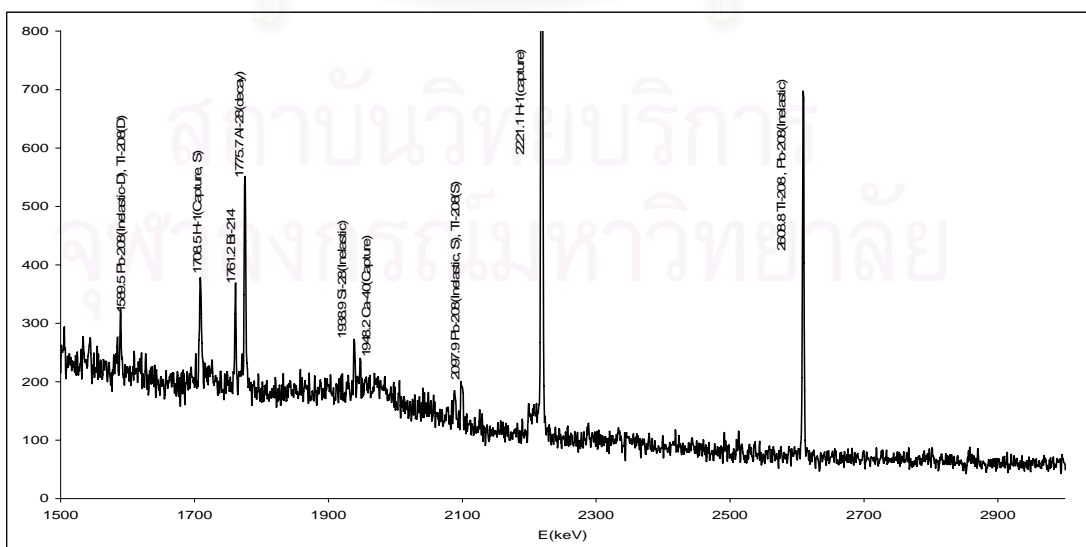
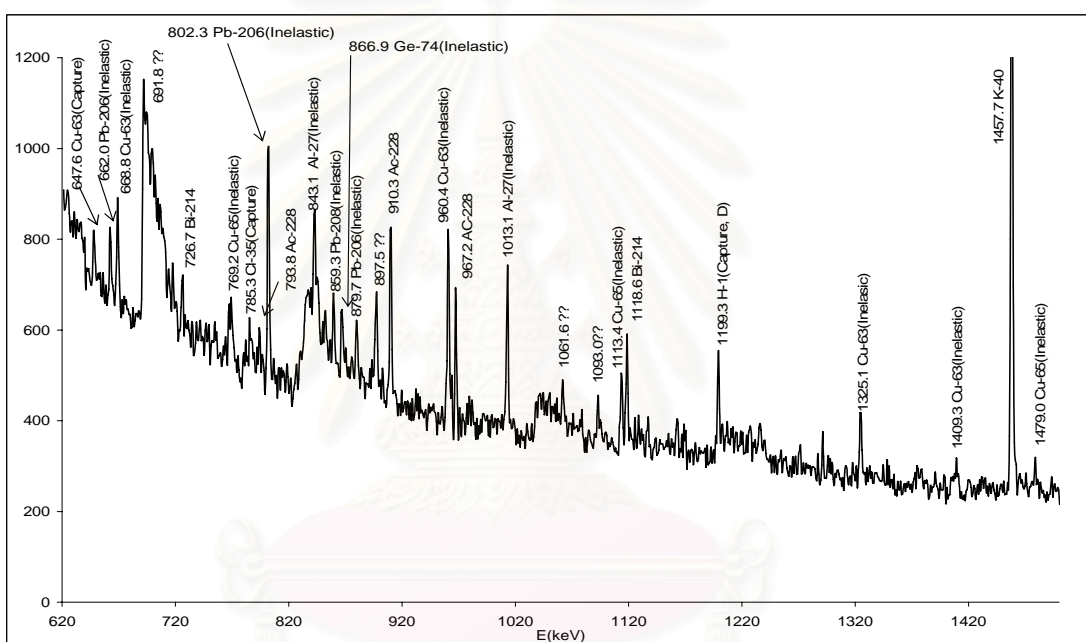
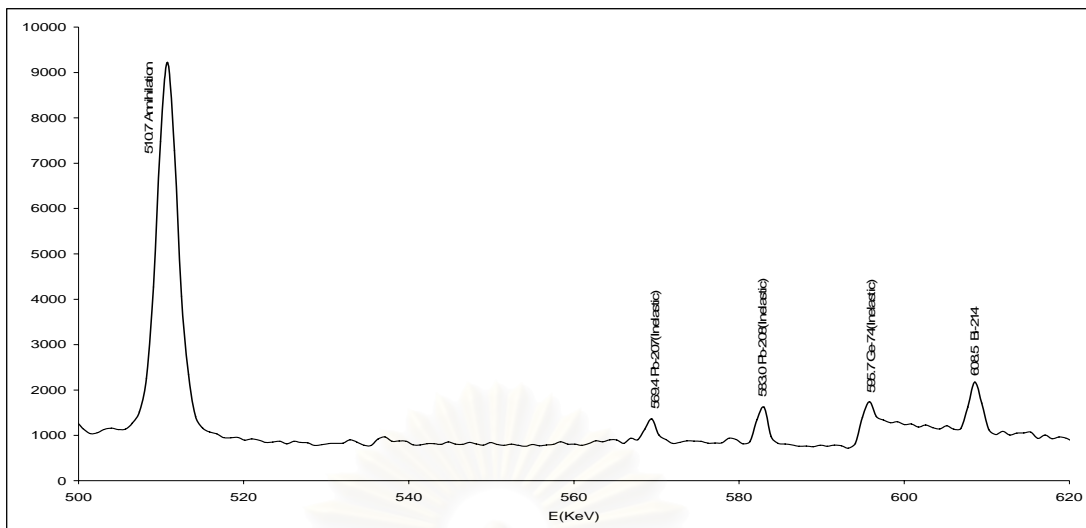
รูปที่ ข.25 สเปกตรัมรังสีฟลูออโรสโคปของระฆังสำริด



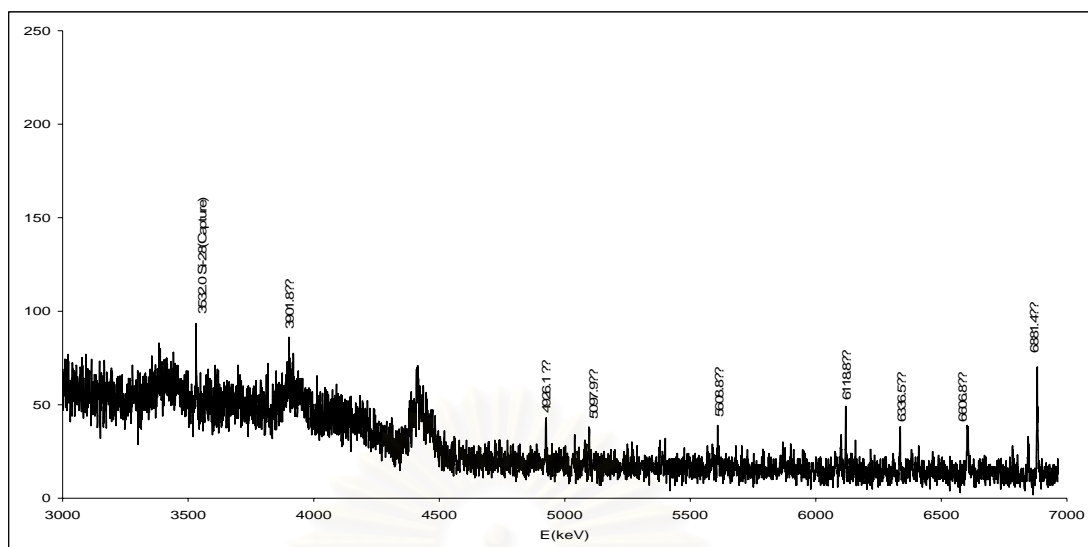
รูปที่ ข.26 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์เกมมาของแร่สังสาริต



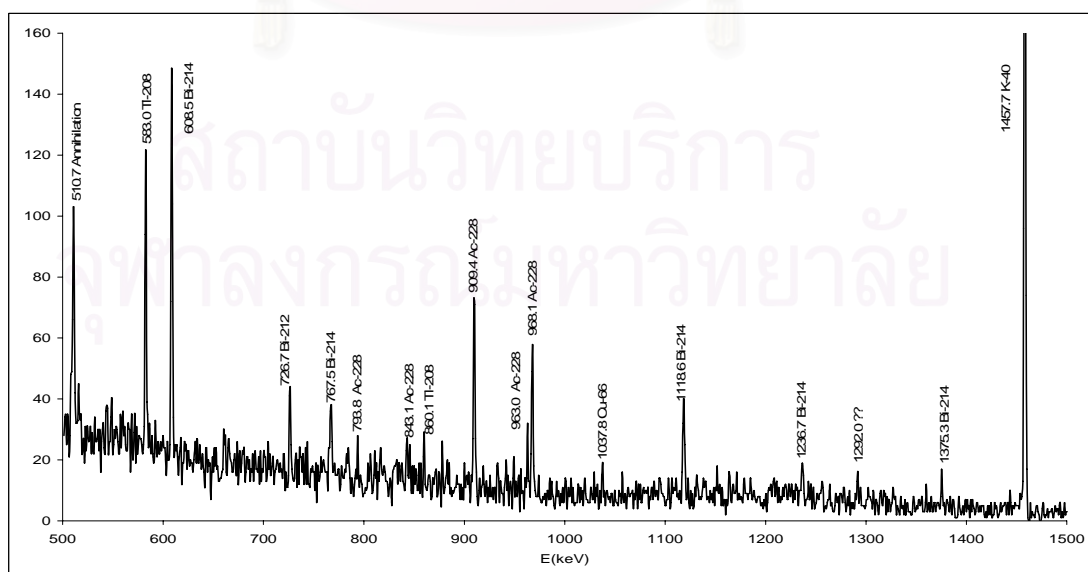
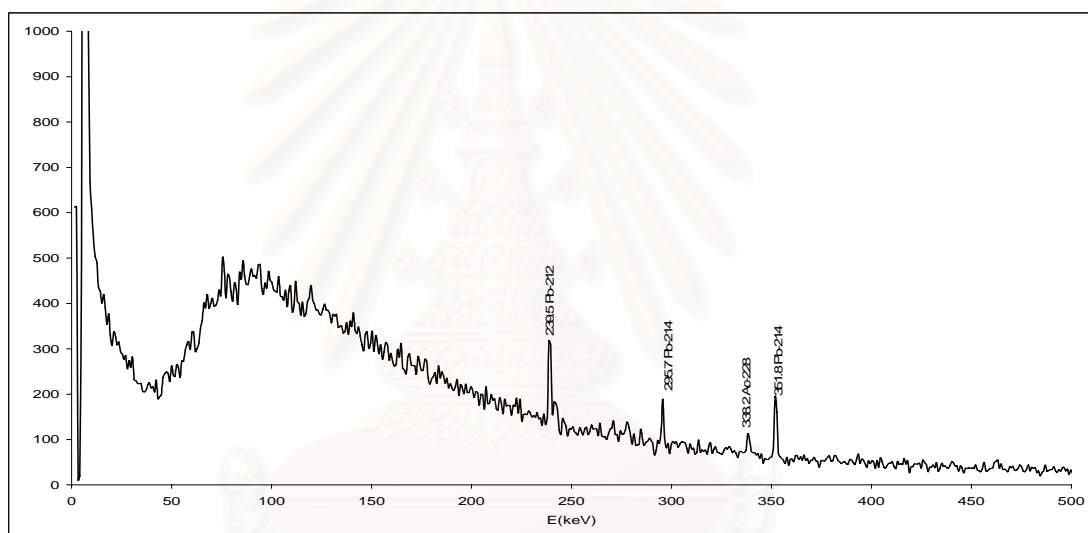
รูปที่ ข.27 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์เกมมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 1)



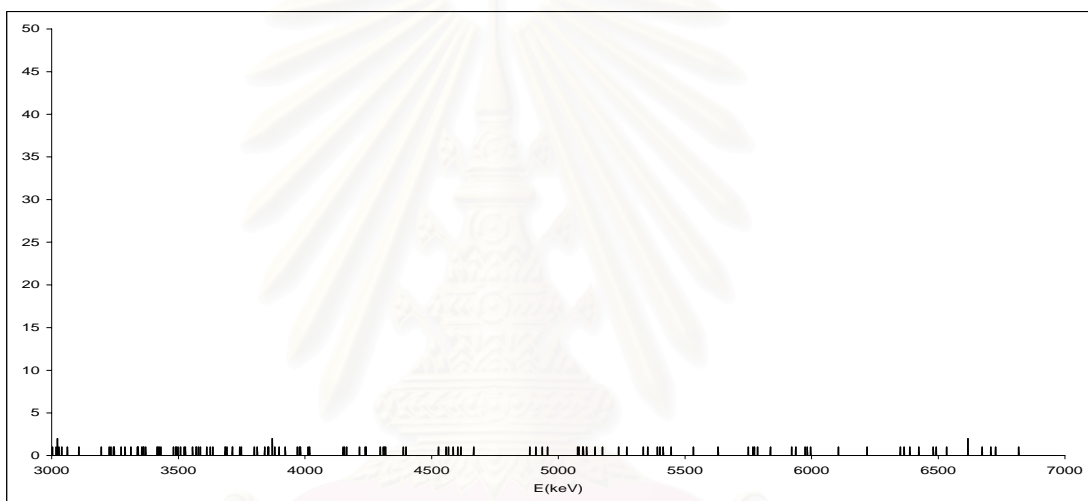
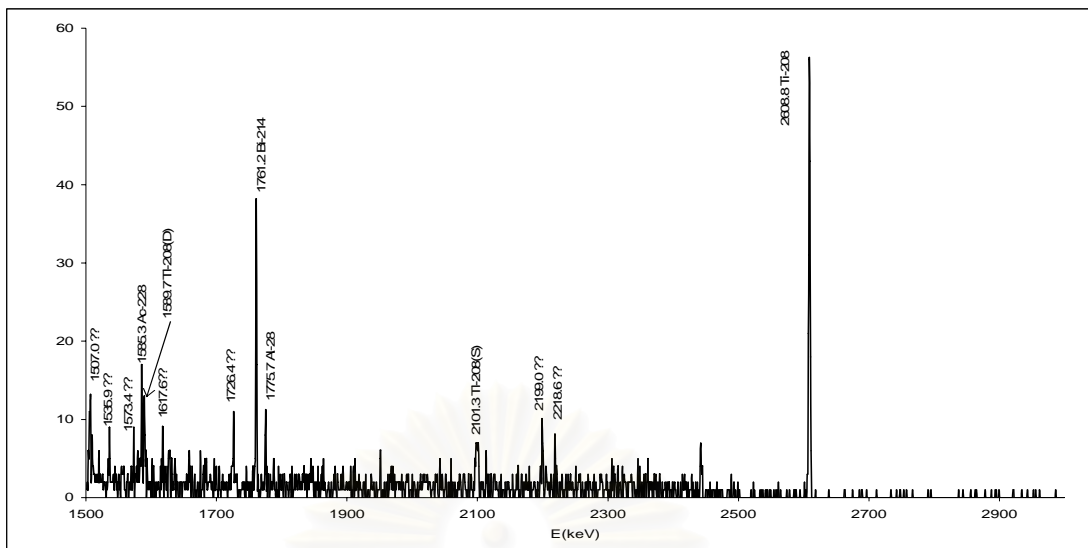
รูปที่ ข.28 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 1)



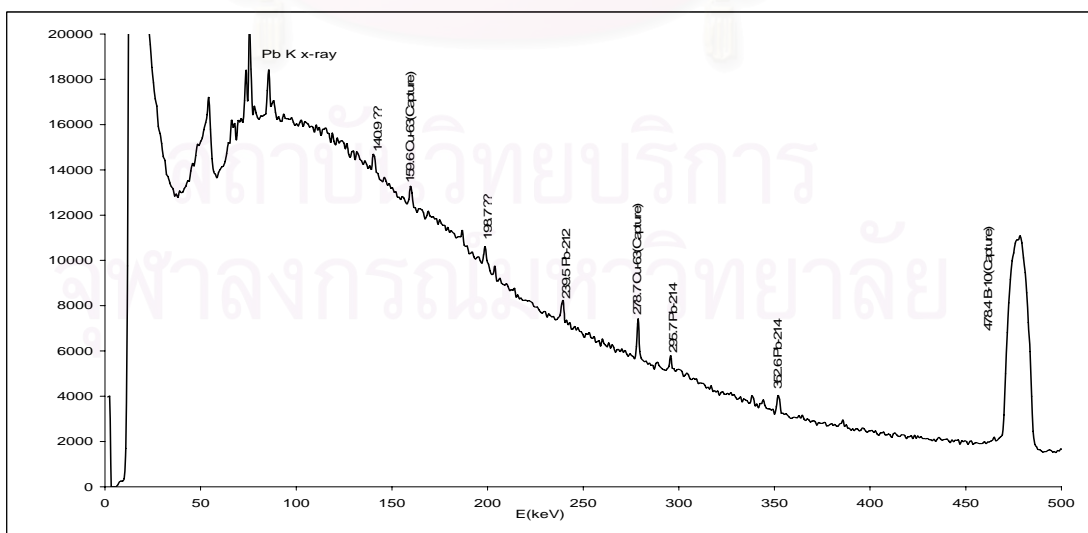
รูปที่ ข.29 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 1)



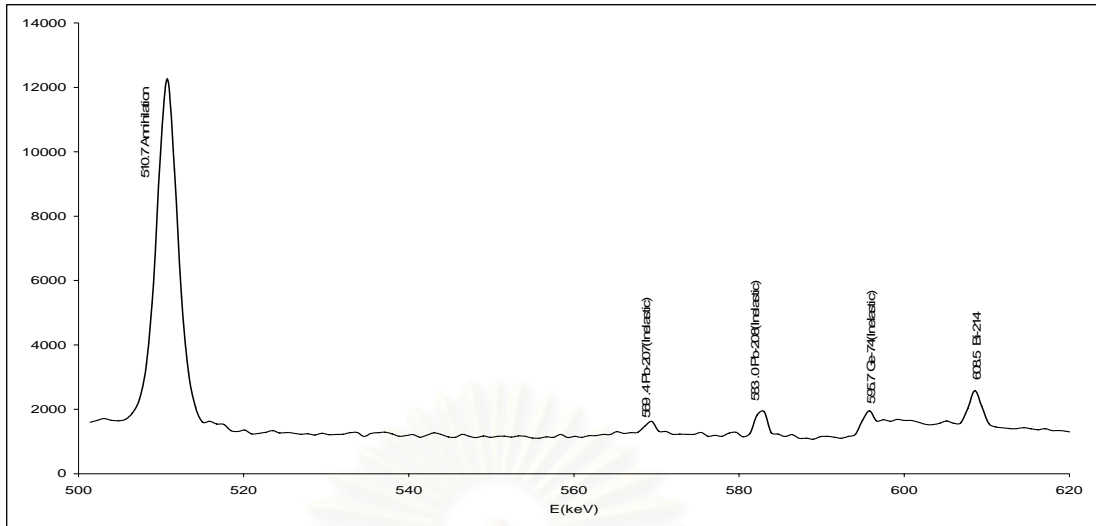
รูปที่ ข.30 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากชุดวิเคราะห์ที่ 1



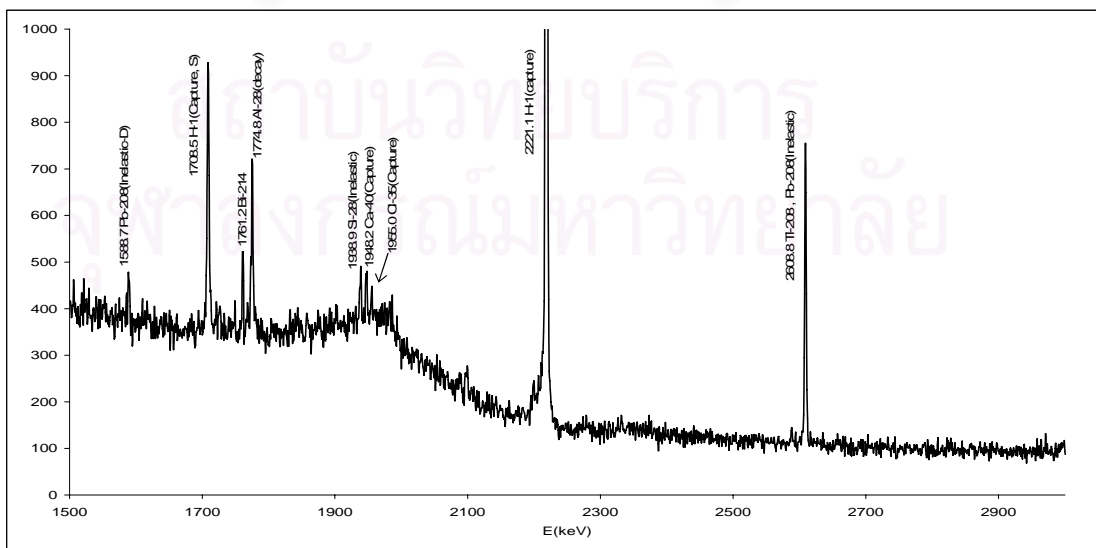
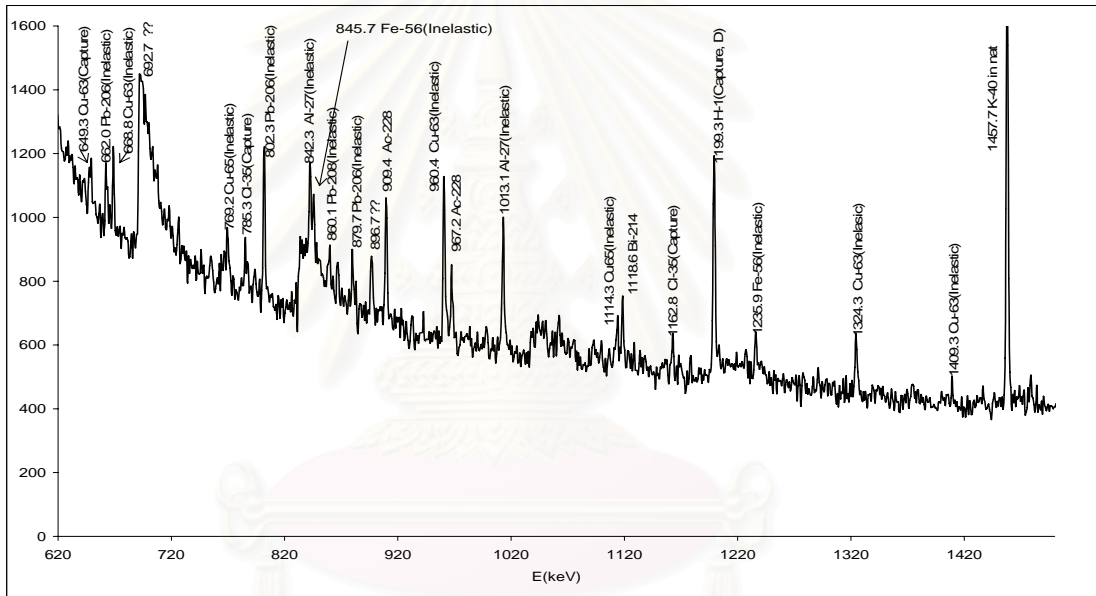
รูปที่ ข.31 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากจุดวิเคราะห์ที่ 1



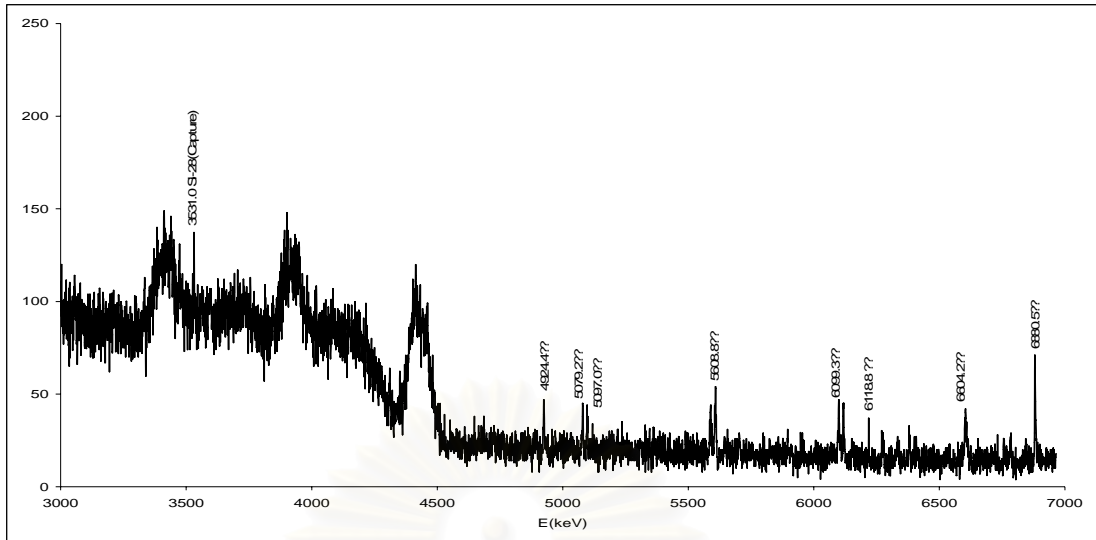
รูปที่ ข.32 สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 2)



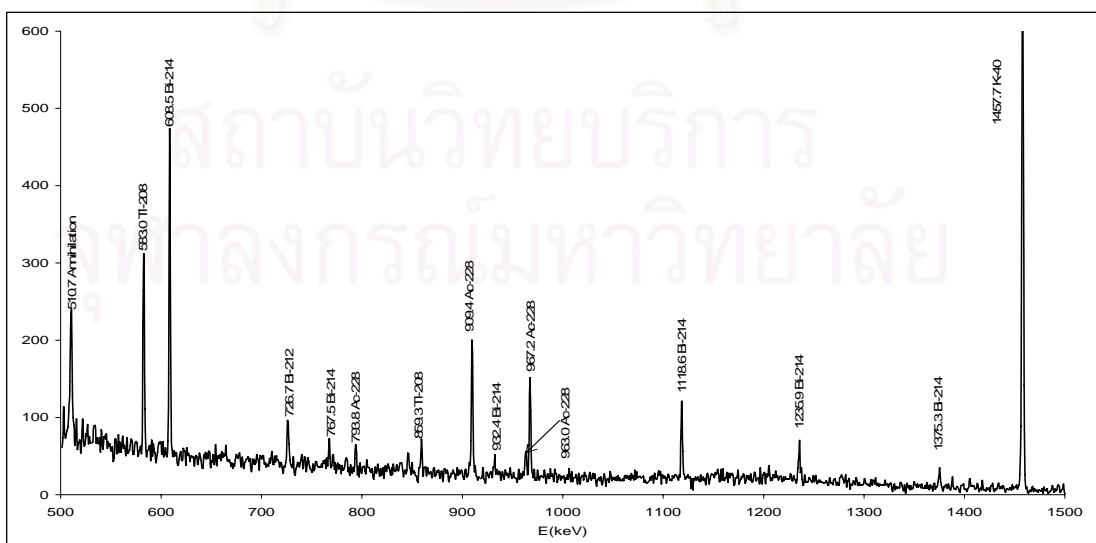
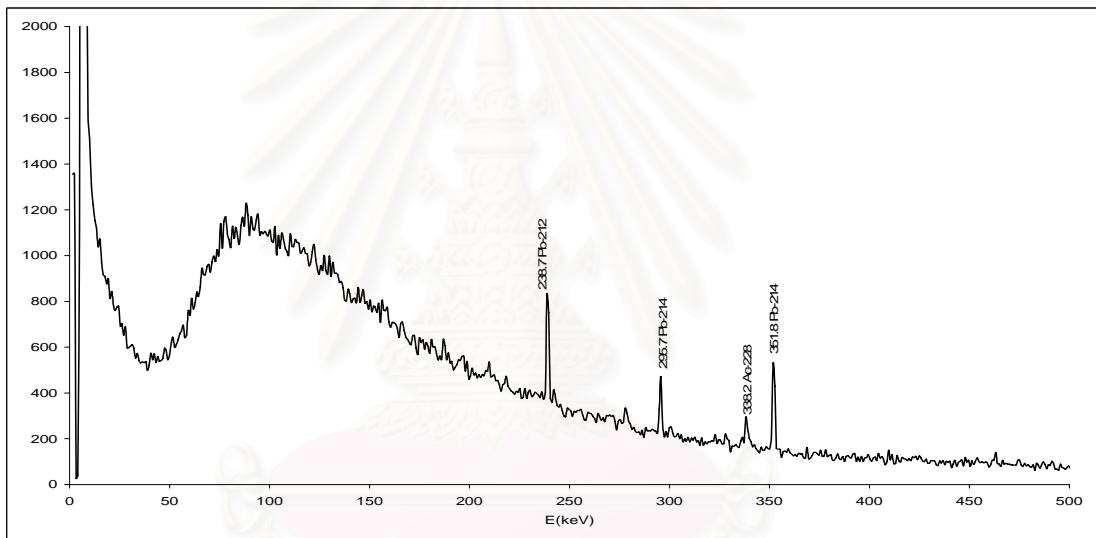
รูปที่ ข.33 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต่อเนื่องมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 2)



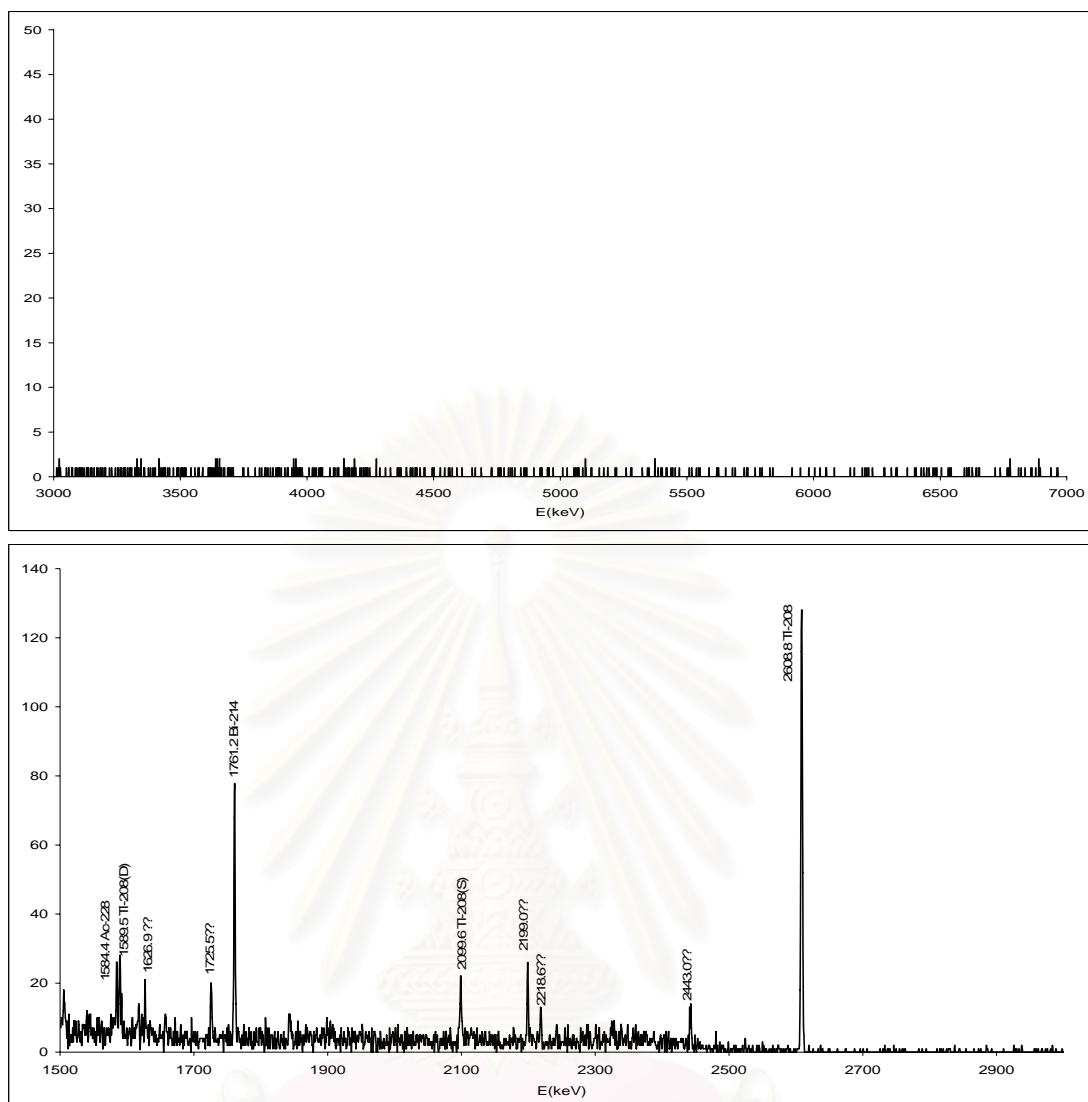
รูปที่ ข.34 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต่อเนื่องมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 2)



รูปที่ ข.35 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาของพระประธาน วัดหน้าพระเมรุ จ.อยุธยา(จุดที่ 2)



รูปที่ ข.36 สเปกตรัมรังสีฟอรอมต์แกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากจุดวิเคราะห์ที่ 2



รูปที่ ข.37 สเปกตรัมรังสีฟอตอนต์แกมมาเมื่อนำต้นกำเนิดนิวตรอนออกจากจุดวิเคราะห์ที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางพวงพร ศรีสมบุญ เกิดวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัย ศิลปากร ในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปี การศึกษา 2547 สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ สังกัดสำนักพิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติ กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย