

การตรวจวัดถูระเบิดโดยการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจน



นางสาวนภลัย คำสีม่วง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

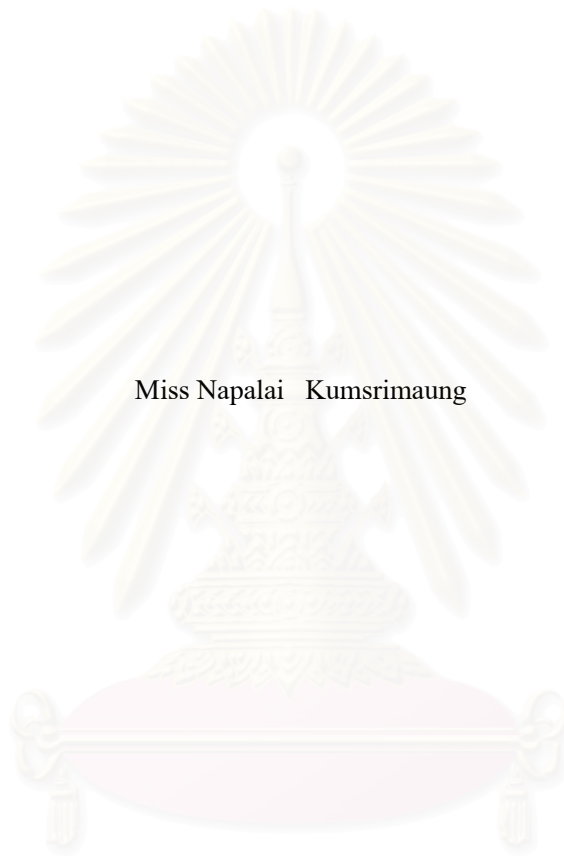
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1404-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETECTION OF EXPLOSIVES BY MEASUREMENT OF PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY FROM
NITROGEN



Miss Napalai Kumsrimaung

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2002

ISBN 974-17-1404-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจวัดฤทธิ์เบ็ดโดยการวัดรังสีฟอสฟอรัสจากไนโตรเจน
โดย	นางสาวนภลัย คำสีม่วง
สาขาวิชา	นิเวศวิทยาระบบนิเวศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์สุวรรณ์ แสงเพ็ชร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... กรรมการ
(พลตำรวจตรีดิฉันธร วงศ์ไทย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณพร ภัทรสุมนต์)

นภลัย คำสีม่วง : การตรวจวัดระเบิดโดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน
(DETECTION OF EXPLOSIVES BY MEASUREMENT OF PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY
FROM NITROGEN) อ. ที่ปรึกษา :รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 74 หน้า. ISBN 974-17-1404-1

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดระเบิดโดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไนโตรเจนพลังงาน 10.829 MeV ซึ่งใช้ $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ ความแรง 5 คูรี (185 กิกะเบคเคอเรล) และ $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรง 3 คูรี (111 กิกะเบคเคอเรล) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน โดยวางอยู่ในถังน้ำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 1.2 เมตร ซึ่งต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนอยู่ลึกลงไปจากปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอนเท่ากับ 56 เซนติเมตร ท่อนำนิวตรอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร ยาว 56 เซนติเมตร ทำหน้าที่ในการบังคับลำเทอร์มัลนิวตรอนไปยังตำแหน่งที่วางกล่องตัวอย่าง โดยมีหัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด $5''\times 5''$ จำนวน 2 ชุด วางอยู่ด้านข้างของกล่องตัวอย่างทั้งสองด้านโดยหันหน้าหัววัดเข้าหากัน เพื่อทำการตรวจวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนพลังงาน 10.829 MeV การทดลองในช่วงแรกได้ใช้ตัวอย่างที่มีไนโตรเจนสูง ได้แก่ ยูเรียปริมาณ 670-1000 กรัม และการทดลองในช่วงหลังได้ใช้วัตถุระเบิดชนิด TNT ปริมาณ 480 กรัม และ C-4 ปริมาณ 315 กรัม ซึ่งบรรจุอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ จากผลการทดลองพบว่าสามารถเห็นพีคของรังสีแกมมาพลังงาน 10.829 MeV ได้อย่างชัดเจนภายในเวลาประมาณ 500 วินาที เมื่อใช้เพียงหัววัดเดียว และใช้เวลาประมาณ 250 วินาที เมื่อใช้ทั้งสองหัววัดรวมกัน ซึ่งอาจสรุปได้ว่าระบบนี้เหมาะสำหรับใช้ในการตรวจสอบวัตถุระเบิดได้ดีในสถานที่เฉพาะแต่ไม่เหมาะสำหรับใช้ในภาคสนาม การเพิ่มความไวในการตรวจวัดยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนและการใช้หัววัดรังสีแกมมาหลายชุด

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4270374521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: NEUTRON CAPTURE / PROMPT GAMMA-RAY / PGA / NITROGEN

NAPALAI KUMSRIMAUNG : DETECTION OF EXPLOSIVES BY
MEASUREMENT OF PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY FROM NITROGEN.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, 74 PP. ISBN 974-17-
1404-1.

In this research, measurement of 10.829 MeV prompt captured gamma-rays from $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ reaction was experimentally investigated for detection of explosives. The neutron irradiation facility consisted of a 5-Ci (185 GBq) $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ and a 3-Ci (111 GBq) $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ neutron sources submerged in a 1.2 m diameter, 1.2 m height water tank at 56 cm depth. A 21 cm diameter, 56 cm long neutron collimator allowed thermal neutrons to reach the sample box placing above the water tank. Two 5"×5" NaI(Tl) detectors were positioned facing each other beside the sample box to detect the 10.829 MeV gamma-rays emitted in presence of nitrogen. The system was first tested using a nitrogen-rich compound i.e. 670-1000 g urea and finally using 480 g TNT and 315 g C-4 contained in a parcel box. It was found that 10.829 MeV gamma-ray peaks could be clearly observed within approximately 500 seconds for single detector and 250 seconds for dual detectors. It could be concluded that the system was applicable to detect explosives and was suitable for use at specific location but not for field use. The detection sensitivity could still be further improved by using a stronger neutron source and multiple detectors.

Department Nuclear Technology
Field of study Nuclear Technology
Academic year 2002

Student's signature.....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว อย่างสูงยิ่ง ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา อนุเคราะห์ตำรา และเอกสารเชิงวิชาการ ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ คุณอุริช อัชชโคสิต และคุณบัญชา อุณพานิช ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นาวอากาศโทกิจสม พันธุ์โกศล ที่ช่วยติดต่อประสานงานเรื่องนำวัตถุระเบิดมาใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณจเด็จ เย็นใจ และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือทุกอย่างที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ทุนสำหรับอุดหนุนงานวิจัย ในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

๗

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 รังสีนิวตรอน.....	7
2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอนอิสระ.....	7
2.1.2 พลังงานของนิวตรอน.....	8
2.1.3 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน.....	9
2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอน.....	11
2.1.5 ภาคตัดขวางของนิวตรอน.....	15
2.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอน.....	17
2.2.1 เทคนิคการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมา.....	17
2.2.2 เทคนิคนิวตรอนเอกติเวชัน.....	22
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิธีวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	45
4.1 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน.....	45
4.2 ผลการศึกษารูปแบบการกระจายของลำนิวตรอน.....	48

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา.....	52
4.4 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสี พรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ในการเปลี่ยน ตำแหน่งของตัวอย่าง.....	55
4.5 ผลการทดสอบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน โดยใช้หัววัดรังสี แกมมาจำนวน 2 ชุด.....	56
4.6 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของ ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด.....	58
4.7 ผลการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลอง รูปแบบของตัวอย่าง.....	59
4.8 ผลการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลอง รูปแบบของตัวอย่าง โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คู รี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี.....	61
4.9 ผลของการจำลองสถานการณ์การตรวจหาวัตถุระเบิดในกล่องพัสดุไปรษณีย์ โดยใช้วิธีการสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ร่วมกับวิธีการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากไนโตรเจน.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	74

สารบัญตาราง

ณ

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $Be(\alpha, n)$	10
2.2 แสดงคุณสมบัติต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $Be(\gamma, n)$	11
2.3 แสดงค่า Sensitivity Factor และค่าพลังงานของรังสีพรมต์แกมมาที่เกิดจาก ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของธาตุบางชนิด.....	20
2.4 ตัวอย่างธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน.....	26
4.1 ผลการศึกษาระยะที่เหมาะสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบน ของท่อนำนิวตรอน.....	45
4.2 ผลการศึกษาจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนเมื่อเพิ่มความสูงของระดับน้ำในท่อนำ นิวตรอน.....	47
4.3 ผลการศึกษาระยะระหว่างผิวหน้าของหัววัดรังสีถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำนิวตรอนที่ มีผลต่อค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์ (P/B).....	53
4.4 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรมต์ แกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่าง ยูเรียม 668 กรัม.....	55
4.5 ผลการทดสอบการวัดรังสีพรมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด เมื่อ วางตัวอย่างไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน.....	56
4.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนปริมาณของตัวอย่างยูเรียมที่มีผลต่อการใช้เวลาในการ ตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรมต์แกมมา.....	58
4.7 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรมต์ แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่าง ยูเรียม 668 กรัม.....	59
4.8 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรมต์ แกมมาเมื่อนำยูเรียม 1 กิโลกรัม มาวาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์	60
4.9 ผลการทดสอบวัดรังสีพรมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของ ตัวอย่างโดยใส่หนังสือและเสื้อผ้าร่วมกับยูเรียมวางอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์.....	61
4.10 ผลการทดสอบวัดรังสีพรมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของ ตัวอย่างอื่น ๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบวางอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์.....	61

สารบัญตาราง

ญ

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยใส่หนังสือและเสื้อผ้าร่วมกับยูเรียไว้ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ ซึ่งใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี.....	62
4.12 ผลการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในการตรวจวัดถูระเบิดในกล่องพัสดุไปรษณีย์ ซึ่งใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี.....	64



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

๘

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ และ ^{252}Cf	10
2.2 อันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอน.....	14
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางของการดูดกลืนกับความเร็วของนิวตรอน..	17
2.4 การเกิดรังสีฟรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน.....	18
2.5 การเกิดรังสีดีเลย์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน.....	22
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแรงรังสีขณะที่อาบรังสีและปล่อยให้สลายตัว....	25
3.1 ระบบอาบรังสีนิวตรอนในระยะเริ่มศึกษา.....	30
3.2 แผนผังของระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในระยะเริ่มศึกษา.....	31
3.3 แผนภาพการเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน.....	32
3.4 แผนภาพการหาระดับน้ำที่เหมาะสมซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความเข้มของนิวตรอน.....	33
3.5 แผนภาพตารางในการวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอนในแต่ละตำแหน่งบนท่อนำนิวตรอน.....	34
3.6 แผนภาพการจัดระบบอาบรังสีในการวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอน.....	35
3.7 แผนภาพการเลื่อนตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา.....	36
3.8 แผนภาพการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนำนิวตรอน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 1 ชุด.....	37
3.9 แผนผังของระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด.....	38
3.10 แผนภาพการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในยูเรีย 1 กิโลกรัมโดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด.....	38
3.11 ภาพถ่ายระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากการใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด.....	39
3.12 ภาพถ่ายของระบบวิเคราะห์การวัดรังสีฟรอมต์แกมมา.....	39
3.13 แผนภาพการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนำนิวตรอน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด.....	40
3.14 แผนภาพการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาในยูเรีย 1 กิโลกรัมโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ตรงกลางของท่อนำนิวตรอน.....	42
3.15 ภาพถ่ายกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่ภายในบรรจุสายไฟและกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่.....	43

สารบัญภาพ

ฎ

รูปที่	หน้า
3.16 ภาพถ่ายกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่ภายในบรรจุแผ่นตะกั่ว สายไฟ และกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่.....	44
3.17 ภาพถ่ายวัตถุระเบิดชนิด TNT และ C-4.....	44
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอน.....	46
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคะเมียมกับระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอน.....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะความสูงของระดับน้ำในท่อนำนิวตรอน.....	47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคะเมียมกับระยะความสูงของระดับน้ำในท่อนำนิวตรอน.....	48
4.5 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 0 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	49
4.6 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 2 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	49
4.7 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 4 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	50
4.8 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 6 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	50
4.9 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 8 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	51
4.10 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 10 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	51
4.11 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 12 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน.....	52
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีฟรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์กับตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา.....	53
4.13 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ของระบบ.....	54
4.14 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากตัวอย่างยูเรเนียม 1 กิโลกรัม.....	54

สารบัญภาพ

ฐ

รูปที่	หน้า
4.15 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากแบคทีเรียของระบบ โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด..	57
4.16 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากตัวอย่างยูเรเนียม 1 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด.....	57
4.17 รูปภาพสแกนด้วยรังสีเอกซ์ของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งภายในบรรจุสายไฟ และ กระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่.....	63
4.18 รูปภาพสแกนด้วยรังสีเอกซ์ของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งภายในบรรจุแผ่นตะกั่ว สายไฟ และกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่.....	63



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา^{[1],[2],[3]}

ในช่วงระยะหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจวัดโลหะเบ็ดมาโดยตลอดทั้งการตรวจหาค่าเบ็ดที่ยังหลงเหลือจากการสู้รบในศึกสงครามโดยฝังกระจายอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของโลกมากกว่า 70 ประเทศ และวัดโลหะเบ็ดที่ถูกซุกซ่อนไว้ในสิ่งของต่าง ๆ อาทิเช่น กระเป๋าเดินทาง หรือกล่องพัสดุไปรษณีย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นเรื่องยากต่อหน่วยรักษาความปลอดภัยหรือหน่วยตรวจเบ็ดฉุกเฉินระดับต่าง ๆ ที่จะหาเครื่องมือพิเศษที่สามารถตรวจสอบและพิสูจน์วัดโลหะเบ็ดให้ทราบได้อย่างชัดเจนและต้องใช้เวลาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตัววัดโลหะเบ็ดนั้นมีขนาด รูปร่าง และส่วนประกอบต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัย เพื่อหาวิธีการต่าง ๆ ที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับในการตรวจหาวัดโลหะเบ็ดที่สามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วและมีความถูกต้องสูง โดยได้มีการพยายามใช้เทคนิคการตรวจหาวัดโลหะเบ็ดแบบอื่น ๆ เพิ่มเติมเข้ามาอีกนอกเหนือจากวิธีเดิมที่นิยมใช้กัน เช่น การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้เครื่องตรวจโลหะ และการใช้สุนัขดมกลิ่น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะที่เหมือนกันของเทคนิคเหล่านี้คือ สามารถตรวจวัดสิ่งผิดปกติในพื้นที่ดินได้แต่ไม่สามารถชี้บอกได้ว่ามีวัดโลหะเบ็ดอยู่ในสิ่งนั้นหรือไม่ ต่อมาได้มีการนำเทคนิคทางนิวเคลียร์มาปรับประยุกต์ใช้ในการตรวจหาวัดโลหะเบ็ดและกับระเบิด เทคนิคที่ใช้กันส่วนใหญ่คือการใช้เครื่องสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งใช้ตรวจวัดโลหะเบ็ดที่ถูกซุกซ่อนไว้ในสิ่งของต่าง ๆ แต่ไม่สามารถใช้ตรวจหาค่าเบ็ดในภาคสนามได้ เนื่องจากวิธีนี้ต้องใช้พื้นที่สองด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของวัตถุที่จะตรวจ ซึ่งเทคนิคที่อาจจะนำมาใช้ในการตรวจหาค่าเบ็ดในภาคสนามคือการแผ่รังสีทุกซีและและการกระเจิงของรังสีที่ตกกระทบ จากการศึกษาพบว่าเทคนิคทางนิวเคลียร์ที่ใช้ในการตรวจหาวัดโลหะเบ็ดนั้นยังคงมีข้อจำกัดอยู่ในแต่ละเทคนิค เช่น การใช้เครื่องสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์นี้จะไม่สามารถบอกได้ว่าในสิ่งของนั้นมีวัดโลหะเบ็ดอยู่หรือไม่ ถ้ามีวัสดุที่หนามาปิดบังไว้ เพราะว่ารังสีเอกซ์ไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุนั้นได้ จึงได้มีการนำเอาเทคนิคนิวตรอนมาใช้ประกอบในการตรวจหาวัดโลหะเบ็ดและกับระเบิด เพราะนิวตรอนสามารถที่จะทะลุผ่านวัสดุที่หนาและทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุในวัตถุนั้นได้ ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคนิวตรอนอยู่สองเทคนิคคือ เทคนิคแรกเป็นการวิเคราะห์โดยใช้พัลส์ ฟาสต์นิวตรอน และเทอร์มัลนิวตรอน (Pulsed Fast and Thermal Neutron Activation: PFTNA) ซึ่งใช้เครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบดีวเทอร์อน-ตรีเทียมชนิดปิดผนึกขนาดเล็กโดยมีพลังงานของนิวตรอนประมาณ 14.1 MeV ซึ่งหาค่าอัตราส่วนของธาตุต่าง ๆ เช่น คาร์บอนกับไนโตรเจน คาร์บอนกับออกซิเจน และคาร์บอนกับไฮโดรเจน เป็นต้น

เทคนิคที่สองเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปโดยใช้หลักที่ว่าวัตถุระเบิดนั้นมีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับในโตรเจนจะปลดปล่อยรังสีฟอสฟอรัสที่พลังงาน 10.829 MeV ถ้าทำการตรวจวัตถุระเบิดที่ถูกซ่อนไว้ในสิ่งของต่าง ๆ หรือตรวจหากับระเบิดที่ฝังอยู่ใต้ดินแล้วตรวจพบรังสีฟอสฟอรัสที่พลังงาน 10.829 MeV นี้ก็สามารถบอกได้ว่าสิ่งที่ตรวจวัดนั้นมีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบโดยคาดว่าอาจจะเป็นวัตถุระเบิด ด้วยเหตุนี้เทคนิคนิวตรอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เพื่อการตรวจสอบวัตถุระเบิดให้มีความถูกต้องสูง วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ในบางประเทศได้นำเทคนิคทางนิวเคลียร์มาใช้ในการตรวจสอบวัตถุระเบิด เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบออกมาสองรุ่น โดยแต่ละรุ่นใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดต่างกันคือ แคลิฟอร์เนียม-252 และเครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบคิวเทอรอน-คิวเทอรอน โดยมีพลังงานของนิวตรอนประมาณ 2.5 MeV ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในเครื่องต้นแบบนี้คือเทคนิคเทอร์มัลนิวตรอนแอกติเวชัน เครื่องต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นมาจะถูกนำมาทดลองใช้ในหน่วยรักษาความปลอดภัยของสนามบินเพื่อทำการตรวจหาวัตถุระเบิดที่ซ่อนอยู่ภายในกระเป๋าเดินทางของผู้โดยสาร

วิธีการตรวจวัตถุระเบิดโดยทั่วไปกระทำได้ 2 วิธีใหญ่ คือ

1. วิธีการวิเคราะห์กลิ่นหรือไอระเหย ได้ทำการศึกษากันอยู่ 4 ชนิด คือ
 - 1.1 Mass Spectroscopy (MS)
 - 1.2 Ion Mobility Spectrometry (IMS)
 - 1.3 Gas Chromatography (GC)
 - 1.4 Chemoluminescence Detection (CLD)
2. วิธีการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์ ได้ทำการศึกษากันอยู่หลายเทคนิค อาทิเช่น
 - 2.1 Gamma Ray Absorption (GRA)
 - 2.2 Thermal Neutron Activation (TNA)
 - 2.3 Fast Neutron Activation (FNA)
 - 2.4 X-ray Radiography (XR)
 - 2.5 Neutron Scattering (NS)

จากวิธีการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมานี้ ล้วนมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป และในการวิจัยครั้งนี้มุ่งสนใจที่จะนำเทคนิคเทอร์มัลนิวตรอนแอกติเวชันจากการวัดรังสีฟอสฟอรัสออกมาจาก

ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนมาทำการตรวจวัดระเบิดโดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน เพราะว่าธาตุไนโตรเจนนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่สุดในวัตถุระเบิด เพราะองค์ประกอบของวัตถุระเบิดโดยส่วนมากนั้นจะมีปริมาณไนโตรเจนอยู่ประมาณ 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนนี้มีข้อดี คือ เนื่องจากการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้มีกระบวนการหรือขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน รวมทั้งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ในตัวอย่างได้พลังงานส่วนใหญ่ของการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนนี้จะมีพลังงานสูงสามารถที่จะทะลุทะลวงจากภาชนะหรือวัสดุที่ห่อหุ้มได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ผลวิเคราะห์ได้รวดเร็ว และใช้ระยะเวลาสั้น เพราะสามารถวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมาในขณะที่อาบรังสีนิวตรอนจากไนโตรเจนได้เลย และในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกพลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนพลังงาน 10.829 MeV เนื่องจากที่พลังงานนี้จะไม่มีการรบกวนจากธาตุอื่นมารบกวนทำให้มีค่าเบคกราวด์ต่ำ

วัตถุระเบิดตามพระราชบัญญัติมาตราที่ 4^[4] หมายถึง วัตถุที่สามารถมีกำลังดันอย่างแรงต่อสิ่งห่อหุ้มล้อมโดยจับปล้นในเมื่อระเบิดขึ้น โดยมีสิ่งเหมาะสมมาทำให้เกิดกำลังดันหรือโดยการสลายตัวของวัตถุระเบิดนั้นทำให้มีแรงทำลาย เช่น TNT, RDX, C-3, C-4, ดินปืน และไนโตรกลีเซอรินเหลว เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประยุกต์เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไนโตรเจนมาใช้ในการตรวจวัดระเบิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและจัดสร้างระบบในการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรง 3 คูรี และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดค์(แทลเลียม) ขนาด 5"× 5" จำนวน 2 ชุด

2. ทดลองตรวจวัดไนโตรเจนในวัตถุระเบิด

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกแบบและสร้างระบบวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา
3. วัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนในวัตถุระเบิด
4. หาความไวในการตรวจวัดไนโตรเจน
5. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไนโตรเจน มาใช้ในการตรวจวัตถุระเบิดที่สะดวกและรวดเร็ว สำหรับเป็นแนวทางในการนำไปใช้ตรวจวัตถุระเบิดในแหล่งซุกซ่อนต่าง ๆ อาทิเช่น กระเป๋าเดินทาง กล่องพัสดุไปรษณีย์ เป็นต้น

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 P.N. Tiwari, R. Bergman and B. Larsson^[5] (1971) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาของธาตุไนโตรเจนในยูเรีย โดยใช้ $^{241}\text{Am/Be}$ ที่มีความแรงแรงรังสี 100 มิลลิวูรี่ เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) NaI(Tl) ขนาด 3"x2" จำนวน 1 ชุด ระบบอาบรังสีนิวตรอนได้ใช้พาราฟินเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน และใช้ทองแดงเป็นตัวกำบังรังสีพรอมต์แกมมาจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนและจากการทำอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับวัสดุรอบข้างไม่ให้เข้าสู่หัววัด และได้วัดความเข้มของนิวตรอน ณ ตำแหน่งอาบรังสีตัวอย่างมีค่าประมาณ $5 \times 10^2 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ผลการวิจัยพบว่า สามารถตรวจวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในสารตัวอย่างยูเรียหนัก 706 กรัมได้ โดยใช้เวลาในการวัด 800 นาที

1.6.2 Cheng-Jong Lee, Jiunn-Hsing Chao and Chien Chung^[6] (1990) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การตรวจวัดรังสีแกมมาพลังงานสูงโดยใช้หัววัดบิสมัทเจอร์มานิต โดยใช้ ^{252}Cf 40 ไมโครกรัม เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาสองชนิดเปรียบเทียบกัน คือ บิสมัทเจอร์มานิต (BGO) ขนาด 2.5"x2" กับ โซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) NaI(Tl) ขนาด 3"x3" โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของ $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ ในสารยูเรียหนัก 2 กิโลกรัม ที่บรรจุอยู่ในกระเป๋าเอกสาร เลียนแบบการตรวจหาวัตถุระเบิดด้วยเทคนิคนี้ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้เวลาในการวัด 1800 วินาที หัววัดรังสีแกมมาแบบ BGO สามารถตรวจวัดได้ว่ามีไนโตรเจน โดยมีค่าความไวในการวัดรังสีได้ประมาณ 0.36 cps ต่อ กิโลกรัมของสารยูเรีย ส่วนหัววัดรังสีแกมมาแบบ NaI(Tl) นั้น ไม่สามารถตรวจวัดได้ว่ามีไนโตรเจน

1.6.3 คณิต ทองพิสิฐสมบัติ^[7] (1991) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การหาปริมาณไนโตรเจนโดยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้ $^{238}\text{Pu/Be}$ ที่มีความแรงรังสี 5 คูรี เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) NaI(Tl) ขนาด 5"×5" จำนวน 1 ชุด ระบบอับรังสีนิวตรอนได้นำมาเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอนซึ่งบรรจุอยู่ในถังเหล็ก และใช้ตะกั่วเป็นตัวกำบังรังสีพรอมต์แกมมาจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนและจากการทำอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับวัสดุรอบข้างไม่ให้เข้าสู่หัววัด การหาปริมาณไนโตรเจนในสารอินทรีย์และปุ๋ยได้ทดสอบในรูปของสารละลาย โดยใช้ยูเรียเป็นสารมาตรฐาน ซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 0.5–8 โมลต่อลิตร โดยวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนพลังงาน 10.829 MeV พบว่ามีค่าขีดจำกัดในการวัดประมาณ 1% ของไนโตรเจนสำหรับขนาดตัวอย่าง 7 ลิตร เมื่อใช้เวลาในการวัด 4000 วินาที นอกจากนี้ก็ได้จำลองสถานการณ์การตรวจสอบสารคล้ายวัตถุระเบิดจากการใช้เทคนิคนี้ โดยบรรจุสารยูเรียหนัก 1 กิโลกรัมไว้ในกระเป๋าเอกสาร และใช้เวลาในการวัด 1800 วินาที ซึ่งผลการทดลองพบที่มีความไวในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาได้ประมาณ 0.1 cps ต่อ 100 กรัมของไนโตรเจน หรือเท่ากับ 0.4 cps ต่อกิโลกรัมของสารยูเรีย

1.6.4 G. Viesti และคณะ^[8] (1999) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเทอร์มัลนิวตรอนแอกติเวชันเพื่อตรวจสอบกับระเบิด โดยใช้ ^{252}Cf ที่มีความแรงรังสีประมาณ 10^7 นิวตรอนต่อวินาที เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) NaI(Tl) ขนาด 10 ซม.×10 ซม. จำนวน 4 ชุด ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เมลามีนหนัก 800 กรัม เป็นตัวอย่างวัตถุคล้ายกับระเบิด และได้ทำการจำลองตรวจวัดตัวอย่างดินเพื่อเป็นค่าแบบกราวด์ในการหักลบกับตัวอย่างเมลามีน ผลการวิจัยพบว่าสามารถวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไนโตรเจนได้ที่ตำแหน่งฟิคของไนโตรเจนในช่วง single escape peak จนถึงช่วง full energy peak

1.6.5 S. Singkarat, U. Tippawan, G.G. Hoyes, N. Chirapatpimol and T. Vilaitong^[9] (2000) ได้ทำการศึกษาเรื่อง ผลของความกว้างของสัญญาณนิวตรอนที่มีผลต่อการลดลงของแบบกราวด์ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแบบห้วงสั้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในการผลิตรังสีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) NaI(Tl) ขนาด 5"×5" จำนวน 1 ชุด ในการทดลองนี้ได้นำเทคนิค time-of-flight มาเสริมเพื่อช่วยลดรังสีแกมมารบกวน การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะตรวจวัดธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ในวัสดุประเภทยาเสพติดและวัตถุระเบิด โดยเลือกทดสอบความกว้างของหัวงนิวตรอนคือ 2 ns กับ 50 ns ในที่สุดได้พบว่าหัวงนิวตรอนที่แคบที่สุดจะช่วยให้อัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาต่อแบบกราวด์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ก็ได้จำลองสถานการณ์การตรวจหาวัตถุ

ระเบิดชนิด C-3 หนัก 1.4 กิโลกรัมใส่ในกระเป๋าดำเดินทาง และใช้เวลาในการวัด 3600 วินาที ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถวัดรังสีฟรอมต์แกมมาของธาตุต่าง ๆ ได้ที่พลังงาน 1.6 MeV, 2.3 MeV, 3.7 MeV, 4.4 MeV, 5.1 MeV และ 6.1 MeV



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 รั้งสีนิวตรอน

J. Chadwick ค้นพบอนุภาคนิวตรอนในปี ค.ศ. 1932 จากปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคแอลฟา กับธาตุเบริลเลียม นิวตรอนเป็นอนุภาคที่อยู่ภายในนิวเคลียสของอะตอมซึ่งรวมตัวอยู่กับโปรตอน ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูงมาก ตามปกตินิวเคลียสจะอยู่ในสถานะเสถียร แต่บางสถานะอาจมีสิ่งรบกวนกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส ทำให้นิวตรอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสได้ นิวตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า นิวตรอนอิสระ

2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอนอิสระ^[10]

2.1.1.1 ประจุไฟฟ้า (charge) นิวตรอนเป็นกลางทางประจุ การเป็นกลางทางประจุนี้ ทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้โดยไม่เกิดคู่อิออน เนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมบ์ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

2.1.1.2 มวล (mass) มวลของนิวตรอน $m({}_0^1n) = 1.008665 \text{ u}$ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลของโปรตอน $m({}_1^1H) = 1.007825 \text{ u}$ จะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกัน

2.1.1.3 สปินและโมเมนต์แม่เหล็ก (spin and magnetic force) นิวตรอนมีโมเมนต์เชิงมุมสปิน $\frac{1}{2}h$ และมีโมเมนต์แม่เหล็ก -1.9135 นิวเคลียร์แมกนีตอน

2.1.1.4 คลื่นและการโพลาไรเซชัน (wave and poralization) นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นได้เช่นเดียวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยที่คุณสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงได้จากปรากฏการณ์การหักเหของนิวตรอน ส่วนคุณสมบัติโพลาไรเซชันจะแสดงได้จากปรากฏการณ์เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านสนามแม่เหล็ก เพราะนิวตรอนมีโมเมนต์แม่เหล็ก

2.1.1.5 การสลายตัวให้กัมมันตรังสี (radioactive decay) นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้โปรตอนโดยการคายอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน ดังสมการที่ 2.1 โดยมีครึ่งชีวิตในการสลายตัวของนิวตรอนเท่ากับ 12 นาที



โดยมีค่า $Q = 0.782 \text{ MeV}$

2.1.2 พลังงานของนิวตรอน (neutron energy)^[11]

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งประเภทได้ 3 ประเภท ตามระดับพลังงานดังนี้

2.1.2.1 นิวตรอนช้า (slow neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0-1 keV แบ่งออกเป็น 3 ช่วงพลังงาน ได้แก่

- เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพันธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานที่พบมากที่สุดของเทอร์มัลนิวตรอน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0.05–1 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 1–1000 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่า “resonance absorption”

2.1.2.2 อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (intermediate neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0.1–1 MeV

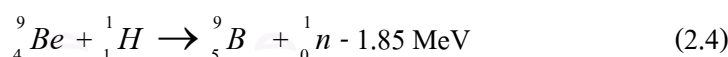
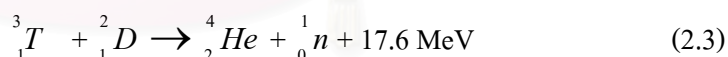
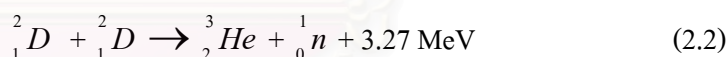
2.1.2.3 นิวตรอนเร็ว (fast neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

2.1.3 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron source)^[11]

ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนสำหรับการผลิตนิวตรอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.3.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวของไอโซโทปของธาตุหนักบางตัว เช่น ยูเรเนียม-235 (^{235}U) กับนิวตรอนช้า กล่าวคือเมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอนหนึ่งแล้วนิวเคลียสนั้นแตกตัวออกเป็นสองส่วนเรียกว่า “ฟิชชันแฟรกเมนต์ (fission fragment)” ซึ่งมีเลขมวลประมาณ 70-160 พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว จากนั้นนิวตรอนเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันทวีคูณต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จึงทำให้มีความเข้มข้นของนิวตรอนสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนอื่น ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10^8 - 10^{14} n/cm²-sec พลังงานของนิวตรอนที่ได้นี้มีค่าตั้งแต่เทอร์มัลนิวตรอนถึง 18 MeV แต่มีพลังงานของนิวตรอนเฉลี่ยประมาณ 2.5 MeV

2.1.3.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) หรือเรียกว่า “เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)” เป็นเครื่องผลิตอนุภาคนิวตรอนพลังงานสูง โดยเร่งให้อนุภาคที่มีประจุ เช่น ดิวเทรียม หรือโปรตอน ให้มีพลังงานสูงขึ้นไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่ง ซึ่งมักจะทำด้วยธาตุเบา ซึ่งเรียกว่า “เป้า (target)” ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และได้อนุภาคนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่



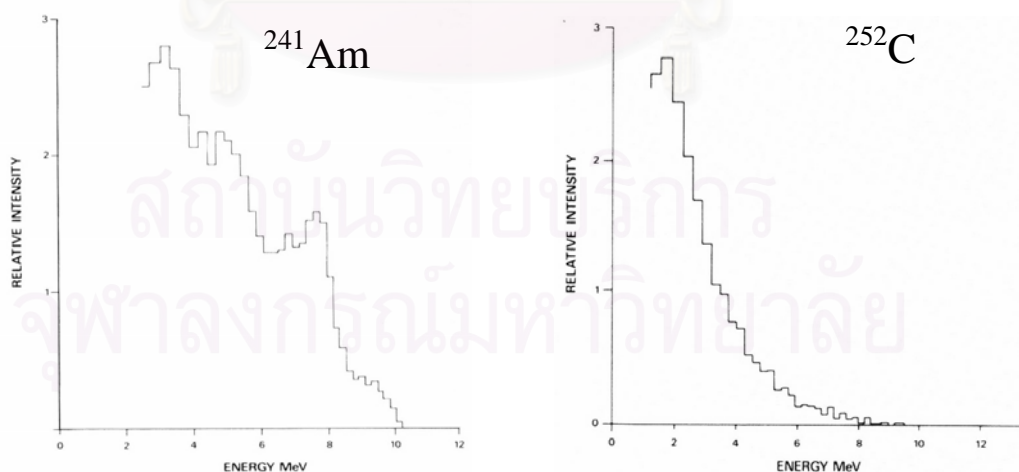
เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ ซึ่งผลิตนิวตรอนพลังงาน 14.1 MeV เป็นเครื่องเร่งอนุภาคคักคาไฟฟ้าต่ำ และมีความเข้มข้นของนิวตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 10^8 - 10^{12} n/cm²-sec

2.1.3.3 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทป (isotopic neutron source) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

- ประเภท (α, n) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α, n) โดยมีไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น อะเมริเซียม-241 (^{241}Am), พลูโทเนียม-238 (^{238}Pu) และพอโลเนียม-210 (^{210}Po) ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 4-6 MeV ผสมกับธาตุบางชนิดที่นิวตรอนในนิวเคลียสมีพลังยึดเหนี่ยวต่ำ เช่น เบริลเลียม-9 (^9Be), โบรอน-10 (^{10}B) โดยทั่วไปนิยมใช้ ^9Be เนื่องจากเป็นธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV และให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดประมาณ 80 ตัวต่อการชนของอนุภาคแอลฟาจำนวนหนึ่งล้านตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มของนิวตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 10^5 - 10^7 n s $^{-1}$ Ci $^{-1}$ ของไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา คุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด Be(α, n)^[12]

นิวไคลด์	ครึ่งชีวิต	พลังงานของอนุภาคแอลฟา (MeV)	พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน (n s $^{-1}$ Ci $^{-1}$)
^{210}Po	138 วัน	5.30	4.54	2.5×10^6
^{238}Pu	89 ปี	5.50	4.00	2.8×10^6
^{241}Am	458 ปี	5.48	4.46	2.2×10^6



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบ $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ และ ^{252}Cf (จาก Industrial Gauging and Analytical Instrumentation Sources ของบริษัท Amersham International plc.)

- ประเภท (γ, n) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (γ, n) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมา เช่น พลวง-124 (^{124}Sb), ยิตเรียม-88 (^{88}Y) ที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV กับ ^9Be เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของ ^9Be จะมีนิวตรอนหลุดออกมา แต่จะมีพลังงานของนิวตรอนต่ำ และมีความเข้มของนิวตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 10^5 - 10^6 n s⁻¹Ci⁻¹ ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันนัก เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมากและมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน คุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด Be(γ, n)^[12]

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

- ประเภทแตกตัวเอง (self fission หรือ spontaneous fission) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสีบางชนิด ได้แก่ ^{252}Cf (ครึ่งชีวิต 2.6 ปี) ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัวต่อการแตกตัว 1 ครั้ง โดยที่นิวตรอนมีพลังงานเฉลี่ย 2.14 MeV และมีความเข้มของนิวตรอนประมาณ 2.3×10^{12} n s⁻¹ g⁻¹ ซึ่งต้นกำเนิด ^{252}Cf มีอัตราการปลดปล่อยของนิวตรอนสูงกว่าต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) ประมาณ 4.3×10^9 n s⁻¹ Ci⁻¹ ของ ^{252}Cf หรือประมาณ 2.3×10^6 n s⁻¹ μg^{-1} ของ ^{252}Cf

2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอน (neutron interaction)^[13]

เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง จะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบ โดยขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของตัวกลางนั้น ๆ อันตรกิริยาที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

2.1.4.1 อันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น ทำให้พลังงานของนิวตรอนลดลง ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสถานะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมาโดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป พลังงานจลน์

รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงเดิม กล่าวคือพลังงานรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังการชนมีค่าเท่ากัน การชนแบบยืดหยุ่นนี้บางทีเรียกว่า “ potential scattering ” สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,n) เช่น ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$, ${}^2\text{D}(n,n){}^2\text{D}$ เป็นต้น สำหรับการชนแบบยืดหยุ่นนี้เมื่อนิวตรอนเกิดไปชนกับอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกับตัวมันเอง เช่น โปรตอน หรือ ดิวเทรอน นิวตรอนก็จะเสียพลังงานมากทำให้พลังงานของนิวตรอนลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยานี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า

2.1.4.2 อันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วนิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) จากนั้นจะมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปลดปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะตื่นตัว (excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติก็จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา อันตรกิริยาแบบนี้พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยืดหยุ่นนี้ถือว่าเป็น threshold reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสถานะตื่นตัวได้ ปฏิกิริยาแบบนี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (endothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นลบ สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,n') หรือ $(n,n'\gamma)$ เช่น ${}^{16}\text{O}(n,n'\gamma){}^{16}\text{O}$, ${}^{27}\text{Al}(n,n'\gamma){}^{27}\text{Al}$ และ ${}^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma){}^{56}\text{Fe}$ เป็นต้น ดังนั้นปฏิกิริยานี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน

2.1.4.3 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า เรดิเอทิฟแคปเจอร์ (radiative capture) หรือ ปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (neutron absorption reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง นิวตรอนจะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาเรียกว่า “captured gamma-rays” หรือ “neutron captured gamma-rays” อาจจะมีรังสีแกมมา 1 ตัวหรือมากกว่าก็ได้

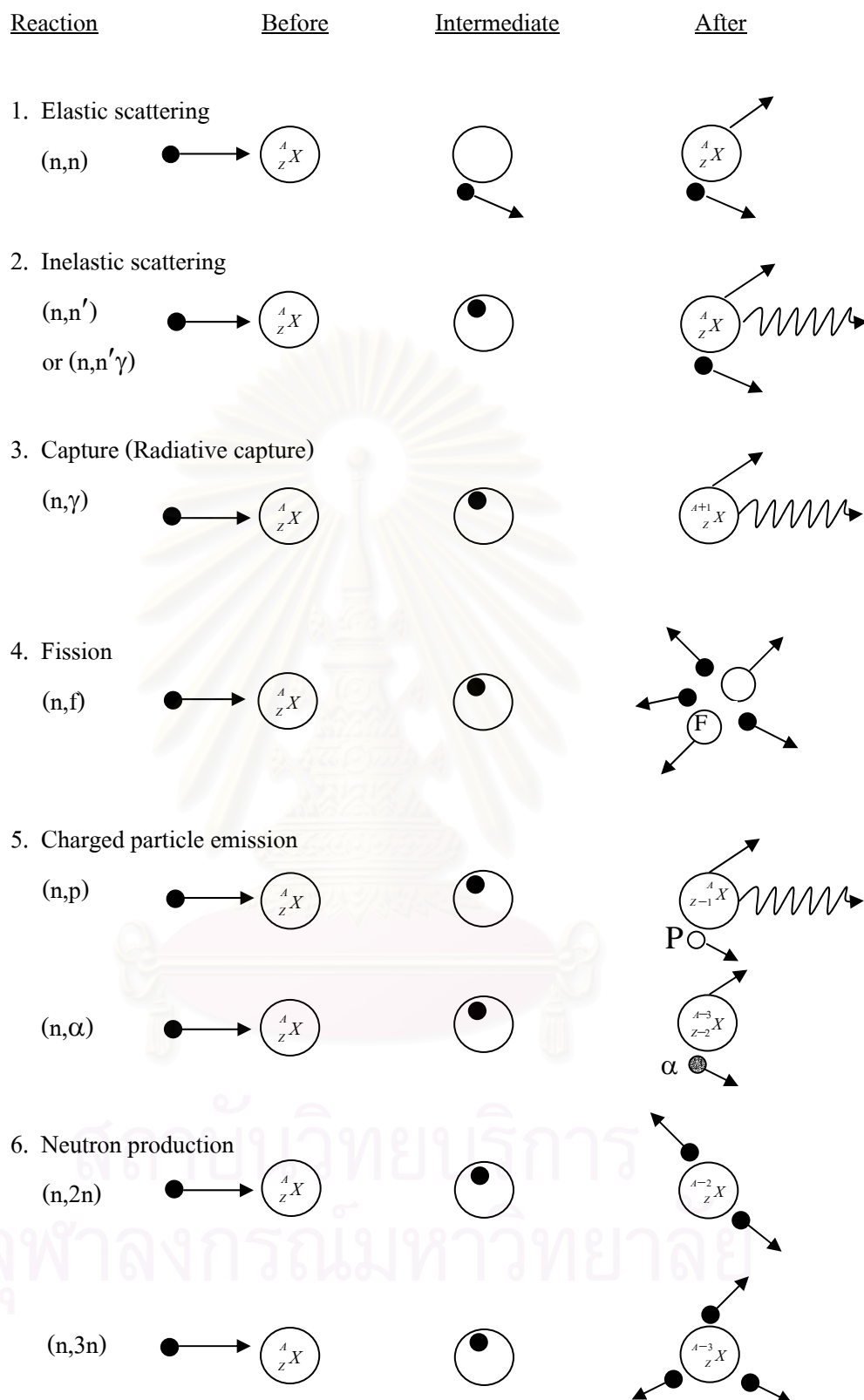
อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน (exothermic reaction) ออกมา คือมีค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิมรวมกับของนิวตรอนอิสระเสมอ กล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามวลของนิวเคลียสเดิมรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,γ) เช่น ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$, ${}^{59}\text{Co}(n,\gamma){}^{60}\text{Co}$ และ

$^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ เป็นต้น ปฏิกริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสี การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis : NAA) และการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมา (prompt gamma-ray neutron activation analysis : PGNA)

2.1.4.4 อันตรกิริยาการแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 (^{235}U), ยูเรเนียม-238 (^{238}U) เป็นต้น เมื่อนิวตรอนเข้าไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เกิดเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วนิวเคลียสรวมจะแบ่งตัวออกเป็น 2 ส่วนได้นิวเคลียสใหม่ 2 นิวเคลียส ที่มีเลขมวลอยู่ระหว่างประมาณ 70-160 พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วย ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ประโยชน์อยู่ในปัจจุบัน ปฏิกริยาแบบฟิชชันมีทั้งเป็น threshold reaction และไม่เป็น threshold reaction สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,f)

2.1.4.5 อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังจากเกิดนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วจะปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น แอลฟา โปรตอน ปฏิกริยาแบบนี้มีทั้ง exothermic reaction และ endothermic reaction แต่ว่าประเภทที่เป็นแบบ exothermic reaction มีน้อย สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n, α) และ (n,p) เช่น $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ และ $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับโบรอนและปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับลิเทียมมีความสำคัญมากในเรื่องการวัดรังสีนิวตรอนและการกำบังรังสีนิวตรอน โดยเฉพาะปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับลิเทียม มีความสำคัญในการผลิตทริเทียม (^3H) สำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิวชัน (fusion) ซึ่งกำลังพัฒนาอยู่

2.1.4.6 อันตรกิริยาการผลิตนิวตรอน (neutron-producing reaction) ปฏิกริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นแบบ endothermic reaction ผลของปฏิกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,2n) หรือ (n,3n) ปฏิกริยา (n,2n) นับว่าเป็นปฏิกิริยาที่มีความสำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้น้ำหนักหนัก (heavy water) หรือ เบริลเลียม (beryllium) เป็นส่วนประกอบ เพราะธาตุไฮโดรเจนและเบริลเลียมมีนิวตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่อย่างหลวม ๆ (loosely bound) ในนิวเคลียส กล่าวคือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้าย (the last neutron) มีค่าต่ำ จึงเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนหลุดออกมาได้ง่าย ปฏิกริยาอื่น ๆ ได้แก่ $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$

รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาแบบต่างๆ ของนิวตรอน^[11]

2.1.5 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (neutron cross section)^[11]

การที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสของตัวกลางและพลังงานของนิวตรอน ซึ่งสามารถอธิบายในเชิงปริมาณได้ในเทอมของ ภาคตัดขวาง (cross section) หมายถึง โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาของนิวเคลียสใด ๆ กับอนุภาคนิวตรอน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1.5.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section: σ) เป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ ต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร นั่นคือ

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (2.5)$$

เมื่อ σ_s คือภาคตัดขวางของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

โดยที่
$$\sigma_s = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,n')}$ คือภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

และ σ_a คือภาคตัดขวางของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

โดยที่
$$\sigma_a = \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,f)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \dots \quad (2.7)$$

เมื่อ $\sigma_{(n,\gamma)}$ คือภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,f)}$ คือภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการแตกตัว

$\sigma_{(n,p)}$ คือภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n,\alpha)}$ คือภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการเกิดอนุภาคแอลฟา

2.1.5.2 ภาคตัดขวางมหภาค (macroscopic cross section: Σ) เป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ ต่อระยะทาง มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) นั่นคือ

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.8)$$

เมื่อ N คือความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทปในหน่วย atom/cm^3

σ คือค่าภาคตัดขวางจุลภาคของอะตอมของไอโซโทปในหน่วย barn(b)

สำหรับตัวกลางที่เป็นสารประกอบหรือมีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ ค่า Σ_t จะมีค่าเท่ากับผลรวมของ Σ_t ของแต่ละธาตุ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\Sigma_t = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \quad (2.9)$$

จะได้
$$\Sigma_t = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \quad (2.10)$$

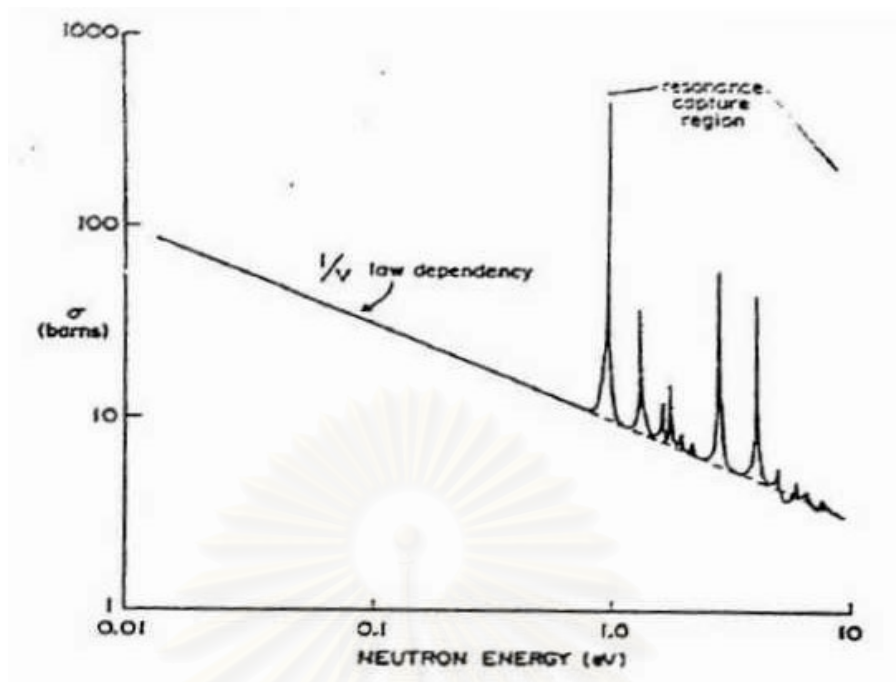
เมื่อ Σ_t คือค่าภาคตัดขวางมหภาคของตัวกลางในหน่วย cm^{-1}

$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับในหน่วย cm^{-1}

N_1, N_2, N_3, \dots คือความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับในหน่วย atom/cm^3

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับในหน่วย barn(b)

ค่า Σ เป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละไอโซโทป สำหรับธาตุและวัสดุ ค่า Σ ขึ้นอยู่กับไอโซโทปต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นธาตุหรือวัสดุเหล่านั้น ส่วนค่า σ เป็นค่าเฉพาะของแต่ละไอโซโทป ซึ่งเป็นภาคตัดขวางประสิทธิผล (effective cross section) ของนิวเคลียส ในการเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอน (ไม่ใช่ภาคตัดขวางที่แท้จริงของนิวเคลียส) ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับนิวไคลด์หนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาด้วย ภาคตัดขวางของการดูดกลืนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนจะแปรผกผันกับความเร็ว ($\sigma_{th} \propto \frac{1}{v}$) ดังรูปที่ 2.3

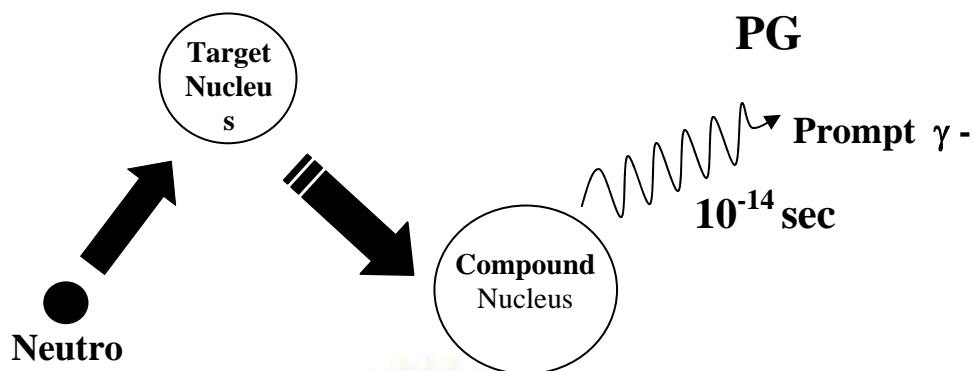


รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางของการดูดกลืนกับความเร็วนิวตรอน

2.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอน

2.2.1 การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอน

เทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอน (neutron capture reaction) หรือเรียกว่า (prompt gamma-ray analysis: PGA) เป็นการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมาในขณะจับนิวตรอน ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยอันตรกิริยาการจับนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ กล่าวคือ เมื่อนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชนทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วนิวตรอนถูกจับหรือดูดกลืนไปรวมตัวกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง ทำให้นิวเคลียสมิเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 จากนั้นกลายเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) ขึ้น ซึ่งนิวเคลียสรวมนี้อาจอยู่ในสถานะกระตุ้นระดับหนึ่ง (excited state) แล้วพยายามลดระดับพลังงานลงให้กลับสู่สถานะปกติ (ground state) โดยมีการปลดปล่อยรังสีฟรอมต์แกมมาออกมา 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว ก็ได้ภายในเวลา 10^{-14} วินาที ถ้าทำการตรวจวัดรังสีฟรอมต์แกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนนี้ เรียกว่า เทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอนดังรูปที่ 2.4

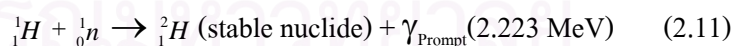


รูปที่ 2.4 การเกิดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

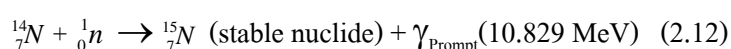
โดยส่วนมากแล้วปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n,γ) มักเกิดขึ้นได้ดีกับนิวตรอนพลังงานต่ำโดยเฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน และจะต้องขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการจับนิวตรอนด้วย ซึ่งถ้าธาตุไหนมีค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการจับนิวตรอนสูง ก็แสดงว่าธาตุนั้นมีความไวในการเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอนสูง และค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนเป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละไอโซโทปของแต่ละธาตุ

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ตัวอย่างเช่น การหาปริมาณธาตุบางชนิดในน้ำเสีย เช่น Al, Pb, Cd และ Fe การหาปริมาณธาตุโบรอนในดิน และการหาปริมาณธาตุ C, H, S, O, Al, Si และเถ้า่านตามแนวถ่านหิน ณ พื้นที่ เป็นต้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เช่น

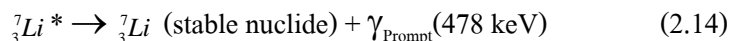
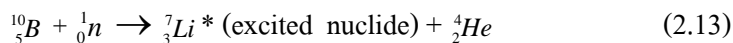
ไฮโดรเจน (H)



ไนโตรเจน (N)



โบรอน (B)



ปริมาณการให้รังสีพรอมต์แกมมา (Yield of prompt gamma-ray) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield} = N\phi t\sigma(E_n) \quad (2.15)$$

เมื่อ Yield คือจำนวนรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา

N คือจำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์

ϕ คือนิวตรอนฟลักซ์

t คือเวลาที่ใช้ในการอบรังสี

$\sigma(E_n)$ คือค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาการจับนิวตรอนขณะที่นิวตรอนมีพลังงาน E_n

สำหรับในสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ หรือในสารตัวอย่างที่เป็นสารประกอบหรือมีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ พบว่าค่า Total neutron cross section (σ_T) จะมีผลทำให้ความเข้มของนิวตรอนลดลง ดังนั้น จำนวนการให้รังสีพรอมต์แกมมาที่ได้ จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ $(1-e^{-f})$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield} = N\phi t\sigma(E_n)(1-e^{-f}) \quad (2.15)$$

$$\text{โดยที่} \quad f = \sum_i N_i(\sigma_{T,i}) \quad (2.16)$$

รังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้ มีพลังงานค่อนข้างสูงถึงระดับประมาณ 11 MeV ซึ่งนิวเคลียสของธาตุส่วนใหญ่มักจะปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมาหลายระดับพลังงาน เช่น ใน โครเจน อะลูมิเนียม และ เหล็ก เป็นต้น ส่วนนิวเคลียสของธาตุบางชนิดก็จะปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมาเพียงระดับพลังงานเดียวเท่านั้น เช่น ไอโดรเจน

โบรอน และคาร์บอน เป็นต้น ตัวอย่างของธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า Sensitivity Factor และค่าพลังงานของรังสีฟอสมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของธาตุบางชนิด^[14]

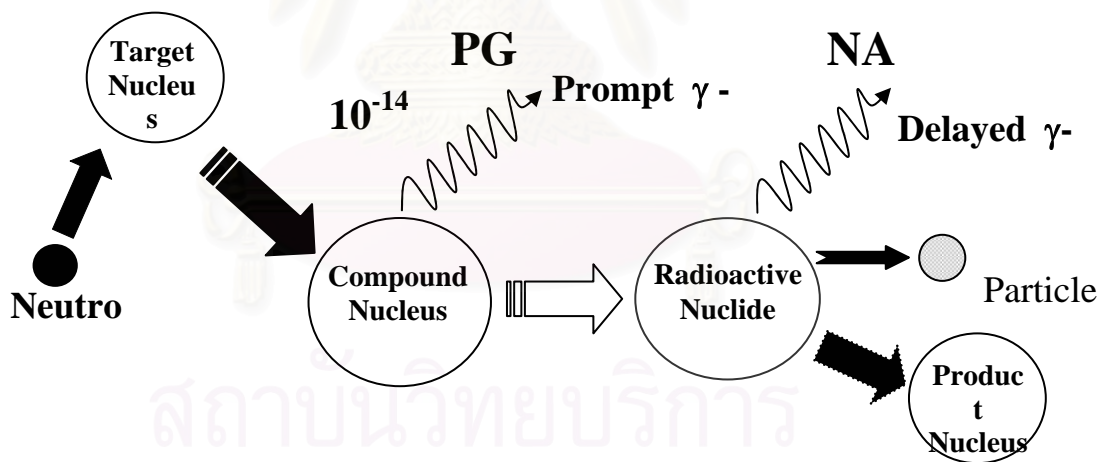
Element (Natural Isotopes)	Captured cross-section (σ_{th}) Barn	Atomic mass (A) a.m.u.	Energy (E_γ) MeV	Intensity (I) (photon/100neutron)	Sensitivity ($I\sigma_{th}/A$)
B	752	10.811	0.478	47	3269
C	0.0034	12.011	4.945	67	0.019
N	0.075	14.007	10.829	15	0.080
			8.309	4.22	0.022
			7.299	8.36	0.047
			6.321	16.65	0.089
			5.560	9.05	0.048
			5.532	17.79	0.095
			5.297	18.58	0.099
			5.267	25.41	0.136
Na	0.534	22.989	6.395	25.69	0.592
			5.617	5.99	0.139
			4.188	1.68	0.039
			3.982	21.58	0.501
			3.879	6.23	0.148
			3.588	17.31	0.402
Al	0.235	26.981	7.724	20.10	0.175
			7.694	4.17	0.036
			6.102	1.79	0.015
			5.134	1.63	0.014
			4.903	1.84	0.016
			4.734	3.49	0.030

ต่อ ตารางที่ 2.3

Element (Natural Isotopes)	Captured cross-section (σ_{th}) Barn	Atomic mass (A) a.m.u.	Energy (E_{γ}) MeV	Intensity (I) (photon/100neutron)	Sensitivity ($I\sigma_{th}/A$)
Al	0.235	26.981	4.260	4.07	0.035
			4.134	4.26	0.037
Cl	33.2	35.45	8.579	2.30	2.16
			7.790	6.63	6.22
			7.414	8.52	7.99
			6.620	10.00	9.38
			6.111	15.78	14.80
			5.715	4.62	4.33
			4.980	3.82	3.58
Fe	2.62	55.847	9.298	3.85	0.181
			7.646	22.14	1.040
			7.632	27.19	1.270
			7.279	4.60	0.216
			6.018	8.08	0.379
			5.921	8.29	0.389
			4.810	1.66	0.078
			4.219	4.02	0.188
Cd	3620	112.40	5.824	2.31	75
			5.431	1.08	34.8
			3.109	1.12	36.1
			3.000	1.60	51.5
			0.559	79.71	2567
I	6.6	126.904	5.198	1.81	0.094
			4.950	1.41	0.073
Tl	3.3	204.390	6.167	2.10	0.034
			5.642	3.85	0.062
Pb	0.170	207.19	7.368	94.77	0.077

2.2.2 การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน^[15]

การวัดรังสีแกมมาโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis : NAA) เป็นการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน ซึ่งเทคนิคนี้ที่อาศัยอันตรกิริยาการจับนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เหมือนกับเทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน แต่การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันต่างกับการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ตรงที่รังสีแกมมาที่ถูกตรวจวัดมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน ทำให้เวลาที่วัดรังสีแกมมาทั้งสองต่างกันด้วย กล่าวคือ รังสีฟอสมต์แกมมาเกิดจากการที่นิวเคลียสรวมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นระดับหนึ่งแล้วพยายามลดระดับพลังงานลงจึงปลดปล่อยรังสีฟอสมต์แกมมาออกมา ส่วนรังสีแกมมาที่ถูกวัดโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสผลิตภัณฑ์ที่เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเท่านั้น ถ้าทำการตรวจวัดรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนนี้ เรียกว่า เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดรังสีแกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เกิดขึ้นเมื่อมีนิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์มัลนิวตรอนวิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยากับนิวเคลียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีพร้อมกับปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคอิเล็กตรอน อนุภาคโพซิตรอน และอนุภาคแอลฟา เป็นต้น และมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา โดยที่รังสีแกมมานี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ค่าครึ่งชีวิต

(half life) ชนิดของรังสี และพลังงานต่าง ๆ ที่ปลดปล่อยออกมาของแต่ละนิวไคลด์นั้น ๆ จากคุณสมบัติเฉพาะตัวนี้ จะทำให้ทราบได้ว่าเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุใด สำหรับอัตราการเกิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron cross section) ของธาตุที่นำเข้าอบรังสี และจำนวนอะตอมของธาตุที่นำเข้าอบรังสี รวมทั้งสัดส่วนของธาตุนั้น ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ (isotopic abundance) การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$R = N_0 \phi \sigma \quad (2.17)$$

$$R = \left(\frac{wfN_A}{M} \right) \phi \sigma \quad (2.18)$$

โดยที่ R คืออัตราการเกิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

N_0 คือจำนวนอะตอมทั้งหมดของนิวไคลด์เดิมก่อนเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ϕ คือความเข้มนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์ หน่วย $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

σ คือภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนของนิวไคลด์นั้น หน่วย บาร์น

W คือน้ำหนักของธาตุที่ทำการอบรังสี

f คือ % abundance ของนิวไคลด์นั้น

N_A คือ Avogadro's number = 6.022×10^{23} โมเลกุลต่อกรัมต่อโมล

M คือมวลอะตอมของธาตุที่ทำการอบรังสี

ส่วนอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ เวลา t จะเป็นไปตามสมการ

$$D_t = \lambda N_t \quad (2.19)$$

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

$T_{\frac{1}{2}}$ คือครึ่งชีวิต (half life) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น

N_t คือจำนวนอะตอมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ณ เวลา t

t คือช่วงเวลาที่ใช้ในการอบรังสี

ถ้าอัตราการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าคงที่แล้ว สามารถคำนวณอัตราการเพิ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี $\left(\frac{dN_t}{dt}\right)$ ได้จาก ผลต่างระหว่างอัตราการเกิด (R) กับอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (D) นั้น ดังสมการ

$$\left(\frac{dN_t}{dt}\right) = N_0\phi\sigma - \lambda N \quad (2.20)$$

จากการอินทิเกรตจะได้

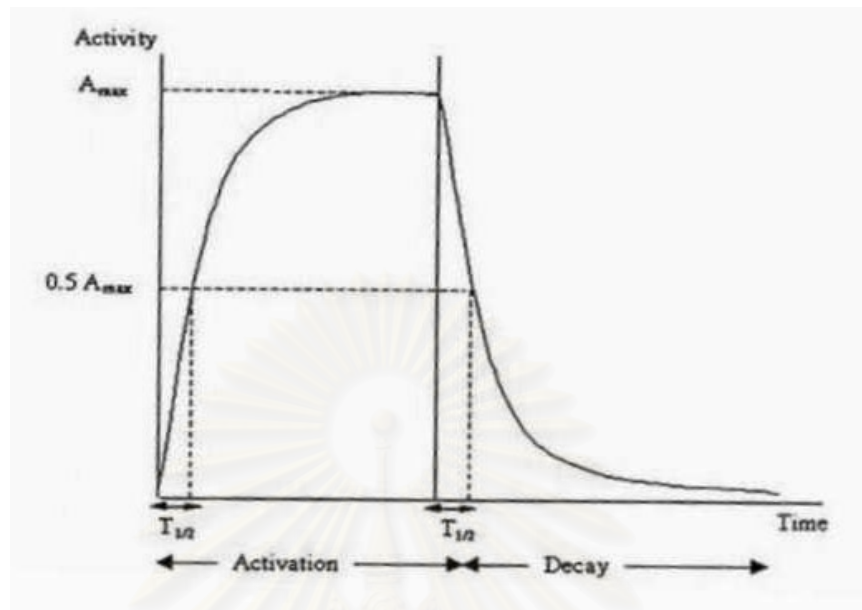
$$\lambda N_t = N_0\phi\sigma[1 - e^{-\lambda t}] \quad (2.21)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.21 ค่า λN_t นั้นคือค่าอัตราการสลายตัว หรือ ค่าความแรงรังสี ณ เวลา t (A_t) ดังนั้นการหาค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$A_t = N_0\phi\sigma[1 - e^{-\lambda t}] \quad (2.22)$$

แต่ถ้าทั้งนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้หลังจากการอบรังสีแล้วเป็นเวลา t_d ความแรงรังสีจะมีค่าลดลงดังสมการ

$$A_t = N_0\phi\sigma[1 - e^{-\lambda t}][e^{-\lambda t_d}] \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแรงรังสีขณะที่อาบรังสีและปล่อยให้สลายตัว

ความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างได้ ดังสมการที่ 2.23 แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มข้นของนิวตรอนมีค่าไม่แน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงได้และภาคตัดขวางของการจับนิวตรอนก็ไม่สามารถหาได้ถูกต้อง ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้จึงนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบ จากความแรงรังสีที่วัดได้ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน โดยที่ตำแหน่งในการอาบรังสี เวลาในการอาบรังสี ช่วงระยะเวลาในการวัด และระบบวัดรังสี เดียวกันทั้งหมด ทำให้สามารถคำนวณเปรียบเทียบหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้จากความสัมพันธ์นี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีจากสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงรังสีจากสารมาตรฐาน}} \quad (2.24)$$

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน^[16]

Element	Isotope	Abundance (%)	Reaction	γ -ray Energy (MeV)	Half life	Detection Limits (μg)*
Al	²⁷ Al	100	²⁷ Al (n, γ) ²⁸ Al	1.779	2.31 min.	0.02
As	⁷⁵ As	100	⁷⁵ As (n, γ) ⁷⁶ As	0.559	26.8 hr.	0.002
Cd	¹¹⁴ Cd	28.93	¹¹⁴ Cd (n, γ) ¹¹⁵ Cd	0.528	53.5 hr.	0.05
	¹¹⁶ Cd	7.61	¹¹⁶ Cd (n, γ) ¹¹⁷ Cd	1.997	3.0 hr.	0.1
Ca	⁴⁶ Ca	0.004	⁴⁶ Ca (n, γ) ⁴⁷ Ca	1.297	4.54 d.	-
	⁴⁸ Ca	0.185	⁴⁸ Ca (n, γ) ⁴⁹ Ca	3.084	8.75 min.	3
Cl	³⁷ Cl	24.47	³⁷ Cl (n, γ) ³⁸ Cl	1.643	37.1 min.	0.04
Cu	⁶³ Cu	69.09	⁶³ Cu (n, γ) ⁶⁴ Cu	1.346	12.88 hr.	0.003
Au	¹⁹⁷ Au	100	¹⁹⁷ Au (n, γ) ¹⁹⁸ Au	0.412	2.7 d.	0.0003
I	¹²⁷ I	100	¹²⁷ I (n, γ) ¹²⁸ I	0.443	25 min.	0.003
Fe	⁵⁸ Fe	0.31	⁵⁸ Fe (n, γ) ⁵⁹ Fe	1.099	46.5 d.	10
Ni	⁶⁴ Ni	1.08	⁶⁴ Ni (n, γ) ⁶⁵ Ni	1.482	2.55 hr.	0.4
Ti	⁸⁰ Ti	5.18	⁸⁰ Ti (n, γ) ⁸¹ Ti	0.320	5.76 min	-

หมายเหตุ * สำหรับนิวตรอนฟลักซ์ $10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน แต่มีข้อแม้ที่ว่า การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันจะต้องวิเคราะห์ธาตุที่เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสผลิตภัณฑ์ที่เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การหาปริมาณอะลูมิเนียมในแร่เหล็ก การหาปริมาณธาตุแมงกานีสในแร่แมงกานีสเพื่อวัดระดับคุณภาพ และการวิเคราะห์ธาตุพวกแลนธาไนด์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับจุดกำเนิดพื้นผิวโลกเป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้ ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุไนโตรเจนได้ เนื่องจากธาตุไนโตรเจนเมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอนแล้ว ไม่สามารถเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ ทำให้ไม่สามารถทำการวัดรังสีดีเลย์แกมมาที่เกิดกับธาตุไนโตรเจนได้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) [NaI(Tl)] ขนาด 5"×5" พร้อมหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ (photomultiplier tube, PMT) ฐานหลอด (tube base) และภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) จำนวน 2 ชุด สำหรับวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับไนโตรเจน-14

3.1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (high voltage power supply) สำหรับหัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม)

3.1.3 ภาคขยายหลัก (amplifier) และ เครื่องมิกเซอร์รุตเทอร์ (mixer router) สำหรับรับสัญญาณจาก 2 หัววัด

3.1.4 เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (multichannel analyzer, MCA) CANBERRA รุ่น 35 plus

3.1.5 ไมโครคอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว (notebook microcomputer) สำหรับรับ-ส่งข้อมูลวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมากับ MCA

3.1.6 เครื่องเอกซเรย์กระเป๋าของสนามบิน ESCAN TM ผลิตโดยบริษัท EG&G ASTROPHYSICS

3.1.7 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดไอโซโทปรังสี พลูโตเนียม-238/เบริลเลียม [²³⁸Pu/Be] ความแรง 5 คูรี และ อะเมริเซียม-241/เบริลเลียม [²⁴¹Am/Be] ความแรง 3 คูรี ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโพลิเอทีลีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร พร้อมโครงเหล็ก 4 ขา สำหรับรับน้ำหนักอุปกรณ์ของระบบอานรังสีนิวตรอนทั้งหมด

3.1.8 หัววัดรังสีนิวตรอนแบบฉาบโบรอน (Boron Lined) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร พร้อมชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณรังสีของเครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้ว Eberline รุ่น 1921 สำหรับวัดความเข้มของนิวตรอน

3.1.9 หัววัดรังสีประเภทแก้วเรืองแสง (glass scintillator) ชนิด NE 905 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร พร้อมหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์และภาคขยายส่วนหน้า สำหรับวัดความเข้มของนิวตรอน

3.1.10 วัสดุกำบังรังสี ได้แก่ ตะกั่วสำหรับกำบังรังสีแกมมา และพาราฟินผสมกรดบอริก สำหรับกำบังรังสีนิวตรอน

3.1.11 แผ่นโบรอนคาร์ไบด์สำหรับกำบังรังสีนิวตรอนไม่ให้ไปทำปฏิกิริยากับหัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม)

3.1.12 พาราฟิน ท่อโลหะ และท่อพีวีซีสำหรับสร้างระบบท่อนำนิวตรอน

3.1.13 ปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 ซึ่งมีความเข้มข้นของไนโตรเจนประมาณ 46 % สำหรับใช้ในการศึกษาการจัดระบบออบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีฟอสมต์แกมมาที่เหมาะสมในการตรวจวัดรังสีฟอสมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจน-14

3.1.14 วัตถุระเบิดชนิดTNTหนัก 480 กรัม และ C-4 หนัก 315 กรัม สำหรับเป็นตัวอย่างทดสอบในการตรวจสอบวัตถุระเบิด

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การออกแบบและการจัดระบบวิเคราะห์รังสีฟอสมต์แกมมา

การออกแบบระบบออบรังสีนิวตรอนจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มของนิวตรอนเป็นหลัก ส่วนการจัดระบบวิเคราะห์รังสีฟอสมต์แกมมาจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มของรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนพลังงาน 10.829 MeV จากธาตุไนโตรเจน และการลดค่าแบคกราวด์เป็นหลัก

3.2.1.1 การออกแบบระบบออบรังสีนิวตรอน

ในการวิจัยนี้ต้องการเทอร์มัลนิวตรอนเพื่อทำอันตรกิริยากับไนโตรเจนในตัวอย่างและวัดรังสีฟอสมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน แต่เนื่องด้วยในการวิจัยนี้ได้ใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดไอโซโทปรังสีพลูโตเนียม-238/เบริลเลียม ความแรง 5 คูรี ซึ่งต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนประเภท (α, n) นี้ผลิตนิวตรอนเร็ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วให้กลายเป็นนิวตรอนช้าหรือเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้น้ำทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน เนื่องจากน้ำสามารถลดพลังงานของนิวตรอนได้ดี และสามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ของระบบออบรังสีนิวตรอนได้ง่ายและราคาประหยัด ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนพลูโตเนียม-238/เบริลเลียม ความแรง 5 คูรี ถูกบรรจุไว้ในถังน้ำโพลิเอทีลีน โดยที่ถังโพลิเอทีลีนนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร เหตุผลที่ใช้ถังโพลิเอทีลีน เนื่องมาจากในงานวิจัยที่ผ่านมาของคุณคณิต ทองพิสิฐสมบัติ ได้ใช้ถังน้ำที่ทำด้วยเหล็กซึ่งรังสีฟอสมต์แกมมาพลังงาน 9.298 MeV ที่เกิดขึ้นจากเหล็กนี้จะไปรบกวนกับพีคของไนโตรเจนช่วง double escaped peak ทำให้มีแบคกราวด์สูง จึงเปลี่ยนมาใช้ถังน้ำโพลิเอทีลีนแทนเพื่อลดค่าแบคกราวด์จากพีคเหล็ก

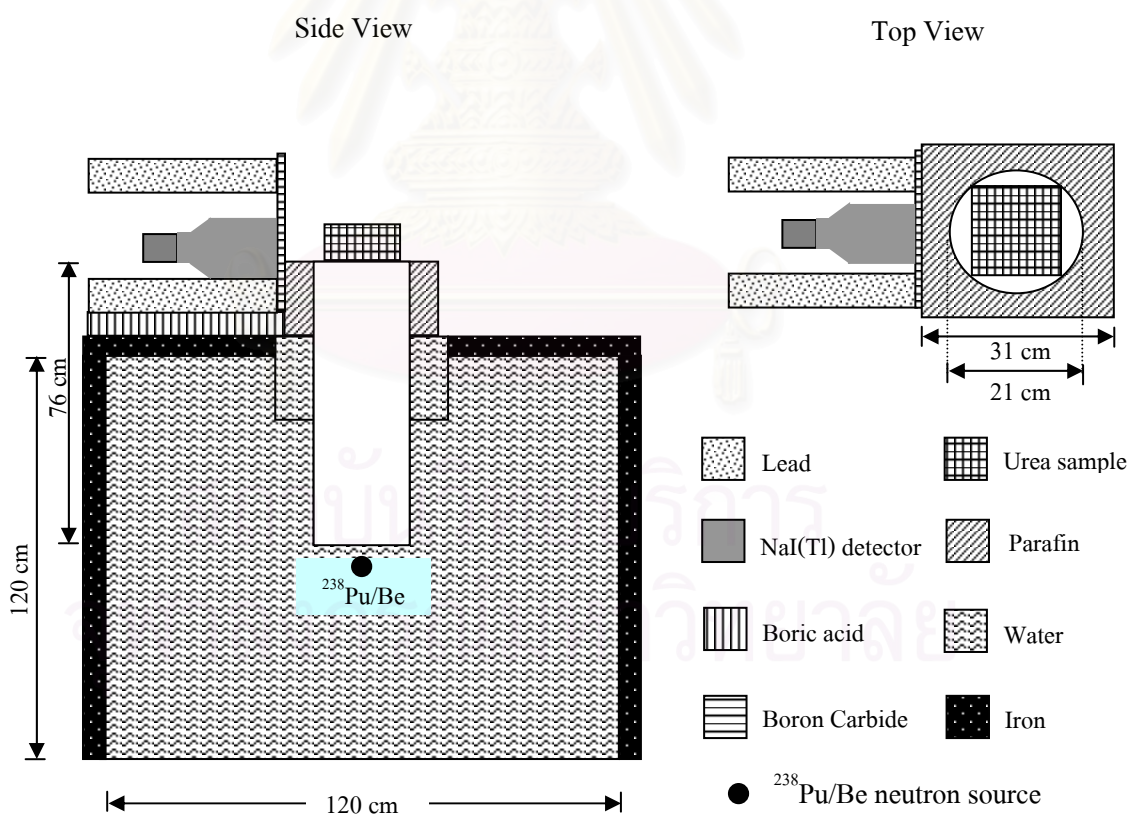
ส่วนระบบท่อนำนิวตรอนประกอบไปด้วย 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกได้ใช้ท่อพีวีซีขนาดใหญ่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร วางตรงกลางอยู่ในถังน้ำโพลิเอทีลิน โดยมีปลายปิดข้างหนึ่งอยู่ในน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในท่อนำนิวตรอน และมีปลายเปิดข้างหนึ่งอยู่เหนือน้ำเพื่อเป็นช่องว่างในการนำเทอร์มัลนิวตรอนไปอาบรังสีกับตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันก็มีถึงวงแหวนที่ทำด้วยเหล็กชุบสังกะสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22 เซนติเมตร และที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 38 เซนติเมตร สูง 26 เซนติเมตร วางซ้อนทับกับท่อพีวีซีในส่วนที่อยู่เหนือผิวน้ำ โดยท่อชั้นในทำเป็นท่อนำนิวตรอนและท่อชั้นนอกไว้ใส่น้ำให้เต็มเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนและบังคับลำนิวตรอนให้พุ่งขึ้นไปยังตัวอย่าง และเพื่อป้องกันไม่ให้นิวตรอนเล็ดลอดออกไปจากท่ออาบรังสีทางด้านข้างโดยไม่ผ่านตัวอย่าง ส่วนที่สองทำหน้าที่เป็นที่วางตัวอย่างมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่าทำด้วยพาราฟินขนาด 31 ซม.×31 ซม. และสูง 13 ซม. ซึ่งตรงกลางเจาะรูให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออาบรังสีคือ 21 เซนติเมตร วางทับกับถึงวงแหวนเพื่อให้ตัวอย่างมีระดับความสูงเสมอกับหัววัด เพื่อที่จะทำให้ตัวอย่างที่ถูกอาบรังสีนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาเข้าสู่หัววัดได้โดยตรง แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.14

3.2.1.2 การจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของธาตุไนโตรเจน

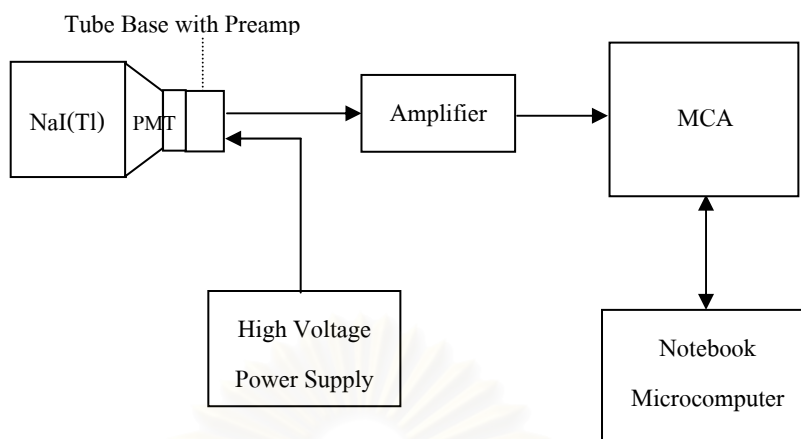
ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด 5"×5" เนื่องจากพลังงานที่จะพิจารณาอยู่ในช่วงพลังงานสูงมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หัววัดที่มีขนาดใหญ่ เพราะว่าหัววัดที่มีขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานสูงได้ดี รังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ นี้มีหลายพลังงานด้วยกัน แต่ที่เลือกวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV นี้ ก็เพราะว่าในช่วงพลังงานนี้ไม่มีฟิสิกของธาตุอื่นมารบกวนจึงทำให้มีค่าแบคกราวด์ต่ำ ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขช่องกับพลังงานได้ใช้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 2.22 MeV ที่เกิดจากปฏิกิริยา $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ กับไฮโดรเจนในน้ำและโพลิเอทีลินกับรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 4.43 MeV จากปฏิกิริยา $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$ ที่ปลดปล่อยมาจากคันทันกานีตริงสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu/Be}$ ในการเปรียบเทียบ

การจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจะต้องคำนึงถึงความสำคัญในการกำบังรังสีพรอมต์แกมมาซึ่งปลดปล่อยมาจากธาตุอื่นที่ไม่ใช่ธาตุไนโตรเจน และรังสีนิวตรอนจากคันทันกานีตริงสีนิวตรอนด้วย ในการวิจัยนี้ได้ใช้ตะกั่วรูปทรงกระบอกที่วางในแนวนอนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 27.5 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร สำหรับ

กำบังรังสีฟรอมต์เกมมาพลังงานต่างๆ จากวัสดุรอบข้างได้แก่ รังสีฟรอมต์เกมมาพลังงาน 2.22 MeV ที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำ รังสีฟรอมต์เกมมาพลังงาน 4.43 MeV ที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu/Be}$ อันเนื่องมาจากการที่คาร์บอน-12 ลดระดับพลังงานลงจากสถานะถูกกระตุ้น (excited state) ไปสู่สถานะปกติ (ground state) และในการวิจัยนี้ก็ได้ใช้แผ่นโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) วางไว้หน้าหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ทั้งสองหัววัด สำหรับกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีไม่ให้เข้าหัววัดทางด้านหน้าโดยตรง และยังมีกรดบอริกใส่ในกล่องไม้ที่มีขนาด 30 ซม.×35 ซม.×5 ซม. วางอยู่ใต้ตะกั่วรูปทรงกระบอกสำหรับกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีไม่ให้ทำอันตรกิริยากับตะกั่วได้ เพราะถ้ารังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีทำอันตรกิริยากับตะกั่วจะทำให้เกิดฟิสิกพลังงาน 6.858 MeV จากตะกั่วสูงซึ่งจะทำให้มีค่าแบคกราวด์สูงขึ้น และกรดบอริกก็ยังสามารถกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีไม่ให้เข้าหัววัดทางด้านล่างโดยตรง การจัดระบบออบรังสีนิวตรอนในระยะเริ่มทำการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 และแผนผังของระบบวัดรังสีฟรอมต์เกมมาในระยะเริ่มศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ระบบออบรังสีนิวตรอนในระยะเริ่มศึกษา



รูปที่ 3.2 แผนผังของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาในระยะเริ่มศึกษา

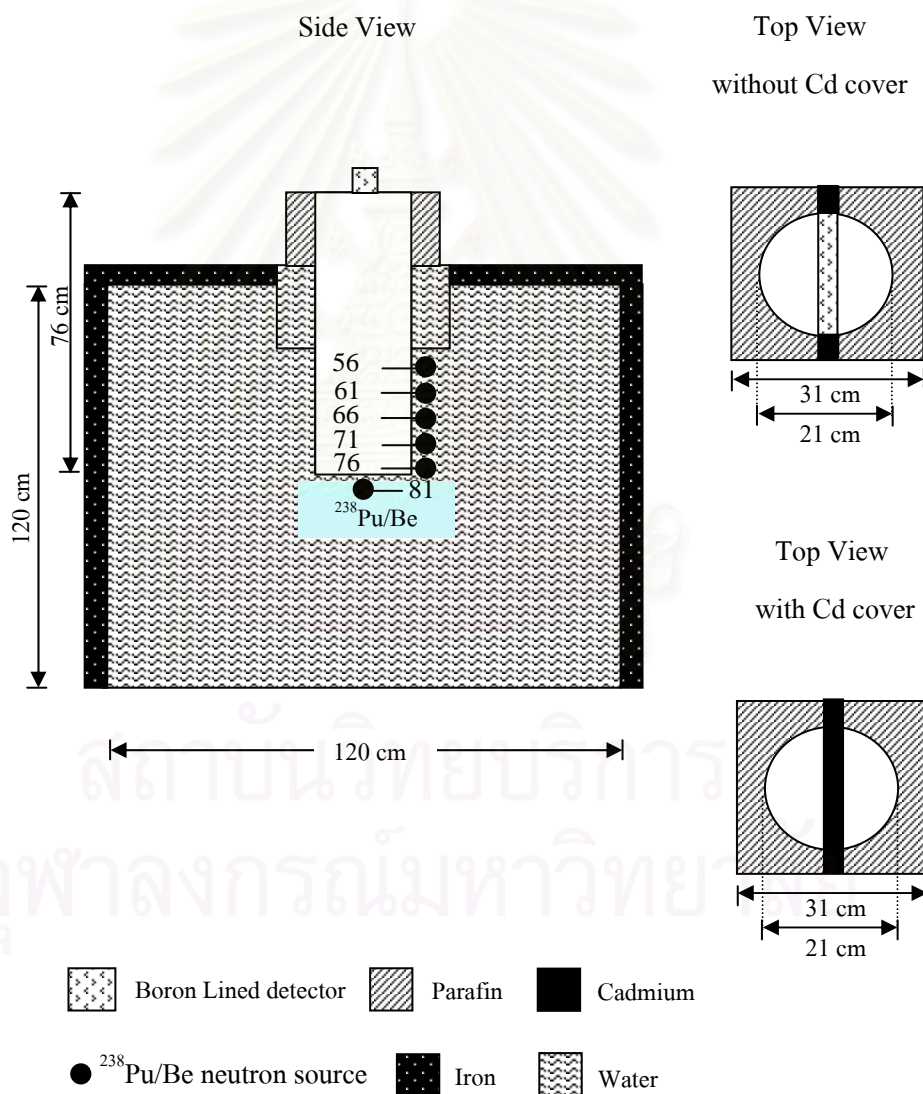
3.2.2 การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการวัดรังสีพรอมต์แกมมา

เพื่อให้ระบบอานรังสีนิวตรอนมีความเหมาะสมในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไนโตรเจนในตัวอย่างยูเรีย จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของไนโตรเจนต่อแบบกราวด์ สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษาวิจัยได้แก่ การหาตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน การหารูปแบบการเคลื่อนที่ของลำนิวตรอน การหาตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา และการหาเวลาที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาเมื่อใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 1 ชุด และ 2 ชุด ตามลำดับ

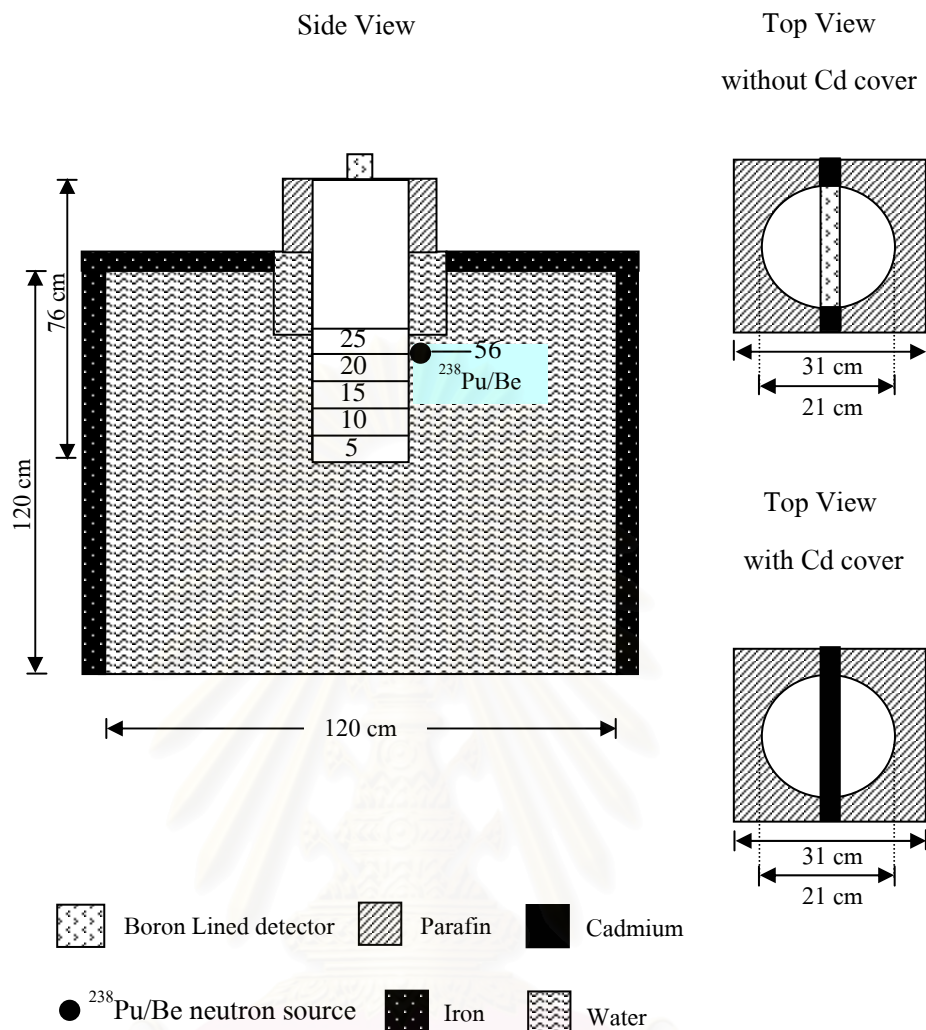
3.2.2.1 การศึกษาผลของตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

โดยใช้ท่อนำนิวตรอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร สูง 76 เซนติเมตร และใช้หัววัดรังสีนิวตรอนฉาบโบรอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร พร้อมชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณรังสีสำหรับวัดความเข้มของนิวตรอน โดยวางหัววัดรังสีอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน วัดรังสีนิวตรอนในขณะที่มีและไม่มีแผ่นแคดเมียมหุ้มที่หัววัดรังสี และใช้ $^{238}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน จากนั้นจึงเลื่อนระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอนที่ระยะ 56, 61, 66, 71, 76 และ 81 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 60 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และ

4.2 ตามลำดับ จากผลการทดลองโดยพิจารณาจากจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนและค่าอัตราส่วนแคดเมียมจะได้ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม คือที่ระยะ 56 เซนติเมตร เมื่อนำต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนไว้ที่ตำแหน่งดังกล่าว จากนั้นเติมน้ำลงไปในท่อนำนิวตรอนที่ระดับความสูงต่าง ๆ คือที่ระยะ 5, 10, 15, 20 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละระดับความสูงได้ทำการวัดรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 60 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เพื่อหาระยะความสูงของระดับน้ำที่เหมาะสมซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นของนิวตรอน



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน



รูปที่ 3.4 แผนภาพการหาระดับน้ำที่เหมาะสมซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความเข้มของนิวตรอน

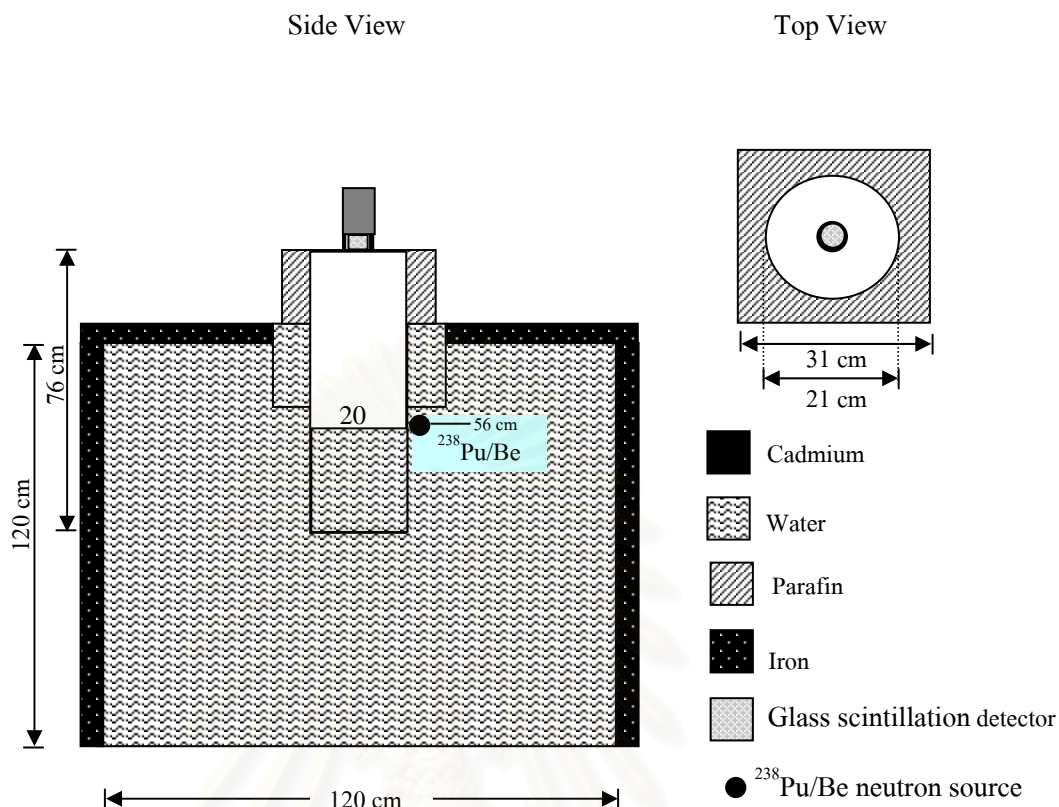
3.2.2.2 การศึกษารูปแบบการกระจายของลำนิวตรอน

จัดระบบอานรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.1 โดยเลือกวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนไว้ที่ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอนที่ระยะ 56 เซนติเมตร และเลือกระดับน้ำในท่อนำนิวตรอนที่ความสูง 20 เซนติเมตร เพราะจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.2.1 ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนและระดับความสูงของน้ำในท่อนำนิวตรอนดังกล่าว จะให้จำนวนเทอร์มัลนิวตรอนสูงสุดและมีค่าอัตราส่วนแคดเมียมที่สูงด้วย การศึกษารูปแบบการกระจายของลำนิวตรอนทำได้โดยการใช้หัววัดรังสีประเภทแก้วเรืองแสงชนิด NE 905 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร ซึ่งมีแผ่นแคดเมียมคลุมรอบด้านข้างของหัววัด วัดปริมาณความเข้มของรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งได้ทำตาราง

ของตำแหน่งที่ใช้ในการวัดปริมาณความเข้มของรังสีนิวตรอน โดยแบ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 5.2 ซม.×5.2 ซม. ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 เมื่อภายในวงกลมเป็นช่องนำนิวตรอน ส่วนภายนอกวงกลมเป็นพาราฟิน ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 120 วินาที โดยเริ่มจากที่ระยะติดกับปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน และทำการวัดในแต่ละตำแหน่งอีกครั้งโดยเลื่อนหัววัดให้สูงขึ้น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.11

1A	1B	1C	1D	1E	1F
2A	2B	2C	2D	2E	2F
3A	3B	3C	3D	3E	3F
4A	4B	4C	4D	4E	4F
5A	5B	5C	5D	5E	5F
	V				
6A	6B	6C	6D	6E	6F

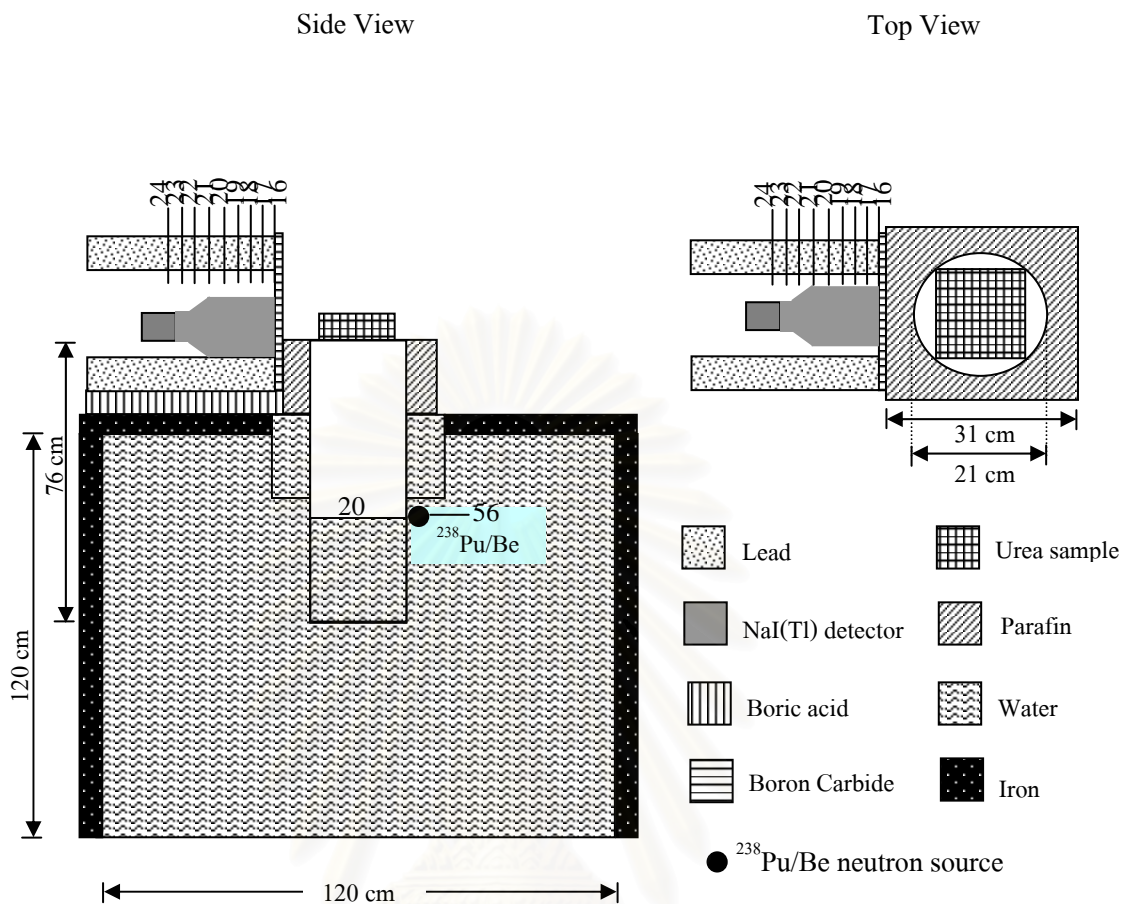
รูปที่ 3.5 แผนภาพตารางในการวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอนในแต่ละตำแหน่งบนท่อนำนิวตรอน



รูปที่ 3.6 แผนภาพการจัดระบบอานรังสีในการวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอน

3.2.2.3 การศึกษาผลของตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา

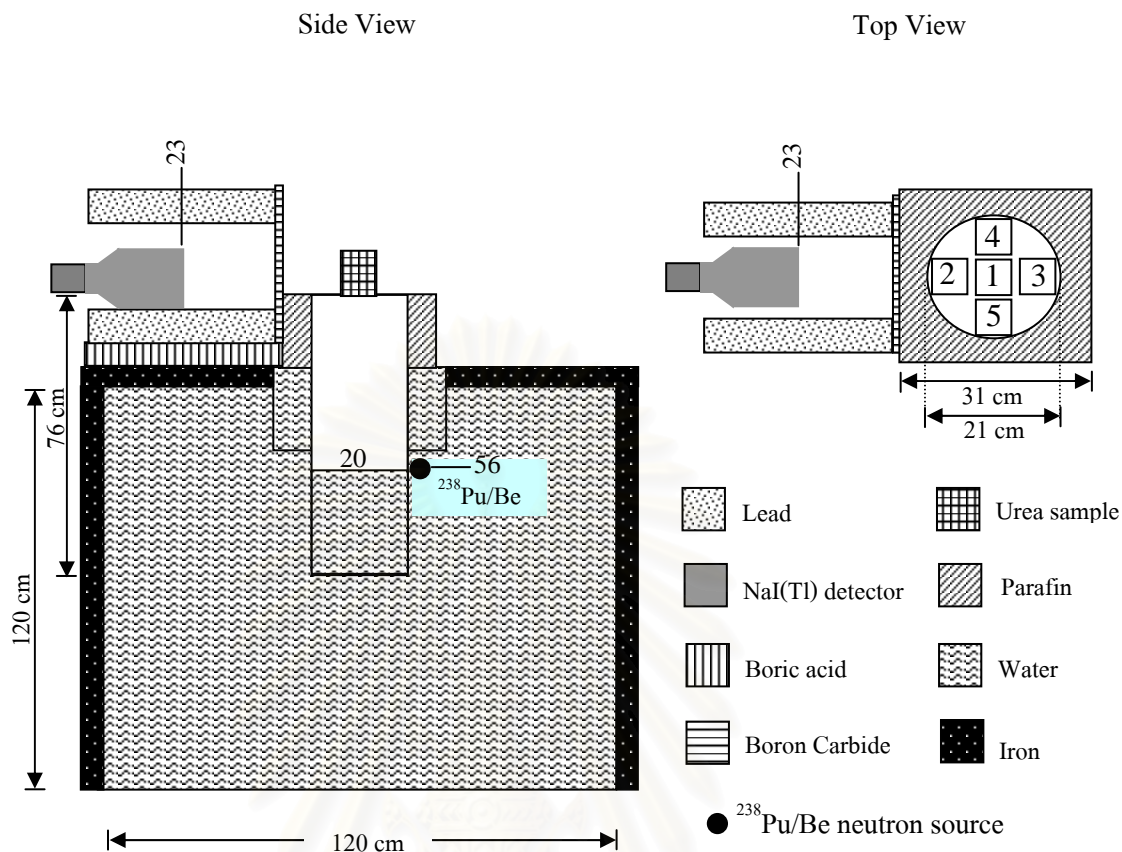
จัดระบบอานรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.2 โดยใช้ตัวอย่างยูเรเนียม 1 กิโลกรัม นำมาแยกใส่ในกล่องกระดาษที่มีขนาด 7.75 ซม.×4.7 ซม.×6 ซม. จำนวน 6 กล่อง แล้วนำมาจัดวางให้มีขนาด 15.5 ซม.×14.1 ซม.×6 ซม. ใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5"×5" วัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างยูเรเนียมที่ระยะต่าง ๆ คือเริ่มที่ระยะ 16 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของท่อนำนิวตรอนถึงผิวหน้าของหัววัด และเลื่อนออกมาครั้งละ 1 เซนติเมตร จนถึงที่ระยะ 24 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของท่อนำนิวตรอนถึงผิวหน้าของหัววัด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 1800 วินาที และหาปริมาณจำนวนนับสุทธิของรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV ที่ตำแหน่งฟิคของไนโตรเจนในช่วง single escaped peak จนถึงช่วง full energy peak ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14



รูปที่ 3.7 แผนภาพการเลื่อนตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา

3.2.2.4 การทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่าง

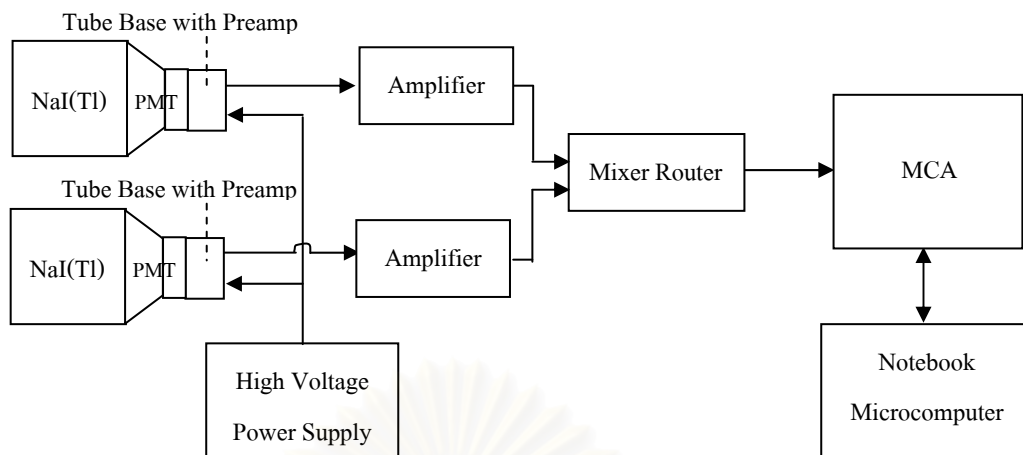
จัดระบบอานรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.3 โดยเลือกวางหัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ไว้ที่ระยะ 23 เซนติเมตร เพราะจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.2.3 ที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้จะได้อัตราส่วนความเข้มของรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์มีค่าสูงสุด จากนั้นนำตัวอย่างยูเรีย 668 กรัม มาแยกใส่ในกล่องกระดาษที่มีขนาด 7.75 ซม.×4.7 ซม.×6 ซม. จำนวน 4 กล่อง แล้วนำมาจัดวางให้มีขนาด 7.75 ซม.×9.4 ซม.×12 ซม. วางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนานิวตรอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4



รูปที่ 3.8 แผนภาพการวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาในยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนำนิวตรอน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 1 ชุด

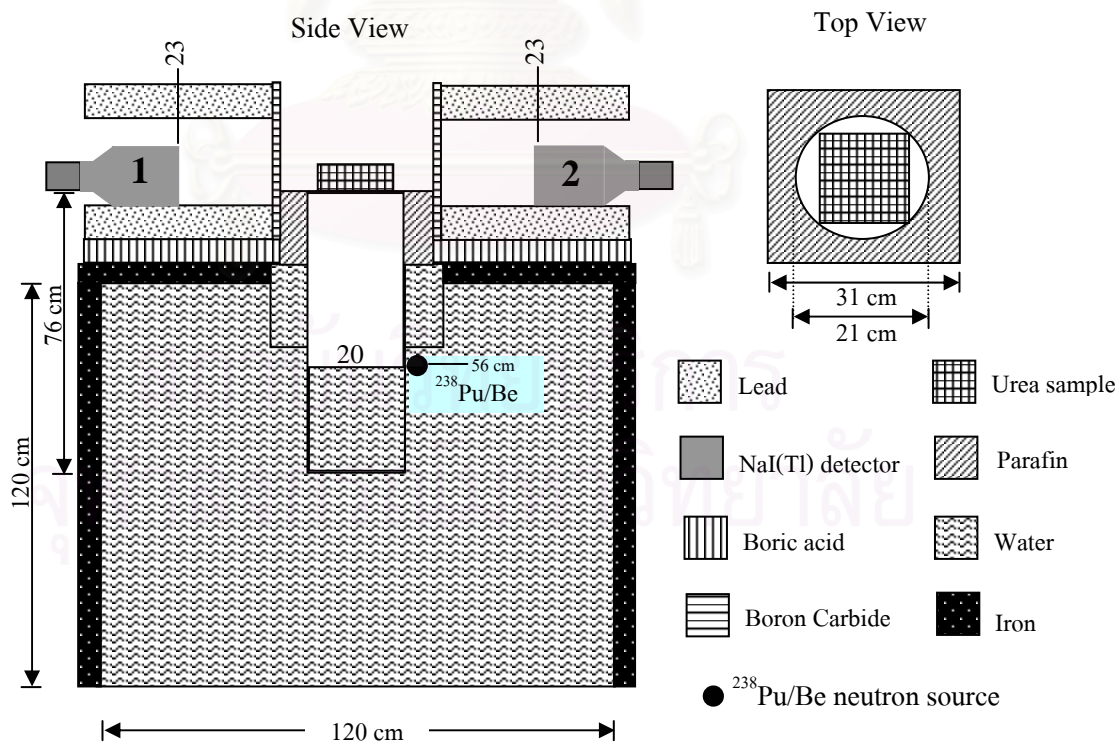
3.2.2.5 การทดสอบวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาจากไนโตรเจน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทดลองวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาจากไนโตรเจนในยูเรียโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 1 ชุด ต่อจากนี้จะเป็นการทดลองวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาจากไนโตรเจนในยูเรียโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 2 ชุด เพื่อเพิ่มความไวในการวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาพลังงานสูง โดยมีเครื่องมือเครื่องวัดทำหน้าที่ในการรับสัญญาณพร้อมกันจากสองหัววัดต่อการวัดหนึ่งครั้ง แผนผังของระบบวัดรังสีพร้อมตัวอย่างแกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) จำนวน 2 ชุด แสดงไว้ในรูปที่ 3.9

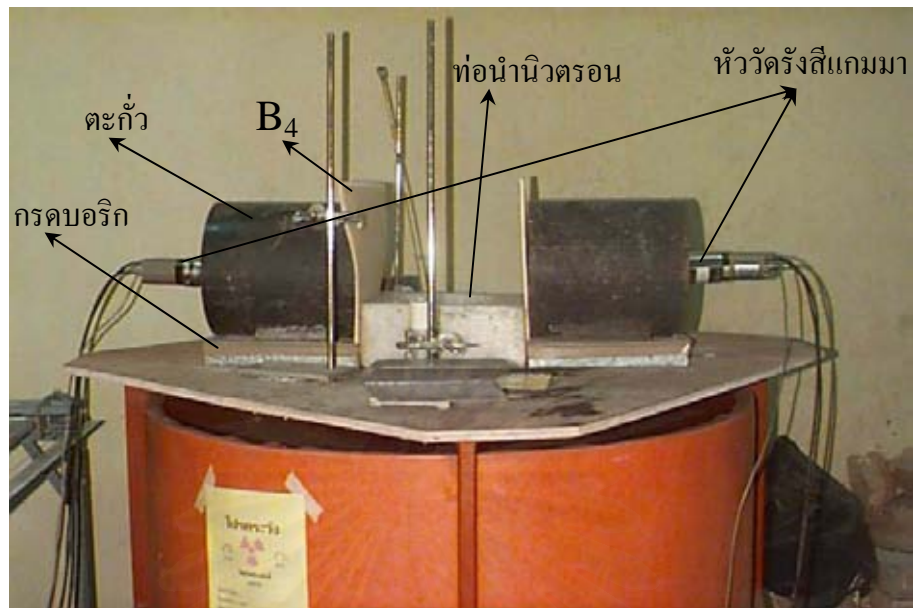


รูปที่ 3.9 แผนผังของระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด

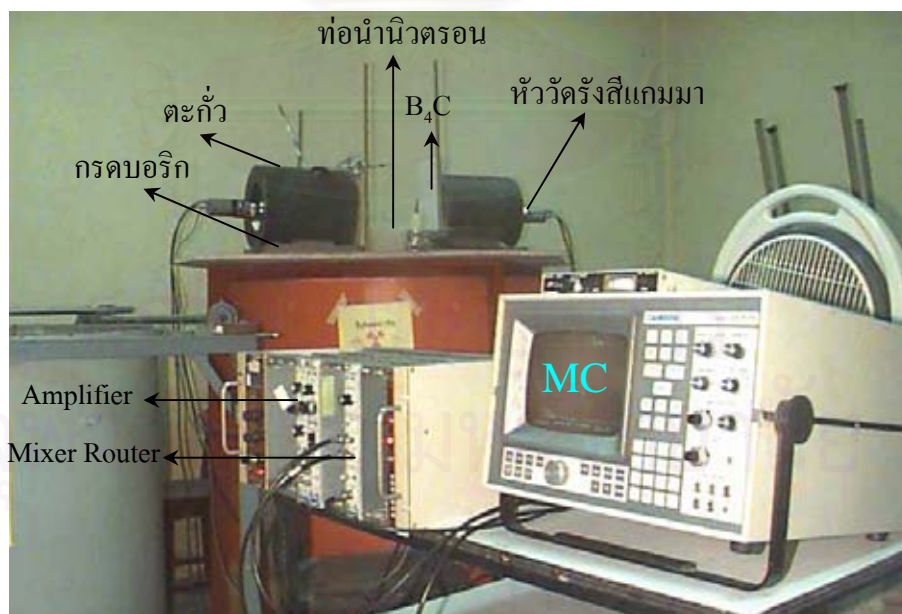
จัดระบบอานรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.4 ซึ่งเพิ่มหัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 1 ชุด มาวางโดยหันหน้าเข้าหากัน จากนั้นวางตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม ที่มีขนาด 15.5 ซม.×14.1 ซม.×6 ซม. วางที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 แผนภาพการวัดรังสีพร้อมดีแกมมาในยูเรีย 1 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด



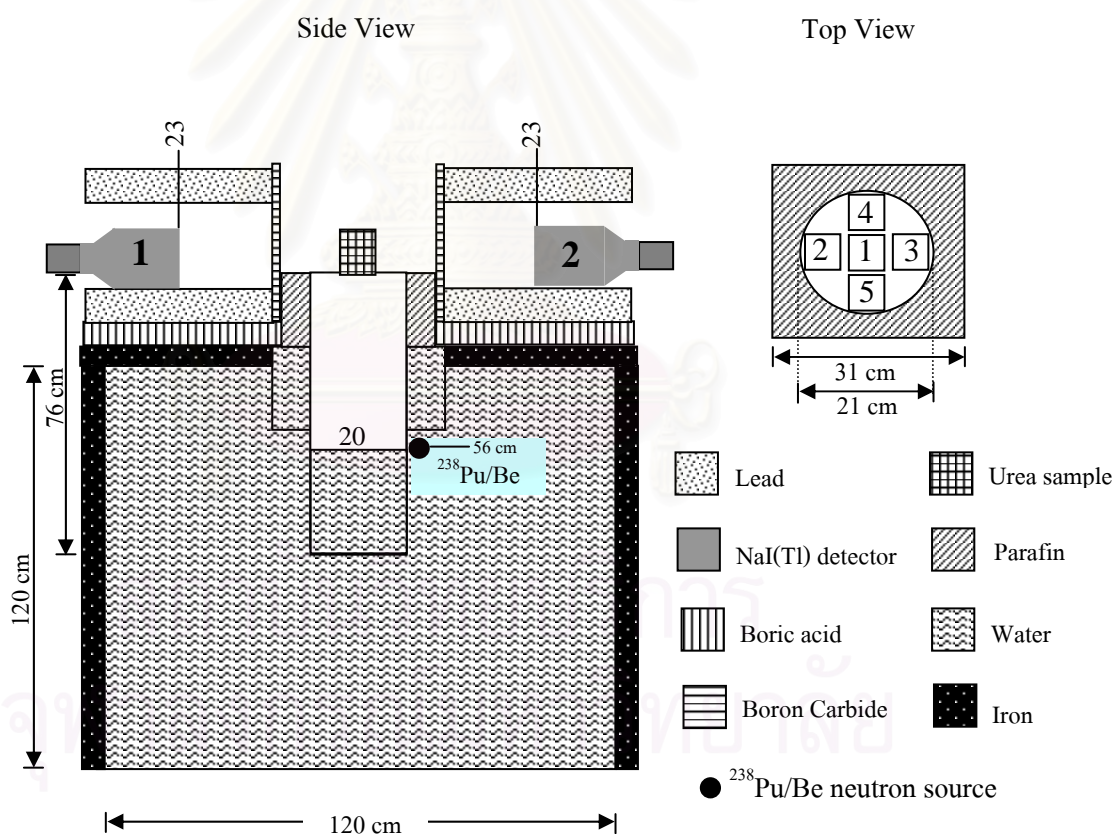
รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากการใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายของระบบวิเคราะห์การวัดรังสีพร้อมดีแกมมา

3.2.2.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด

จัดระบบอาบรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.5 โดยนำตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม ที่มีขนาด 7.75 ซม.×14.1 ซม.×12 ซม. มาอบรังสีนิวตรอนโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนิวตรอน ซึ่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที จากนั้นได้ทำการเปลี่ยนขนาดตัวอย่างจากยูเรีย 1 กิโลกรัม มาเป็นยูเรีย 668 กรัม ที่มีขนาด 7.75 ซม.×9.4 ซม.×12 ซม. โดยนำยูเรีย 668 กรัม มาอบรังสีนิวตรอนซึ่งวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนิวตรอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



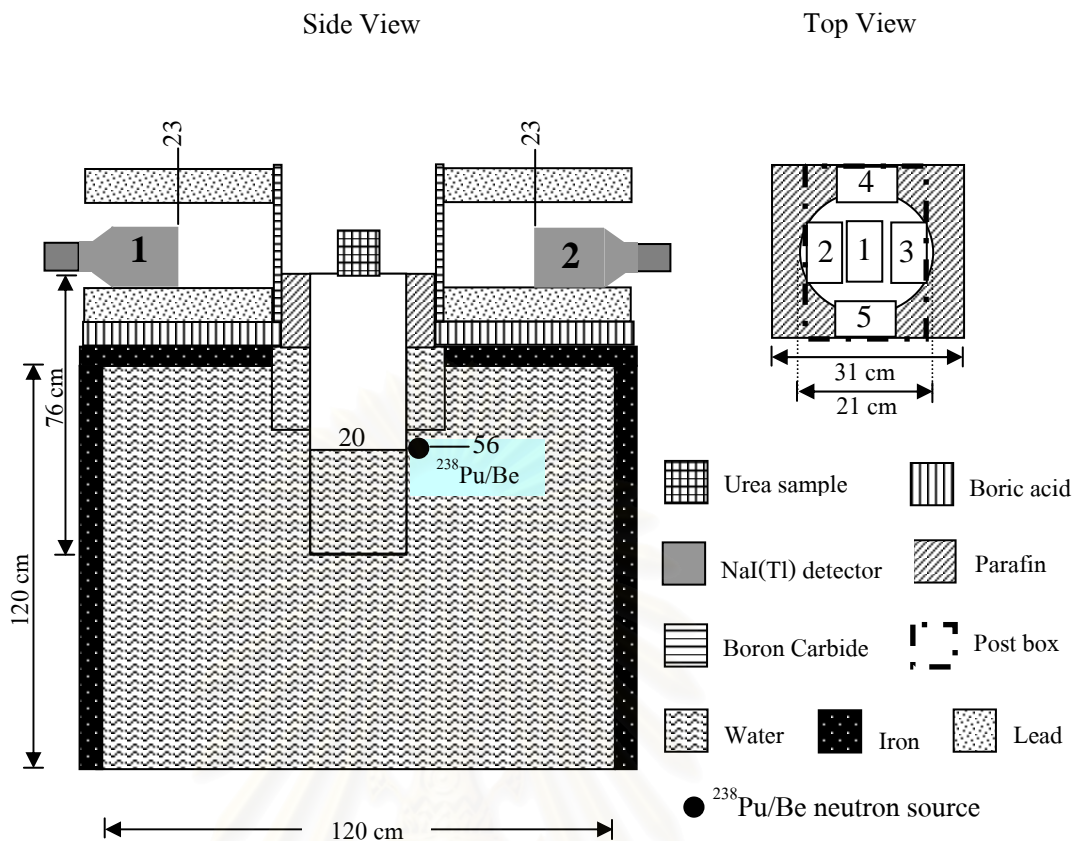
รูปที่ 3.13 แผนภาพการวัดรังสีพรอมต์แกมมาในยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนิวตรอน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด

3.2.2.7 การทดสอบวัดรังสีพร้อมต์แอมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง

ตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม ที่มีขนาด 7.75 ซม.×14.1 ซม.×12 ซม. นำมาใส่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่มีขนาด 20 ซม.×30 ซม.×11 ซม. นำไปอบรังสีนิวตรอนโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

จากนั้นทำการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยนำสิ่งของอื่น ๆ เช่น หนังสือและเสื้อผ้าใส่ลงไปในกล่องพัสดุไปรษณีย์พร้อมกับตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม ที่มีขนาดเดียวกันนี้ นำไปอบรังสีนิวตรอนโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน และทำการวัดรังสีพร้อมต์แอมมาจากไนโตรเจนที่ปล่อยมาจากยูเรียเทียบกับรังสีพร้อมต์แอมมาที่ปล่อยมาจากกล่องพัสดุไปรษณีย์โดยไม่มียูเรียบรรจุอยู่เป็นค่าเบคกราวด์ ซึ่งในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดรังสีพร้อมต์แอมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่างอื่น ๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการวัดคือ นมถั่วเหลือง 1 กิโลกรัม และหมูเบคอน 1 กิโลกรัม โดยวางนมถั่วเหลืองไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน ได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที และทำการวัดรังสีพร้อมต์แอมมาจากไนโตรเจนในหมูเบคอน โดยวางหมูเบคอนไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันกับนมถั่วเหลือง ซึ่งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที และทำการตรวจวัดรังสีพร้อมต์แอมมาจากไนโตรเจนจากกล่องพัสดุไปรษณีย์เปล่า ๆ เป็นค่าเบคกราวด์ โดยใช้เวลาในการวัดรังสี 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10



รูปที่ 3.14 แผนภาพการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาในยูเรีย 1 กิโลกรัมโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดูปริมาณซึ่งวางกล่องพัสดูปริมาณไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน

3.2.2.8 การทดสอบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ²³⁸Pu/Be ความแรง 5 คูรี และ ²⁴¹Am/Be ความแรง 3 คูรี

ทำการเพิ่มต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ²⁴¹Am/Be ความแรง 3 คูรี นำมาวาง ณ ตำแหน่งตรงข้ามกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ²³⁸Pu/Be ความแรง 5 คูรี จากนั้นทำการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยนำสิ่งของอื่น ๆ เช่น หนังสือและเสื้อผ้าใส่ลงไปในกล่องพัสดูปริมาณพร้อมกับตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม ที่มีขนาด 7.75 ซม.×14.1 ซม.×12 ซม. นำมาใส่ในกล่องพัสดูปริมาณที่มีขนาด 20 ซม.×30 ซม.×11 ซม. และนำไปอบรังสีนิวตรอนโดยวางยูเรียไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของกล่องพัสดูปริมาณซึ่งวางกล่องพัสดูปริมาณไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน และทำการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาของไนโตรเจนที่ปล่อยมาจากยูเรียเทียบกับรังสีพร้อมตัวแกมมาที่ปล่อยมาจากกล่องพัสดูปริมาณโดยไม่มียูเรียบรรจุอยู่เป็นค่าเบคกราวด์ ซึ่งในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

3.2.2.9 การจำลองสถานการณ์การตรวจหาวัตถุระเบิดในกล่องพัสดุไปรษณีย์ โดยใช้วิธีการสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ร่วมกับวิธีการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน

นำวัตถุระเบิดชนิด TNT 480 กรัม และ C-4 315 กรัม มาบรรจุแยกชนิดใส่ในกระป๋องสองกระป๋อง โดยนำมาใส่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่มีขนาด 20 ซม.×30 ซม.×11 ซม. และมีสายไฟอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 นำไปสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์กระเปาะของสนามบิน ESCAN TM ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 จากนั้นนำกล่องพัสดุไปรษณีย์ดังกล่าวไปอาบรังสีนิวตรอน ซึ่งวางวัตถุระเบิดทั้งสองไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของกล่องพัสดุไปรษณีย์และวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนิวตรอน ทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของไนโตรเจนที่ปล่อยมาจากวัตถุระเบิดเทียบกับรังสีพรอมต์แกมมาที่ปล่อยมาจากกล่องพัสดุไปรษณีย์โดยไม่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่เป็นค่าเบคกราวด์ ซึ่งในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ทำการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติม โดยนำแผ่นตะกั่วที่หนา 1 มิลลิเมตร มาปิดทับบางส่วนของกระป๋องที่บรรจุวัตถุระเบิด ซึ่งวางอยู่ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์กล่องเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.16 นำไปสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์กระเปาะของสนามบิน ESCAN TM ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 จากนั้นนำกล่องพัสดุไปรษณีย์ดังกล่าวไปอาบรังสีนิวตรอน โดยวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตั้งที่กล่าวมาข้างต้น และทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของไนโตรเจนที่ปล่อยมาจากวัตถุระเบิดเทียบกับรังสีพรอมต์แกมมาที่ปล่อยมาจากกล่องพัสดุไปรษณีย์โดยไม่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่เป็นค่าเบคกราวด์ ซึ่งในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีเป็นเวลา 3600 วินาที ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่ภายในบรรจุสายไฟและกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่อยู่ในบรรจุแผ่นตะกั่ว สายไฟ และกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายวัตถุระเบิดชนิด TNT และ C-4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

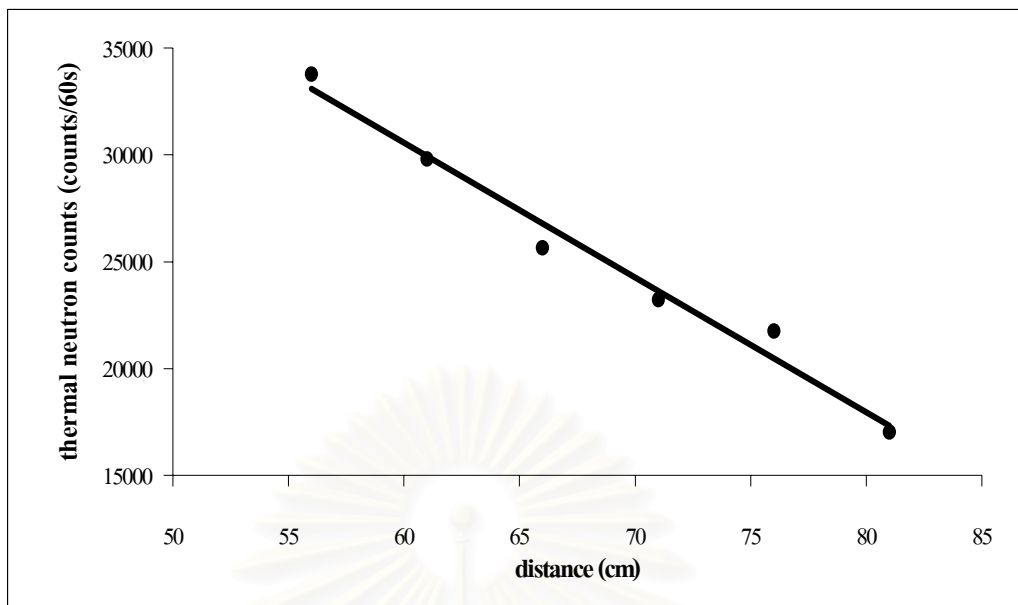
4.1 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเข้าใกล้ที่วางตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแคดเมียม จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นค่าที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาหาตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสมนั้นคือค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอน ดังนั้นจึงเลือกระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงที่วางตัวอย่างที่ระยะ 56 เซนติเมตร เพราะให้ค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนสูงสุด จากนั้นเติมน้ำลงไปในห้องนำนิวตรอนที่ระดับความสูงต่าง ๆ เพื่อต้องการหาความสูงของน้ำภายในห้องนำนิวตรอนที่จะมีผลทำให้จำนวนเทอร์มัลนิวตรอนมีค่ามากขึ้น จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนจะมีค่ามากที่สุด เมื่อมีระดับน้ำในห้องนำนิวตรอนสูง 20 เซนติเมตร และระดับน้ำที่ความสูงนี้ก็มีย่ออัตราส่วนแคดเมียมสูงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกระดับน้ำที่ระยะความสูง 20 เซนติเมตร และมีระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของห้องนำนิวตรอนที่ระยะ 56 เซนติเมตร

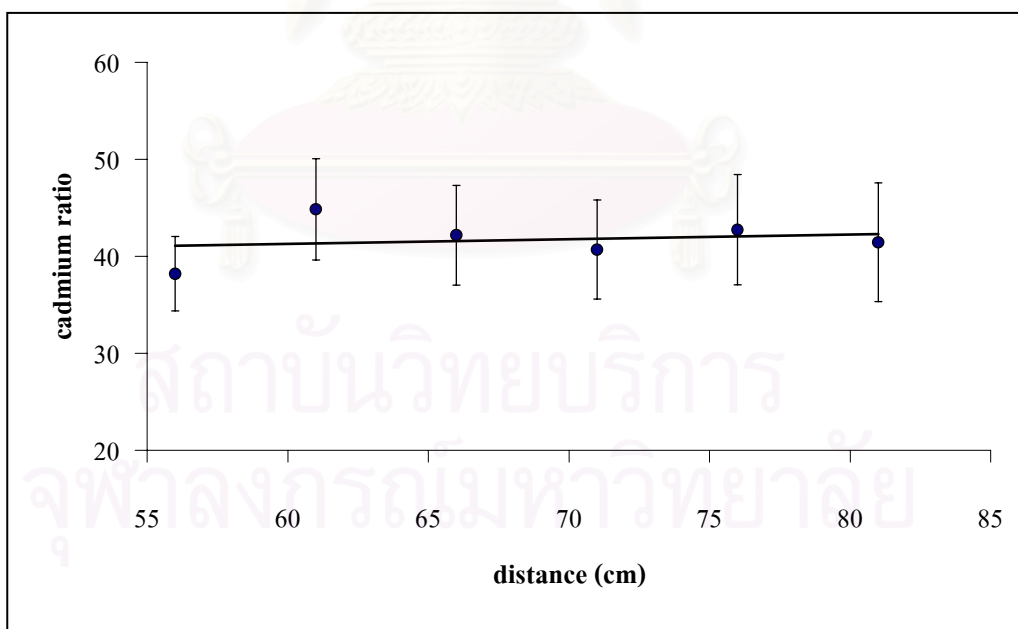
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาระยะที่เหมาะสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของห้องนำนิวตรอน

distance (cm)	thermal neutron counts (counts/60s)	cadmium ratio*
56	33782	38.2
61	29811	44.8
66	25651	42.2
71	23220	40.7
76	21749	42.7
81	17027	41.4

หมายเหตุ* ได้จากอัตราส่วนของจำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อไม่มีต่อมีแผ่นแคดเมียมหุ้มหัววัดนิวตรอน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอน

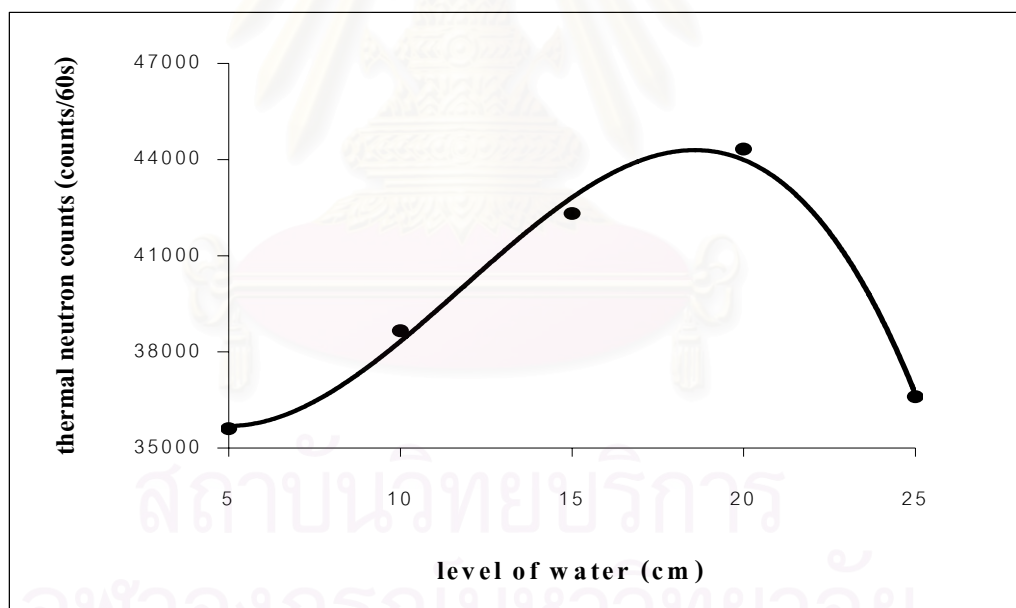


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคดเมียมกับระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนถึงปลายเปิดด้านบนของท่อนำนิวตรอน

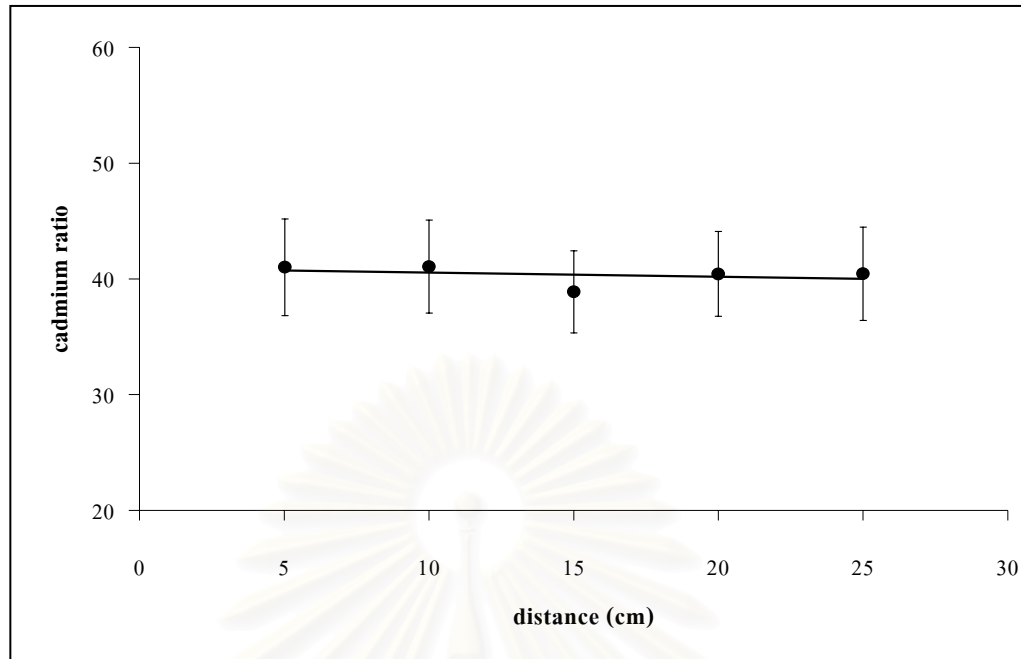
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนเมื่อเพิ่มความสูงของระดับน้ำในท่อนำนิวตรอน

level of water (cm)	thermal neutron counts (counts/60s)	cadmium ratio*
5	35605	41.0
10	38662	41.06
15	42314	38.9
20	44326	40.4
25	36603	40.4

หมายเหตุ* ได้จากอัตราส่วนของจำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อไม่มีต่อมีแผ่นแคดเมียมหุ้มหัววัดนิวตรอน



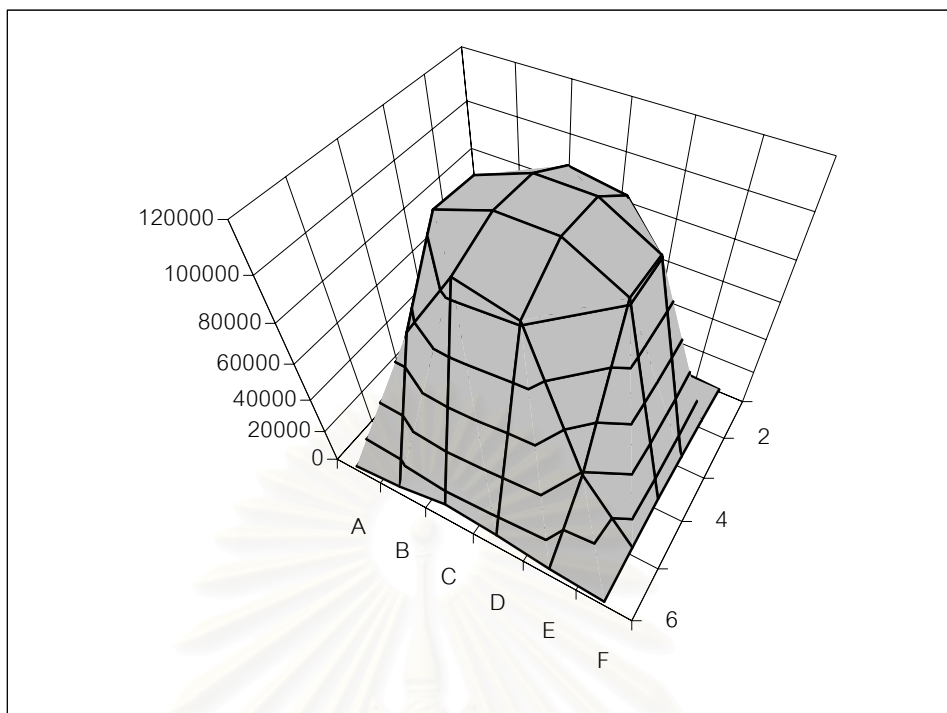
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะความสูงของระดับน้ำในท่อนำนิวตรอน



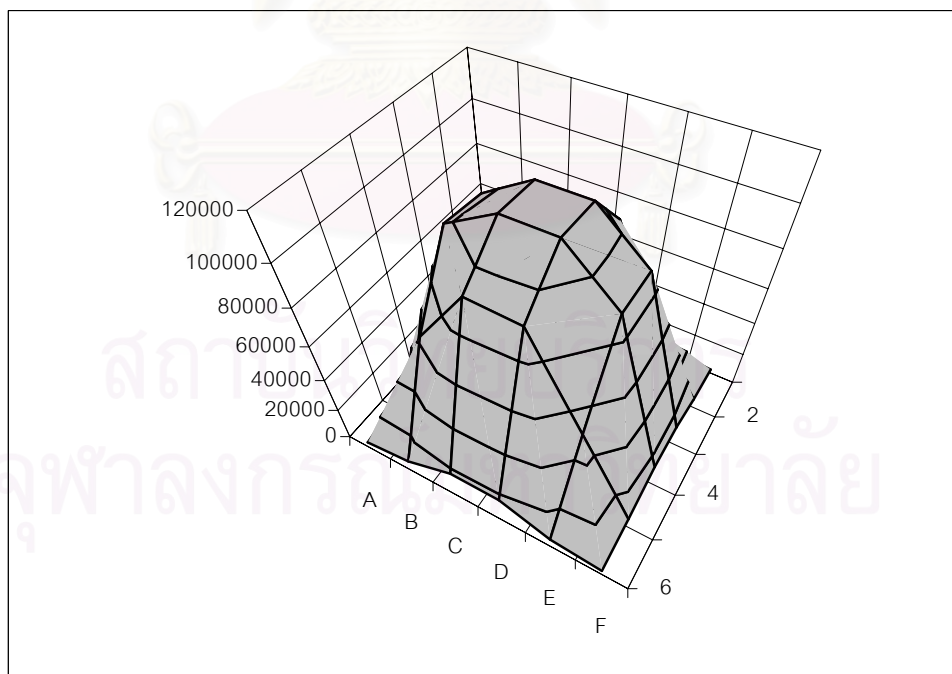
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคดเมียมกับระยะความสูงของระดับน้ำในท่อนำนิวตรอน

4.2 ผลการศึกษารูปแบบการกระจายของลำนิวตรอน

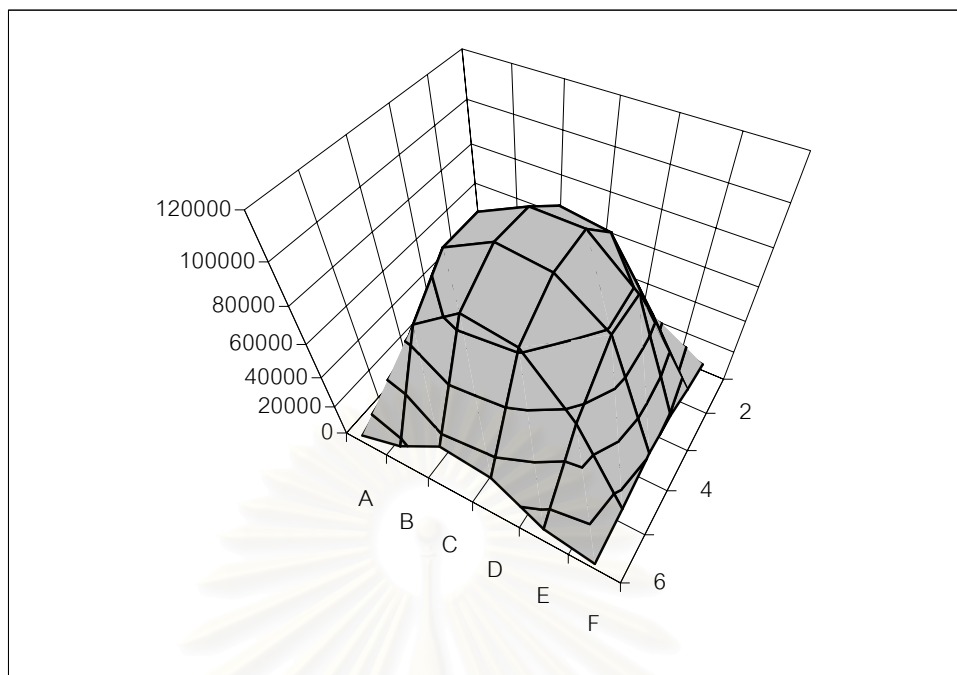
จากการศึกษา รูปแบบการกระจายของลำนิวตรอน เมื่อวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ระยะติดกับปลายเปิดของท่อนำนิวตรอนนั้น พบว่าที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนจะมีปริมาณความเข้มของนิวตรอนมากที่สุดและที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างจากตรงกลางออกมาในแนวรัศมี จะมีปริมาณความเข้มของนิวตรอนน้อยลงไปเรื่อย ๆ ตามระยะที่ห่างออกมาจากตรงกลางตามแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเมื่อวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ระยะสูงขึ้น จะพบว่าที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนยังคงมีปริมาณความเข้มของนิวตรอนมากกว่าที่ตำแหน่งที่ห่างออกไปตามแนวรัศมี แต่ปริมาณความเข้มของนิวตรอนจะมีค่าน้อยลงไปตามลำดับ เมื่อระยะที่วัดความเข้มของนิวตรอนอยู่สูงขึ้น ไปจากระยะที่ติดกับท่อนำนิวตรอน



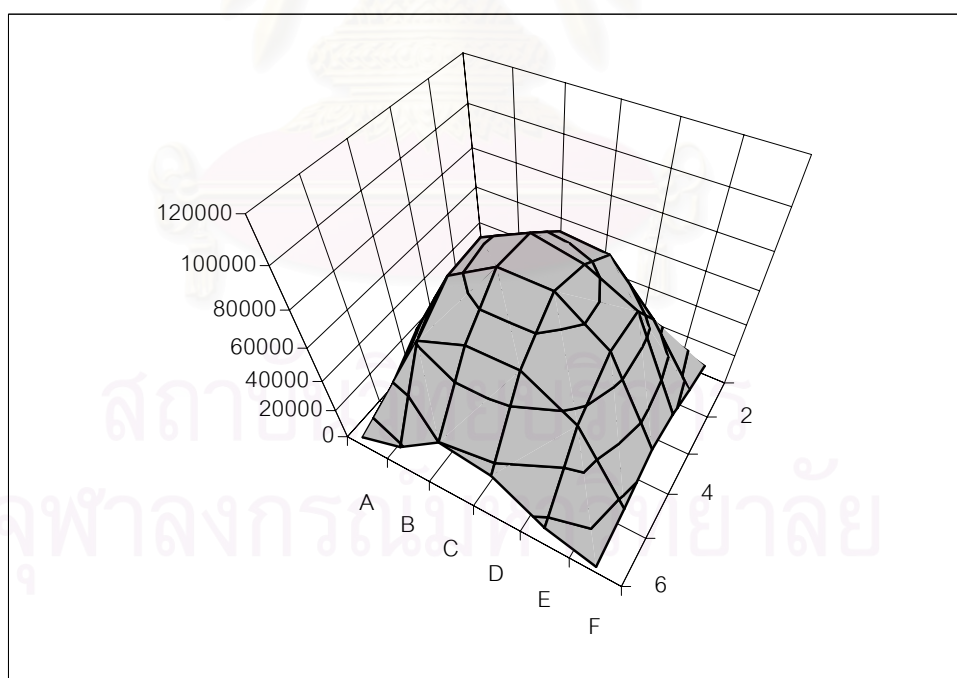
รูปที่ 4.5 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 0 เซนติเมตรจากปลายเปิดของ
ท่อนำนิวตรอน



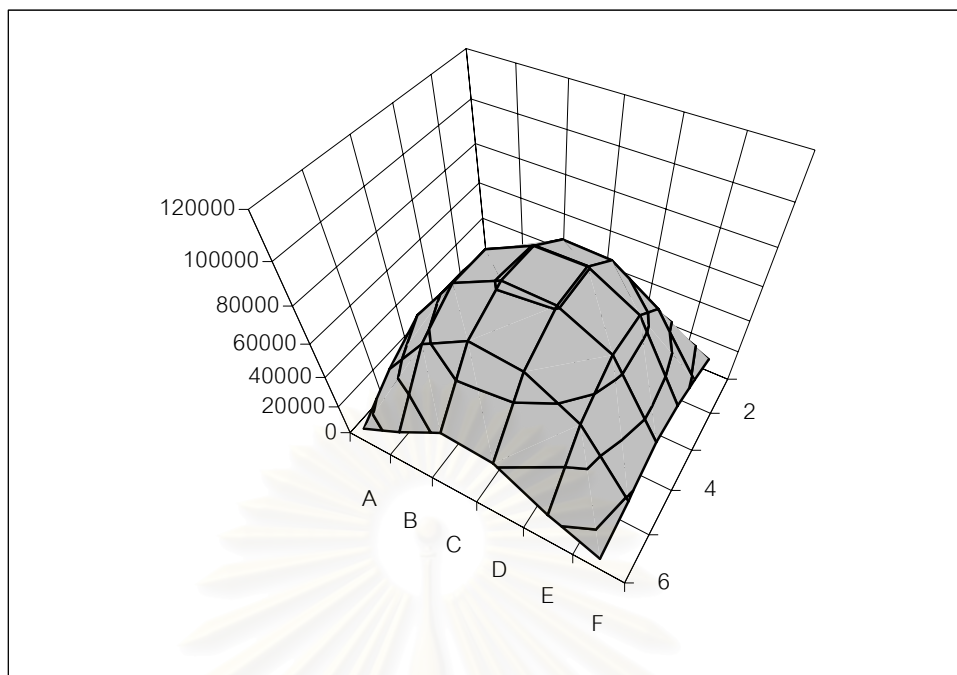
รูปที่ 4.6 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 2 เซนติเมตรจากปลายเปิดของ
ท่อนำนิวตรอน



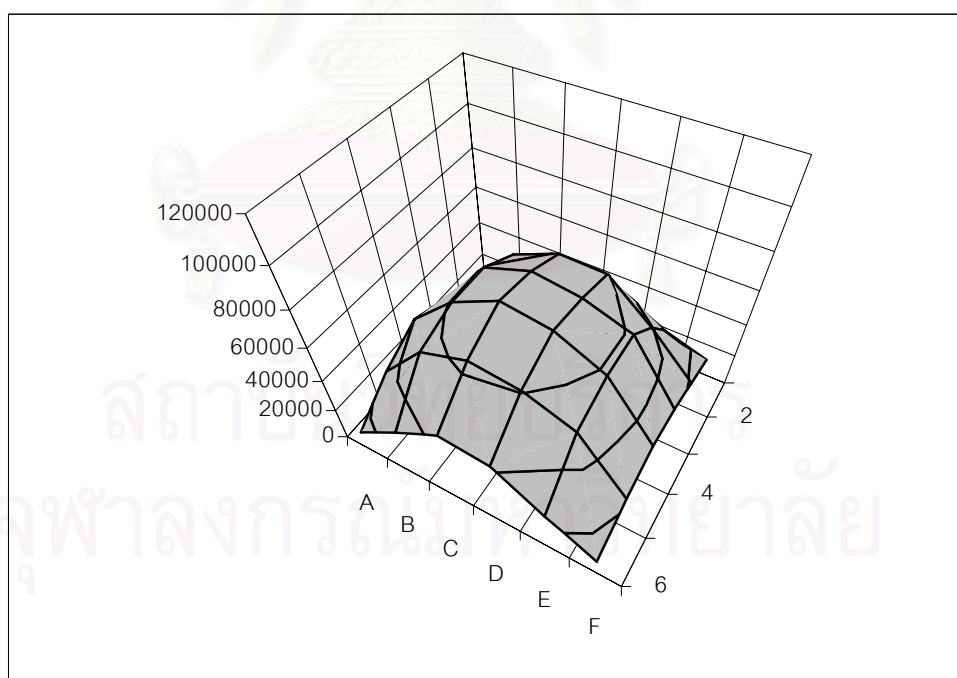
รูปที่ 4.7 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 4 เซนติเมตรจากปลายเปิดของ
ท่อนำนิวตรอน



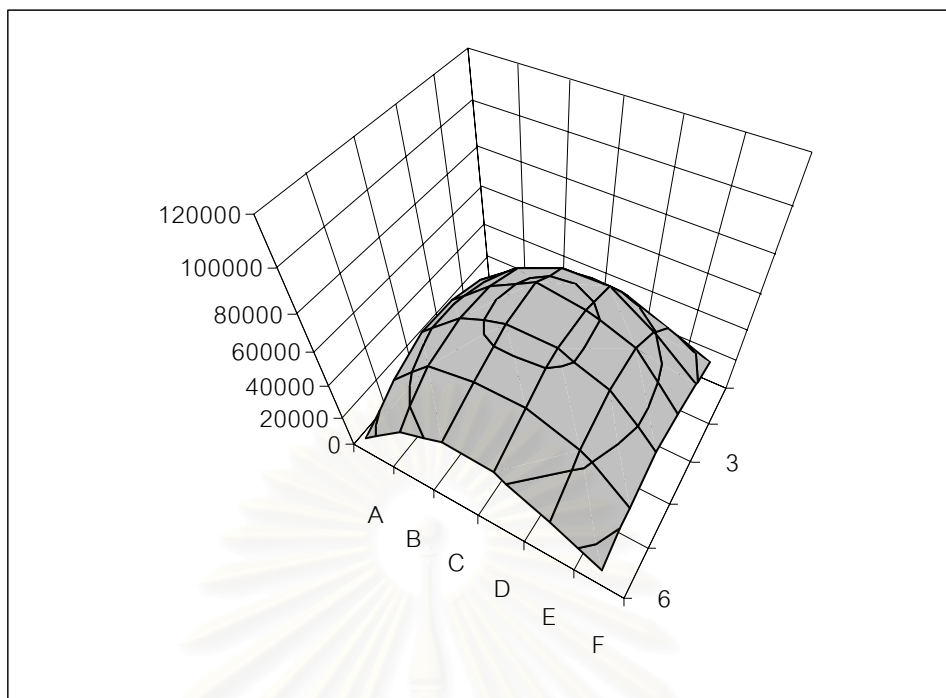
รูปที่ 4.8 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 6 เซนติเมตรจากปลายเปิดของ
ท่อนำนิวตรอน



รูปที่ 4.9 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 8 เซนติเมตรจากปลายเปิดของ
ท่อนำนิวตรอน



รูปที่ 4.10 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 10 เซนติเมตรจากปลายเปิด
ของท่อนำนิวตรอน



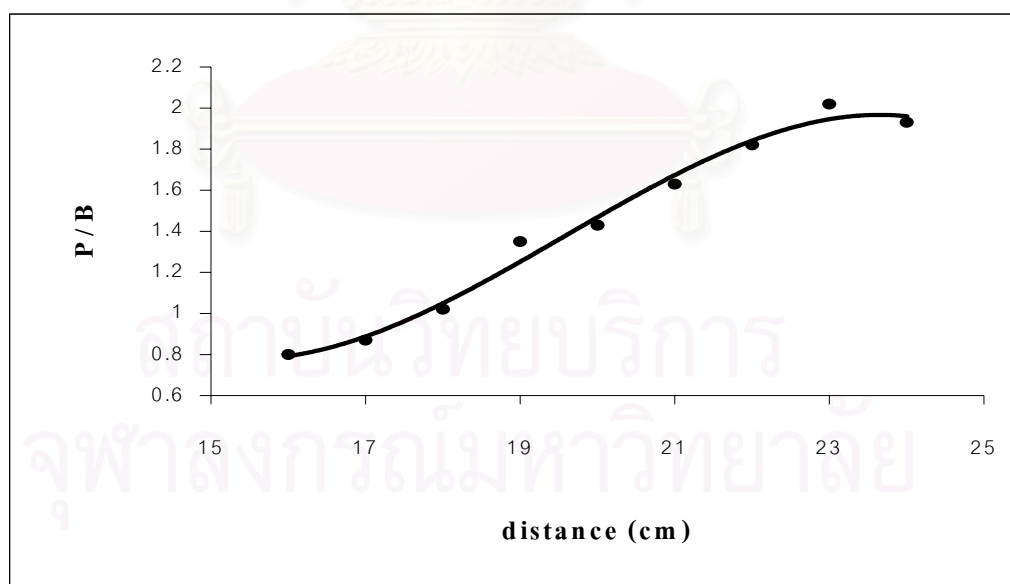
รูปที่ 4.11 ปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ณ ความสูง 12 เซนติเมตรจากปลายเปิดของท่อนำนิวตรอน

4.3 ผลการศึกษาตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา

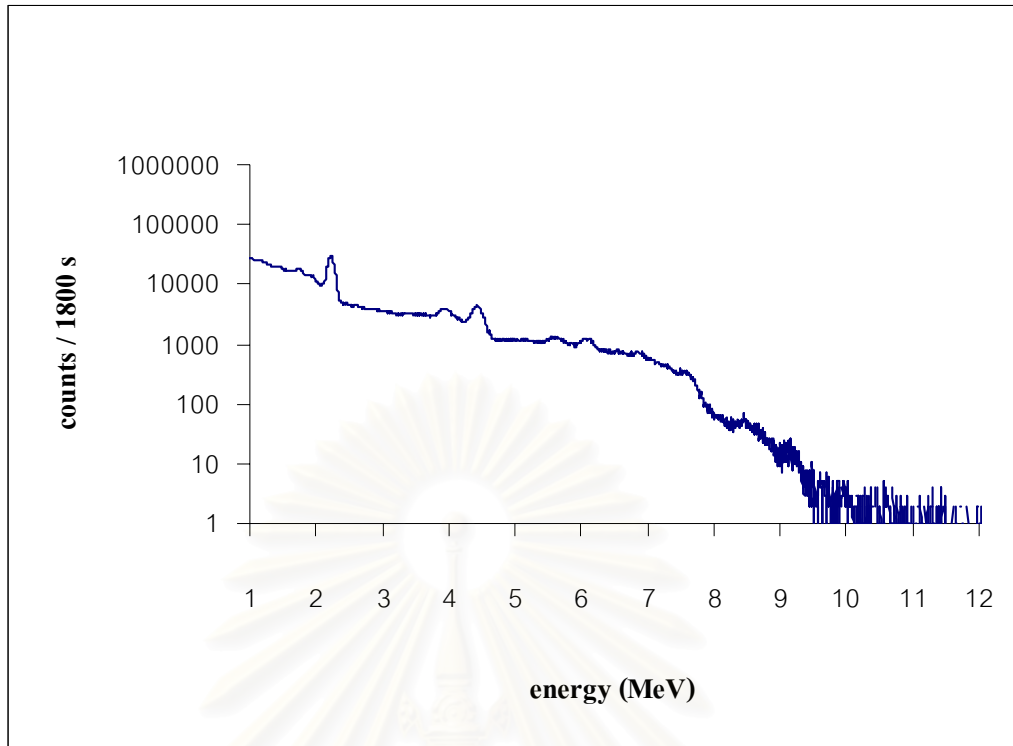
เมื่อเลื่อนหัววัดรังสีแกมมาห่างออกมา จะพบว่าค่าอัตรานับสุทธิของรังสีพรอมต์แกมมาในช่วงพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนมีค่าลดลงเมื่อระยะระหว่างผิวหน้าของหัววัดรังสีถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำนิวตรอนมีค่ามากขึ้นและให้ค่าเบคกราวด์ลดลงตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อเบคกราวด์จะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะระหว่างผิวหน้าของหัววัดรังสีถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำนิวตรอนมีค่ามากขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อถึงระยะหนึ่งคือ ที่ระยะ 24 เซนติเมตร เนื่องจากที่ระยะนี้มีค่าเบคกราวด์ใกล้เคียงกับที่ระยะ 23 เซนติเมตร ทำให้มีอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อเบคกราวด์มีค่าลดลง จากงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกระยะระหว่างผิวหน้าของหัววัดรังสีถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำนิวตรอนที่ 23 เซนติเมตร เนื่องจากได้อัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อเบคกราวด์มีค่าสูงสุด

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาระยะระหว่างผิวหน้าของหัววัดรังสีถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำนิวตรอนที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์ (P/B)

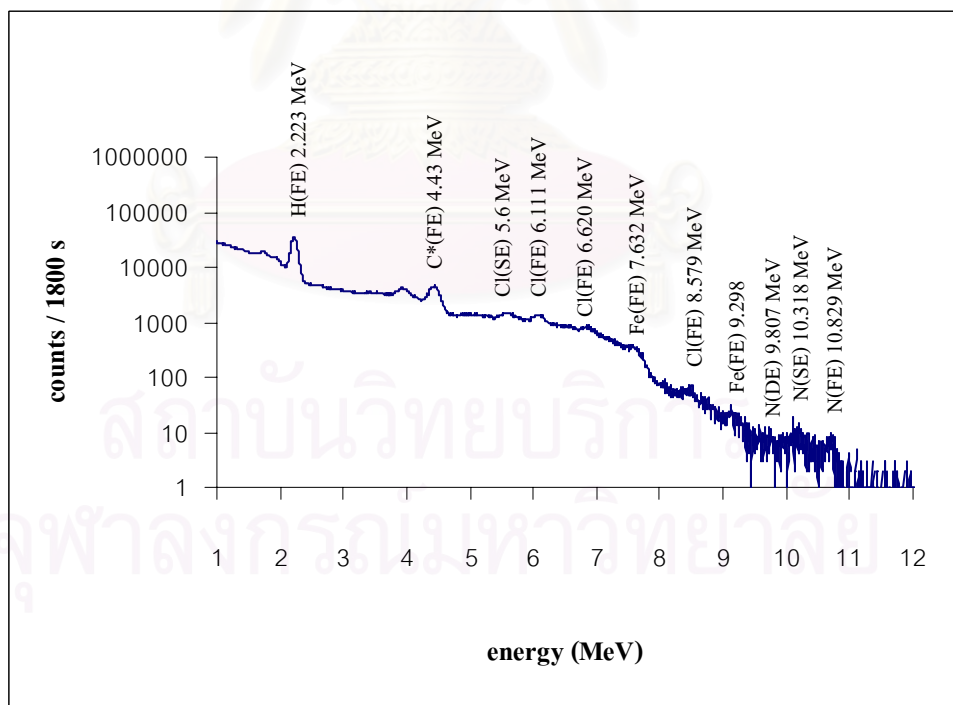
distance (cm)	integral counts of bg (B) (counts/1800s)	net integral counts of sample (P) (counts/1800s)	net integral count rate (cps)	P/B
16	1191	1011	0.56	0.85
17	874	838	0.47	0.96
18	702	782	0.43	1.11
19	534	747	0.42	1.40
20	454	684	0.38	1.51
21	360	640	0.36	1.78
22	325	631	0.35	1.94
23	260	555	0.31	2.13
24	262	525	0.29	2.00



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์กับตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ของระบบ



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม

4.4 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่าง

จากข้อมูลผลการวิจัยที่ผ่านมา ทำให้สามารถจัดระบบอบรังสีนิวตรอนพร้อมกับการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนพลังงาน 10.829 MeV ได้ ผลการทดสอบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในยูเรีย 668 กรัม ในแต่ละตำแหน่งจากการวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อวางยูเรียอยู่ในตำแหน่งที่ 2 จะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนเร็วที่สุด เนื่องจากวางตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับหัววัดมากที่สุด แต่เมื่อวางยูเรียอยู่ในตำแหน่งที่ 3 จะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนนานที่สุด เนื่องจากวางตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งที่ไกลจากหัววัดมากที่สุด และเมื่อวางยูเรียอยู่ในตำแหน่งที่ 1, 5 และ 4 ตามลำดับ พบว่าจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนได้แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากวางตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากหัววัดในระยะทางที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 1 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างยูเรีย 668 กรัม

position	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (counts/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time* (second)
1	582	401	0.11	0.69	620
2	582	513	0.14	0.88	403
3	582	244	0.07	0.42	1521
4	582	318	0.09	0.55	939
5	582	329	0.09	0.57	883

หมายเหตุ * คือเวลาดำสุดที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา^[17]

คำนวณได้จาก

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเบคราวด์ = ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของตัวอย่าง

$$\left(\frac{B}{T}\right)_t + 3\sqrt{\left(\frac{B}{T}\right)_t} = \left(\frac{S}{T}\right)_t - 3\sqrt{\left(\frac{S}{T}\right)_t} \quad (4.1)$$

ดังนั้นจะได้

$$t = 9T \left(\frac{S + B + 2\sqrt{BS}}{(S - B)^2} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ S คือจำนวนนับรังสีของตัวอย่าง

B คือจำนวนนับรังสีของแบคกราวด์

T คือเวลาที่ใช้ในการนับรังสี

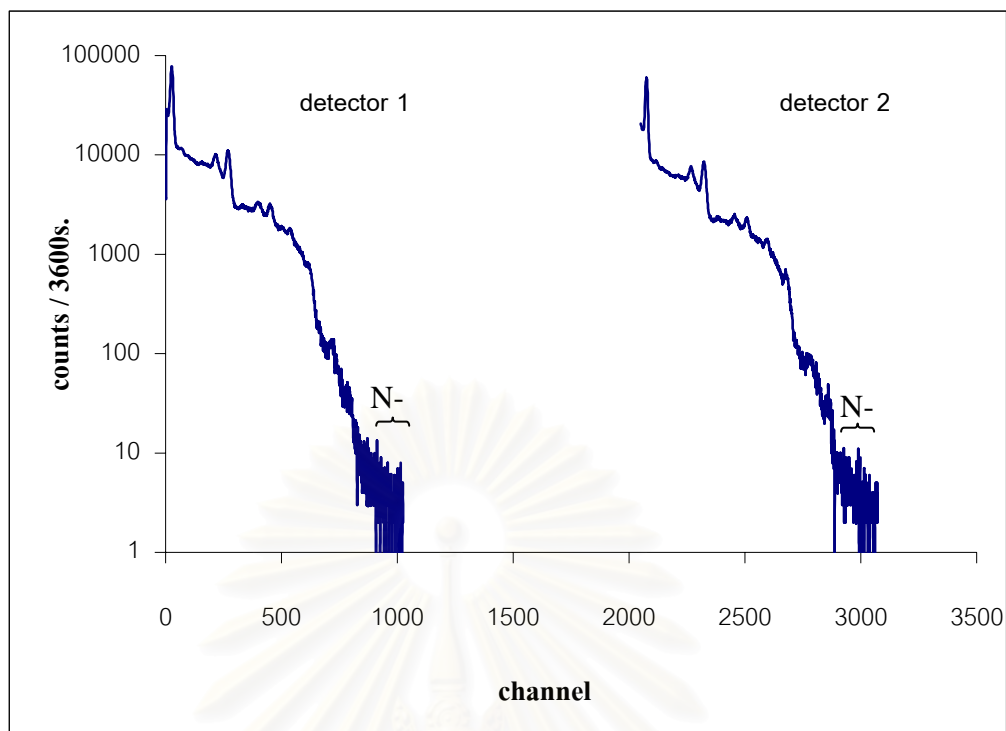
t คือเวลาต่ำสุดที่ใช้ในการตรวจพบในโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา

4.5 ผลการทดสอบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด

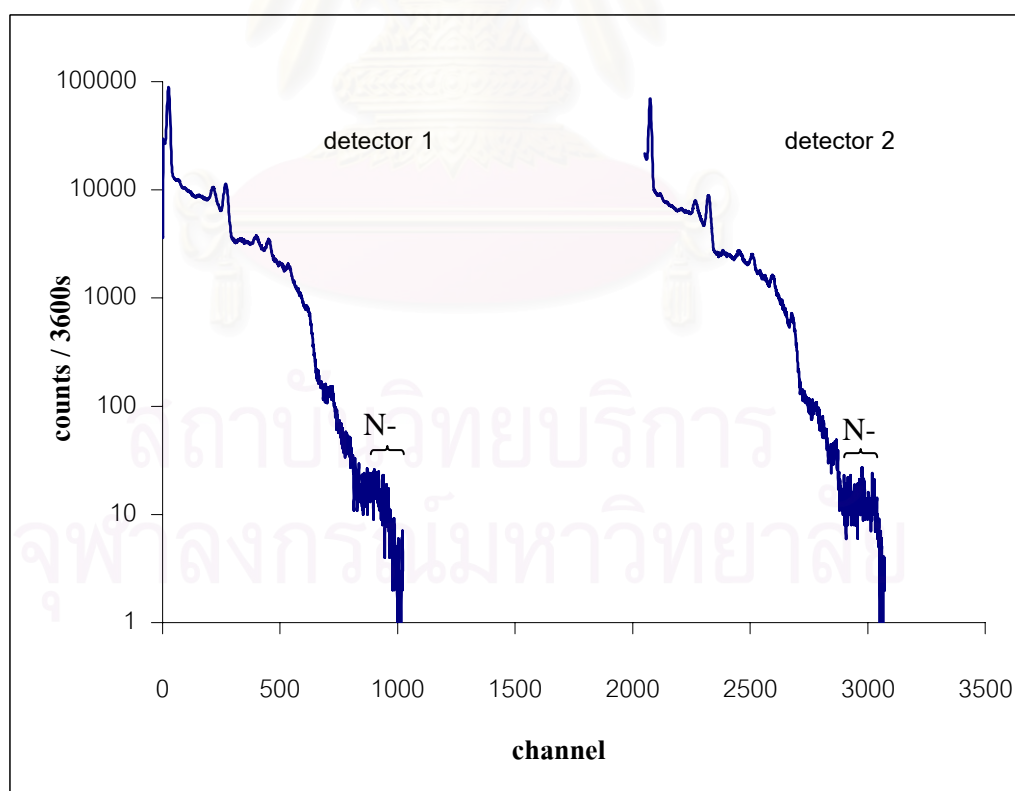
จากการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในยูเรีย 1 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดค์(แทลเลียม) จำนวน 2 ชุด และใช้เครื่องมือมิคเซอร์รูทเตอร์เป็นตัวรับสัญญาณจากทั้งสองหัววัดนั้น ทำให้สามารถเห็นสเปกตรัมจากทั้งสองหัววัดได้ในเวลาที่พร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการวัดรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ และรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม จากผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนของทั้งสองหัววัดเมื่อวางตัวอย่างไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนนั้น พบว่ามีค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด เมื่อวางตัวอย่างไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอน

weight of sample (kg)	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (counts/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B
1	detector 1	583	1106	0.31	1.90
	detector 2	447	1071	0.30	2.40



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากแบคคราเวดซ์ของระบบ โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากตัวอย่างยูเรเนียม 1 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดรังสีแกมมา 2 ชุด

4.6 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด

ผลการทดสอบการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในยูเรีย 1 กิโลกรัม และลดขนาดของตัวอย่างให้เล็กลงจนเหลือยูเรีย 668 กรัม โดยวางตัวอย่างยูเรียทั้งสองขนาดไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนเหมือนกัน พบว่าเมื่อวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนในยูเรีย 1 กิโลกรัม จะใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนเร็วกว่าในยูเรีย 668 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และผลการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อนำนิวตรอน พบว่า ณ ตำแหน่งของตัวอย่างที่วางอยู่ใกล้หัววัดจะใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ที่วางอยู่ไกลหัววัดออกไป ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนปริมาณของตัวอย่างยูเรียที่มีผลต่อการใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา

weight of sample (kg)	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (counts/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
1	detector 1	579	651	0.18	1.12	267
	detector 2	447	651	0.18	1.46	225
0.668	detector 1	579	400	0.11	0.69	620
	detector 2	447	376	0.10	0.84	569

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนของระบบวัดรังสีพร้อมดีแกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างยูเรียม 668 กรัม

position	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
1	detector 1	595	403	0.11	0.68	625
	detector 2	476	383	0.11	0.80	577
2	detector 1	595	503	0.14	0.85	424
	detector 2	476	220	0.06	0.46	1555
3	detector 1	595	247	0.07	0.42	1515
	detector 2	476	447	0.12	0.94	442
4	detector 1	595	367	0.10	0.62	739
	detector 2	476	315	0.09	0.66	814
5	detector 1	595	385	0.11	0.65	678
	detector 2	476	332	0.09	0.70	742

4.7 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง

จากผลการทดลอง เมื่อนำยูเรียม 1 กิโลกรัม มาวาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ แล้วนำไปอบรังสีนิวตรอนเพื่อวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจน โดยวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนนั้น พบว่าสามารถตรวจพบไนโตรเจนจากตัวอย่างยูเรียมได้ทุกตำแหน่งภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

จากการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง โดยการนำสิ่งของอื่นๆ ไปใส่ลงในกล่องพัสดุไปรษณีย์ พร้อมกับตัวอย่างคล้ายวัตถุระเบิดซึ่งเป็นยูเรียม 1 กิโลกรัม และนำไปอบรังสีนิวตรอนเพื่อวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจนนั้น พบว่าเวลาที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของแต่ละหัววัดที่มียูเรียมรวมกับสิ่งของอื่น ๆ ซึ่งวางอยู่ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์จะใช้เวลาเร็ว โดยที่หัววัดที่หนึ่งใช้เวลาประมาณ 213 วินาที ส่วนหัววัดที่สองใช้เวลาประมาณ 190 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และเมื่อคิดค่าการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนจากทั้งสองหัววัดรวมกันประมาณ 101 วินาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก) ส่วนการตรวจวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจนในนมถั่ว

เกลือ 1 กิโลกรัม และหมูเบคอน 1 กิโลกรัม ซึ่งวางไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของกล่องพัสดุไปรษณีย์ นั้น พบว่าเวลาที่ใช้ในการตรวจพบในโตรเจนที่มีนมถั่วเหลืองและหมูเบคอนวางอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์จะใช้เวลานาน เนื่องจากค่าจำนวนนับของรังสีพรอมต์แกมมาจากในโตรเจนในตัวอย่งนมถั่วเหลืองและหมูเบคอนมีค่าน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการใช้เวลาในการตรวจพบในโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาเมื่อนำยูเรีย 1 กิโลกรัม มาวาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์

position	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
1	detector 1	569	642	0.18	1.13	270
	detector 2	455	594	0.17	1.31	265
2	detector 1	569	863	0.24	1.52	166
	detector 2	455	467	0.13	1.03	397
3	detector 1	569	524	0.15	0.92	382
	detector 2	455	802	0.22	1.76	162
4	detector 1	569	349	0.10	0.61	780
	detector 2	455	353	0.10	0.78	644
5	detector 1	569	363	0.10	0.64	727
	detector 2	455	375	0.10	0.82	579

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยใส่หนังสือและเส้นใ้รวมกับยูเรียวางอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์

type of sample	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
urea 1	detector 1	646	778	0.22	1.20	213
kg	detector 2	532	773	0.21	1.45	190

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่างอื่น ๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบวางอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์

type of sample	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
milk 1	detector 1	599	125	0.03	0.21	5474
kg	detector 2	480	113	0.03	0.24	5430
bacon 1	detector 1	599	263	0.07	0.44	1358
kg	detector 2	480	240	0.07	0.50	1336

4.8 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี

เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มีความแรง 8 คูรี จะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนที่มีอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์เร็วขึ้น โดยที่หัววัดที่หนึ่งจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนประมาณ 163 วินาที ส่วนหัววัดที่สองจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนประมาณ 121 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และเมื่อคิดค่าการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนจากทั้งสองหัววัดรวมกันประมาณ 71 วินาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก)

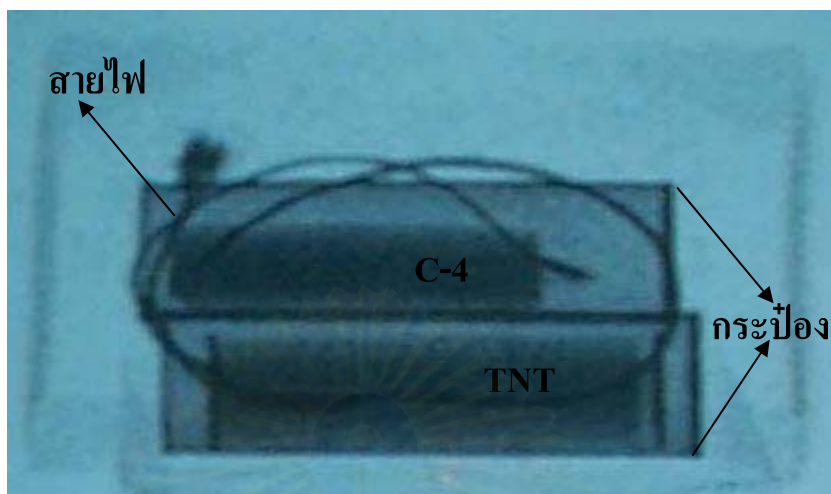
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยใส่หนังสือและเสื้อผ้าร่วมกับยูเรียไว้ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ ซึ่งใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี

type of sample	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
urea 1 kg	detector 1	772	982	0.27	1.27	163
	detector 2	560	1042	0.29	1.86	121

4.9 ผลของการจำลองสถานการณ์การตรวจหาวัตถุระเบิดในกล่องพัสดุไปรษณีย์ โดยใช้วิธีการสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ร่วมกับวิธีการวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจน

ผลจากการสแกนกล่องพัสดุไปรษณีย์ด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ได้บรรจุสายไฟและกระป๋องที่ภายในได้บรรจุวัตถุระเบิดไว้สองกระป๋อง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าสามารถเห็นภาพของวัตถุระเบิดทั้งสองก้อนที่ถูกบรรจุอยู่ในกระป๋องทั้งสองได้ โดยรังสีเอกซ์สามารถที่จะทะลุผ่านกล่องพัสดุไปรษณีย์และกระป๋องได้ ส่วนบริเวณที่มีวัตถุระเบิดและสายไฟนั้นรังสีเอกซ์ทะลุผ่านไปได้น้อยจึงทำให้มองเห็นความแตกต่างได้ และจากผลการทดลองเมื่อนำวัตถุระเบิดหนัก 795 กรัม พร้อมกับสายไฟใส่ลงไปในกล่องพัสดุไปรษณีย์ และทำการตรวจวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจน พบว่าสามารถตรวจพบไนโตรเจนของแต่ละหัววัดโดยใช้เวลาประมาณ 500 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และเมื่อคิดค่าการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนจากทั้งสองหัววัดรวมกันประมาณ 250 วินาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก)

ส่วนผลจากการนำแผ่นตะกั่วมาปิดทับบางส่วนของกระป๋องทั้งสอง แล้วนำไปสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าในส่วนที่ถูกแผ่นตะกั่วปิดทับนั้นรังสีเอกซ์ทะลุผ่านไปได้น้อยมาก จึงทำให้ไม่สามารถเห็นรายละเอียดในส่วนที่ถูกแผ่นตะกั่วปิดทับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และจากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 เมื่อนำแผ่นตะกั่วมาปิดทับบางส่วนของกระป๋องทั้งสอง และทำการตรวจวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจน พบว่าสามารถตรวจพบไนโตรเจนของแต่ละหัววัดโดยใช้เวลาประมาณ 600 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และเมื่อคิดค่าการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนจากทั้งสองหัววัดรวมกันประมาณ 300 วินาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก)



รูปที่ 4.17 รูปภาพสแกนด้วยรังสีเอกซ์ของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งภายในบรรจุสายไฟ และกระป๋อง
ที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่



รูปที่ 4.18 รูปภาพสแกนด้วยรังสีเอกซ์ของกล่องพัสดุไปรษณีย์ซึ่งภายในบรรจุแผ่นตะกั่ว สายไฟ
และกระป๋องที่มีวัตถุระเบิดบรรจุอยู่

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบวัดรังสีพร้อมดีแกมมาจากไนโตรเจนในการตรวจวัดระเบิดในกล่อง
พัสดุไปรษณีย์ ซึ่งใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{328}\text{Pu/Be}$ ความแรง 5 คูรี และ $^{241}\text{Am/Be}$ ความแรง 3 คูรี

type of sample	type of detector	integral counts of bg (B) (counts/3600s)	net integral counts of sample (P) (count/3600s)	net integral count rate (cps)	P/B	minimum analysis time (second)
TNT 480 g + C-4 315 g	detector 1	754	497	0.14	0.66	518
	detector 2	587	449	0.12	0.76	511
TNT 480 g + C-4 315 g + แผ่นตะกั่ว	detector 1	733	436	0.12	0.59	640
	detector 2	577	396	0.11	0.69	630

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การจัดระบบอบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เหมาะสม

ในการออกแบบระบบอบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนกับธาตุไนโตรเจน ปัญหาที่พบคือ มีรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 2.22 MeV ที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำ รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 4.43 MeV ที่ปล่อยออกมาจากคานำเนutron และรังสีพรอมต์แกมมาพลังงานต่าง ๆ จากการทำอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับวัสดุรอบข้างเกิดขึ้นสูง เป็นเหตุให้มีค่าแบคกราวด์สูง แต่เมื่อมีการจัดระบบอบรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าจำนวนเทอร์มันิวตรอนและอัตราส่วนแคดเมียม พบว่าระบบอบรังสีนิวตรอนที่คานำเนutron จะต้องมีค่าจำนวนเทอร์มันิวตรอนสูงและมีค่าอัตราส่วนแคดเมียมที่สูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกวางคานำเนutron ห่างจากที่วางตัวอย่างที่ระยะ 56 เซนติเมตร และมีระดับน้ำในท่อนำนิวตรอนที่ระยะความสูง 20 เซนติเมตร ในส่วนการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนที่เหมาะสมนั้น จะต้องพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์ ซึ่งระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่คานำเนutron จะต้องมีค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์สูง ดังนั้นจึงได้เลือกวางหัววัดรังสีแกมมาทั้งสองให้อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อนำนิวตรอนที่ระยะ 23 เซนติเมตร โดยวางหันหน้าเข้าหากัน ซึ่งในการจัดระบบอบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.829 MeV จากไนโตรเจนที่เหมาะสมนั้นจะทำให้สามารถลดค่าแบคกราวด์ลงได้ ส่วนรูปแบบการกระจายของลำนิวตรอน จากรูปที่ 4.5 พบว่ามีการกระจายของนิวตรอนในลักษณะที่บริเวณตรงกลางของท่อนำนิวตรอนจะมีปริมาณความเข้มของนิวตรอนสูงกว่าที่บริเวณด้านข้าง ซึ่งอยู่ห่างจากตรงกลางออกมาในแนวรัศมี และเมื่อวัดปริมาณความเข้มของนิวตรอนที่ระยะสูงขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.11 พบว่าจะมีปริมาณความเข้มของนิวตรอนลดลงไป แต่ยังคงมีการกระจายของนิวตรอนในลักษณะเดิม ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ณ บริเวณตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนนั้นมีโอกาสในการทำอันตรกิริยากับตัวอย่างสูงกว่าบริเวณที่ห่างออกไปในแนวรัศมี

5.1.2 การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 2 ชุด

ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในตัวอย่างยูเรีย 1 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 2 ชุด พบว่าทั้งสองหัววัดมีค่าอัตรานับสุทธิของไนโตรเจนใกล้เคียงกันประมาณ 0.3 cps ต่อกิโลกรัมของยูเรีย และค่าอัตราส่วนความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนต่อแบคกราวด์ประมาณ 2

5.1.3 การใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ในการเปลี่ยนปริมาณและตำแหน่งของตัวอย่าง

จากการวัดรังสีพรอมต์แกมมาในตัวอย่างที่มีปริมาณแตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณของไนโตรเจนมากจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนเร็วกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณของไนโตรเจนน้อย และจากการวัดรังสีพรอมต์แกมมาในตัวอย่างยูเรีย 668 กรัม ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนท่อนานิวตรอน พบว่าระยะทางระหว่างตัวอย่างถึงหัววัดรังสีแกมมานั้น มีผลต่อการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ใกล้กับหัววัดจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนเร็วกว่าตัวอย่างที่วางอยู่ไกลกับหัววัด ดังนั้นสรุปได้ว่าทั้งปริมาณและตำแหน่งของตัวอย่างเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา

5.1.4 การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการจำลองรูปแบบของตัวอย่าง

ในการจำลองรูปแบบของตัวอย่างโดยนำยูเรีย 1 กิโลกรัม วาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ พบว่าสามารถตรวจวัดไนโตรเจนจากยูเรียได้ทุกตำแหน่งภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ที่มีขนาด 20 ซม.×30 ซม.×11 ซม. ส่วนการตรวจวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในตัวอย่างนมถั่วเหลืองและหมูเบคอนนั้น พบว่าต้องใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจน เนื่องจากตัวอย่างเหล่านี้มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่น้อย

5.1.5 การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนโดยการเปรียบเทียบเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มีความแรงเพิ่มขึ้น

การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในยูเรีย 1 กิโลกรัม หนังสือ และเสื้อผ้า ซึ่งบรรจุอยู่ในกล่องพัสดุไปรษณีย์ โดยวางกล่องพัสดุไปรษณีย์ไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำนิวตรอนนั้น พบว่าเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มีความแรงมากกว่าจะใช้เวลาในการตรวจพบไนโตรเจนได้เร็วกว่าต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มีความแรงน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละหัววัดจะใช้เวลาเร็วกว่าประมาณ 50 วินาที และจากทั้งสองหัววัดจะใช้เวลาเร็วกว่าประมาณ 30 วินาที

5.1.6 การจำลองสถานการณ์การตรวจหาวัตถุระเบิดในกล่องพัสดุไปรษณีย์ โดยใช้วิธีสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ร่วมกับวิธีการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจน

ในการสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ของกล่องพัสดุไปรษณีย์นั้น พบว่าสามารถเห็นวัตถุระเบิดที่บรรจุอยู่ในกระป๋องได้ แต่เมื่อนำแผ่นตะกั่วมาปิดทับบางส่วนของกระป๋องที่บรรจุวัตถุระเบิดนั้นแล้วนำไปสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าไม่สามารถเห็นวัตถุระเบิดในส่วนที่ถูกแผ่นตะกั่วปิดทับได้ ดังนั้นในการตรวจสอบวัตถุระเบิดโดยการสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์เพียงอย่างเดียว นั้น ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์มีวัตถุระเบิดอยู่หรือไม่ ซึ่งก็เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการใช้วิธีสแกนภาพด้วยรังสีเอกซ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัตถุระเบิดโดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนควบคู่กันไปด้วย ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 พบว่าสามารถตรวจพบไนโตรเจนจากวัตถุระเบิดที่อยู่ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ได้ และเมื่อนำแผ่นตะกั่วมาปิดทับบางส่วนของกระป๋องที่บรรจุวัตถุระเบิดก็สามารถตรวจพบไนโตรเจนจากวัตถุระเบิดที่อยู่ภายในกล่องพัสดุไปรษณีย์ได้เช่นกัน แต่อาจต้องใช้เวลาในการตรวจสอบนานขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของธาตุไนโตรเจนควรเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม โดยต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เลือกใช้นั้น ควรมีความเข้มของนิวตรอนสูงและไม่ควรมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดในขณะทำการวัดรังสี ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ $^{238}\text{Pu/Be}$ และ $^{241}\text{Am/Be}$ เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนโดยต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนทั้งสองปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะที่พลังงาน 4.43 MeV มีผลทำให้มีค่าแบคกราวด์สูง และต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนประเภท (α, n) นี้มีความเข้มของนิวตรอนต่ำด้วย ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความไวมากขึ้นควรเลือกใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดรังสี

นิวตรอนแทน เนื่องจากปลดปล่อยรังสีแกมมาในปริมาณที่น้อยกว่าแหล่งกำเนิดทั้งสองโดยไม่ปลดปล่อยรังสีแกมมาที่พลังงาน 4.43 MeV และมีความเข้มของนิวตรอนสูง ซึ่งสูงกว่าต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนประเภท (α, n) นี้ประมาณ $4.3 \times 10^9 \text{ ns}^{-1} \text{ Ci}^{-1}$

5.2.2 จากงานวิจัยครั้งนี้ ได้พิจารณารังสีฟรอมต์แกมมาจากไนโตรเจนในช่วงพลังงาน 10.829 MeV ซึ่งจำเป็นต้องใช้หัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงในการวัดรังสีแกมมาพลังงานสูง ดังนั้น เพื่อให้สามารถทำการตรวจวัดไนโตรเจนได้เร็วขึ้น ควรเลือกใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดค์(เทลเลียม)ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรืออาจใช้หัววัดรังสีแกมมาที่มีประสิทธิภาพสูง และควรเพิ่มจำนวนหัววัดรังสีแกมมาให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการวัดปริมาณรังสีแกมมาได้มากขึ้น

5.2.3 การวัดรังสีฟรอมต์แกมมามีข้อเสียคือ การวัดรังสีแกมมาในขณะที่อบรังสีนิวตรอนนั้นรังสีฟรอมต์แกมมาพลังงานอื่น ๆ จากวัสดุรอบข้างจะถูกวัดไปด้วยมีผลทำให้ค่าแบคกราวด์สูง ดังนั้นในการออกแบบระบบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาจึงควรเลือกใช้วัสดุที่กำบังรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ได้ดีและเหมาะสมกับธาตุที่ถูกรววัด เพื่อไม่ให้เกิดรังสีฟรอมต์แกมมาไปรบกวนในช่วงพลังงานที่สนใจ และในกรณีนี้ควรเลือกใช้ท่อนานิวตรอนที่ไม่ใช่ท่อพีวีซี เนื่องจากในผลการทดลองมีรังสีฟรอมต์แกมมาจากคลอรีนเกิดขึ้นและควรใช้บิสมัทแทนตะกั่วในการกำบังรังสีแกมมาเนื่องจากรังสีฟรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนฟิคของไนโตรเจน

5.2.4 สามารถนำเทคนิคการวัดรังสีฟรอมต์แกมมานี้ ไปพัฒนาใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบวัตถุระเบิดที่ถูกซุกซ่อนไว้ในสิ่งของต่าง ๆ อาทิเช่น กระเป๋าเดินทาง และกล่องพัสดุไปรษณีย์ เป็นต้น หรือนำไปใช้ในการตรวจวัดตัวอย่างอื่น ๆ ได้แก่ ตรวจหายาเสพติดที่มีองค์ประกอบของธาตุคลอรีน โดยธาตุคลอรีนนั้นจะมีความไวต่อเทคนิคนี้สูง ทำให้อาจตรวจสอบได้ง่าย ทั้งนี้จะต้องใช้งานร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ ด้วย

รายการอ้างอิง

1. สมพร จงคำ. การตรวจวัดระเบิดด้วยวิธีนิวเคลียร์. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2543.
2. Shea, P.M., Gozani, T. A TNA Explosives-Detection System in Airline Baggage. Nuclear Instruments and Methods, A299, 444-448, 1990.
3. Gozani, T. A Review of Neutron Based Non-Intrusive Inspection Techniques. Applications of Nuclear Techniques, 1-12, 1995.
4. พระปรมาภิไธยสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช. พระราชบัญญัติอาวุธปืน เครื่องกระสุน วัตถุระเบิด ดอกไม้เพลิง และสิ่งเทียมอาวุธปืน. คณะกรรมการกฤษฎีกา, 2490.
5. Tiwari, P.N., Bergam, R., and Larsson, B. Determination of Nitrogen in Organic Materials by Prompt (n, γ) Technique. International Journal of Applied Radiation and Isotope, 22, 587-592, 1971.
6. Cheng-Jong Lee, Jiunn-Hsing Chao, and Chien Chung. High-Energy Gamma Ray Spectrometer Using Bismuth Germanate Detector. Applied Radiation and Isotope, 42(6), 547-553, 1991.
7. คณิต ทองพิสิฐสมบัติ. การหาปริมาณไนโตรเจนโดยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
8. Viesti, G., Cinausero, M., และคณะ. The Explodet Project Advanced Nuclear Techniques for Humanitarian Demining. Nuclear Instruments and Methods, A422, 918-921, 1999.
9. Singkarat, S., Tippawan, U., Hoyes, G.G., Chirapatpimol, N., and Vilaithong, T. Effect of Neutron Pulse Width on Background Reduction in Prompt Gamma-Ray Analysis. Fast Neutron Research Facility, Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University. 2543.
10. จรัญ พรหมสุวรรณ. นิวเคลียร์ฟิสิกส์เบื้องต้น. เอกสารการสอน. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2540.
11. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. เอกสารการสอน. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
12. Ehmann, W.D., and Vance, D.E. Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis. The United State of America: John Willey & Sons, 1991.

13. สมยศ ศรีสถิตย์. ความรู้เบื้องต้นทางเทคโนโลยีนิวเคลียร์. เอกสารการสอน. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
14. Duffey, D., El-Kady, A., and Senftle, F.E. Analytical Sensitivites and Energies of thermal neutron-capture gamma rays. Nuclear Instruments and Methods, 80, 149-171, 1970.
15. พรรณี เสถียรศรี. การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
16. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
17. Knoll, F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc. 65-97, 2000.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาเวลาต่ำสุดที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากทั้งสองหัววัดรวมกัน

คำนวณได้จาก

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด = ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด
ของแบคกราวด์ทั้งสองหัววัด ของตัวอย่างทั้งสองหัววัด

$$\left(\frac{B_1+B_2}{T}\right)t + 3\sqrt{\left(\frac{(\sqrt{B_1})^2+(\sqrt{B_2})^2}{T}\right)t} = \left(\frac{S_1+S_2}{T}\right)t - 3\sqrt{\left(\frac{(\sqrt{S_1})^2+(\sqrt{S_2})^2}{T}\right)t}$$

ดังนั้นจะได้

$$t = 9T \left(\frac{B_1 + B_2 + S_1 + S_2 + 2\sqrt{(B_1 + B_2)(S_1 + S_2)}}{(S_1 + S_2 - B_1 - B_2)^2} \right)$$

เมื่อ S_1 คือจำนวนนับรังสีของตัวอย่างสำหรับหัววัดที่หนึ่ง

S_2 คือจำนวนนับรังสีของตัวอย่างสำหรับหัววัดที่สอง

B_1 คือจำนวนนับรังสีของแบคกราวด์สำหรับหัววัดที่หนึ่ง

B_2 คือจำนวนนับรังสีของแบคกราวด์สำหรับหัววัดที่สอง

T คือเวลาที่ใช้ในการนับรังสี

t คือเวลาต่ำสุดที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากทั้งสองหัววัดรวมกัน

ตัวอย่างการหาเวลาต่ำสุดที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบโดยการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาจากไนโตรเจนในวัตถุระเบิดชนิด TNT 480 กรัม และ C-4 315 กรัม จากทั้งสองหัววัดรวมกัน

เมื่อ $S_1 = 1251$ counts/3600s, $S_2 = 1036$ counts/3600s, $B_1 = 754$ counts/3600s,
 $B_2 = 587$ counts/3600s และ $T = 3600$ s

ดังนั้น

$$t = 9 \times 3600 \left(\frac{754 + 587 + 1251 + 1036 + 2\sqrt{(754 + 587)(1251 + 1036)}}{(1251 + 1036 - 754 - 587)^2} \right)$$

จะได้ $t = 258$ s

ตัวอย่างการหาเวลาต่ำสุดที่ใช้ในการตรวจพบไนโตรเจนของระบบโดยการวัดรังสีพร้อมดีแกมมา จากไนโตรเจนในวัตถุระเบิดชนิด TNT 480 กรัม และ C-4 315 กรัม ในแต่ละหัววัด

$$\text{จากสมการ} \quad t = 9T \left(\frac{S + B + 2\sqrt{BS}}{(S - B)^2} \right)$$

สำหรับหัววัดที่ 1 เมื่อ $S = 1251 \text{ counts}/3600\text{s}$, $B = 754 \text{ counts}/3600\text{s}$ และ $T = 3600 \text{ s}$

$$\text{ดังนั้น} \quad t = 9 \times 3600 \left(\frac{1251 + 754 + 2\sqrt{754 \times 1251}}{(1251 - 754)^2} \right)$$

$$\text{จะได้} \quad t = 518 \text{ s}$$

สำหรับหัววัดที่ 2 เมื่อ $S = 1036 \text{ counts}/3600\text{s}$, $B = 587 \text{ counts}/3600\text{s}$ และ $T = 3600 \text{ s}$

$$\text{ดังนั้น} \quad t = 9 \times 3600 \left(\frac{1036 + 587 + 2\sqrt{587 \times 1036}}{(1036 - 587)^2} \right)$$

$$\text{จะได้} \quad t = 511 \text{ s}$$

จากงานวิจัยนี้สามารถประเมินค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ดังนี้

- | | |
|--|----------------------|
| 1. ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ และ $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ความแรงรวมประมาณ 5-8 คูรี | 800,000 บาท |
| 2. หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดค์(เทลเลียม) ขนาด 5"×5" จำนวน 2 ชุด | 1,000,000 บาท |
| 3. อุปกรณ์ของระบบการวิเคราะห์รังสีพร้อมดีแกมมา | 800,000 บาท |
| รวมทั้งสิ้น | <u>2,600,000 บาท</u> |

ถ้าใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิด ^{252}Cf 20 ไมโครกรัม แทนต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนในข้อ 1 จะได้ความเข้มของนิวตรอนสูงกว่าประมาณเกือบ 10 เท่า แต่มีราคาสูงกว่าเล็กน้อยคือประมาณ 1 ล้านบาท

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนภลัย คำสีม่วง เกิดวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ.2521 จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย