

การหาปริมาณธาตุโบรอนในดินโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รังสีฟอสฟอรัสจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน



นางสาวชุติมา กรานรอด

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

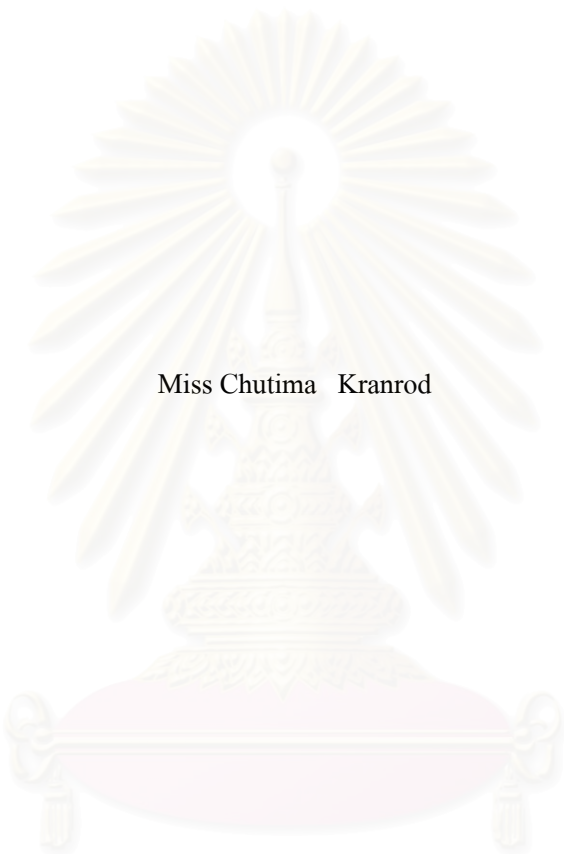
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1058-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF BORON IN SOILS
USING THE PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY ANALYSIS TECHNIQUE



Miss Chutima Kranrod

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 2001

ISBN 974-03-1058-3

ชุตินา กรานรอด: การหาปริมาณธาตุโบรอนในดินโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์
แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (DETERMINATION OF BORON IN SOILS USING
THE PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY ANALYSIS TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา :
รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 62 หน้า. ISBN 974-03-1058-3.

การวิจัยนี้เป็นการทดลองหาปริมาณธาตุโบรอนในตัวอย่างดิน โดยการวัดรังสีพรอมต์
แกมมาพลังงาน 478 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์จากปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ระบบอาบนิวตรอนประกอบ
ด้วยต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอะเมริเซียม-เบริลเลียมความแรง 500 มิลลิวูรี่ (18.5 กิกะเบคเคอเรล)
และใช้น้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอน โดยวางหัววัดรังสีเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูงสำหรับวัดรังสีพรอมต์
แกมมาที่เกิดขึ้นไว้ชิดด้านข้างของภาชนะบรรจุตัวอย่างซึ่งวางอยู่บนปากท่อนำลำนิวตรอน และ
ได้ทำการศึกษาปัจจัยซึ่งมีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 กิโลอิเล็กตรอน
โวลต์ ปัจจัยดังกล่าว ได้แก่ ผลของตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตำแหน่งของหัววัดรังสี ขนาด
ของภาชนะใส่ ตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่าง ความหนาแน่นของตัวอย่าง และความชื้นในตัวอย่าง ได้ใช้
เทคนิคการเติมสารมาตรฐานเพื่อการสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสี
พรอมต์แกมมากับปริมาณโบรอนในดินสำหรับการหาปริมาณโบรอนจากตัวอย่างดินอื่น ๆ ได้ทำการ
วิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุโบรอนในดินจากตัวอย่างดินจำนวน 5 ตัวอย่าง พบว่า ปริมาณโบรอนที่
วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วงประมาณ 26 - 48 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไม่เกิน 9 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก สำหรับขีดจำกัดในการวิเคราะห์โบรอนในดินด้วยเทคนิคนี้
มีค่าประมาณ 0.2 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก ที่เวลาในการวัดรังสี 12000 วินาที วิธีการที่พัฒนาขึ้น
มาสามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบเทคนิคนี้ สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนในดิน ณ พื้นที่ได้

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##4270297921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

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

CHUTIMA KRANROD : DETERMINATION OF BORON IN SOILS USING THE
PROMPT CAPTURED GAMMA-RAY ANALYSIS TECHNIQUE. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, 62 PP. ISBN 974-03-1058-3.

Determination of boron in soil sample by measurement of 478 keV prompt gamma-ray from $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction was experimentally investigated. The neutron irradiation system consisted of a 500 mCi (18.5 GBq) $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ neutron source and water as the moderator. A high purity germanium detector was positioned close to one side of the sample container which was seated on the neutron collimator. Factors that affected the intensity of 478-keV gamma-ray were also investigated including positions of the source and the sample as well as size, shape and moisture content of the sample. The standard addition technique was used to calibrate the system for determining boron in other samples. The boron contents in five soil samples were determined and found to be in the range of 26 - 48 ppm by weight with the standard deviations of ≤ 9 ppm while the detection limit was found to be approximately 0.2 ppm for 12,000-second counting time. The developed procedure will be used to calibrate this technique for in situ determination of boron in soil.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2001

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์นี้ จากงานปฏิบัติและค้นคว้า และความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่ง จาก รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ความห่วงใยที่ดีตลอดมา จากเพื่อน ๆ นิสิตทุกท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้ครบในที่นี้ ขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคนใน ครอบครัวที่ให้ความเมตตากรุณา ความห่วงใย และดูแลให้กำลังใจที่ดีเสมอมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในหลักสูตรนี้ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 นิเวตรอน.....	6
2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิเวตรอน.....	6
2.1.2 พลังงานของนิเวตรอน.....	7
2.1.3 ปฏิกิริยาผลิคนิเวตรอน.....	7
2.1.4 ต้นกำเนิดนิเวตรอน.....	9
2.1.5 อันตรกิริยาของนิเวตรอนกับตัวกลาง.....	11
2.1.6 ภาควัดขวางของนิเวตรอน.....	14
2.2 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิเวตรอน.....	15
2.2.1 เทคนิคนิเวตรอนแอกติเวชัน.....	15
2.2.2 เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา.....	18
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26

บทที่

4. ผลการวิจัยและวิธีวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	35
4.1 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน.....	35
4.2 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางหัววัดรังสีแกมมา แบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง.....	37
4.3 ผลการศึกษาขนาดภาชนะบรรจุตัวอย่างและปริมาณของตัวอย่าง.....	38
4.4 ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง.....	40
4.5 ผลการศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง.....	41
4.6 ผลการทดสอบระบบวิเคราะห์ธาตุโบรอนในตัวอย่างดิน.....	42
4.7 ผลการทดสอบสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV กับปริมาณของโบรอนในดินที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน.....	42
4.8 ทดสอบหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดิน.....	47
4.9 ผลการทดลองหาปริมาณธาตุโบรอนในดินจากแหล่งต่าง ๆ.....	48
4.10 การหาค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์.....	49
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด $Be(\alpha,n)$10
2.2	คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด $Be(\gamma,n)$10
2.3	ตัวอย่างธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน.....17
2.4	ธาตุบางชนิดที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จาก อันตรกิริยาการจับนิวตรอน.....20
4.1	ผลการศึกษาผลของระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับ ปลายท่อนำลำนิวตรอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ.....35
4.2	ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางหัววัดรังสี ณ ตำแหน่งต่าง ๆ.....37
4.3	ผลการศึกษาขนาดภาชนะสำหรับบรรจุตัวอย่างและปริมาณของตัวอย่าง.....38
4.4	ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง.....40
4.5	ผลการศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง.....41
4.6	ผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของ โบรอน ที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.4.3.....38
4.7	เปรียบเทียบปริมาณ โบรอน เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา กับปริมาณของ โบรอน.....43
4.8	ผลการเปรียบเทียบปริมาณ โบรอน ในตัวอย่างดินที่เตรียมขึ้น กับวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา.....47
4.9	ผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของ โบรอน ในตัวอย่างดินจากแหล่งต่าง ๆ48

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการเกิดรังสีฟอตอนต์แกมมา.....	18
2.2 แผนภาพการสลายตัวให้รังสีแกมมา.....	19
3.1 อุปกรณ์วัดรังสีแกมมา.....	24
3.2 ภาพสำหรับใส่ตัวอย่างทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม.....	25
3.3 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบอาบรังสีนิวตรอน.....	25
3.4 แสดงแผนผังการจัดระบบวัดรังสีฟอตอนต์แกมมา.....	27
3.5 ระบบอาบรังสีนิวตรอนในระยะเริ่มศึกษา.....	28
3.6 แผนภาพแสดงตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ทำการวิจัย.....	29
3.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา HPGe	30
3.8 แผนภาพแสดงระบบอาบรังสีนิวตรอนกับขนาดของดินทดสอบ.....	31
3.9 แผนภาพแสดงระบบอาบรังสีนิวตรอนสำหรับศึกษาผลของความชื้น และผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง.....	32
3.10 แผนภาพแสดงระบบอาบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีแกมมา ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับระยะห่างระหว่าง ปลายท่อลำนิวตรอนกับต้นกำเนิดนิวตรอน.....	36
4.2 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนต์แกมมาที่ระยะห่างระหว่างปลายท่อลำนิวตรอน กับต้นกำเนิดนิวตรอน.....	36
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา.....	37
4.4 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนต์แกมมาที่ตำแหน่งของหัววัดรังสีที่ระยะต่าง ๆ.....	38
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับความหนาแน่นของตัวอย่างดิน.....	39
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับปริมาณของตัวอย่างดิน.....	39
4.7 สเปกตรัมของรังสีฟอตอนต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผ่านการบด และไม่ผ่านการบด.....	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผ่านการอบ และไม่ผ่านการอบ.....	41
4.9 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดิน ที่ผสมโบรอนประมาณ 200 ppm โดยน้ำหนัก.....	42
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ เวลา 4000 วินาที.....	43
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ เวลา 4000 วินาที.....	45
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ เวลา 4000 วินาที ที่ทำการปรับแก้ค่าแล้ว.....	45
4.13 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดิน ที่ผสมโบรอนประมาณ 50 ppm โดยน้ำหนัก.....	46
4.14 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm โดยน้ำหนัก.....	46
4.15 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดิน ที่ผสมโบรอนประมาณ 20 ppm โดยน้ำหนัก.....	47
4.16 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดิน ที่ผสมโบรอนประมาณ 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก.....	48
4.17 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินจากพื้นที่ต่าง ๆ.....	49
ก1 แสดงลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา^{(1),(2)}

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และส่งออกผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าว ยางพารา และผลไม้ ซึ่งเป็นสินค้าออกที่สำคัญของประเทศและปัจจุบันมีการแข่งขันสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่เกษตรกรต้องให้ความสำคัญต่อคุณภาพ และปริมาณของผลผลิต ซึ่งคุณภาพและปริมาณของผลผลิตจะดีหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน อาทิเช่น สภาพแวดล้อม และธาตุอาหารพืชในดิน ซึ่งชนิดและปริมาณธาตุอาหารในดินก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่พืชต้องได้รับเพื่อการเจริญเติบโต และเพื่อการผลิตดอกออกผล ซึ่งถ้าพืชได้รับธาตุอาหารที่จำเป็นครบถ้วนในปริมาณและสัดส่วนที่พอเหมาะก็จะทำให้พืชเจริญเติบโต และผลิตดอกออกผลได้ดี แต่ถ้าในทางกลับกันหากพืชขาดธาตุอาหารชนิดใดชนิดหนึ่งหรือแม้แต่มีธาตุอาหารครบทุกธาตุแต่ไม่ได้สัดส่วนกันแล้ว ก็จะทำให้พืชแสดงอาการผิดปกติได้ เช่น การเจริญเติบโตของพืชชะงักงันหรือผลผลิตลดต่ำลง เป็นต้น ซึ่งถ้าปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้นกับพื้นที่การเกษตรแล้ว ก็จะส่งผลกระทบต่อภาวะการส่งออกของประเทศก็เป็นได้

โบรอนเป็นธาตุกึ่งโลหะที่อยู่ในดินทั่ว ๆ ไปในรูปของกรดบอริก และมีอยู่ในดินในช่วงปริมาณเป็นร้อยละประมาณ 0.0005 - 0.015 หรือ 5 - 150 ส่วนในล้านส่วน (parts per million, ppm) โบรอนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นและสำคัญสำหรับพืชหลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล สตรอเบอรี่ ลูกพีช ลูกแพร์ แครอท ปาล์ม กะหล่ำปลี แตงกวา มะเขือเทศ ข้าว ข้าวโพด และกุหลาบ เป็นต้น ปริมาณของธาตุโบรอนที่เหมาะสมแก่ความต้องการของพืชนั้นอยู่ในระดับประมาณส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก แต่หากพืชได้รับปริมาณโบรอนไม่เพียงพอแล้วก็จะส่งผลกระทบต่อพืช เช่น ระบบรากและใบเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ความสามารถในการออกดอก ให้เมล็ด ให้ผล ลดน้อยลง และมีโอกาสในการกลายพันธุ์สูง และหากพืชได้รับปริมาณโบรอนมากเกินไป ก็จะกลายเป็นสารพิษที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งมีการศึกษาและพบว่าปริมาณโบรอนเกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลกระทบต่อผลของพืชประเภท แอปเปิ้ล มะนาว และผลไม้เปลือกแข็ง เช่น แก้ว และถ้าหากปริมาณเกิน 4 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อกระบวนการเจริญเติบโตของพืชทั้งปวง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษา ค้นคว้า และวิจัย เพื่อหาวิธีการต่าง ๆ ที่สะดวก รวดเร็ว และเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของโบรอนในดิน ถ้าหากพบว่าปริมาณของโบรอนในดินเป็นอันตรายต่อพืชแล้วก็จะได้หาทางแก้ไขหรือป้องกันได้ทัน่วงที

การวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนโดยทั่วไปกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีวิเคราะห์ทางเคมี เช่น flame atomic spectrometric method, colorimetric method, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry และ ion chromatography เป็นต้น ซึ่งวิธีทางเคมีเหล่านี้จะเป็นแบบที่ต้องมีการทำลายตัวอย่าง มีปัญหายุ่งยากในกระบวนการวิเคราะห์ ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน และที่สำคัญคือมีความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณโบรอนต่ำ ๆ ก่อนข้างสูง สำหรับวิธีวิเคราะห์ทางนิวเคลียร์ ได้แก่ เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาที่ระดับพลังงาน 478 keV และเทคนิคการนับรอยอนุภาคแอลฟา (alpha track) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างโบรอนกับนิวตรอนแล้วเกิดปฏิกิริยา $^{10}_5B(n,\alpha)^7_3Li$ และได้ผลผลิตของปฏิกิริยา คือ อนุภาคแอลฟา และไอโซโทปของ 7_3Li วิ่งในทิศทางตรงกันข้ามกันด้วยความเร็วสูง ประกอบกับมีการสลายตัวของชั้นพลังงานต้นตัวอย่างรวดเร็ว คือ 73×10^{-15} วินาที และปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาพลังงานประมาณ 478 keV ออกมา สำหรับเทคนิคการนับรอยของอนุภาคแอลฟานั้นเป็นการวิเคราะห์ที่ความถูกต้องและความแม่นยำในการวิเคราะห์นั้นขึ้นอยู่กับการนับรอยอนุภาคแอลฟาซึ่งเป็นการชำนานของแต่ละบุคคล

ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมาขณะอาบรังสีนิวตรอน จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโบรอนในดิน เนื่องจากเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive method) สามารถเตรียมตัวอย่างได้ง่าย ใช้กับตัวอย่างปริมาณมาก ๆ ได้ ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว และที่สำคัญคือเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมานี้ยังเป็นเทคนิคที่สามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ในตัวอย่างได้ดีอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน สำหรับการหาปริมาณธาตุโบรอนในดิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

3.1.1 ออกแบบและจัดระบบสำหรับการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV จากปฏิกิริยา $^{10}_5B(n,\alpha)^7_3Li$ โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

3.1.2 หาขีดจำกัดในการวัดปริมาณธาตุโบรอนในดิน

3.1.3 วิเคราะห์ธาตุโบรอนในดินจากแหล่งต่าง ๆ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบการจัดระบบวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง แบบเคลื่อนย้ายได้
- 1.4.3 ทดลองวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอนในดิน โดยเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน
- 1.4.4 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV กับความเข้มข้นของโบรอนในดิน และขีดจำกัดในการวิเคราะห์
- 1.4.5 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุโบรอนในดินจากแหล่งอื่น ๆ
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

- 1.5.1 ได้เทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโบรอนในดินที่สะดวกและรวดเร็ว เพื่อที่จะนำวิธีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์โบรอนในดินที่น่าสนใจอื่น ๆ
- 1.5.2 ได้วิธีเปรียบเทียบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนในดิน ณ พื้นที่

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 พรรณี เสถียรศรี^[3] (1999) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน โดยได้ทดลองวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของธาตุบางชนิดในดิน ณ พื้นที่ โดยใช้เทคนิคที่มีสามเทคนิค คือ เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน และจากผลการวิจัยพบว่ามีจำนวน 8 ธาตุ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน คือ ไฮโดรเจน โบรอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม ไททานียม และเหล็ก และมีจำนวน 5 ธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน คือ ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน โปแตสเซียม และเหล็ก ส่วนเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ โซเดียม อะลูมิเนียม คลอรีน และแมงกานีส ส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ณ พื้นที่ วิเคราะห์ได้จำนวน 5 ธาตุ ได้แก่ ซิลิกอน ไททานียม อะลูมิเนียม และแมงกานีส โดยใช้ผลการวิเคราะห์ดินโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันในห้องปฏิบัติการมาตรฐานกราฟเปรียบเทียบและใช้ฟิคแกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของอินเดียมในหัววัดรังสีในการปรับแก้ความเข้มรังสีแกมมาของธาตุต่าง ๆ

1.6.2 ปานทิพย์ อัมพรรัตน์^[4] (1996) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบหมุนวน (cyclic NAA) โดยการวิเคราะห์ซิลิกอนและเหล็กใช้เทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนโดยใช้ ²⁴¹Am/Be ความแรง 90 มิลลิวูรี่ เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนเร็ว การวิเคราะห์อะลูมิเนียมใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบหมุนวน ส่วนเทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนใช้ในการวิเคราะห์แคลเซียมและเหล็ก และสำหรับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันและเทคนิคการวัดรังสีฟอรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนได้ใช้เทอร์มัลนิวตรอนที่ได้จาก ²³⁸Pu/Be ความแรง 5 คูรี ที่มีน้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอน การวัดรังสีแกมมาในการวิจัยนี้ใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว X 5 นิ้ว พบว่า ซีดจำกัดในการวิเคราะห์อะลูมิเนียมซิลิกอน แคลเซียม และเหล็ก มีค่าประมาณ 1, 10, 20 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ด้วยเทคนิคนิวตรอนมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ แต่ยังคงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเทคนิคนิวตรอนบางส่วนก่อนการนำไปใช้งานจริงในการวิเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์ผง

1.6.3 Yonezawa, C., Haji Wood, A. K., Hoshi, M., Ito, Y., and Tachikawa, E.^[5] (1995) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์รังสีฟอรอมต์แกมมาของธาตุโบรอนด้วยลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ในตัวอย่างหิน ฟิช ถ่านหิน ถ้ำถ่านหิน ตะกอนต่าง ๆ จากสิ่งแวดล้อมและวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยขนาด 20 MW (Japan Research Reactor No.3, JAERI) เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ซึ่งฟลักซ์นิวตรอนที่ตำแหน่ง วางตัวอย่างประมาณ 2.4×10^7 neutrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ และวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาซึ่งประกอบด้วยหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง และหัววัดบิสมัทเจอร์มาเนียม (BGO) พบว่าขีดจำกัดในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ต่ำสุด ในระดับนาโนกรัมถึงไมโครกรัมต่อกรัมของโบรอน และมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า 20% ซึ่งขีดจำกัดในการวิเคราะห์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง คือประมาณ 12-22 นาโนกรัมต่อกรัมในตัวอย่างที่มีองค์ประกอบพวกคาร์บอนและเบอร์ลิเลียม 120-260 นาโนกรัมต่อ-กรัม สำหรับตัวอย่างสิ่งแวดล้อมทางทะเลและถ้ำถ่านหิน และประมาณ 57-98 นาโนกรัมต่อกรัมสำหรับตัวอย่างอื่นๆ อีกทั้งยังได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องในการหาปริมาณโบรอนในตัวอย่าง ได้แก่ขนาดของตัวอย่าง ปริมาณของไฮโดรเจนในตัวอย่าง และการรบกวนต่าง ๆ เนื่องจากธาตุอื่น ๆ ในตัวอย่างด้วย

1.6.4 Abdel, A.S., Zohny, E.E.M., and Zaghloul, R.A.^[6] (1994) ได้ศึกษาเรื่อง การใช้เทคนิคการลดทอนนิวตรอนในการหาปริมาณโบรอนในวัสดุที่มีส่วนผสมของโบรอน โดยใช้นิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) และใช้หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) และหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) วางระบบแบบแอนติโคอเรนชันในการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 411.8 keV ที่เกิดจากแผ่นทองคำที่ใช้เป็นตำแหน่งวางตัวอย่าง ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทองคำ เพื่อหาสัดส่วนของฟลักซ์นิวตรอนก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนจากตัวอย่าง ทำให้สามารถคำนวณหาการลดทอนของนิวตรอนที่เกิดขึ้น ได้ทดลองวิเคราะห์ตัวอย่างแก้วมาตรฐานที่ผสมโบรอนในปริมาณที่แตกต่างกัน 11 ตัวอย่าง ในช่วงระหว่าง 0.1-0.3 % เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนนิวตรอนและปริมาณของโบรอนในตัวอย่าง พบว่าค่าการลดทอนนิวตรอนและปริมาณของโบรอนในตัวอย่างมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง และเมื่อนำตัวอย่างแก้วมาตรฐานที่ผสมโบรอนปริมาณต่ำ ๆ มาทดสอบกับระบบดังกล่าว ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าค่าการลดทอนนิวตรอนที่ปริมาณโบรอนต่ำ ๆ มีผลค่อนข้างดีมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ ทำให้เชื่อถือได้ว่าเทคนิคการลดทอนนิวตรอนนี้มีความไวดีพอสำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณโบรอนได้

1.6.5 สมพร จงคำ, วราวุธ ขจรฤทธิ์ และวันชัย ธรรมวานิช^[7] (1989) ได้ทำการศึกษาเรื่อง ผลของ ดอปเลอร์ จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ โดยใช้พาราฟินผสมโบแรกซ์นำไปอาบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ กัมมันตภาพรังสี 50 คูรี แล้วทำการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมาด้วยหัววัดรังสี High purity germanium (HPGe) พบว่ามีพีคของรังสีแกมมาพลังงาน 478 keV ที่มีความกว้างขดพีคถึง 15 keV จากปกติ 2 keV อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดผลของ ดอปเลอร์ (Doppler's effect)

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 นิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบอยู่ภายในนิวเคลียสของอะตอม ถูกค้นพบโดย James Chadwick ในปี ค.ศ. 1932 จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (α, n) เมื่อให้อนุภาคแอลฟาวิ่งชนเป้าเบริลเลียม^[8] ผลการค้นพบดังกล่าวได้ทำให้เกิดความเข้าใจลักษณะโครงสร้างของนิวเคลียสอย่างแท้จริง และต่อมาได้มีการทดลองศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยใช้นิวตรอน จนกระทั่งปัจจุบันนี้ได้นำเอาปฏิกิริยานิวเคลียร์ ที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอนมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการผลิตไอโซโทปรังสี เพื่อนำไปใช้ในโรงพยาบาล หรือในทางอุตสาหกรรมก็ใช้การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวเคลียร์เมื่อนิวตรอน เช่น นิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis, NAA) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (neutron radiography) เป็นต้น

2.1.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอนอิสระ

2.1.1.1 ประจุไฟฟ้า (charge) นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ และเหตุนี้เองที่ทำให้นิวตรอนสามารถวิ่งผ่านไปในตัวกลางได้โดยไม่เกิดคู่อิออนหรืออิออนแพร์ (ion pair) เนื่องจากไม่ถูกรบกวนด้วยแรงคูลอมบ์ (coulomb force) ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

2.1.1.2 มวล (Mass) มวลของนิวตรอนมีค่าใกล้เคียงมวลของโปรตรอน

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

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

2.1.1.3 สปินและโมเมนต์แม่เหล็ก (spin and magnetic moment) นิวตรอนมีสปินและโมเมนต์เชิงมุม $\frac{1}{2}h$ และมีโมเมนต์แม่เหล็ก -1.9135 นิวเคลียร์แมกนีตอน (nuclear magneton)

2.1.1.4 คลื่นและคุณสมบัติโพลาไรเซชัน (wave and polarization) นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นได้เช่นเดียวกับอนุภาคเบาอื่น ๆ โดยสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงให้เห็นจากปรากฏการณ์หักเหของนิวตรอน (neutron diffraction) ส่วนคุณสมบัติโพลาไรเซชันเมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กที่แรงแล้วจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้น เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุแต่มีโมเมนต์แม่เหล็ก

1.1.1.5 การสลายตัวของนิวตรอนอิสระ เมื่อระดับพลังงานในนิวเคลียสอยู่ในสถานะต้นตัวนิวตรอนก็จะสลายตัวให้ โปรตอน อิเล็กตรอน แอนตินิวตริโน (antineutrino) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานประมาณ 782 keV ดังสมการ



โดยมีครึ่งชีวิตของนิวตรอนอิสระที่ปลดปล่อยกัมมันตรังสีประมาณ 12 นาที

2.1.2 พลังงานของนิวตรอน (neutron energy)^{[9],[10]}

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งตามระดับพลังงานได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.1.2.1 นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0-1 keV แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ๆ ดังนี้

- เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพัทธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานที่พบมากที่สุดของเทอร์มัลนิวตรอน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.05-1.0 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1 – 1000 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่ามี “Resonance absorption”

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

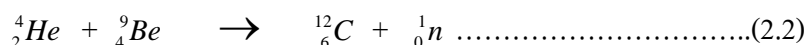
2.1.2.3 นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

2.1.3 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน

นิวตรอนที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ผลิตขึ้นมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

2.1.3.1 นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (α, n) นิวตรอนถูกผลิตขึ้นโดยการยิงอนุภาคแอลฟาไปที่เป้าซึ่งเป็นธาตุเบา และปลดปล่อยนิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา ได้แก่ เรเดียม (Ra) พลูโตเนียม (Pu) หรืออะเมริเชียม (Am) ส่วนธาตุเบา ได้แก่ ลิเทียม (Li) ฟลูออรีน (F) โบรอน (B) และเบริลเลียม (Be) ในปัจจุบันต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา

(α, n) ที่ใช้กันแพร่หลายคือที่สุดคืออะเมริเซียม/เบริลเลียม ($^{241}\text{Am}/\text{Be}$) ซึ่งจะได้นิวตรอนผลิตออกมาจากปฏิกิริยาดังนี้



2.1.3.2 นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตดิสอินทิเกรชัน (Photodisintegration Reaction) ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอน ได้แก่ ${}^9_4\text{Be} (\gamma, n){}^9_4\text{Be}$ และ ${}^2_1\text{H} (\gamma, n){}^2_1\text{H}$ พลังงานเทอร์ชโฮลด์ (threshold energy) ของปฏิกิริยาทั้งสอง คือ 1.67 MeV และ 2.23 MeV ตามลำดับ ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่สำคัญได้แก่ ${}^{124}\text{Sb}-\text{Be}$ นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้เป็นนิวตรอนพลังงานต่ำและช่วงพลังงานแคบกว่านิวตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยา (α, n)

2.1.3.3 นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัว (fusion reaction) ของนิวเคลียสของธาตุเบา โดยการเร่งอนุภาคที่มีประจุเข้าไปชนเป้าซึ่งเป็นธาตุเบา เช่น ไฮโดรเจน สำหรับปฏิกิริยานี้ในธรรมชาติเกิดขึ้นในดวงอาทิตย์ และนักวิทยาศาสตร์ได้ประดิษฐ์เครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) จากปฏิกิริยานี้ในการผลิตนิวตรอน เช่น ปฏิกิริยา ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$

2.1.3.4 นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา stripping (Stripping Reaction) ผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ (หลายร้อย MeV) จากการ stripping นิวตรอน (${}^2_1\text{H}$) โดยที่ภายในอนุภาคนิวตรอนหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยนิวตรอนและโปรตอนอย่างละตัว ซึ่งยึดกันอยู่ด้วยพลังงานประมาณ 2.2 MeV ถ้านิวตรอนถูกทำให้มีพลังงานสูงมาก ๆ และวิ่งเข้าชนเป้านิวตรอนจะแตกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนมีพลังงานเท่ากับครึ่งหนึ่งของนิวตรอน โดยนิวตรอนจะมีทิศทางไปข้างหน้า ส่วนโปรตอนก็จะถูกจับโดยนิวเคลียสของเป้า

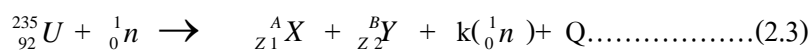
2.1.3.5 นิวตรอนที่เกิดจากโปรตอนพลังงานสูง (High energy proton) ผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ โดยให้โปรตอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ วิ่งเข้าชนนิวเคลียสของเป้า นิวตรอนซึ่งมีพลังงานไม่สูงนักจะรับพลังงานจากโปรตอนเกือบทั้งหมด โดยวิธีนี้อาจได้นิวตรอนพลังงานสูงถึง 2 – 3 MeV

2.1.3.6 นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction) เป็นนิวตรอนที่เกิดจากนิวเคลียสของธาตุที่สามารถเกิดฟิชชันได้ (fissionable nucleus) เช่น ยูเรเนียม-235 จับนิวตรอนหนึ่งตัวจากนั้นนิวเคลียสแตกเป็น 2 ส่วน พร้อมกับให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว นิวตรอนที่ถูกผลิตออกมานี้ ก็จะทำให้เกิดฟิชชันต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จึงทำให้ได้นิวตรอนพลักซ์สูงกว่าปฏิกิริยาอื่น ๆ สำหรับพลังงานของนิวตรอนที่ได้มีค่าตั้งแต่เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ถึง 18 MeV และมีค่าพลังงานโดยเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 2 MeV ธาตุกัมมันตรังสีบางชนิด เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (${}^{252}\text{Cf}$) สามารถแตกตัวได้เอง (self fission) ในการแตกตัวเองแต่ละครั้งจะให้นิวตรอนออกมาประมาณ 2-3 ตัว

1.2.4 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)^{[11],[12]}

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ในการผลิตนิวตรอนทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.2.4.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของธาตุยูเรเนียม($^{235}_{92}U$) ดังปฏิกิริยา



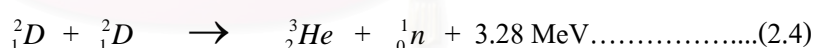
$$\text{เมื่อ } A + B + k = 236$$

$$Z_1 + Z_2 = 92$$

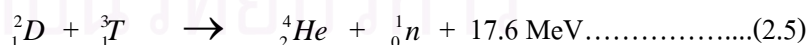
ซึ่งค่าเฉลี่ยของการเกิดอนุภาคนิวตรอนต่อฟิชชันเท่ากับ 2.5 ($k = 2.5$) และมีระดับพลังงานต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1-10 MeV ซึ่งเป็นนิวตรอนเร็ว และมีระดับพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 MeV ข้อดีของการผลิตนิวตรอนโดยวิธีนี้ คือ สามารถผลิตทั้งนิวตรอนพลังงานต่ำและพลังงานสูงได้ในปริมาณฟลักซ์ที่สูงประมาณ 10^{14} n/cm²-sec ซึ่งสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนอื่น ๆ

1.2.4.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) เป็นเครื่องผลิตอนุภาคนิวตรอนพลังงานสูงจากการเร่งอนุภาคที่มีประจุ เช่น ดิวเทรียม หรือ โปรตอน ให้มีพลังงานสูงขึ้นและวิ่งเข้าชนเป้าซึ่งมักจะเป็นธาตุเบา โดยเครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) เช่น Linear accelerator Cyclotron เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และได้อนุภาคนิวตรอนออกมาปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากคือ

ปฏิกิริยา DD (DD reaction)



ปฏิกิริยา DT (DT reaction)



นิวตรอนที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาข้างต้นจะมีพลังงานประมาณ 2.46 และ 14.08 MeV ตามลำดับ และสามารถให้ความเข้มข้นนิวตรอน ออกมาในช่วงประมาณ $10^8 - 10^{12}$ n cm⁻²s⁻¹

1.2.4.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- ไอโซโทปที่ได้จากอันตรกิริยา (α, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการผสมธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น ^{241}Am , ^{238}Pu , และ ^{210}Po กับธาตุบางชนิดที่มีพลังยึดเหนี่ยวอนุภาคนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำหรือธาตุเบา เช่น ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ และ ${}^2\text{D}$ (deuterium) ทำให้

เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (α, n) โดยทั่วไปนิยมใช้ ${}^9\text{Be}$ เนื่องจากเป็นธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำคือประมาณ 1.67 MeV และให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดประมาณ 80 ตัวต่อการชนของอนุภาคแอลฟาจำนวนหนึ่งล้านตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และความเข้มข้นนิวตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 10^5 - 10^7 n s⁻¹Ci⁻¹ คุณสมบัติของไอโซโทปที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิด Be(α, n)^[13]

นิวไคลด์	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของอนุภาคแอลฟา (MeV)	พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอน(MeV)	ความเข้มข้นของนิวตรอน(n s ⁻¹ Ci ⁻¹)
²³⁸ Pu	89 ปี	5.50	4.00	2.8x10 ⁶
²³⁹ Pu	24100 ปี	5.14	4.59	1.6x10 ⁶
²¹⁰ Po	138 วัน	5.30	4.54	2.5x10 ⁶
²⁴¹ Am	458 วัน	5.48	4.46	2.2x10 ⁶
²⁴⁴ Cm	18.1 ปี	5.79	4.31	3.0x10 ⁶
²⁴² Cm	163 วัน	6.10	4.16	4.0x10 ⁴
²²⁶ Ra	1620 ปี	7.69	3.94	1.1x10 ⁷
²²⁷ Ac	22 ปี	7.36	3.87	1.5x10 ⁷

- ไอโซโทปที่ได้จากอันตรกิริยา (γ, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการผสมธาตุกัมมันตรังสีซึ่งสลายตัวให้โฟตอน หรือรังสีแกมมาเช่น ¹²⁴Sb และ ⁸⁸Y กับธาตุเบาที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำ เช่น ⁹Be ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (γ, n) เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของ ⁹Be นิวตรอนจะหลุดออกมา แต่นิวตรอนที่ได้จะมีพลังงานต่ำ และมีความเข้มข้นนิวตรอนประมาณ 10^5 n s⁻¹Ci⁻¹ คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด Be(γ, n)^[13]

ต้นกำเนิด	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มข้นนิวตรอน (n s ⁻¹ Ci ⁻¹)
⁸⁸ Y- ⁹ Be	103.6 วัน	0.16	1.0 x10 ⁵
¹²⁴ Sb- ⁹ Be	60.2 วัน	0.024	3.0 x10 ⁶

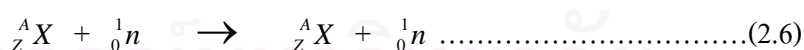
ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันนัก เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน

- ไอโซโทปรังสีชนิดมีการแตกตัวของนิวเคลียส (Spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสี ได้แก่ แคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เองพร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 3 ตัวต่อการแตกตัว 1 ครั้ง โดยนิวตรอนมีพลังงานเฉลี่ย 2.14 MeV มีความเข้มข้นนิวตรอนประมาณ $2.3 \times 10^{12} \text{ n s}^{-1} \text{ g}^{-1}$ ซึ่งอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจาก ^{252}Cf สูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) ประมาณ $4.3 \times 10^9 \text{ n s}^{-1} \text{ Ci}^{-1}$ ของ ^{252}Cf หรือประมาณ $2.3 \times 10^6 \text{ n s}^{-1} \mu\text{g}^{-1}$ ของ ^{252}Cf

1.2.5 อันตรกิริยาของนิวตรอน (Neutron interaction) ^[14]

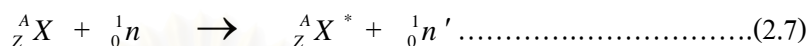
เมื่อนิวตรอนชนกับอนุภาคตัวกลางหรือนิวเคลียสอื่น ๆ ย่อมจะเกิดการกระเจิงหรือเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ได้หลายแบบ โดยขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของตัวกลางนั้น อันตรกิริยาที่สำคัญของนิวตรอนกับตัวกลางมีดังต่อไปนี้

1.2.5.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วพลังงานของนิวตรอนจะลดลง ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนจะรับพลังงานไปโดยที่นิวเคลียสนั้นยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (Ground state) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมาโดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป พลังงานและโมเมนตัมรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังการชนมีค่าเท่ากัน การชนแบบยืดหยุ่นนี้บางทีเรียกว่า “Potential scattering” ใช้สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาเป็น (n,n) สำหรับอันตรกิริยาการกระเจิงของนิวตรอนนี้เมื่อเกิดกับอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคของนิวตรอน เช่น โปรตอน และดิวเทรียม นิวตรอนจะเสียพลังงานมาก ทำให้พลังงานลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการชนแบบยืดหยุ่นนี้จึงมีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าสมการของปฏิกิริยาคือ

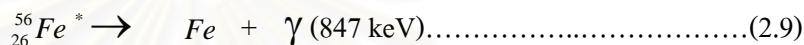
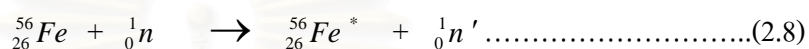


1.2.5.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วนิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (Compound nucleus) มีการถ่ายเทพลังงานให้นิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะตื่นตัว (Excited state) และจะมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปลดปล่อยออกมา เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติก็จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา อันตรกิริยาแบบนี้พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์

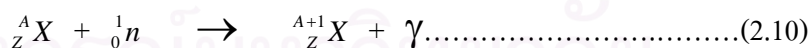
ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยืดหยุ่นนี้ถือว่าเป็นแบบเทอร์ชโฮลด์ (threshold reaction) คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสถานะตื่นตัวได้ อันตรกิริยาแบบนี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นอันตรกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic interaction) นิยมใช้สัญลักษณ์ย่อของอันตรกิริยาเป็น (n,n) หรือ (n,n' γ) อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน สมการของการเกิดปฏิกิริยา คือ



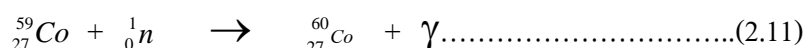
ตัวอย่างเช่น



1.2.5.3 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture) หรือเรียกว่า เรดิเอทีฟแคปเจอร์ (Radiative capture) หรือ ปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง นิวตรอนจะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมา (captured gamma-rays หรือ neutron captured gamma-rays) เป็นอันตรกิริยาแบบปลดปล่อยพลังงาน (Exothermic interaction) เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิมรวมกับของนิวตรอนอิสระเสมอ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มวลของนิวเคลียสเดิมรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ นิยมใช้สัญลักษณ์ย่อของอันตรกิริยาเป็น (n, γ) อันตรกิริยาแบบนี้เป็นอันตรกิริยาหลักที่ใช้ในการผลิตไอโซโทปรังสี การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis, NAA) และการวิเคราะห์ธาตุแบบการวัดรังสีพร้อมตัวแกมมา (prompt gamma-ray neutron activation analysis, PGNA) สมการของปฏิกิริยา คือ



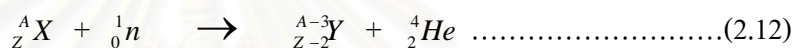
ตัวอย่างเช่น



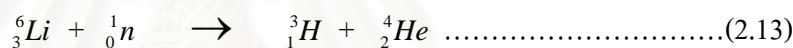
1.2.5.4 ปฏิกิริยาฟิชชันหรือปฏิกิริยาแตกตัว (Fission reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เกิดเป็นนิวเคลียสรวม (Compound nucleus) แล้ว นิวเคลียสรวมจะแบ่งตัวออกเป็น 2 ส่วนแตกออกมาได้

นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัว หลุดออกมาด้วย ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาหลักสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ประโยชน์อยู่ในปัจจุบัน อันตรกิริยานี้มักใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f)

1.2.5.5 อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังจากเกิดนิวเคลียสรวม (Compound nucleus) แล้วจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน อันตรกิริยาแบบนี้มีทั้งปลดปล่อยพลังงานและดูดกลืนพลังงาน แต่ที่ประเภทที่เป็นแบบปลดปล่อยพลังงานนั้นมีน้อย ได้แก่ อันตรกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ และ อันตรกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ อันตรกิริยาทั้งสองนี้มีความสำคัญมากในเรื่อง การวัดนิวตรอนและการกำบังนิวตรอน อันตรกิริยานี้มักใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, α) และ (n,p) สมการของอันตรกิริยา (n, α) คือ



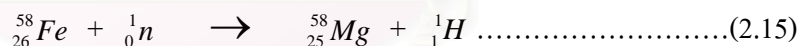
ตัวอย่างเช่น



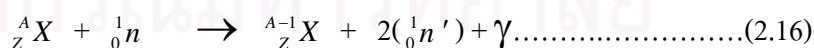
สมการของอันตรกิริยา (n,p) คือ



ตัวอย่างเช่น



1.2.5.6 อันตรกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นแบบดูดกลืนพลังงาน ผลของอันตรกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,2n) หรือ (n,3n) สมการของอันตรกิริยา คือ



เมื่อ ${}_Z^A X$: ไอโซโทปกัมมันตรังสีเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A

${}_0^1 n$: อนุภาคนิวตรอน

${}_Z^A X^*$, ${}_Z^{A+1} X$, ${}_Z^{A-1} X$, ${}_{Z-1}^A Y$, ${}_{Z-2}^{A-3} Y$: ไอโซโทปกัมมันตรังสี ของธาตุเดิม X และธาตุใหม่ Y

${}_1^1 H$, ${}_2^4 He$ และ γ : อนุภาคโปรตอน อนุภาคแอลฟา และรังสีแกมมา ตามลำดับ

1.2.6 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

นิวตรอนเมื่อวิ่งเข้ามาเพื่อทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง สามารถมีโอกาส (Probability) ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 6 แบบข้างต้นได้มากน้อยเพียงใดขึ้นกับชนิดของนิวเคลียสของตัวกลางนั้น และพลังงานของนิวตรอนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถอธิบายในเชิงปริมาณได้ในเทอมของ ภาคตัดขวาง (cross section) แบ่งออกได้ 2 ประเภทดังนี้

1.2.6.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section : σ_i) เป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ ต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

$$\sigma_i = \sigma_s + \sigma_a \dots \dots \dots (2.17)$$

โดยที่ σ_s คือภาคตัดขวางของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

$$\sigma_s = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} \dots \dots \dots (2.18)$$

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

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

σ_a คือภาคตัดขวางของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

$$\sigma_a = \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} \dots \dots \dots (2.19)$$

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

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

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

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

1.2.6.2 ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section : Σ) หมายถึงโอกาสที่นิวตรอนจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางต่อระยะทาง มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) นิยมใช้เมื่อตัวกลางมีความหนา สามารถคำนวณได้จากผลคูณของจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางต่อลูกบาศก์เซนติเมตรกับค่าภาคตัดขวางจุลภาค นั่นคือ

$$\Sigma = N\sigma \dots \dots \dots (2.20)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทปในหน่วย atom/cm^3

σ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของอะตอมของไอโซโทปในหน่วย barn (b)

ค่า Σ เป็นเฉพาะสำหรับแต่ละไอโซโทป สำหรับธาตุและวัสดุ ค่า Σ ขึ้นอยู่กับไอโซโทปต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นธาตุหรือวัสดุเหล่านั้น ส่วนค่า σ เป็นค่าเฉพาะของแต่ละไอโซโทป

ซึ่งเป็นภาคตัดขวางประสิทธิผล (Effective cross section) ของนิวเคลียส ในการเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอน (ไม่ใช่ภาคตัดขวางที่แท้จริงของนิวเคลียส) ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับนิวไคลด์หนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาด้วย ภาคตัดขวางของการดูดกลืนสำหรับนิวตรอนจะแปรผกผันกับความเร็ว ($\sigma \propto \frac{1}{v}$) เมื่อ v คือความเร็วของนิวตรอน

2.2 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยนิวตรอน

2.2.1 เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Technique)^[15]

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เป็นการวิเคราะห์ธาตุโดยการนำตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ไปอบรังสีนิวตรอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ค่าครึ่งชีวิต (half life) ชนิดของรังสีและพลังงานต่าง ๆ ที่ปลดปล่อยออกมา จากคุณสมบัติเฉพาะตัวนี้ จะทำให้ทราบได้ว่าเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุใด สำหรับอัตราการเกิดกัมมันตรังสีนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron cross section) ของธาตุที่นำเข้าไปอบรังสี จำนวนอะตอมของธาตุที่นำเข้าไปอบรังสี รวมทั้งสัดส่วนของธาตุนั้นๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ (isotopic abundance) และเมื่อวัดปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นหลังการอบรังสีนิวตรอนแล้ว และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานของธาตุนั้น ๆ ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้

เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันเป็นการวิเคราะห์หลังจากที่ทำการอบรังสีนิวตรอนแล้ว การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$R = N_0 \phi \sigma \dots \dots \dots (2.21)$$

$$= \left(\frac{WfN_A}{M} \right) \phi \sigma \dots \dots \dots (2.22)$$

- โดยที่ R : อัตราการเกิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
 N_0 : จำนวนอะตอมทั้งหมดของนิวไคลด์เดิมก่อนเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี
 ϕ : ความเข้มข้นนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์ หน่วย $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 σ : ภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนของนิวไคลด์นั้น หน่วย บาร์น
 W : น้ำหนักของธาตุที่ทำการอบรังสี
 f : % abundance ของนิวไคลด์นั้น
 N_A : Avogadro's number = 6.022×10^{23} โมเลกุลต่อกรัมต่อโมล
 M : มวลอะตอมของธาตุที่ทำการอบรังสี

ส่วนอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ เวลา t จะเป็นไปตามสมการ

$$D_t = \lambda N_t \dots \dots \dots (2.23)$$

โดยที่ λ : ค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (decay constant)

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

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

N_t : จำนวนอะตอมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ณ เวลา t

t : ช่วงเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

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

$$\left(\frac{dN_t}{dt}\right) = N_0 \phi \sigma - \lambda N \dots \dots \dots (2.24)$$

จากการอินทิเกรตจะได้

$$\lambda N_t = N_0 \phi \sigma [1 - e^{-\lambda t}] \dots \dots \dots (2.25)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.25 ค่า λN_t นั้นคือค่าอัตราการสลายตัว หรือ ค่าความแรงรังสี ณ เวลา t (A_t) ดังนั้นความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A_t = N_0 \phi \sigma [1 - e^{-\lambda t}] \dots \dots \dots (2.26)$$

แต่ถ้าทั้งนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้หลังจากการอาบรังสีแล้วเป็นเวลา t_d ความแรงรังสีจะมีค่าลดลงดังสมการ

$$A_t = N_0 \phi \sigma [1 - e^{-\lambda t}] [e^{-\lambda t_d}] \dots \dots \dots (2.27)$$

ความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างได้ ดังสมการที่ 2.27 แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มข้นของนิวตรอนมีค่าไม่แน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงได้และภาคตัดขวางของการจับนิวตรอนก็ไม่สามารถหาได้ถูกต้อง ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้จึงนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบ จากความแรงรังสีที่วัดได้ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน โดยที่ตำแหน่งในการอาบรังสี เวลาในการอาบรังสี ช่วงระยะเวลาในการวัด และระบบวัดรังสี เดียวกันทั้งหมด ทำให้สามารถคำนวณเปรียบเทียบหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้จากความสัมพันธ์นี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีจากสารตัวอย่าง.....(2.27)}}{\text{ความแรงรังสีจากสารมาตรฐาน}}$$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างธาตุบางชนิดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน^[11]

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

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้ ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโบรอนได้ เนื่องจากธาตุโบรอนเมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอนแล้ว ไม่ได้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถทำการวัดรังสีได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา (PGNAA)

เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมานั้น ต่างกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (NAA) ตรงที่เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนั้นเป็นการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น และยังคงเหลืออยู่ภายหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน ส่วนเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาเป็นการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาขณะที่กำลังอาบรังสีนิวตรอน

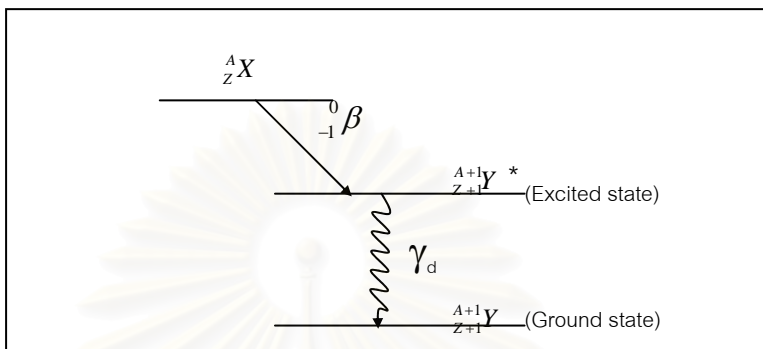
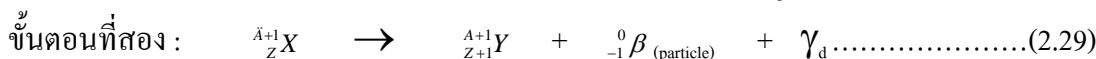
เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนนี้ เป็นการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมาในขณะที่อาบรังสี โดยอาศัยอันตรกิริยาการจับนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ กล่าวคือเมื่อนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วนิวตรอนถูกจับหรือดูดกลืนไปรวมตัวกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง จากนั้นกลายเป็นนิวเคลียสรวม (Compound nucleus) ขึ้น ซึ่งนิวเคลียสรวมนี้มักจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น จึงพยายามลดระดับพลังงานลงเพื่อกลับสู่ระดับปกติ โดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาภายในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ คือ น้อยกว่า 10^{-14} วินาที ซึ่งเราเรียกรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมานี้ว่า รังสีพรอมต์แกมมา (prompt gamma-ray) ซึ่งรังสีพรอมต์แกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้อาจมีมากกว่า 1 ตัวก็ได้ ส่วนนิวเคลียสผลผลิต (product nucleus) ที่ได้จากปฏิกิริยานี้อาจจะเป็นไอโซโทปเสถียรหรือไอโซโทปรังสีก็ได้ และสำหรับขั้นตอนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการเกิดรังสีพรอมต์แกมมา

โดยส่วนมากแล้วปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) มักเกิดขึ้นได้ดีกับนิวตรอนพลังงานต่ำ โดยเฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน กระบวนการเกิดมี 2 ขั้นตอน ดังแสดงในสมการที่ 1.1 และสมการที่ 1.2 โดยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการวัดรังสีพรอมต์แกมมา (prompt gamma-ray Analysis : PGA) ในขณะที่อาบรังสี อาศัยขั้นตอนแรก ส่วนการวิเคราะห์โดยการวัดรังสีแกมมาที่ได้จาก

การสลายตัว (decay ray) หรือนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis : NAA) ที่วัดได้หลังการอบรังสีแล้ว อาศัยขั้นตอนที่สอง



รูปที่ 2.2 แผนภาพการสลายตัวให้รังสีดีเลย์แกมมา

ปริมาณการให้รังสีพรมต์แกมมา (Yield of prompt γ -ray) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield} = N\phi t \sigma(E_n) \dots\dots\dots(2.30)$$

โดยที่ Yield : จำนวนรังสีพรมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา

N : จำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์

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

t : เวลาที่ใช้ในการอบรังสี

$\sigma(E_n)$: ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาขณะที่นิวตรอนมีพลังงาน E_n

สำหรับในสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ หรือตัวอย่างที่ประกอบด้วยธาตุหลายชนิดพบว่าค่า total neutron cross section (σ_T) จะมีผลทำให้ความเข้มข้นนิวตรอนลดลง ดังนั้น จำนวนรังสีแกมมาที่ได้จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ $(1-e^{-f})$

โดยที่ $f = \sum_i N_i (\sigma_T)_i \dots\dots\dots(2.31)$

ตัวอย่างของธาตุบางชนิดที่มีความไวสูงต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ธาตุบางชนิดที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพร้อมต์แกมมา จาก อันตรกิริยาการจับนิวตรอน^[16]

Element (Natural Isotopes)	Cross- section(σ)Barn s	Atomic mass(A) a.m.u.	Energy(E_γ) (MeV)	Intensity(I) (photons/100neutr on)	Sensitivity ($I\sigma/A$)
B	752	10.811	0.478	47	3269
Cd	3620	112.40	5.824	2.31	75.0
			5.431	1.08	34.8
			3.109	1.12	36.1
			3.000	1.60	51.5
			0.559	79.71	2567
Au	99.6	196.97	6.512	1.66	0.839
			6.457	2.24	1.13
			6.319	3.47	1.75
			6.252	5.42	2.74
			6.149	1.14	0.576
			5.983	1.37	0.693
			5.710	1.31	0.662
			5.524	1.20	0.607
			5.148	1.31	0.662
			5.103	1.12	0.566
Ag	63.0	107.87	6.056	1.16	0.677
			5.739	1.04	0.607
			5.700	1.56	0.911
Cl	33.2	35.45	7.790	6.63	6.22
			7.414	8.52	7.99
			6.620	10.00	9.38
			6.111	15.78	14.8
			5.715	4.62	4.33

ตารางที่ 2.3 ต่อ

Element (Natural Isotopes)	Cross- section(σ)Ba rns	Atomic mass(A) a.m.u.	Energy(E_γ) (MeV)	Intensity(I) (photons/100neutr on)	Sensitivity ($I\sigma/A$)
Cl (ต่อ)			4.980	3.82	3.58
			3.062	3.73	3.50
Pt	9.6	195.09	6.034	1.10	0.054
			5.611	1.04	0.051
			5.307	1.16	0.057
			5.255	4.85	0.239
			5.173	1.77	0.087
I	6.6	126.904	5.198	1.81	0.094
			5.094	1.07	0.055
			4.950	1.41	0.073
Fe	2.62	55.847	9.298	3.85	0.181
			7.646	22.14	1.04
			7.632	27.19	1.27
			7.279	4.6	0.216
			6.018	8.08	0.379
			5.921	8.29	0.389
Ge	2.45	72.59	7.260	1.30	0.0439
			6.916	1.58	0.0533
			6.708	1.96	0.0662
			6.389	1.01	0.0341
			6.116	2.04	0.0688
			6.037	1.87	0.0631
			5.817	1.24	0.0418
			5.518	1.53	0.0516
			5.450	1.43	0.0483
Pb	0.170	207.19	7.368	94.77	0.0777

ธาตุโบรอนในธรรมชาติที่ประกอบด้วย 2 ไอโซโทป คือ ^{10}B และ ^{11}B ปริมาณประมาณร้อยละ 20 และ 80 ตามลำดับ นั้น ไอโซโทป ^{10}B มีความสำคัญพิเศษต่อการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีค่าภาคตัดขวาง (cross section) ของการทำปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ต่อเทอร์มัลนิวตรอนพลังงาน 0.025 eV สูงมากถึง 3836 บาร์น และจากความสามารถในการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังกล่าว จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์คุณภาพและปริมาณของธาตุโบรอนได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมานี้ เป็นการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่ระดับพลังงาน 478 keV ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างโบรอนกับนิวตรอนแล้วเกิดปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ และได้ผลผลิตของปฏิกิริยาที่อนุภาคแอลฟาและไอโซโทปของ ^7Li วิ่งในทิศทางตรงกันข้ามกันด้วยความเร็วสูง ประกอบกับการสลายตัวของชั้นพลังงานต้นตัวอย่างรวดเร็ว คือ 73×10^{-15} วินาที และปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาพลังงานประมาณ 478 keV ออกมา โดยพีคดังกล่าวที่วัดได้จะมีลักษณะพิเศษคือมีความกว้างของพีคแคบผิดปกติ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดผลของดอปเลอร์ (Doppler effect)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity germanium, HPGe) แบบเคลื่อนย้ายได้ ขนาด 4.3 เซนติเมตร X 4.15 เซนติเมตร ของ CANBERRA รุ่น GC1020 มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV เท่ากับ 10 %

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

3.1.3 ไมโครคอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าคอมพิวเตอร์ (Notebook microcomputer) สำหรับบันทึกข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่องเก็บลงในแผ่นดิสเกตต์ (diskette)

3.1.4 ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ ความแรงรังสี 500 มิลลิวูร์ หรือ 18.5 กิกะเบคเคอเรล

3.1.5 แผ่นแคดเมียม หนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับกำบังรังสีนิวตรอน ในขณะที่วัดรังสีพร้อมตัวแกมมา

3.1.6 ถังเหล็กสำหรับบรรจุน้ำเพื่อหน่วงพลังงานนิวตรอน และสำหรับกำบังรังสีนิวตรอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร และสูง 90 เซนติเมตร

3.1.7 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสองชั้นที่มีปลายปิดข้างหนึ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชั้นใน 12 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชั้นนอก 22 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร สำหรับชั้นในทำเป็นท่อส่งลำนิวตรอนหรือคอลลิเมเตอร์ (collimator) และ ชั้นนอกสำหรับบรรจุน้ำเพื่อทำหน้าที่สะท้อนนิวตรอนและบังคับลำนิวตรอนให้พุ่งขึ้นด้านบน

3.1.8 ภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่าง ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร

3.1.9 วัสดุสำหรับกำบังรังสีแกมมา ได้แก่ ตะกั่วขนาด 10 เซนติเมตร X 20 เซนติเมตร X 5 เซนติเมตร

3.1.10 กรดบอริก (Boric Acid) สำหรับเติมเพื่อเตรียมดินมาตรฐานในการหาปริมาณธาตุโบรอน

3.1.11 ตัวอย่างดินสำหรับการหาปริมาณธาตุโบรอนจาก ดินขุยไผ่ ดินหน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ดินข้างสนามฟุตบอลคณะรัฐศาสตร์ ดินจากจังหวัดสมุทรปราการ ดินจากจังหวัดระยอง และดินจากจังหวัดจันทบุรี



(ก)



(ข)

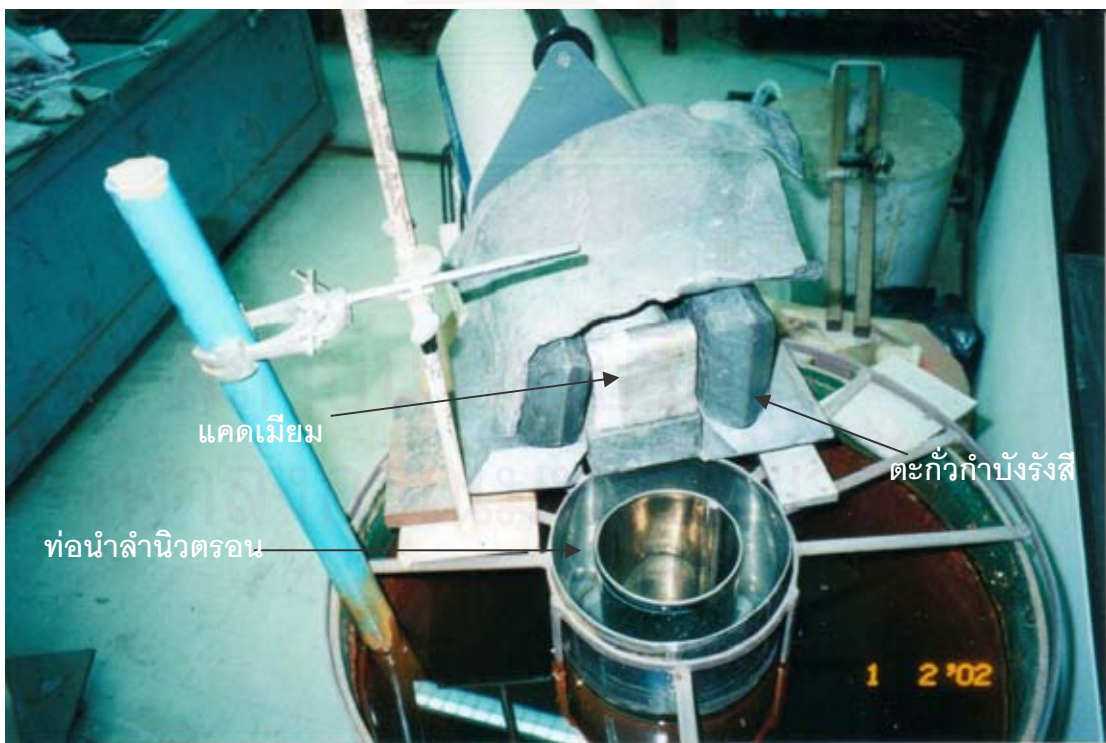
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดรังสีแกมมา

(ก) เครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่องและเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

(ข) หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ แบบเคลื่อนย้ายได้



รูปที่ 3.2 ภาพสำหรับใส่ตัวอย่างทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบต่างๆของระบบอานรังสีนิวตรอน

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการวิเคราะห์ธาตุโบรอนในดินนี้อาศัยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้มีการอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันกับการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถออกแบบและจัดระบบวัดรังสีที่เหมาะสมได้จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV ที่เกิดขึ้น วิธีการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบและการจัดระบบวิเคราะห์

ใช้ $^{241}\text{Am} / ^9\text{Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิลิวรี่ เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น

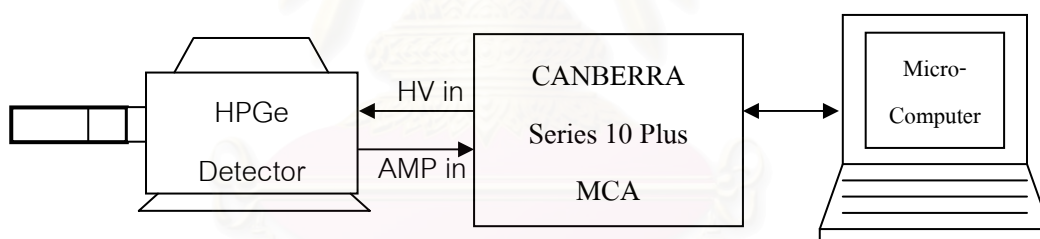
3.2.1.1 การออกแบบและจัดระบบอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบจากข้อมูลที่มีผู้วิจัยไว้ และประกอบกับหลักการทางทฤษฎีแล้วนำมาดัดแปลงให้เหมาะสมกับสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และทุนวิจัยที่ได้รับ โดยระบบอาบรังสีของเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนนี้ ใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am} / ^9\text{Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิลิวรี่ ซึ่งการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนี้ ต้องการเทอร์มัลนิวตรอนในการเกิดอันตรกิริยา แต่เนื่องด้วย ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ใช้ทำให้นิวตรอนเร็ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหน่วงพลังงานของนิวตรอนจากนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน โดยได้เลือกใช้น้ำเป็นตัวหน่วงพลังงาน เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ของระบบอาบรังสีได้ง่ายและประหยัด ระบบอาบรังสีในระยะเริ่มทำการศึกษาวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.5

ดังนั้นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am} / ^9\text{Be}$ ความแรงแรังสี 500 มิลลิลิวรี่ นี้จึงถูกบรรจุในถังเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร และสูง 90 เซนติเมตร ที่มีน้ำอยู่สูงประมาณ 80 เซนติเมตร ถังนิวตรอนที่ใช้อาบรังสีนิวตรอนแก่ตัวอย่าง ถูกส่งขึ้นมาตามท่อส่งลำนิวตรอน ซึ่งทำด้วยท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสองชั้นที่มีปลายปิดข้างหนึ่ง โดยชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร โดยชั้นในทำเป็นท่อส่งลำนิวตรอน และชั้นนอกสำหรับบรรจุน้ำเพื่อทำหน้าที่สะท้อนนิวตรอนและบังกัมป์ ลำนิวตรอนให้พุ่งขึ้นด้านบน โดยต้องเติมน้ำให้เต็ม (เนื่องจากระดับน้ำนี้ยังเป็นตัวแปรสำคัญต่อนิวตรอนฟลักซ์ด้วย เพราะถ้าระดับน้ำลดลงจะทำให้ลำนิวตรอนจากปลายด้านล่างของท่อ สูญเสียไปที่ช่องว่างระหว่างผิวน้ำกับตัวอย่างมากขึ้น ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนที่เกิดก็จะลดลง) โดยท่อส่งลำนิวตรอนปลายที่ปิดถูกจุ่มลงน้ำโดยให้ปากท่ออยู่เหนือน้ำ 10 เซนติเมตรเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าภายในท่อ ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ที่นอกปลายด้านล่างของท่อส่งลำนิวตรอน และได้

เว้นระยะระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อส่งลำนิวตรอนด้วย ระยะห่างนี้เป็นระยะที่ทำให้ฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนสูงสุด นิวตรอนที่ถูกห้วงพลังงานแล้วจะเข้าสู่ท่อส่งลำนิวตรอน ซึ่งภายในท่อมีอากาศอยู่ บังคับให้ลำนิวตรอนพุ่งขึ้นสู่ปลายด้านเปิดของท่อและสัมผัสกับตัวอย่างซึ่งวางอยู่ปลายท่อ ซึ่งตัวการที่บังคับให้ลำนิวตรอนพุ่งขึ้นด้านบนคือน้ำที่ล้อมรอบท่อ เพราะน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนได้ดี โดยไม่สูญเสียนิวตรอนออกไปทางด้านข้างของท่อมากนัก ดังนั้นนิวตรอนจึงวิ่งเป็นลำไปในอากาศขึ้นสู่ปากท่อ เพื่ออาบตัวอย่างดินมากขึ้น

3.2.1.2 การจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 478 keV จากปฏิกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$

ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$ โดย 7_3Li จะอยู่ในสถานะกระตุ้น จึงมีการปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมา พลังงาน 478 keV ออกมาเพื่อกลับสู่สถานะปกติ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง และเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้น จึงจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมานี้ดังแสดงในรูป 3.4

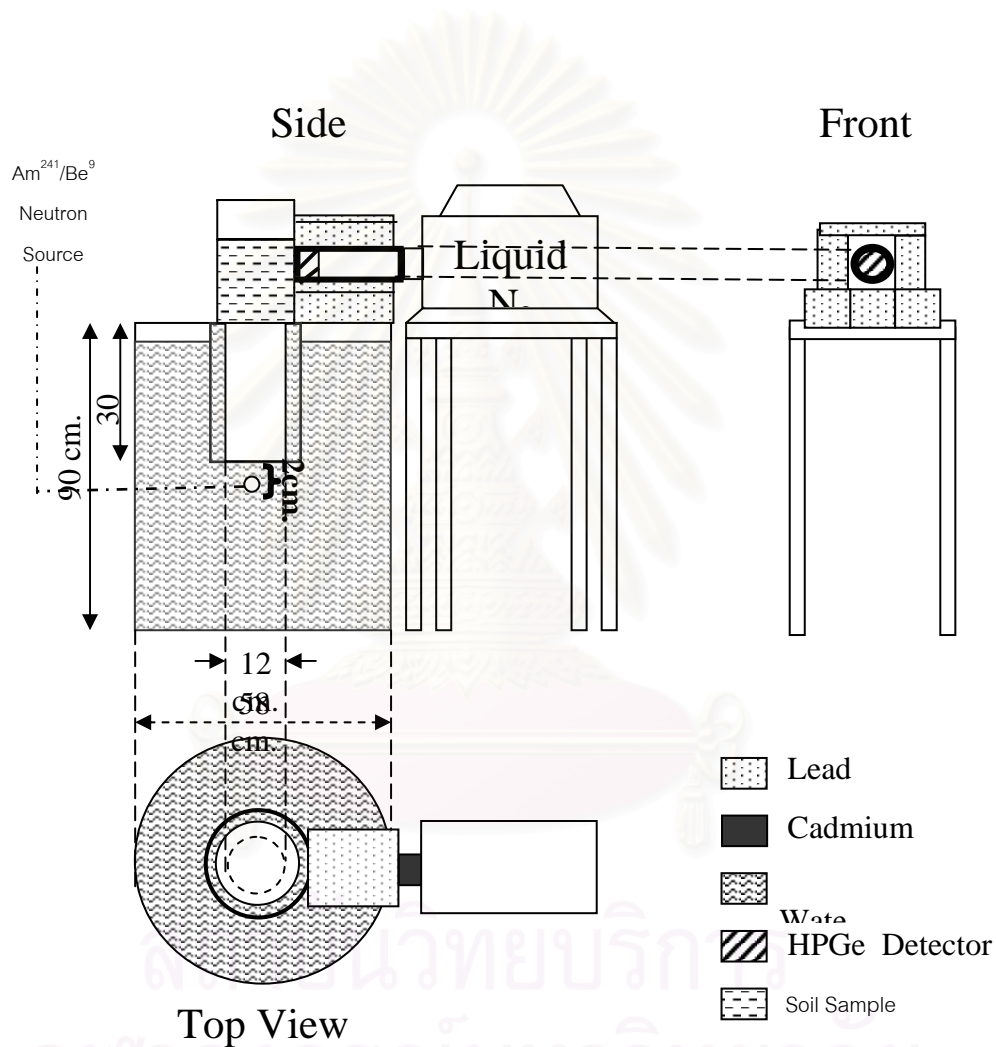


รูปที่ 3.4 แสดงแผนผังการจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา

การจัดระบบวัดรังสีแกมมานี้ ให้หัววัดอยู่ด้านข้างของตัวอย่าง เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้หัววัดรังสีอยู่ในแนวที่รังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอนและรังสีนิวตรอนพุ่งขึ้นมาจากท่ออาบรังสี อันจะเป็นอันตรายต่อหัววัดรังสีและทำให้ค่าเบคกราวด์สูง สำหรับขนาดของภาชนะใส่ตัวอย่างได้เลือกให้มีขนาดโตกว่าท่อส่งลำนิวตรอน เพื่อให้ตัวอย่างถูกอาบรังสีนิวตรอนได้เต็มพื้นที่ และในขณะเดียวกันก็ป้องกันไม่ให้นิวตรอนเล็ดลอดออกไปจากท่ออาบรังสีโดยไม่ผ่านตัวอย่าง นอกจากนั้นยังใช้ตะกั่วเพื่อกำบังรังสีแกมมาของโพแทสเซียม-40 นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากยูเรเนียมจากสิ่งแวดล้อม รังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV จากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมาพลังงาน 2.223 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของไฮโดรเจนในน้ำ เข้าสู่หัววัดด้วย

นอกจากนี้ยังใช้กระบอบอกแคดเมียม หุ้มหัววัดเพื่อใช้เป็นตัวกำบังรังสีนิวตรอนเพื่อป้องกันการจับนิวตรอนของลิเทียม และเจอร์มาเนียม ภายในหัววัดรังสีด้วย

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขช่อง(channel number) และระดับพลังงานของรังสีแกมมา ใช้รังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐาน (standard source) โซเดียม-22 พลังงาน 511 keV และ ที่พลังงาน 1274 keV

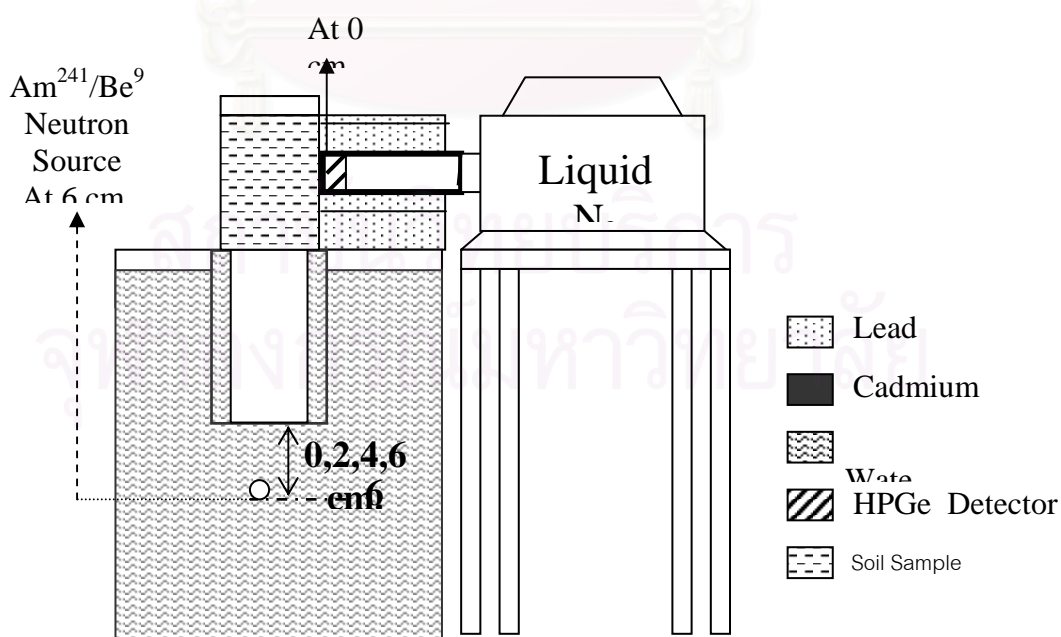


รูปที่ 3.5 ระบบอาบรังสีนิวตรอนในระยะเริ่มศึกษา

3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดรังสีพรอมต์แกมมา

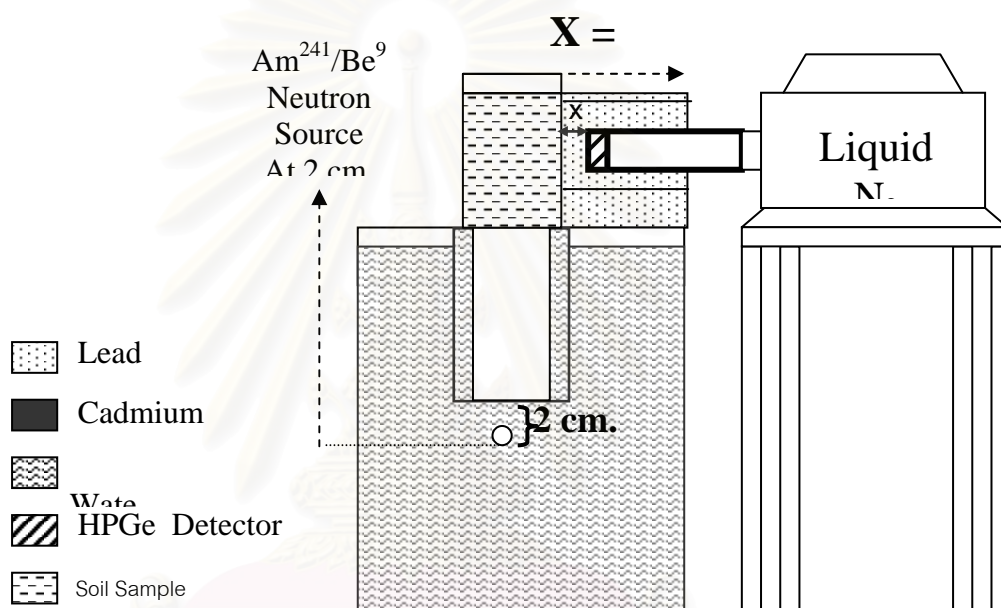
เพื่อให้ระบบอานรังสีมีความเหมาะสมในการหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดิน จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อแบคกราวด์ สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษาวิจัยได้แก่ ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา ขนาดภาชนะบรรจุตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่าง ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง และความชื้นของตัวอย่าง โดยในการศึกษาดำเนินการต้นกำเนิดนิวตรอน ตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมาปริมาณของตัวอย่าง ได้ใช้ดินผสมโบรอนประมาณ 200 ppm โดยน้ำหนัก เป็นตัวอย่าง และใช้ดินหน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ในการศึกษาความชื้นของตัวอย่าง และความแน่นของตัวอย่าง

3.2.2.1 การศึกษาผลของตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน โดยใช้ท่อลำนิวตรอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ตัวอย่างดินสูงประมาณ 15 เซนติเมตรหนัก 5.5 กิโลกรัม ใส่ภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร โดยมีหัววัดรังสีอยู่ห่างจากภาชนะใส่ตัวอย่างที่ระยะ 0 เซนติเมตร และต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนอยู่ตรงกลางใต้ท่อลำนิวตรอน จากนั้นได้ทดสอบเลื่อนระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับปลายท่อลำนิวตรอน 4 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะ 0, 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งทำการวัดรังสีเป็นเวลา 2000 วินาที ผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



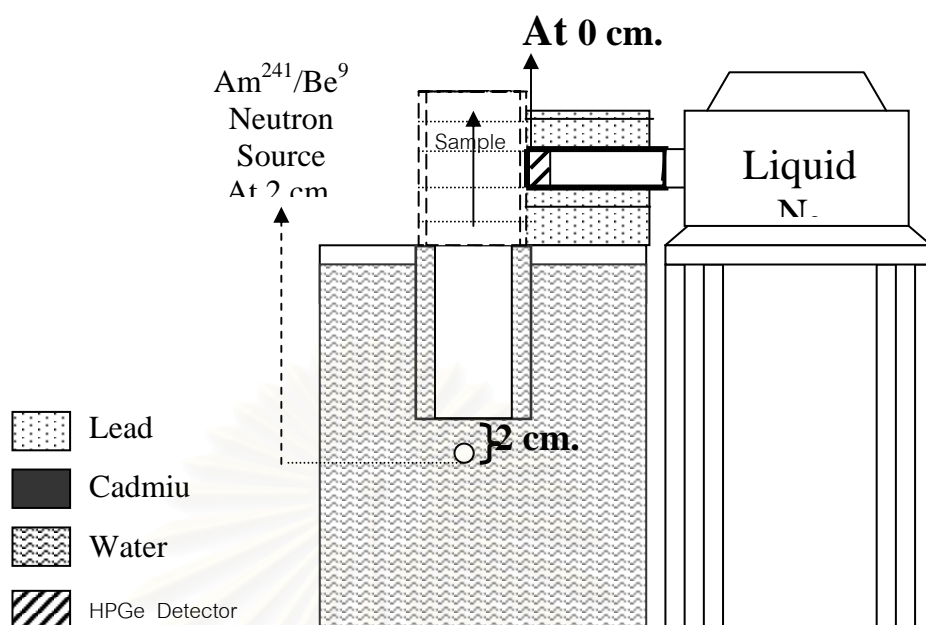
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ทำการวิจัย

3.2.2.2 การศึกษาผลของตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา จักระบบอบรังสีเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2.1 โดยเลือกวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนไว้ตรงกลางใต้ท่อนำลำนิวตรอน ที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร เพราะที่ตำแหน่งนี้ได้อัตราส่วนความเข้มข้นของรังสีพรอมต์แกมมาจากโบรอนในดิน ต่อแบคกราวด์สูงสุด และมีการเลื่อนหัววัดรังสีที่ระยะต่าง ๆ โดยเริ่มจากตำแหน่งที่สัมผัสข้าง ภาชนะใส่ตัวอย่าง (ที่ระยะ 0 เซนติเมตร) ออกมาครั้งละ 2.5 เซนติเมตร จนถึงระยะทาง 7.5 เซนติเมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 แต่ละตำแหน่งทำการวัดรังสีเป็นเวลา 2000 วินาที ผลการวิจัย แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา HPGe

3.2.2.3 การศึกษาผลของขนาดภาชนะบรรจุตัวอย่างและปริมาณตัวอย่าง จักระบบวัด เช่นเดียวกัน โดยวางหัววัดรังสีที่ระยะ 0 เซนติเมตรจากตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างดินใส่ลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร โดยเริ่มที่ความหนา 5 เซนติเมตร และเพิ่มความหนาครั้งละ 5 เซนติเมตร ทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่ได้ในแต่ละความหนาของตัวอย่างดินที่ระดับต่าง ๆ ครั้งละ 4000 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และหลังจากนั้น เปลี่ยนขนาดของภาชนะบรรจุตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 14 เซนติเมตร ผลการศึกษาแสดง ดังในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

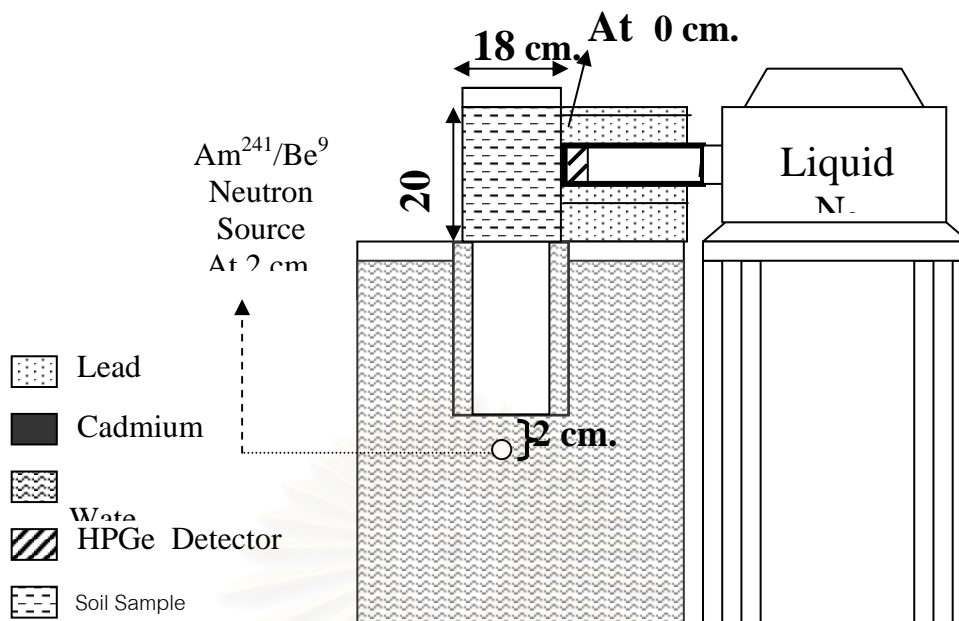


รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงระบบอาบรังสีนิวตรอนกับขนาดของดินทดสอบ

3.2.2.4 ศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง จัดระบบวัดเช่นเดียวกัน ใช้ภาชนะบรรจุตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร บรรจุตัวอย่างหนักประมาณ 6.5 กิโลกรัม ระบบอาบรังสีนิวตรอนดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้ตัวอย่างดินที่อบแห้งแต่ยังไม่ได้บด ทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาเป็นเวลา 12000 วินาที และหลังจากนั้นได้เปลี่ยนเป็นตัวอย่างดินที่อบแห้งและบดละเอียดแล้ว ได้ผลแสดงดังในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

3.2.2.5 ศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง จัดระบบวัดเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ใช้ภาชนะบรรจุตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร บรรจุตัวอย่างสูง 20 เซนติเมตร ใช้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นประมาณ 10% ทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาเป็นเวลา 12000 วินาที และหลังจากนั้นได้เปลี่ยนเป็นตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้ว ได้ผลแสดงดังในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8

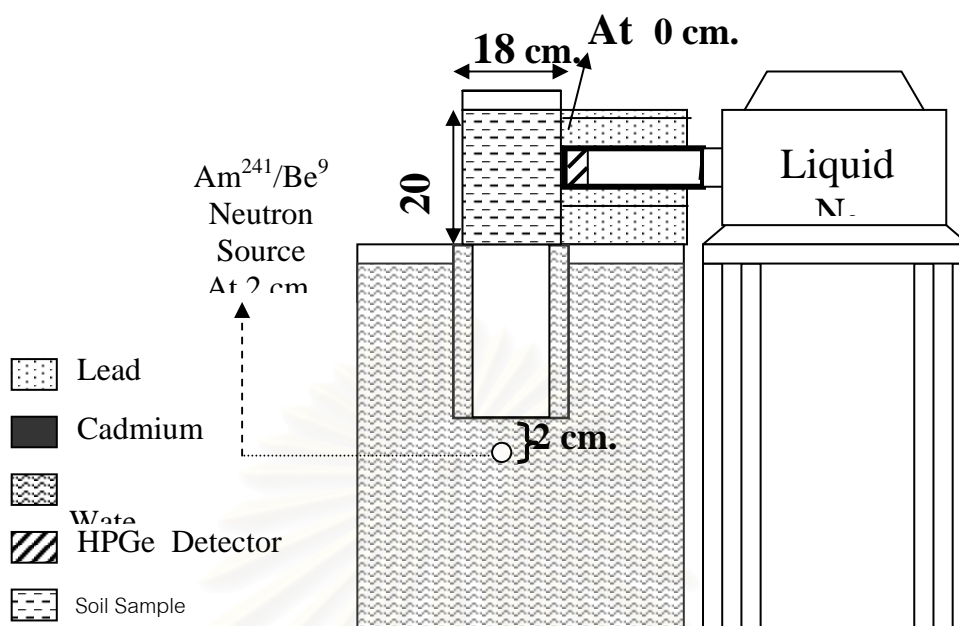
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงระบบอานรังสีนิวตรอนสำหรับศึกษาผลของความชื้น และผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง

3.2.2.6 การทดสอบวัดรังสีฟรอมต์แกมมาของโบรอนที่ระดับพลังงาน 478 keV ในตัวอย่างดิน จากผลการวิจัยในขั้นต้นที่ผ่านมาเกี่ยวกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ตำแหน่งของหัววัดรังสี ผลของขนาดของภาชนะที่บรรจุตัวอย่างดิน ผลของปริมาณของตัวอย่างดิน ผลของความหนาแน่นในตัวอย่างดิน และผลของความชื้นของตัวอย่างดินนั้น ได้นำข้อมูลมาพิจารณาในการออกแบบระบบวิเคราะห์โบรอนในตัวอย่างดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 โดยตัวอย่างดินทุกตัวอย่างต้องมีการอบและบดให้ละเอียดก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ และได้ทำการทดสอบวัดสเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมาในตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 200 ppm โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการนับรังสี 4000 วินาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงระบบอบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.3 การทดลองวัดรังสีพร้อมดีแกมมาพลังงาน 478 keV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบ โดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน และหาประมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน

3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.3.1.1 นำดินขุยไฟที่จะใช้เตรียมตัวอย่างเข้าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบประมาณ 18 ชั่วโมง

3.2.3.1.2 นำดินที่ผ่านการอบแล้วมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อน

3.2.3.2 การเตรียมดินเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน

3.2.3.2.1 นำดินที่ผ่านการอบ การบด และการร่อนแล้ว มาเตรียมตัวอย่างดินที่มีปริมาณของโบรอนในดินต่าง ๆ กัน ใช้ดินในการเตรียมตัวอย่างตัวอย่างละประมาณ 6.5 กิโลกรัม มาเติมสารละลายกรดบอริก (boric acid) ตามปริมาณของโบรอนในดินที่ต้องการ คือ 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยเติมสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นละ 800 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2.3.2.2 นำดินที่เติมสารละลายกรดบอริกแล้ว เข้าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบประมาณ 18 ชั่วโมง

3.2.3.2.3 นำดินแต่ละตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอนที่ 3.2.3.2.2 มาทำการร่อนด้วยตะแกรงร่อนเพื่อให้ตัวอย่างดินผสมเข้ากันดี

3.2.3.3 การทดสอบสร้างกราฟเปรียบเทียบ และทดลองหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน

3.2.3.3.1 สร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV ที่เวลา 4000 วินาที กับปริมาณของโบรอนในดินที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน โดยใช้ตัวอย่างดินที่เตรียมในขั้นตอนที่ 3.2.3.2 นำไปทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาใช้เวลาในการวัดรังสีดังนี้คือ ตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน 0 และ 50 ppm โดยน้ำหนัก วัดนานตัวอย่างละ 12000 วินาที และตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm โดยน้ำหนัก วัดนานตัวอย่างละ 4000 วินาที ได้ผลการคำนวณจำนวนนับรังสีของโบรอนที่เวลา 4000 วินาที และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV ที่เวลา 4000 วินาที กับปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน (ppm) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 และรูปที่ 4.14

3.2.3.3.2 ทดสอบการหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินโดยทดลองวัด รังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV จากตัวอย่างดินที่ทราบปริมาณของโบรอนคือ 20, 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก นำไปทำการวัดรังสีพรอมต์แกมมาใช้เวลาในการวัดรังสีดังนี้คือ ตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน 20 ppm โดยน้ำหนัก วัดนาน 12000 วินาที และตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก วัดนานตัวอย่างละ 4000 วินาที ผลการทดสอบการหาปริมาณโบรอนแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

3.2.3.4 การทดลองหาปริมาณธาตุโบรอนในดินจากแหล่งต่าง ๆ กัน

ได้ทำการทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV จากตัวอย่างดินแหล่งต่าง ๆ กันจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 ดินหน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ตัวอย่างที่ 2 ดินข้างสนามฟุตบอลคณะรัฐศาสตร์ ตัวอย่างที่ 3 ดินจากจังหวัดสมุทรปราการ ตัวอย่างที่ 4 ดินจากจังหวัดระยอง และตัวอย่างที่ 5 ดินจากจังหวัดจันทบุรี ทำการวัดนานตัวอย่างละ 12000 วินาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.17

บทที่ 4

ผลการวิจัย

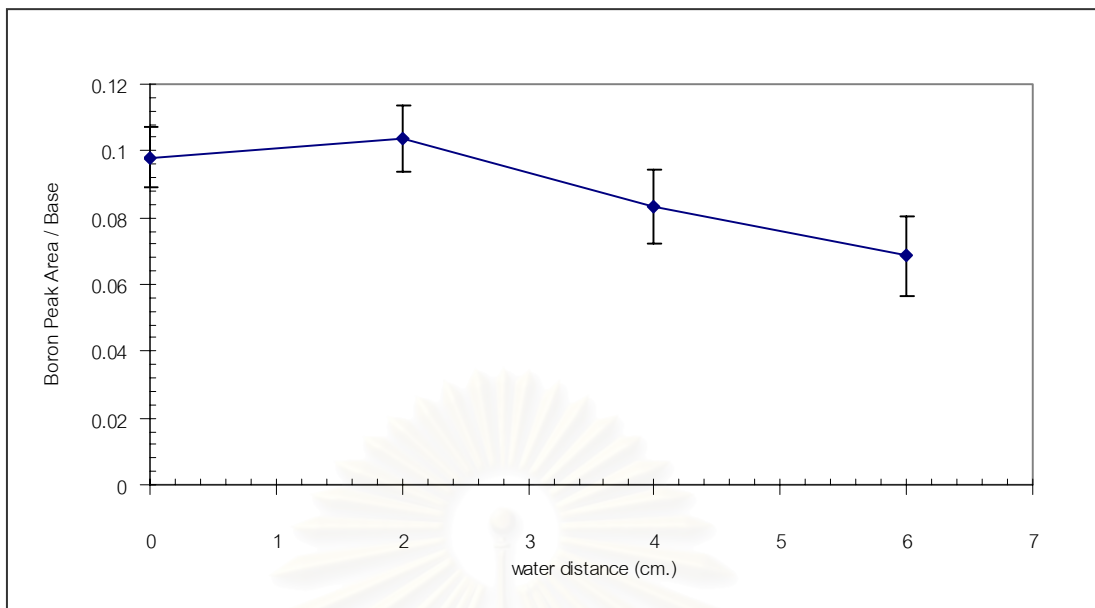
4.1 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

ปรากฏว่าสามารถเห็นพีคของโบรอนที่พลังงาน 478 keV ที่เกิดจากอันตรกิริยา $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ มีลักษณะพิเศษคือเป็นพีคที่กว้างกว่าพีคปกติ อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดผลของดอปเลอร์ (Doppler effect) ได้อย่างชัดเจน และพบว่าความเข้มของสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน แต่เบคราวด์ (base) ได้พีคมีค่าลดลงค่อนข้างมากเมื่อเลื่อนต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนออกห่างจากปลายท่อลำนิวตรอนเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาหาอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อค่าเบคราวด์แล้วพบว่า อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อค่าเบคราวด์มีค่าสูงสุด เมื่อจัดให้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนอยู่ห่างจากปลายท่อลำนิวตรอนที่ระยะ 2 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ดังนั้นในระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมานี้จึงเลือกใช้ตำแหน่งในการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ระยะห่างจากปลายท่อลำนิวตรอนเป็นระยะ 2 เซนติเมตร เป็นระยะในการหวนวงนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนด้วยน้ำให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนในปริมาณความเข้มที่เหมาะสม

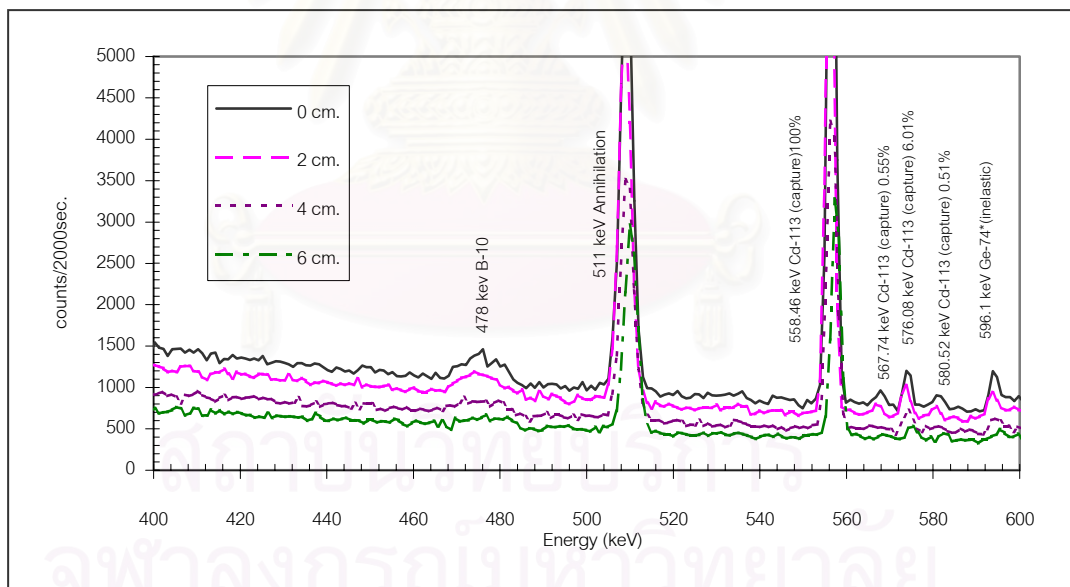
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาผลของระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับปลายท่อลำนิวตรอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

ระยะห่างระหว่างปลายท่อลำนิวตรอนกับตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอน (เซนติเมตร)	(1)	(2)	(2)/(1)
0	28393	2783 ± 258	0.0980 ± 0.0091
2	24139	2504 ± 240	0.1037 ± 0.0099
4	18308	1526 ± 200	0.0834 ± 0.0109
6	14230	975 ± 172	0.0685 ± 0.0121

หมายเหตุ (1) = Base (2) = Boron Peak Area



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับระยะห่างระหว่างปลายท่อนำลำนิวตรอนกับต้นกำเนิดนิวตรอน



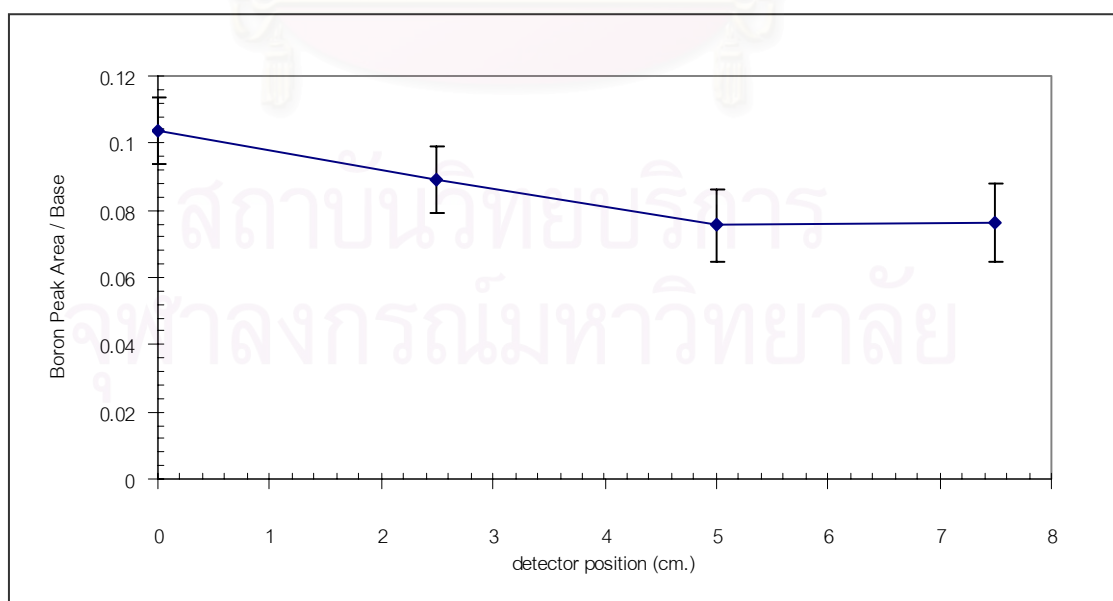
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมาที่ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำลำนิวตรอนกับต้นกำเนิดนิวตรอน

4.2 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

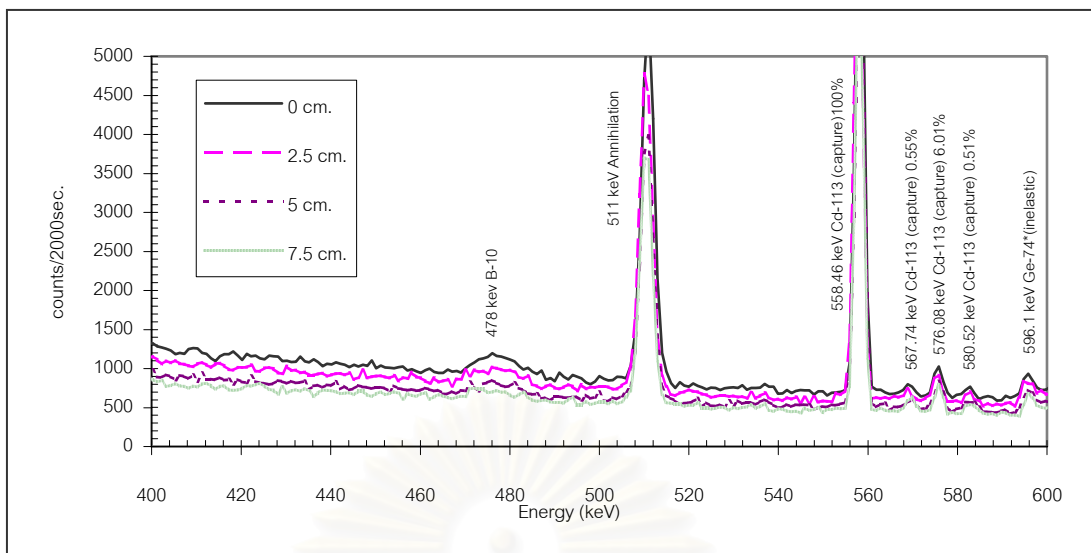
เมื่อเลื่อนหัววัดรังสีห่างออกมา ปรากฏว่าความเข้มของสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV จากอันตรกิริยา $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ที่ได้มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่แบคกราวด์ได้พีคมีค่าลดลงค่อนข้างมาก และเมื่อนำมาหาอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อค่าแบคกราวด์แล้ว พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อค่าแบคกราวด์มีค่าสูงสุดเมื่อจัดให้หัววัดรังสีอยู่ห่างจากภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ระยะ 0 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ดังนั้นในระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมานี้จึงเลือกใช้ตำแหน่งที่ระยะ 0 เซนติเมตรจากภาชนะบรรจุตัวอย่างในการวางหัววัดรังสี ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาตำแหน่งในการวางหัววัดรังสี ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

ระยะทางจากหัววัดรังสีถึงตัวอย่าง (เซนติเมตร)	(1)	(2)	(2)/(1)
0	24139	2504 ± 240	0.1037±0.0099
2.5	21387	1909 ± 211	0.0893±0.0099
5	17849	1347 ± 193	0.0755±0.0108
7.5	16096	1228 ± 183	0.0763±0.0114

หมายเหตุ (1) = Base (2) = Boron Peak Area



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาที่ตำแหน่งของหัววัดรังสีที่ระยะต่าง ๆ

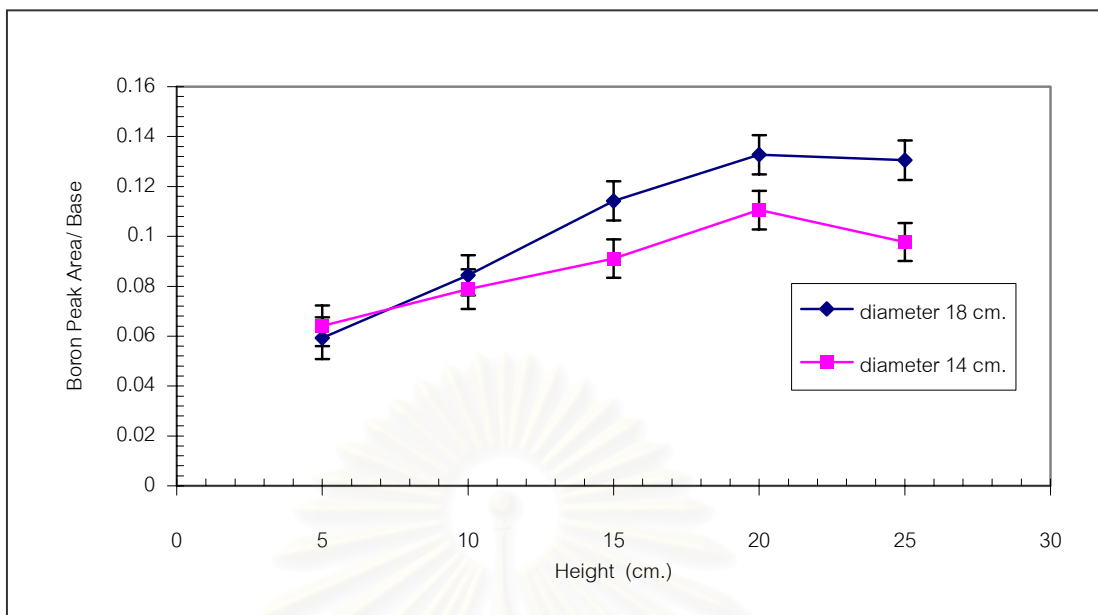
4.3 ผลการศึกษาขนาดภาชนะบรรจุตัวอย่างและปริมาณของตัวอย่าง

จากการเพิ่มปริมาณตัวอย่างดินขึ้นครั้งละ 5 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV จากอันตรกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$ ต่อแบคกราวด์ สำหรับภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร มีค่าอัตราส่วนสูงสุด ที่ความหนาของตัวอย่างประมาณ 20 เซนติเมตร หรือที่น้ำหนักของตัวอย่างประมาณ 6500 กรัม และที่ความหนาเกิน 20 เซนติเมตร พบว่าอัตราส่วนของรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนต่อแบคกราวด์มีค่าลดลง และเมื่อใช้ภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ได้ค่าอัตราส่วนนี้ลดลงไปเพราะแบคกราวด์มีค่าเพิ่มขึ้น

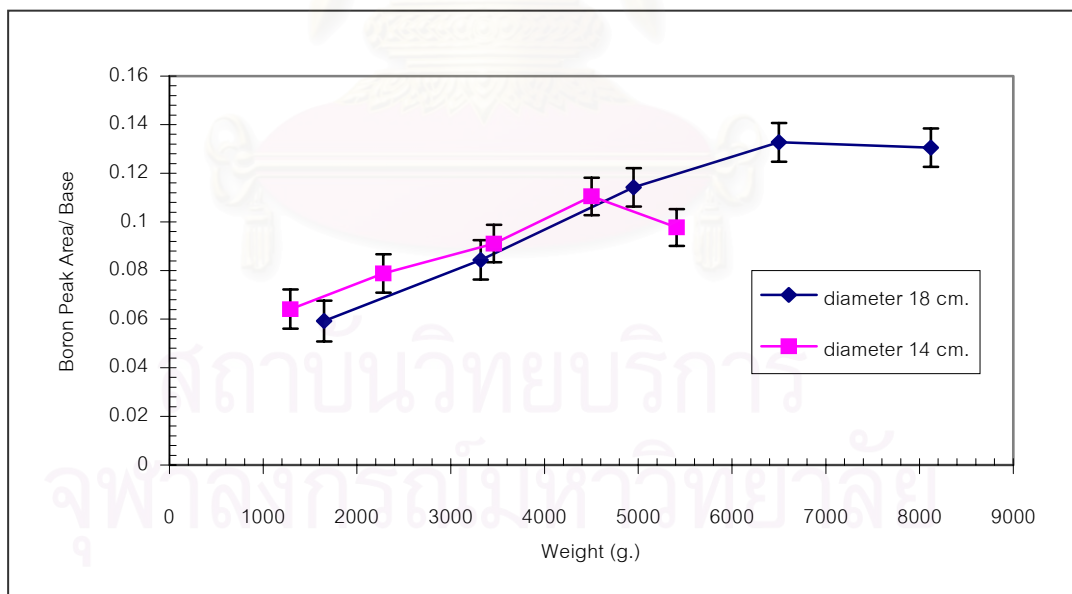
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาขนาดภาชนะสำหรับบรรจุตัวอย่างและปริมาณของตัวอย่าง

ความหนาของตัวอย่างดิน (เซนติเมตร)	ถังบรรจุตัวอย่างขนาด ϕ 18 เซนติเมตร				ถังบรรจุตัวอย่างขนาด ϕ 14 เซนติเมตร			
	น้ำหนัก (กรัม)	(1)	(2)	(2)/(1)	น้ำหนัก (กรัม)	(1)	(2)	(2)/(1)
5	1650	29053	1721 \pm 245	0.0592 \pm 0.0084	1290	31490	2017 \pm 255	0.0641 \pm 0.0081
10	3320	31676	2674 \pm 257	0.0844 \pm 0.0081	2280	34397	2709 \pm 267	0.0788 \pm 0.0078
15	4950	33549	3831 \pm 266	0.1142 \pm 0.0079	3460	35592	3242 \pm 273	0.0911 \pm 0.0077
20	6500	33764	4480 \pm 268	0.1327 \pm 0.0079	4500	36158	3994 \pm 276	0.1105 \pm 0.0077
25	8120	34186	4461 \pm 270	0.1305 \pm 0.0079	5410	36511	3568 \pm 277	0.0977 \pm 0.0076

หมายเหตุ (1) = Base (2) = Boron Peak Area



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับความหนาของตัวอย่างดิน



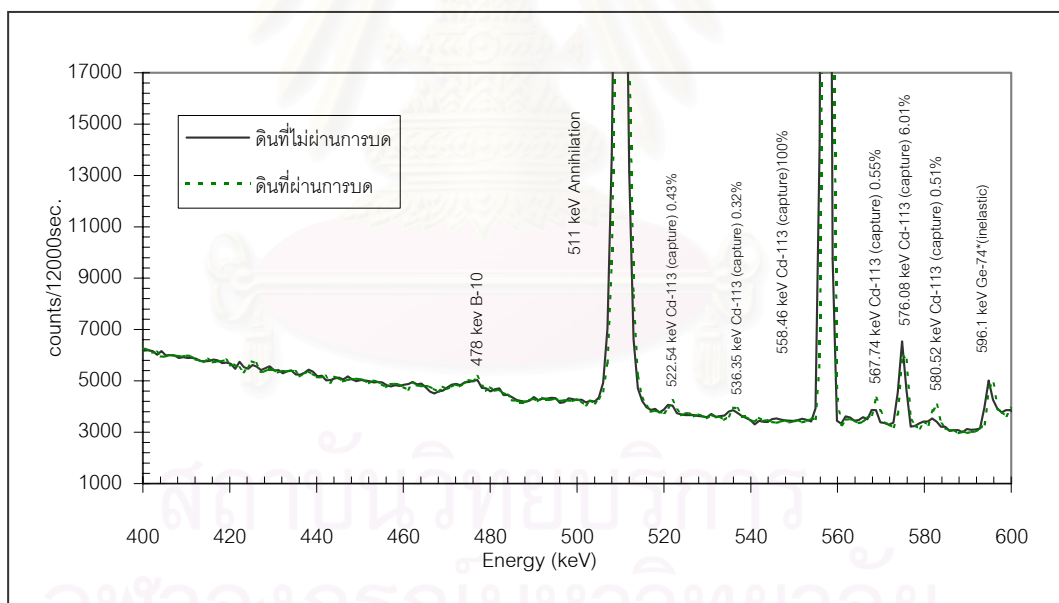
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Boron Peak Area/Base กับปริมาณของตัวอย่างดิน

4.4 ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มของสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV จากอันตรกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$ ที่ได้จากการวัดตัวอย่างดินที่ไม่ได้ผ่านการบดและตัวอย่างดินที่ผ่านการบดแล้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมดินที่มีปริมาณของโบรอนในดินต่างกัน ที่ต้องการความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ตัวอย่างดินที่ผ่านการบด เพราะมีความเหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างดิน เพื่อการวิจัยในขั้นตอนอื่น ๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง

ตัวอย่างดิน	ค่า Boron Peak Area
ดินที่ไม่ผ่านการบด	2051 ± 468
ดินที่ผ่านการบด	2206 ± 490



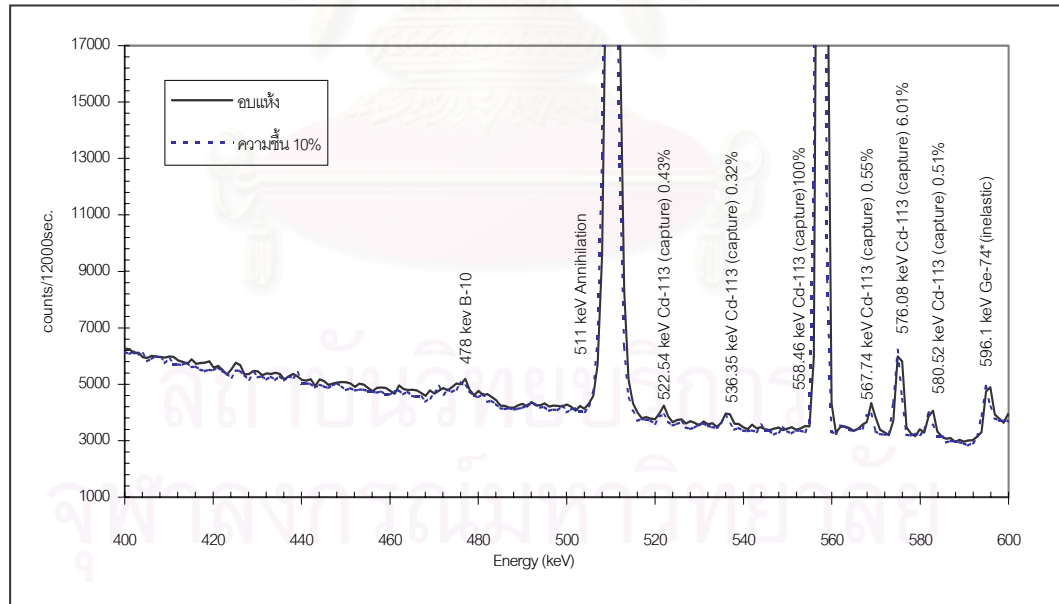
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด

4.5 ผลการศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มของสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV จากปฏิกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$ ที่ได้จากการวัดตัวอย่างดินที่มีความชื้นประมาณ 10% และตัวอย่างดินที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมดินที่มีปริมาณของโบรอนในดินต่างกัน ที่ต้องการความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวอย่างดินที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว เพราะมีความสะดวกในการเตรียมตัวอย่างดิน เพื่อใช้การวิจัย

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง

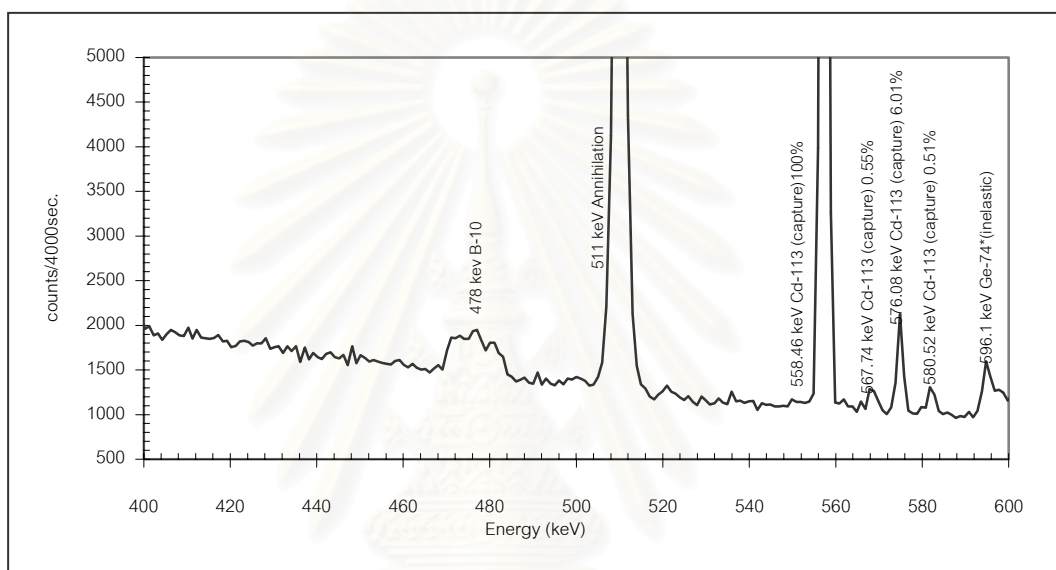
ตัวอย่างดิน	ค่า Boron Peak Area
ดินที่มีความชื้นประมาณ 10 %	2447 ± 480
ดินที่ผ่านการอบไล่ความชื้น	2570 ± 488



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ

4.6 ผลการทดสอบระบบวิเคราะห์ธาตุโบรอนในตัวอย่างดิน

จากข้อมูลผลการวิจัยที่ผ่านมา ทำให้สามารถจัดระบบอานรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีแกมมาที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถวัดรังสีฟรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV จากอันตรกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^3_3Li$ จากธาตุโบรอนในตัวอย่างดินอย่างมีประสิทธิภาพผลการทดสอบระบบวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 200 ppm. โดยน้ำหนักได้สเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมา ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของรังสีฟรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 200 ppm โดยน้ำหนัก

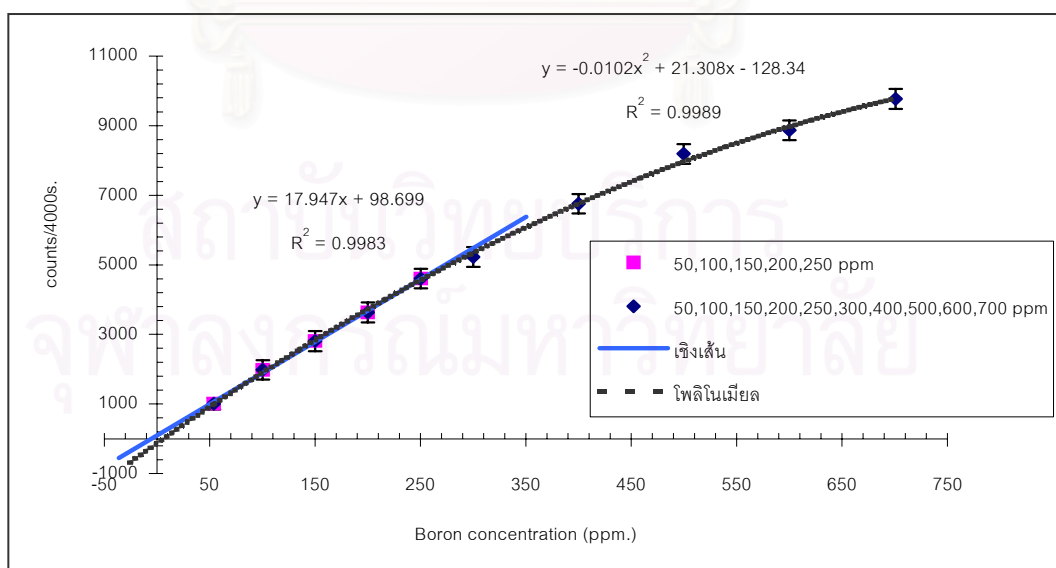
4.7 ผลการทดสอบสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีฟรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV กับปริมาณของโบรอนในดินที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน

จากการทดลองวัดรังสีฟรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV จากอันตรกิริยา $^{10}_5B(n, \alpha)^3_3Li$ เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของโบรอนในดิน กับความเข้มของรังสีฟรอมต์แกมมา ณ เวลา 4000 วินาที ของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอน 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเข้มของรังสีฟรอมต์แกมมาของแต่ละตัวอย่างที่วัดได้แตกต่างกันไป โดยตัวอย่างดินที่มีปริมาณโบรอนต่ำจะได้ค่าความเข้มของรังสีฟรอมต์แกมมาน้อย และค่าที่วัดได้จะมากขึ้นตามปริมาณโบรอนที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอน เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา กับปริมาณของโบรอนในดิน

ปริมาณ โบรอนในตัวอย่างดิน (ppm)	จำนวนนับ /4000วินาที
0	วัดไม่ขึ้น
50	1008 ± 164
100	1980 ± 280
150	2808 ± 288
200	3632 ± 288
250	4604 ± 280
300	5228 ± 288
400	6760 ± 280
500	8192 ± 284
600	8868 ± 284
700	9772 ± 284

จากตารางที่ 4.6 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ เวลา 4000 วินาที ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ เวลา 4000 วินาที

จากกราฟรูปที่ 4.10 พบว่าความเข้มข้นสีพธอมต์แกลมมาของโบรอนจะแปรผันตรงตามปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วง 0 - 250 ppm โดยน้ำหนัก แต่ในช่วงปริมาณโบรอนประมาณ 250 ppm โดยน้ำหนัก ขึ้นไปนั้นมีความชันลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm โดยน้ำหนัก มาสร้างกราฟเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สมการของกราฟเปรียบเทียบนี้คือ

$$y = 17.974x + 98.699 \dots \dots \dots (4.1)$$

โดยที่ y : ความเข้มข้นสีพธอมต์แกลมมาของโบรอนในตัวอย่างดิน ณ เวลานั้น 4000 วินาที

x : ปริมาณโบรอนในตัวอย่างดิน ppm โดยน้ำหนัก

และค่า R^2 สำหรับสมการเส้นตรงนี้ คือ 0.9983

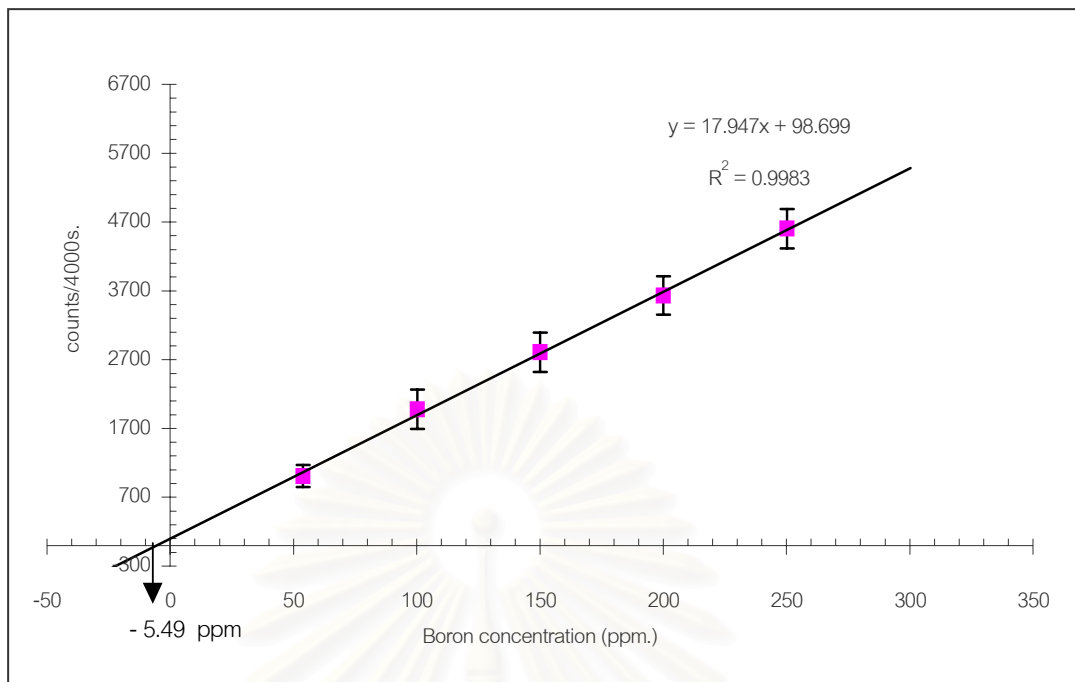
แต่จากกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 4.11 นั้นจะเห็นว่าเส้นกราฟไม่ได้ตัดแกน x และแกน y ที่จุด (0,0) เนื่องจากมีปริมาณโบรอนในดินอยู่แล้ว ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเส้นกราฟตัดแกน x ที่ประมาณ 5.49 ppm โดยน้ำหนัก ทำให้เราทราบว่าในดินที่เราใช้เดิมสารมาตรฐานนั้นมีโบรอนอยู่แล้วประมาณ 5.49 ppm โดยน้ำหนัก ดังนั้นก่อนที่จะทำกราฟเปรียบเทียบเพื่อใช้วิเคราะห์ธาตุโบรอนในดินจากแหล่งอื่น ๆ นั้นต้องมีการปรับแก้ค่าปริมาณของโบรอนในดินจากกราฟเปรียบเทียบที่ได้เสียก่อน โดยการนำค่าโบรอนที่มีอยู่แล้วในดินก่อนการเตรียมรวมเข้ากับปริมาณของสารมาตรฐานโบรอนที่เดิมเข้าไป ทำให้ได้กราฟเปรียบเทียบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และทำให้ได้สมการของกราฟเปรียบเทียบใหม่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนในดินจากแหล่งอื่น ๆ คือ

$$y = 17.974x + 1.2946 \dots \dots \dots (4.2)$$

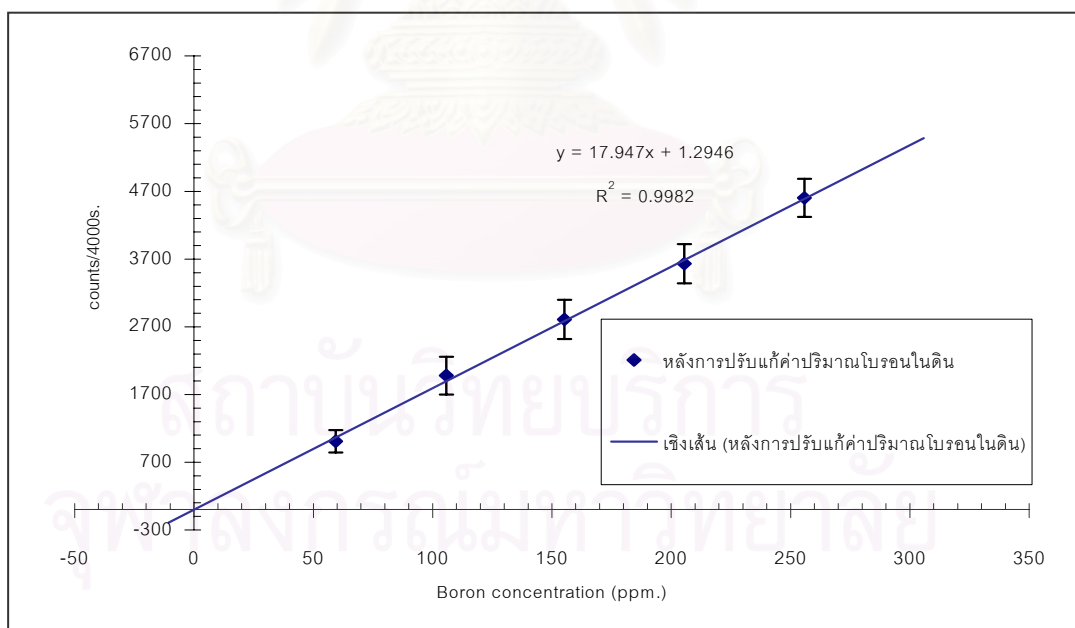
โดยที่ y : ความเข้มข้นสีพธอมต์แกลมมาของโบรอนในตัวอย่างดิน ณ เวลา 4000 วินาที

x : ปริมาณโบรอนในตัวอย่างดิน ppm โดยน้ำหนัก

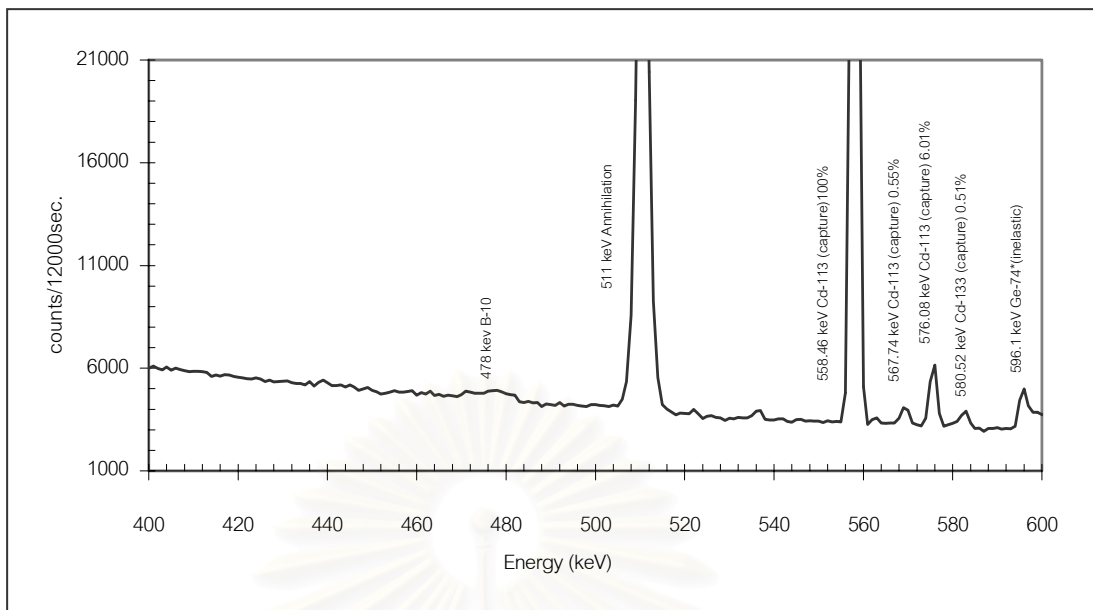
และค่า R^2 สำหรับสมการเส้นตรงนี้ คือ 0.9982



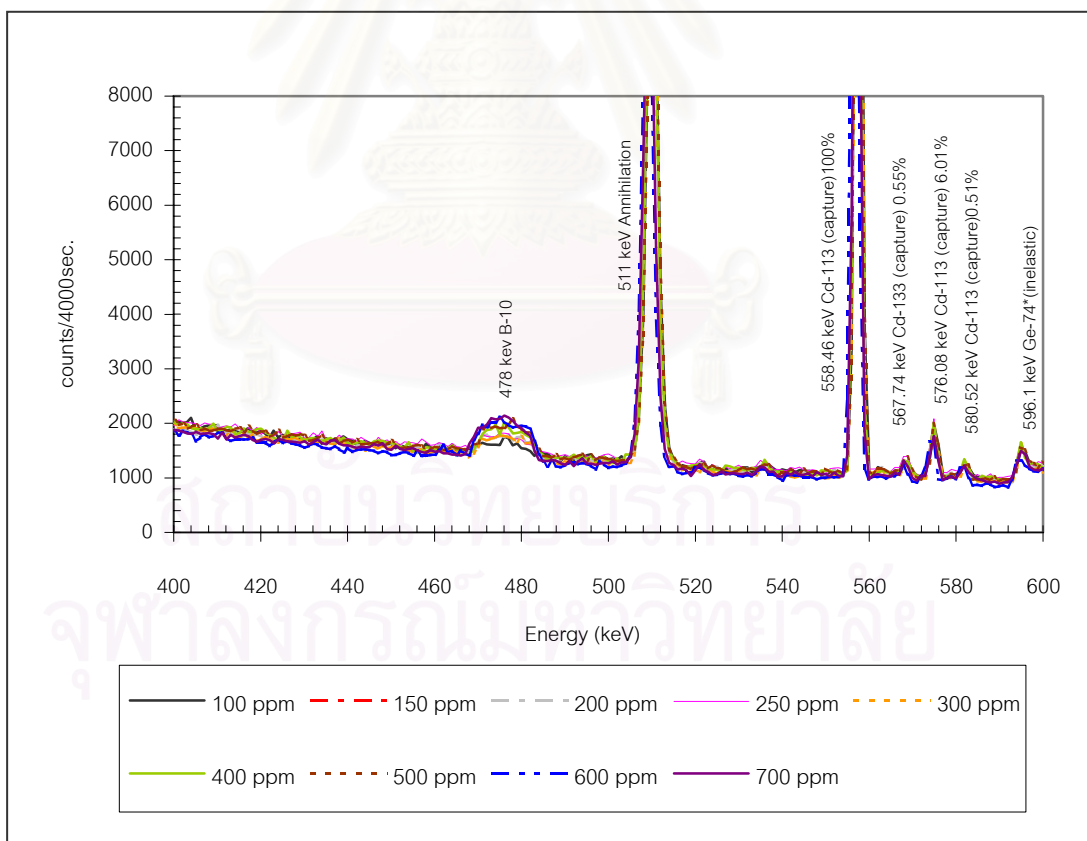
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีฟลูออโรสโคปที่เวลา 4000 วินาที



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน กับความเข้มของรังสีฟลูออโรสโคปที่เวลา 4000 วินาที ที่ทำการปรับแก้ค่าแล้ว



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 50 ppm โดยน้ำหนัก



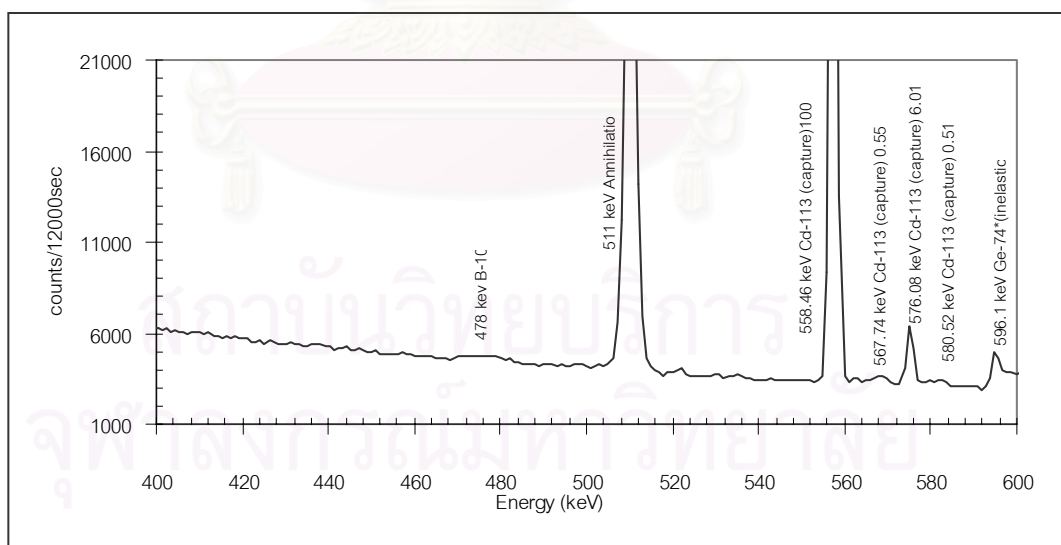
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm โดยน้ำหนัก

4.8 ทดสอบหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดิน

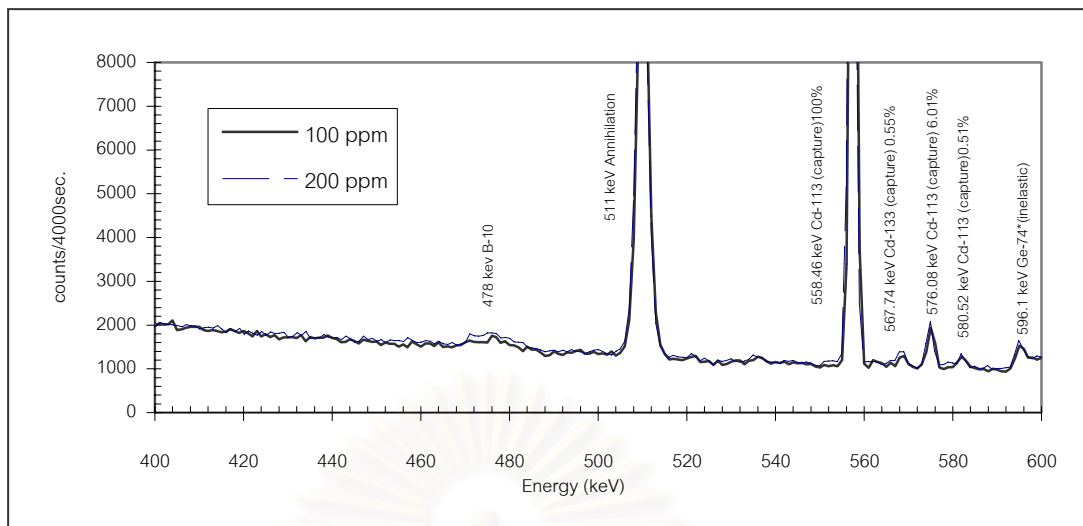
เมื่อทำการทดสอบหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินที่เตรียมขึ้นโดยผสมโบรอนประมาณ 20, 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก กับวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพรอมต์แกมมา แล้วพบว่าเมื่อคำนวณหาปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินจากสมการที่ (4.2) ที่ได้จากกราฟเปรียบเทียบแล้วได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการเตรียมไว้จริงดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินที่เตรียมขึ้นกับวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา

ปริมาณโบรอนที่ผสม ในตัวอย่างดิน (ppm)	จำนวนนับ/4000วินาที	ปริมาณโบรอนที่ได้จาก การคำนวณ (ppm)
20	372 ± 163	20.65 ± 9.01
100	1887 ± 282	105.07 ± 15.64
200	3564 ± 272	198.51 ± 15.08
calibration equation : $y = 17.947x + 1.2946$, $R^2 = 0.9982$		



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 20 ppm โดยน้ำหนัก



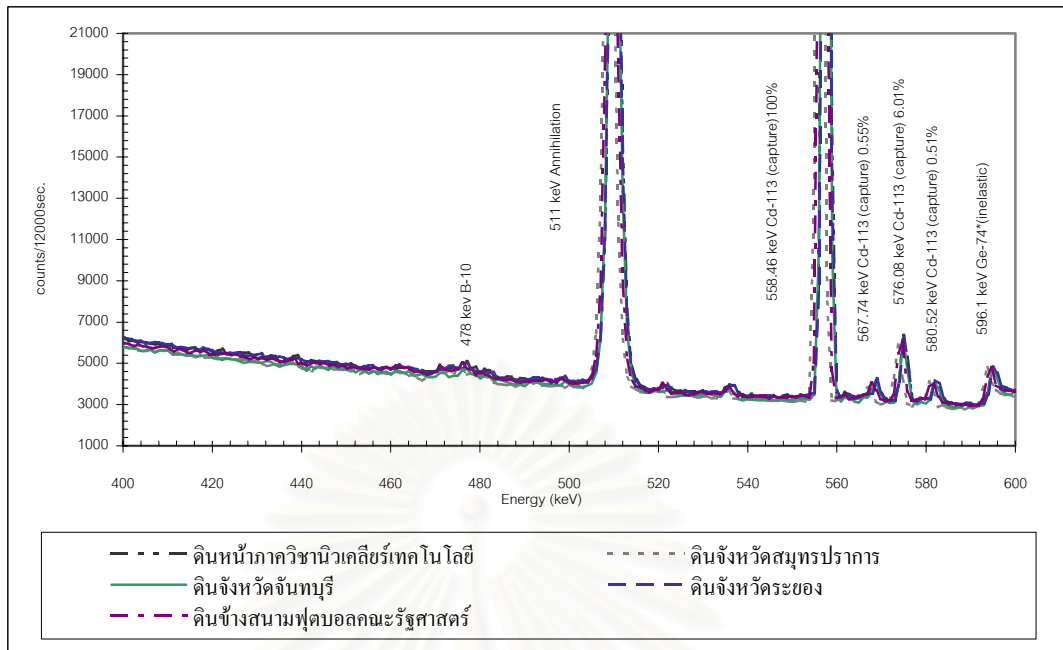
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของรังสีพรอมต์แกมมาของตัวอย่างดินที่ผสมโบรอนประมาณ 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก

4.9 ผลการทดลองหาปริมาณธาตุโบรอนในดินจากแหล่งต่าง ๆ

ผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV เพื่อหาปริมาณธาตุโบรอนในตัวอย่างดิน โดยใช้ตัวอย่างดินจากแหล่งต่าง ๆ กัน จำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 ดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ตัวอย่างที่ 2 ดินข้างสนามฟุตบอลคณะรัฐศาสตร์ ตัวอย่างที่ 3 ดินจากจังหวัดสมุทรปราการ ตัวอย่างที่ 4 ดินจากจังหวัดระยอง ตัวอย่างที่ 5 ดินจากจังหวัดจันทบุรี ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนในตัวอย่างดินจากแหล่งต่าง ๆ

ตัวอย่างดิน	จำนวนนับ /4000วินาที	ปริมาณ โบรอนที่ได้จากการคำนวณ (ppm)
1.ดินร่วนปนทรายสีดำ จากหน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี	856 ± 164	47.62 ± 9.07
2.ดินเหนียวสีเทา จากข้างสนามฟุตบอลคณะรัฐศาสตร์	472 ± 163	26.23 ± 9.01
3.ดินร่วนสีดำ จากอำเภอเมืองจังหวัดสมุทรปราการ	761 ± 160	42.33 ± 8.84
4.ดินร่วนสีแดง จากอำเภอแกลง จังหวัดระยอง	673 ± 164	37.43 ± 9.07
5.ดินร่วนสีเทา จากอำเภอนายายอาม จังหวัดจันทบุรี	532 ± 160	29.57 ± 8.84
calibration equation : $y = 17.947x + 1.2946$, $R^2 = 0.9982$		



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของรังสีฟอรอมต์เกมมาของตัวอย่างดินจากพื้นที่ต่าง ๆ

4.10 การหาค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์

สำหรับงานวิจัยนี้ การหาขีดจำกัดของการวิเคราะห์หาได้จากกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 4.8 จะพบว่าที่ปริมาณโบรอน 0 ppm โดยน้ำหนัก นั้นมีค่าจำนวนนับต่อเวลาในการวัด 4000 วินาที เท่ากับประมาณ 1.29 ซึ่งถือว่าค่านี้เป็นค่าที่นับได้แม้จะไม่มีโบรอนในตัวอย่างดิน จึงนำค่านี้มาใช้เพื่อคำนวณหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์จากสมการที่ 4.2

$$\text{โดยที่ ค่าจำนวนนับในการหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์} = B \pm 3\sqrt{B} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\text{เมื่อ } B = \sqrt{\text{จำนวนนับสุทธิ}}$$

ดังนั้นจำนวนนับในการหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์เท่ากับ 1.29 ± 3.41 counts/4000second และเมื่อนำไปคำนวณหาขีดจำกัดในการหาปริมาณโบรอนสำหรับตัวอย่างดินหนัก 6.5 กิโลกรัม จากสมการที่ 4.2 ได้ปริมาณโบรอนเท่ากับ 0.19 ppm โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การจัดระบบอบรังสีนิวตรอนและระบบวัดรังสีแกมมา ในการออกแบบและจัดระบบวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอนในดิน โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากอันตรกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)\text{Li}^7$ พลังงาน 478 keV นั้น ปัญหาส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับแบคกราวด์ของรังสีแกมมาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น รังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV จากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมาพลังงาน 2.223 MeV จากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนของไฮโดรเจนในน้ำซึ่งใช้เป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน รวมทั้งรังสีแกมมาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากยูเรเนียมจากสิ่งแวดล้อม ทำให้มีปริมาณความเข้มของรังสีค่อนข้างสูง แต่เมื่อจัดวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนให้ห่างจากหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ร่วมกับการกำบังรังสีแกมมา ทำให้สามารถลดค่าแบคกราวด์ลงได้ สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้วางต้นกำเนิดรังสีห่างจากปลายท่อลำนำนิวตรอนลงไปประมาณ 2 เซนติเมตร โดยที่หัววัดรังสีวางอยู่บนตะกั่วหนาประมาณ 5 เซนติเมตร เพื่อกำบังรังสีแกมมา นอกจากนี้ยังใช้แผ่นแคดเมียมหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร หุ้มหัววัดเพื่อกันรังสีนิวตรอนไม่ให้เข้าทำอันตรกิริยากับผลึกภายในหัววัดรังสี และได้เลือกวางหัววัดรังสีทำมุม 90 องศา กับลำนิวตรอนที่ตกกระทบตัวอย่าง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้หัววัดรังสีถูกรังสีนิวตรอนโดยตรงด้วย และเลือกวางหัววัดรังสีไว้ติดทางด้านข้างของภาชนะใส่ตัวอย่าง (ที่ระยะ 0 เซนติเมตร ตามรูปที่ 3.10) ในการพิจารณาค่าแห่งที่เหมาะสมสำหรับการจัดระบบการวัดรังสีพรอมต์แกมมานี้ได้พิจารณาจาก อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากอันตรกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)\text{Li}^7$ พลังงาน 478 keV ต่อแบคกราวด์ที่มีค่าสูง ในเรื่องเกี่ยวกับขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่าง (โดยเลือกขนาดภาชนะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 cm) และปริมาณของตัวอย่าง (โดยเลือกปริมาณของตัวอย่างดินหนัก 6.5 kg) จากการทดลองเรื่องขนาดของภาชนะที่บรรจุตัวอย่าง และปริมาณของตัวอย่างดินพบว่า ขนาดของภาชนะและปริมาณของตัวอย่างนั้น มีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากโบรอนมาก อย่างไรก็ตามการที่จะใช้ตัวอย่างปริมาณเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละกรณีไป ถ้าใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยจะทำให้ความไวในการวัดรังสีไม่ดีและในทางกลับกันถ้าใช้ตัวอย่างปริมาณมากอาจมีความไวดี แต่ตัวอย่างมีขนาดโตเกินไป

งานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง และผลของความชื้นในตัวอย่างดิน โดยได้ศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก และพบว่าความหนาแน่นของตัวอย่างนั้นมีผลต่อความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากโบรอน

ไม่มากนัก และสำหรับการศึกษาผลของความชื้นในตัวอย่างดินนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาที่ความชื้นของดินที่ 0% และที่ความชื้นของตัวอย่างดินที่ 10 % ซึ่งก็พบว่าที่ความชื้น ดังกล่าวมีผลต่อความเข้มรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนไม่มากนักเช่นกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวอย่างดินที่แห้งและบดละเอียดเหมือนกัน เพื่อตัดเงื่อนไขที่ต่างกันทางด้านความชื้นและความหนาแน่นของตัวอย่างดิน

5.1.2 ผลจากการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดินจากเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน กับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา

จากเทคนิคการเติมสารมาตรฐานในตัวอย่างดิน แล้วนำมาทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากอันตรกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)\text{Li}^7$ พลังงาน 478 keV สามารถนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดินกับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโบรอนในตัวอย่างดินจากแหล่งอื่น ๆ ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = 17.947x + 1.2946 ; R^2 = 0.9982 \quad \text{ในช่วงปริมาณ } 0 - 250 \text{ ppm โดยน้ำหนัก}$$

โดย y = ความเข้มรังสีพรอมต์แกมมาจากโบรอนในตัวอย่างดิน ณ เวลา 4000 วินาที

x = ปริมาณโบรอนในตัวอย่างดินมีหน่วยเป็น ppm โดยน้ำหนัก

ได้มีการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการข้างต้น โดยเตรียมดินที่ทราบปริมาณโบรอนในดินประมาณ 20, 100 และ 200 ppm โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาของโบรอนที่พลังงาน 478 keV นำค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณโบรอนจากสมการข้างต้น พบว่ามีปริมาณโบรอน 20.65 ± 9.01 , 105.07 ± 15.64 และ 198.51 ± 15.08 ppm โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการคำนวณข้างต้นจึงถือได้ว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการหาปริมาณธาตุโบรอนในดินจากแหล่งอื่นๆ ได้จริง เพราะมีความถูกต้องค่อนข้างสูง

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอนในดินจากตัวอย่างดิน 5 แห่ง โดยใช้เวลานับรังสี 12000 วินาที เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดินกับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา ได้ผลดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี มีปริมาณโบรอน 47.62 ± 9.07 ppm

ตัวอย่างที่ 2 ดินข้างสนามฟุตบอลคณะรัฐศาสตร์ มีปริมาณโบรอน 26.23 ± 9.01 ppm

ตัวอย่างที่ 3 ดินจากอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ มีปริมาณโบรอน 42.33 ± 8.84 ppm

ตัวอย่างที่ 4 ดินจากอำเภอแกลง จังหวัดระยอง มีปริมาณโบรอน 37.43 ± 9.07 ppm

ตัวอย่างที่ 5 ดินจากอำเภอนายายอาม จังหวัดจันทบุรี มีปริมาณโบรอน 29.57 ± 8.84 ppm

5.1.4 จากการหาขีดจำกัดของระบบวัดในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอนในดินนั้น สามารถหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์ปริมาณโบรอนในดินได้ เท่ากับประมาณ 0.19 ppm โดยน้ำหนัก จากตัวอย่างดินหนักประมาณ 6.5 กิโลกรัม และระยะเวลาในการวัดรังสี 4000 วินาที

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอน เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการหาปริมาณธาตุโบรอนในดินได้ และสามารถที่จะนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโบรอนในดิน ณ พื้นที่ภาคสนามได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเลือกวัสดุกำบังรังสีแกมมาเพื่อลดแบคกราวด์ ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการจับนิวตรอนมีข้อเสียคือ ค่าแบคกราวด์ในระบบวัดจะสูงเนื่องจากเป็นการวัดรังสีแกมมา ณ ตำแหน่งที่ทำการอาบรังสีนิวตรอนและถ้าสามารถลดค่าแบคกราวด์ให้น้อยลงได้ จะมีผลทำให้ระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมามีความถูกต้องมากขึ้น และสามารถตรวจวัดปริมาณธาตุโบรอนปริมาณน้อย ๆ ในตัวอย่างดินได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาจึงควรเลือกใช้วัสดุที่กำบังรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ได้ดีและเหมาะสมกับธาตุที่จะวิเคราะห์ เพื่อไม่เกิดรังสีแกมมาจากตัวกำบังรังสีแกมมาไปรบกวนค่าพลังงานที่สนใจ

5.2.2 ดันกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรเป็นดันกำเนิดที่ไม่ควรมีรังสีแกมมาเกิดขึ้นในขณะที่วัดปริมาณรังสีแกมมา ตัวอย่างเช่น ในการทดลองนี้ใช้ $^{241}\text{Am} / \text{Be}$ ซึ่งให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 60 keV และ 4.43 MeV ออกมาด้วย ดังนั้นหากต้องการให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้นควรเลือกใช้ ^{252}Cf เป็นดันกำเนิดรังสีนิวตรอนแทนเนื่องจากไม่มีรังสีแกมมาพลังงาน 4.43 MeV เป็นแบคกราวด์

5.2.3 จากผลการทดลองสร้างกราฟเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโบรอนกับความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาที่พลังงาน 478 keV นั้น จะเห็นว่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากโบรอนจะแปรผันตรงตามปริมาณของโบรอนในตัวอย่างดิน โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วง 0 – 250 ppm โดยน้ำหนัก แต่ในช่วงปริมาณ 250 ppm โดยน้ำหนักขึ้นไปนั้น มีความชันลดลง เหตุที่ความชันของเส้นกราฟลดลงนั้นอาจเกิดจากภาวะที่ใส่บรรจุตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ประกอบกับโบรอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าระยะทางที่นิวตรอนเข้าทำอันตรกิริยานั้นเข้าทำไม่ได้ไม่ทั่วถึง เพราะมีนิวตรอนบางส่วนถูกดูดกลืนในดินจึงมีผลทำให้ความชันของกราฟลดลง ดังนั้นหากต้องการวัดปริมาณโบรอนในช่วงที่เกิน 250 ppm

โดยน้ำหนัก ขึ้นไป อาจแก้ไขได้โดยลดขนาดของภาชนะบรรจุตัวอย่างลงเพื่อให้นิวตรอนเข้าทำอันตรกิริยาได้ทั่วถึง

5.2.4 สามารถที่จะนำวิธีการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโบรอนนี้ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ธาตุโบรอนในตัวอย่างอื่น ๆ เช่น ในตัวอย่างทางเกษตรกรรม หรือในชิ้นงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความไวในการวิเคราะห์แม้ว่าจะมีปริมาณธาตุอยู่น้อย

5.2.5 เป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุชนิดอื่น โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา เนื่องจากมีบางธาตุที่มีความไวต่อเทคนิคนี้สูง เช่น คลอรีน และซิลิกอน เป็นต้น

5.2.6 สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนในดินโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากอันตรกิริยาการจับนิวตรอน จากงานวิจัยนี้เพื่อเป็นวิธีการเปรียบเทียบสำหรับการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณของการหาปริมาณธาตุโบรอนโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาในดิน ณ พื้นที่ใด แต่ต้องมีการเปรียบเทียบแก้ไขค่าความหนาแน่น ค่าความชื้น ประเภทของดินและค่านิวตรอนฟลักซ์ในแต่ละพื้นที่ซึ่งแตกต่างกันก่อน ซึ่งถ้าสามารถแก้ค่าต่าง ๆ ได้แล้วก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุโบรอนในดิน ณ พื้นที่ ได้ทุกพื้นที่อย่างสะดวกมากรวดเร็ว และไม่ต้องสุ่มเก็บตัวอย่างดินกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการอีกเลย เช่นเดียวกับองค์การนาซา (NASA) ได้ใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนในการวิเคราะห์ธาตุบนผิวดวงจันทร์เมื่อปี 1964^[17]

5.2.7 สามารถที่จะประยุกต์เป็นวิธีการหาปริมาณธาตุโบรอนในดิน โดยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอน แบบห้องปฏิบัติการเคลื่อนที่ (mobile laboratory) ซึ่งคาดว่าจะเป็วิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ก็ควรมีการออกแบบอุปกรณ์ในระบบออปติคัลและระบบการวัดรังสีใหม่ให้เป็นชุดที่เหมาะสมสามารถเคลื่อนย้ายได้

รายการอ้างอิง

1. คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.
2. Brown, P.H., and Sah, R.N. Techniques for boron determination and their application to the analysis of plant and soil samples. In B. Dell; P.H. Brown; and R.W. Bell (eds.), Boron in soils and Plants: Review, pp. 15-33. London: Kluwer Academic, 1997.
3. พรรณี เสถียรศรี. การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาบริหารธุรกิจเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
4. ปานทิพย์ อัมพรรัตน์. การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาบริหารธุรกิจเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. Yonezawa, C.; Haji Wood, A. K.; Hoshi, M.; Ito, Y.; and Tachikawa, E. The Characteristics of The Prompt Gamma-Ray Analyzing System at the Neutron beam guides of JRR-3M. Nuclear Instruments and methods in physics research A329 (1993): 207-216.
6. Abdel, A. S.; Zohny, E. E. M.; and Zaghoul, R. A. The Use of Neutron Attenuation in Borated Materials as an Indicator of Their Boron Content. Radidt. Phys. Chem. 44 No.1/2 (1994): 233-235.
7. สมพร จงคำ วราวุธ ขจรฤทธิ์ และวันชัย ธรรมวานิช. การศึกษาผลของคอปเปอร์แบบสัมพัทธ์ภาพจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. กรุงเทพมหานคร: กองฟิสิกส์. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2532.
8. Chadwick, J. The Existence of a Neutron. Proc. Roy. Soc. A136 (May 10, 1932) : 692-708
9. Curtiss, L. F. Introduction to Neutron Physics. New Delhi: Affiliated East-West Prees, 1959, อ้างถึงใน ปานทิพย์ อัมพรรัตน์, การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาบริหารธุรกิจเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539. หน้า 11.

10. Das, H. A.; Haanhof, A.; and Vander sloot, H. A. Radioanalysis in geochemistry. The Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., 1989, อ้างถึงใน ปานทิพย์ อัมพรรัตน์, การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปริมาณมากโดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539. หน้า 11.
11. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
12. Chilton, A. B.; Hiltis, J. K.; and Faw, R. E. Principles of Radiation Shielding. New Jersey: Prentice-Hall, 1984, อ้างถึงใน กำธร สุนทรปกาสิต, การหาปริมาณไฮโดรเจนโดยการวัด รังสีพร้อมตัวแกมมา พลังงาน 2.223 MeV จากปฏิกิริยา ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539. หน้า 13.
13. Ehmann, W. D.; and Vance, D. E. Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis. The United States of America: John Willey & Sons, 1991.
14. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. เอกสารการสอน. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
15. สมพร จงก้า. Nuclear Activation Analysis. เอกสารประกอบการสอน. กองฟิสิกส์. สำนักงาน พลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
16. Duffey, D.; El-Kady, A.; and Senftle, F.E. Analytical Sensitivities and Energies of thermal-neutron-capture gamma rays. Nuclear Instruments and Methods 80 (1970): 149-171.
17. Caldwell, R. L.; Mills, W. R.; Allen, L. S.; Bell, P. R.; and Heath, R. C. Science. 152 No.3721 (1966): 457
18. Jenkins, R., and De Vries, J.L. Methods of Quantitative Analysis. Practical X-ray Spectrometry. New York: millan, 1970.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



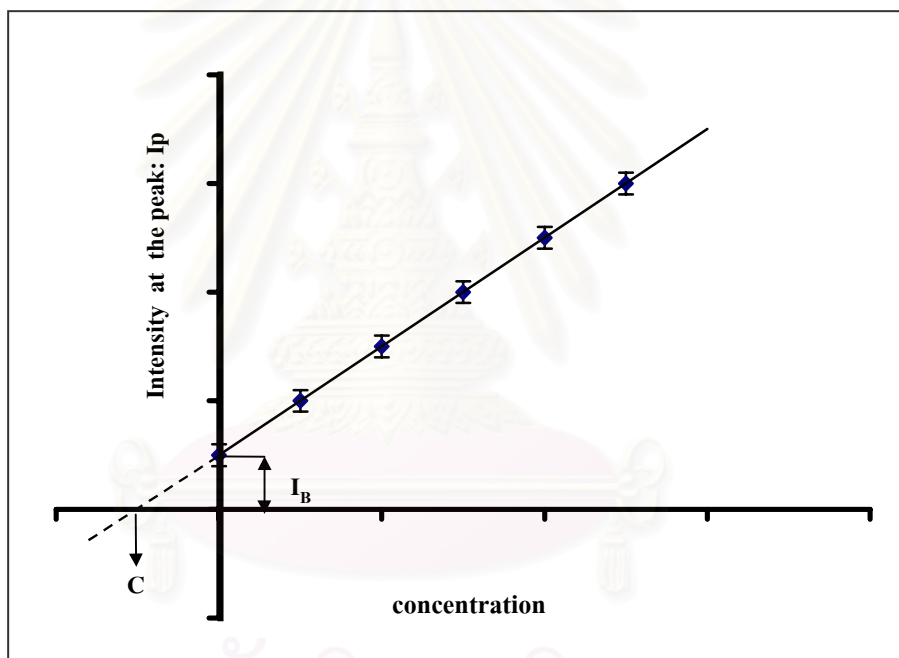
ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เทคนิคการวิเคราะห์

เทคนิคการวิเคราะห์ประมาณธาตุมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1.วิธีการเติมสารมาตรฐาน¹⁸⁾ (Standard Addition) เป็นเทคนิคที่มีการเติมสารมาตรฐานที่ทราบปริมาณชนิดเดียวกันกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ในการทำการวิเคราะห์จึงใช้วิธีวัดความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากธาตุที่สนใจที่จะวิเคราะห์ก่อน และหลังการเติมสารมาตรฐานที่ทราบปริมาณแน่นอนต่าง ๆ กัน จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ (calibration curve) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมาจากธาตุที่สนใจกับความเข้มข้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะต้องเป็นเส้นตรง (linear relationship) ดังแสดงในรูปที่ ก1



รูปที่ ก1 แสดงลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน

จากกราฟรูปที่ ก1 C คือ C คือ ปริมาณของธาตุ

I_B คือ Intercept

ดังนั้นเมื่อต้องการหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่แล้วในตัวอย่างก่อนการเติมสารมาตรฐาน จากกราฟรูปที่ ก1 จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$I_p = mC + I_b$$

เมื่อ C คือ ปริมาณของธาตุ

I_b คือ Intercept

I_p คือ ค่าความเข้มของรังสีพรอมต์แกมมา

m คือ ความชันของเส้นกราฟ

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ธาตุเดียวในสารตัวอย่างที่ซับซ้อน และเป็นเทคนิคที่มีข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะความเข้มข้นต่ำๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Model GC1020 Serial Number 5902318

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows:

Active volume cc Relative efficiency 10 %
 Resolution 2.0 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWTM) at 1.33 MeV
 1.0 keV (FWHM) at 122 keV
 keV (FWTM) at
 Peak/Compton 34 : 1 Cryostat well diameter mm Well depth mm
 Cryostat description or Drawing Number if special 7935-7 (Big Mac)

Physical Characteristics

Geometry Closed-end coaxial

Diameter	<u>43</u> mm	Active volume	<u>56.9</u> cc
Length	<u>41.5</u> mm	Well depth	<u> </u> mm
Distance from window	<u>5</u> mm	Well diameter	<u> </u> mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+)4500 V dc
 Recommended bias voltage V dc (+)4500 V dc
 Leakage current at recommended bias 0.07 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage (-)1.52 V dc
 Capacitance at recommended bias 16 pF

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 μ s

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co		
Energy (keV)	122	1332		
FWHM (keV)	0.86	1.77		
FWTM (keV)	1.58	3.29		
Peak/Compton		43.0:1		
Rel. Efficiency		12.9		

Tested by: Bill Lutz Date: June 1, 1990
 Approved by: Dennis Thompson Date: June 1, 1990

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมา กรานรอด เกิดวันที่ 1 เมษายน พ.ศ.2519 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย