

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เทคนิควิเคราะห์ 3 เทคนิค คือ เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ในการวิเคราะห์แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัยทั้ง 3 เทคนิค คือ เครื่องมือวิเคราะห์รังสีแกมมา และต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนต้องอาบรังสีตัวอย่างด้วยนิวตรอนเร็ว แล้ววัดรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาของนิวตรอน ขณะที่อาบรังสีนิวตรอน ส่วนเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน กับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ต้องอาบรังสีตัวอย่างด้วยนิวตรอนช้า โดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจะวัดรังสีแกมมาที่ออกมาขณะอาบรังสีนิวตรอน แต่เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันจะวัดรังสีแกมมาที่สลายตัวจากไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นภายหลังการอาบรังสีนิวตรอน จากการพิจารณาคุณสมบัติของธาตุทั้งสิ้น คือ อะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม และเหล็ก รวมทั้งข้อมูลจากเอกสารวิจัย พบว่า สำหรับนิวตรอนความเข้มต่ำ ธาตุเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

-เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน : สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก

-เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน : สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุแคลเซียม และเหล็ก

-เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน : สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็ก

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอน ความเข้มชั้นของธาตุนั้นๆ และปริมาณตัวอย่าง ตลอดจนการรบกวนจากแบคกราวด์ในระบบเป็นสำคัญ ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์

ก. เครื่องมือวิเคราะห์รังสีแกมมา ประกอบด้วย

- หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดต์(แทลเลียม) [NaI(Tl)] ขนาด 5 นิ้ว x 5 นิ้ว พร้อมหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (photomultiplier tube ; PMT) ของ BICRON รุ่น 5M5/5
- ฐานหลอดที่มีภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier tube base) ของ BICRON รุ่น 590A
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) ของ ORTEC รุ่น 556 สำหรับหัววัดรังสีแกมมาโซเดียมไอโอไดต์ (แทลเลียม)
- เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer) แบบเคลื่อนย้ายได้ (portable) รุ่น Series 10 plus ของ CANBERRA
- ไมโครคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal microcomputer) และโปรแกรม
- กรมสำเร็จรูปเคอร์มิต (Kermit) สำหรับบันทึกข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง เก็บลงในแผ่นดิสเกตต์ (diskette)

ข. ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

- ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี ที่บรรจุในถังน้ำเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 เซนติเมตร ลึก 110 เซนติเมตร และท่อคอลลิเมเตอร์ (collimator) ทำด้วยอะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สำหรับเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน
- ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ความแรง 90 มิลลิวูรี สำหรับเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

ค. วัสดุกำบังรังสีและห้องพลังงาน

- วัสดุกำบังรังสีแกมมา ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ซึ่งออกแบบให้วางเรียงรอบหัววัดรังสีแกมมาแบบไซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ดังรูปที่ 3.2 (ก) แต่ละก้อนมีขนาด 2 นิ้ว x 7.5 นิ้ว x 3.5 นิ้ว จำนวน 18 ก้อน และขนาด 10 นิ้ว x 16 นิ้ว x 3/4 นิ้ว จำนวน 2 ก้อน

- วัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ได้แก่ แผ่นยางผสมโบรอน (Boron) สำหรับกำบังหัววัดรังสีในเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และโพลีเอทิลีน (polyethylene) ขนาด 30 x 30 x 10 เซนติเมตร สำหรับเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ซึ่งออกแบบเพื่อบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ดังรูปที่ 3.2 (ข)

- ตัวห้องพลังงานนิวตรอน ได้แก่ น้ำ สำหรับเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน และเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เพื่อห้องพลังงานนิวตรอนให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)

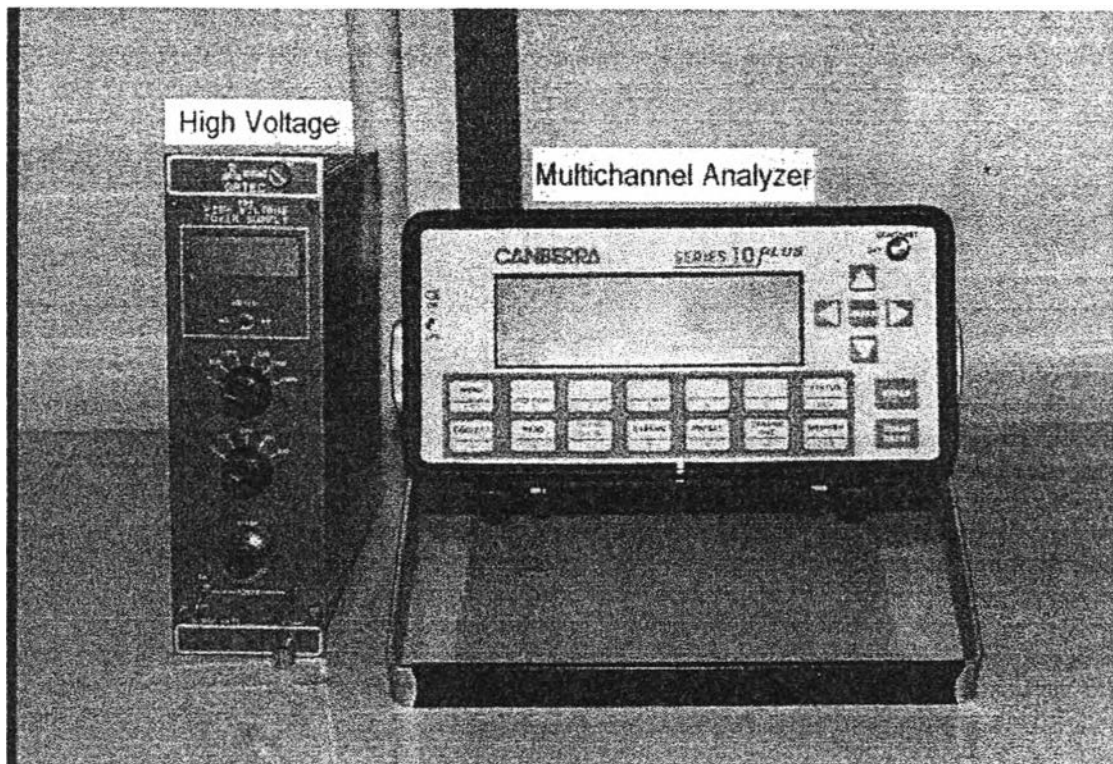
ง. ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก โดยความละเอียดของตัวอย่างที่ 1 ถึง 18 คือ 1 mm จากการร่อนผ่านตะแกรง (sieve) ขนาด 500 μm (1 mesh) แหล่งที่มาของตัวอย่างที่ 12 และ 13 คือจากแหล่งเหมืองของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี และตัวอย่างที่ 17 และ 18 มาจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ (แหล่งเดียวกับตัวอย่างที่ 12 และ 13) โดยตัวอย่างทั้งหมดนี้ ได้ทำการวิเคราะห์โดยวิธีเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) แล้วดังแสดงผลในภาคผนวก ข.

- ตัวอย่างปูนซีเมนต์ 5 ตัวอย่าง คือ ปูนซีเมนต์ตรา A 2 ตัวอย่าง ตรา B, C และ D อย่างละ 1 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างบรรจุในถุงขนาด 50 กิโลกรัม โดยซื้อจากร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง

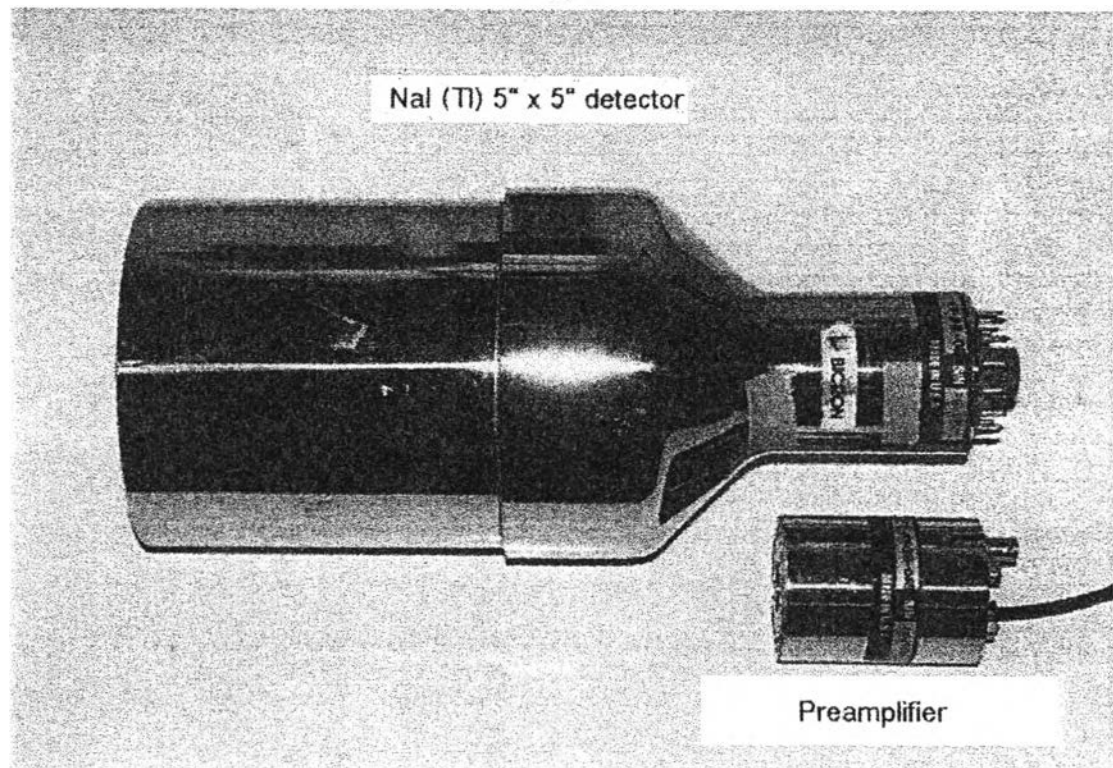
- ตัวอย่างประเภทหินปูน (limestone) สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์แคลเซียม จำนวน 7 ตัวอย่าง

- ตัวอย่างประเภทดินดาน (shale) สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ซิลิกอน และอะลูมิเนียม จำนวน 7 ตัวอย่าง

- ตัวอย่างประเภทแร่เหล็ก จากแหล่งเขาทับควาย สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เหล็ก จำนวน 1 ตัวอย่าง
- ตัวอย่างประเภทศิลาแลง (Latente) จากแหล่ง ส.ผู้พัฒนา สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์แร่เหล็ก และอะลูมิเนียม จำนวน 2 ตัวอย่าง
- ตัวอย่างประเภทดิน จากแหล่งปางอโศก สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์แร่เหล็ก และอะลูมิเนียม จำนวน 1 ตัวอย่าง
- ตัวอย่างประเภทวัตถุดิบ (raw meal) จากขบวนการผลิตที่จะป้อนเข้าสู่หม้อเผา (Kiln) (โปรดดูในภาคผนวก ก.) จำนวน 4 ตัวอย่าง สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 4 ชนิด
- ตัวอย่างประเภทคลinker (Clinker) (โปรดดูในภาคผนวก ก.) จากลานตากคลinker จำนวน 3 ตัวอย่าง และเลือกใช้ 1 ตัวอย่าง จากสายพานส่งเข้าหม้อผสมในชั้นสุดท้าย จำนวน 5 ตัวอย่าง เลือกใช้ 1 ตัวอย่าง สำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 4 ชนิด
- ภาชนะบรรจุตัวอย่าง ได้แก่ ถังไม้ขนาด 32 ซม. x 32 ซม. x 32 ซม. และถังพลาสติกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้นถึง 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากถึง 30 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 31 เซนติเมตร ซึ่งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก



(ก)

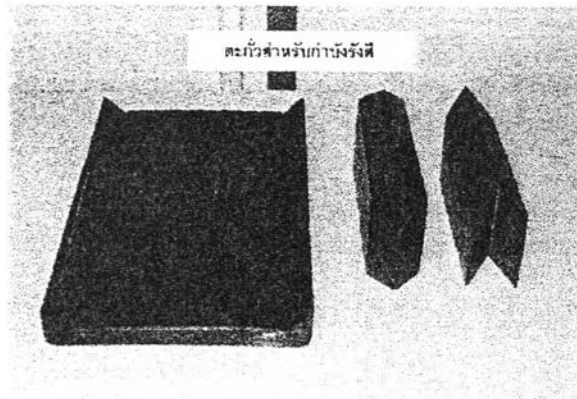


(ข)

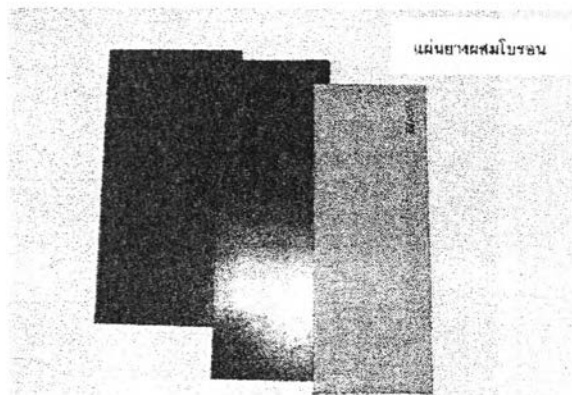
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดรังสีแกมมา

(ก) เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง และแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกตาดสูง

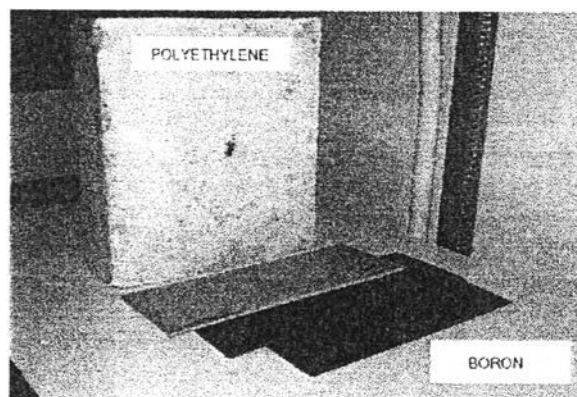
(ข) หัววัด NaI (TI) 5"x5" และภาคขยายส่วนหน้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 (ก) วัสดุกำบังรังสีแกมมา
(ข-ค) แผ่นยางผสมโบรอน และโพลีเอทธีลีน สำหรับกำบังรังสีนิวตรอน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างที่บรรจุในถังพลาสติก

วิธีดำเนินการวิจัย

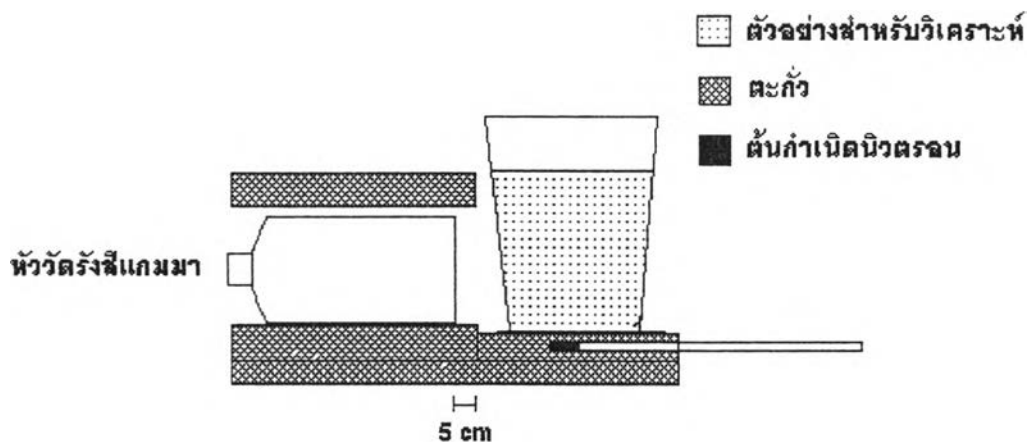
ก. การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

1. การออกแบบและจัดระบบวิเคราะห์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ความแรง 90 มิลลิวูรี ในการอาบรังสีของนิวตรอนเร็ว (fast neutron) และใช้หัววัดรังสีแกมมาโซเดียมไอโอไดต์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว x 5 นิ้ว ในการวัดรังสีพรอมต์แกมมา

ในการจัดระบบอาบรังสีนิวตรอนเร็ว ระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับตัวอย่างที่จะอาบมีความสำคัญมากหากต้นกำเนิดอยู่ห่าง ความเข้มของนิวตรอนเร็วจะลดลง เป็นต้นเหตุให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นจึงต้องจัดต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนให้ใกล้ตัวอย่างมากที่สุด แต่ในขณะเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอน ก็ปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาจากรบบวัดด้วย ดังนั้นถ้าต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ใกล้หัววัดรังสีแกมมาเกินไป จะทำให้แบคกราวด์สูง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ที่มีความแรงเพียง 90 มิลลิวูรี เพื่อจะได้ง่ายต่อการกำบังรังสีจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน เพื่อความปลอดภัยและปรับเปลี่ยนได้ง่าย

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนวางอยู่ใต้ตัวอย่าง และเลือกใช้ตะกั่วเป็นตัวสะท้อนกลับนิวตรอนเร็ว เพื่อเพิ่มฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว โดยวางตะกั่วให้เป็นช่องเพื่อสอดต้นกำเนิดนิวตรอนเข้าไปอยู่ใต้ภาชนะบรรจุตัวอย่าง นอกจากนี้ ตะกั่วยังทำหน้าที่กำบังรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน ไม่ให้เข้าสู่หัววัดโดยตรงอีกด้วย ดังรูปที่ 3.4

ทำการทดสอบวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ที่ระดับพลังงาน 0.847 MeV สำหรับเหล็ก และ 1.779 MeV สำหรับซิลิกอน (Si) โดยจัดระบบวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.4 ทดลองกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ B นาน 2000 วินาที ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดระบบวิเคราะห์ สำหรับเทคนิคการวัดพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

2. การทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ที่ระดับพลังงาน 0.847 MeV ของธาตุเหล็ก และ 1.779 MeV ของธาตุซิลิกอน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กและซิลิกอนในตัวอย่าง

เลือกตัวอย่างที่มีปริมาณธาตุซิลิกอน และเหล็ก เป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป จากตัวอย่างที่ทราบผลวิเคราะห์จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เพื่อใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้

- สำหรับธาตุเหล็ก ใช้ตัวอย่าง raw meal 10, หินปูนตัวอย่างที่ 4, ดินจากแหล่งส. ผู้พัฒนา และปูน B ในการเปรียบเทียบ และทดสอบหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างปูน A, C และ D
- สำหรับธาตุซิลิกอน ใช้ตัวอย่าง raw meal 10, หินปูนตัวอย่างที่ 6, ดินจากแหล่งส. ผู้พัฒนา และปูน B ในการเปรียบเทียบ และทดสอบหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างปูน A, C และ D
- สำหรับแทนแบคกราวด์ที่มาจากตัวอย่าง โดยเลือกตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็ก และซิลิกอนน้อยมาก คือ ตัวอย่างหินปูน 1 ซึ่งมีปริมาณเหล็กและซิลิกอนเท่ากับ 0.06 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่ได้คัดเลือกไว้ และสร้างกราฟเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ที่พลังงาน 0.847 MeV สำหรับธาตุเหล็ก และ 1.779 MeV สำหรับธาตุซิลิกอน กับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุเหล็กและซิลิกอนในตัวอย่าง โดยวัดเป็นเวลานานครั้งละ 2000 วินาทีสำหรับแต่ละตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2. สำหรับธาตุเหล็ก และตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 สำหรับซิลิกอน

คำนวณหาปริมาณธาตุเหล็กและซิลิกอน ในตัวอย่างปูน A, C และ D จากสมการกราฟเปรียบเทียบของเหล็กและซิลิกอน ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 สำหรับธาตุเหล็กและซิลิกอน ตามลำดับ

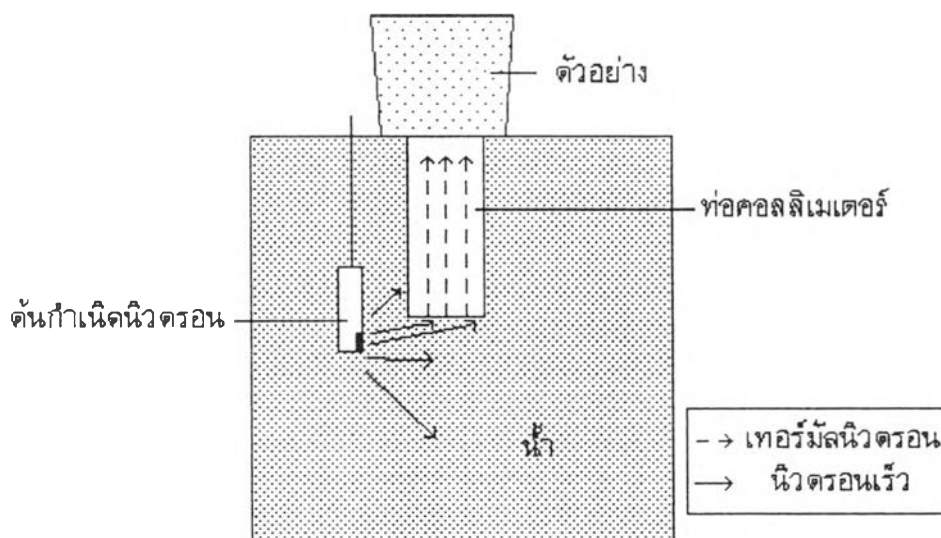
ข. การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

1. การออกแบบและจัดระบบวิเคราะห์

โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี ในการอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) และหัววัดรังสีแกมมาแบบไซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว X 5 นิ้ว ในการวัดรังสีแกมมา

1.1 การออกแบบและจัดระบบอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน ระบบอาบรังสีของเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน ใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนี้ ต้องการเทอร์มัลนิวตรอนในการก่อให้เกิดปฏิกิริยา แต่เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ใช้จะให้นิวตรอนเร็ว จึงจำเป็นต้องหน่วงพลังงานของนิวตรอนจากนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน ได้เลือกใช้น้ำเป็นตัวหน่วงพลังงาน เนื่องจากประหยัด และสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ของระบบอาบรังสี

ดังนั้นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ นี้จึงถูกบรรจุในถังเหล็กที่มีน้ำอยู่เต็ม ถังเหล็กนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 เซนติเมตร และความสูง 110 เซนติเมตร ลำนิวตรอนที่ใช้อาบรังสีนิวตรอนแก่ตัวอย่าง ถูกส่งขึ้นมาตามท่อส่งลำนิวตรอนหรือคอลลิเมเตอร์ (collimator) ซึ่งทำด้วยท่ออะลูมิเนียมปลายปิดหนึ่งข้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ท่อคอลลิเมเตอร์ปลายข้างที่ปิดถูกจุ่มลงน้ำโดยให้ปากท่ออยู่เหนือน้ำ 1 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าภายในท่อ (ระดับน้ำนี้ยังเป็นตัวแปรสำคัญต่อนิวตรอนฟลักซ์ด้วย ถ้าระดับน้ำลดลงจะทำให้ลำนิวตรอนจากปลายด้านล่างของท่อ สูญเสียไปที่ช่องว่างระหว่างผิวน้ำกับตัวอย่างมากขึ้น ปฏิกิริยาจับนิวตรอนที่เกิดก็จะลดลง) ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ที่นอกปลายด้านล่างของท่อคอลลิเมเตอร์ และโดยได้เว้นระยะระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อคอลลิเมเตอร์ด้วยระยะห่างนี้ก็คือ ระยะที่นำหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน นิวตรอนที่ถูกหน่วงพลังงานแล้วจะเข้าสู่ท่อคอลลิเมเตอร์ ภายในท่อซึ่งมีอากาศอยู่ บังคับให้ลำนิวตรอนพุ่งขึ้นสู่ปลายด้านเปิดของท่อ และสัมผัสกับตัวอย่างซึ่งวางอยู่ปลายท่อ ตัวการที่บังคับให้ลำนิวตรอนพุ่งขึ้นด้านบน คือน้ำ เพราะน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนได้ดี น้ำที่ล้อมรอบท่อจะสะท้อนนิวตรอนไปในทางตรงข้าม นิวตรอนจึงวิ่งเป็นลำไปในอากาศขึ้นสู่ปากท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



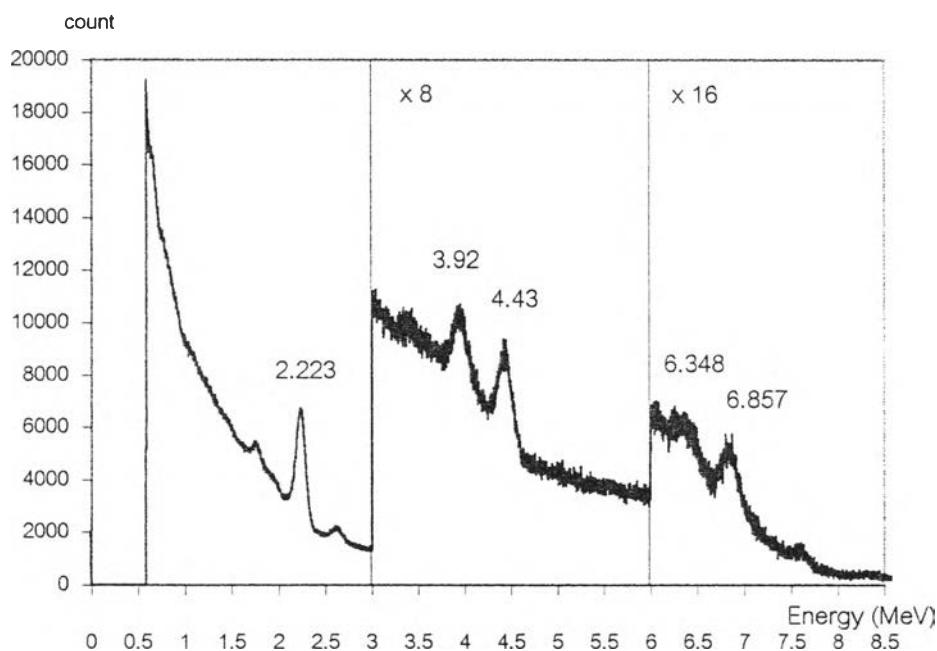
รูปที่ 3.5 ภาพจำลองการเดินทางของลำนิวตรอน สู่ปากท่อคอลลิเมเตอร์

1.2 การออกแบบและจัดระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบโซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว X 5 นิ้ว เนื่องจากปัญหาที่สำคัญของระบบวัดรังสีพรอมต์แกมมา คือ ค่าแบคกราวด์จากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนสูงมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบระบบวัดรังสีแกมมา ให้มีการกำบังรังสีจากแบคกราวด์ได้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้วางหัววัดรังสีแกมมาไว้ในช่องตะกั่ว (ดังแสดงในรูปที่ 3.7) เนื่องจากโฟโตพีคของรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอนส่วนใหญ่ จะอยู่ในช่วงพลังงานสูง ดังนั้นแบคกราวด์ที่ควรพิจารณา จะอยู่ในช่วงพลังงานสูงด้วย พิครังสีแกมมาหลัก ๆ ที่พบในสเปกตรัมของแบคกราวด์ ได้แก่ รังสีแกมมาที่พลังงาน 4.43 MeV จากปฏิกิริยา ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ ของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (เช่นเดียวกับหัวข้อ ก.) รังสีพรอมต์แกมมาจากวัสดุที่ใช้กำบังรังสี จากถังเหล็กที่ใช้บรรจุน้ำ และจากไฮโดรเจน (H) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของน้ำที่ใช้ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 สเปกตรัมของแบคกราวด์ของระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา ด้วยเทคนิควัดพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

| พลังงานของแกมมาที่พบในแบคกราวด์ (MeV) | ที่มาของรังสีแกมมา |
|---------------------------------------|--|
| 2.223 | พรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอนของไฮโดรเจน (H) ในน้ำ |
| 4.43 | จากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน |
| 7.368 | พรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอนของตะกั่ว |
| 6.857 | single escape peak ของพรอมต์แกมมาจากตะกั่ว |
| 6.348 | double escape peak ของพรอมต์แกมมาจากตะกั่ว |
| 7.646 | พรอมต์แกมมาจากการจับนิวตรอนของเหล็ก |
| 7.135 | single escape peak ของพรอมต์แกมมาจากเหล็ก |
| 6.624 | double escape peak ของพรอมต์แกมมาจากเหล็ก |

หมายเหตุ * รังสีแกมมาที่พบในแบคกราวด์นอกจากที่แสดงในตารางที่ 3.1 คือรังสีแกมมาที่มีอัตราความนับได้ค่อนข้างต่ำกวานี้ และไม่ได้อยู่ในช่วงพลังงานที่สนใจ



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมแบคกราวด์ของระบบวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

ในการศึกษาการวิเคราะห์แคลเซียมด้วยเทคนิคพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน เลือกวิเคราะห์ที่พลังงาน 6.420 MeV เนื่องจากที่พลังงาน 4.419 MeV ถูกบดบังจากรังสีแกมมา ที่มาจากต้นกำเนิดนิวตรอนค่อนข้างสูง และที่พลังงานต่ำ 1.942 MeV มีค่าแบคกราวด์ค่อนข้างสูงและอยู่ใกล้กับรังสีพรอมต์แกมมาของไฮโดรเจน (2.223 MeV) ที่พลังงานสองพลังงานหลังนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์แคลเซียมในการทดลองนี้ได้

แต่อย่างไรก็ดี ที่พลังงาน 6.420 MeV มีแบคกราวด์จากดับเบิลเอสเคปพีคของรังสีพรอมต์แกมมาจากตะกั่วที่ 6.348 MeV และดับเบิลเอสเคปพีคของรังสีพรอมต์แกมมาจากเหล็กที่ 6.624 MeV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพลังงานที่สนใจ แต่พบว่าที่ 6.624 MeV จากเหล็กมีค่าน้อยมากเมื่อพิจารณาจาก full peak และซิงเกิลเอสเคปพีค จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ แต่ที่ 6.348 MeV จากตะกั่ววัดได้โฟโตพีคค่อนข้างสูง การหาจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียมสามารถใช้ซิงเกิลเอสเคปพีคที่ 6.857 MeV มาคำนวณสัดส่วน ได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{จำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม} = R_{Ca} - R_{Pb} \left(\frac{B_{Ca}}{B_{Pb}} \right) \quad (1)$$

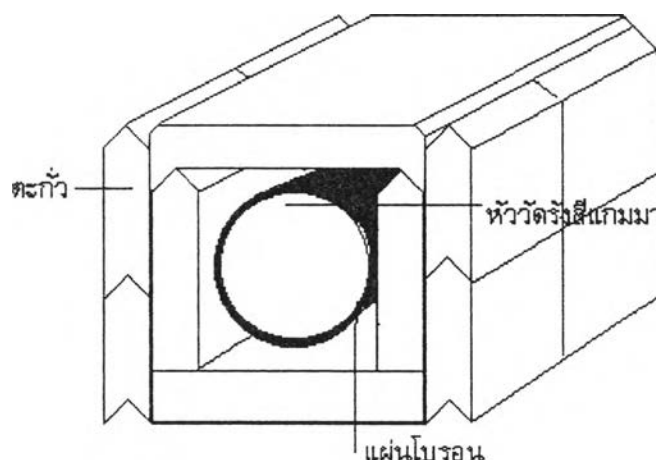
โดย R_{Ca} : อินทิกรัลของพีค 6.420 MeV จากแคลเซียม

R_{Pb} : อินทิกรัลของพีค 6.857 MeV จากตะกั่ว

B_{Ca} : อินทิกรัลของพีค 6.420 MeV จากแบคกราวด์ (ไม่มีแคลเซียม)

B_{Pb} : อินทิกรัลของพีค 6.857 MeV จากแบคกราวด์ (ไม่มีแคลเซียม)

การจัดระบบวัดรังสีแกมมา ให้ห้วงวัดอยู่ด้านข้างของตัวอย่าง และอยู่ไกลจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (จากผลการทดลอง 2.1) เพื่อกั้นการกระเจิงของรังสีนิวตรอนมาเข้าระบบวัด และไม่ให้นิวตรอนเล็ดลอดออกจากท่อคอลลิเมเตอร์โดยไม่ผ่านตัวอย่าง ใช้แผ่นยางผสมโบรอนซึ่งมีความหนา 0.5 เซนติเมตร รองด้านล่างของตะกั่วซึ่งมีห้วงวัดรังสีแกมมาอยู่ภายใน เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีนิวตรอนทะลุไปยังตะกั่วและห้วงวัดรังสีแกมมา และใช้ตะกั่วในการกำบังรังสีแกมมาจากแบคกราวด์ ภายในช่องตะกั่ววางห้วงวัดรังสีแกมมายังมีแผ่นยางผสมโบรอนใต้และบนห้วงวัด เพื่อรักษาห้วงวัดรังสีแกมมา (ดังแสดงในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 ช่องตะกั่วกำบังรังสี

2. การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการวัดรังสีพรอมต์แกมมา

ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมา ปริมาตรของสารตัวอย่าง ความชื้นของสารตัวอย่าง ฯลฯ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ 3 ปัจจัยใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

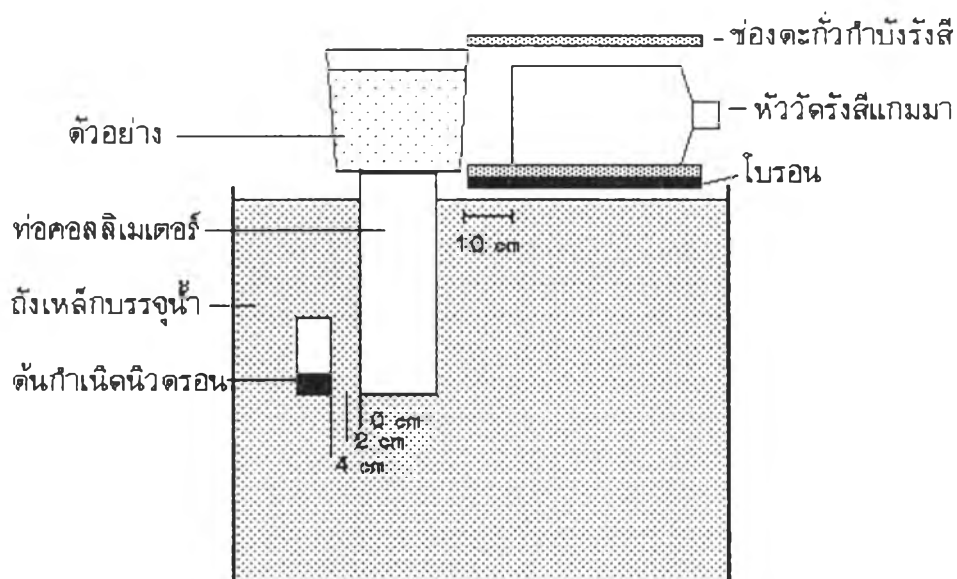
2.1 การศึกษาผลของตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับหัววัดรังสีแกมมา ได้ทดสอบตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน 3 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งกำหนดให้มีระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับปลายท่อคอลลิเมเตอร์ 1 เซนติเมตรเท่ากันหมด (กำหนดจากตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งอยู่ปลายสุดพอดี แต่ทั้งนี้ยังไม่ทราบระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับคอลลิเมเตอร์ ที่ให้เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มากที่สุด จึงทดลองเลือกที่ 1 เซนติเมตร) และใช้ปูน A1 เป็นตัวอย่าง ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนที่ทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 ได้แก่

- ตำแหน่งไกลจากหัววัดรังสีแกมมา (O)
- ตำแหน่งตรงกลางใต้ท่อคอลลิเมเตอร์ (M)
- ตำแหน่งใกล้กับหัววัดรังสีแกมมา (I)

2.2 การศึกษาผลของระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน กับปลายท่อคอลลิเมเตอร์ การทดลองได้นำผลการศึกษาจากหัวข้อ 2.1 มาจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ให้อยู่ที่ตำแหน่งปลายท่อ คอลลิเมเตอร์ด้านที่ไกลจากหัววัด (O) และตำแหน่งของหัววัดรังสีแกมมาอยู่ลึกเข้าไปใน shield 10 เซนติเมตร (B) โดยใช้ตัวอย่างป้อน A1 เช่นเดียวกับการทดลอง 2.1 การทดสอบทำโดยเปลี่ยนระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอนกับปลายท่อคอลลิเมเตอร์ โดยเลื่อนต้นกำเนิดนิวตรอนครั้งละ 2 เซนติเมตร (ดังรูปที่ 3.9) ตำแหน่งที่ทดสอบ ได้แก่

- ระยะห่างจากปลายคอลลิเมเตอร์ 0 เซนติเมตร
- ระยะห่างจากปลายคอลลิเมเตอร์ 2 เซนติเมตร
- ระยะห่างจากปลายคอลลิเมเตอร์ 4 เซนติเมตร

การพิจารณาผลการทดลอง ได้พิจารณาจากค่า จำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม (ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1) ผลการทดลองแสดงไว้ ที่ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 และ 4.12



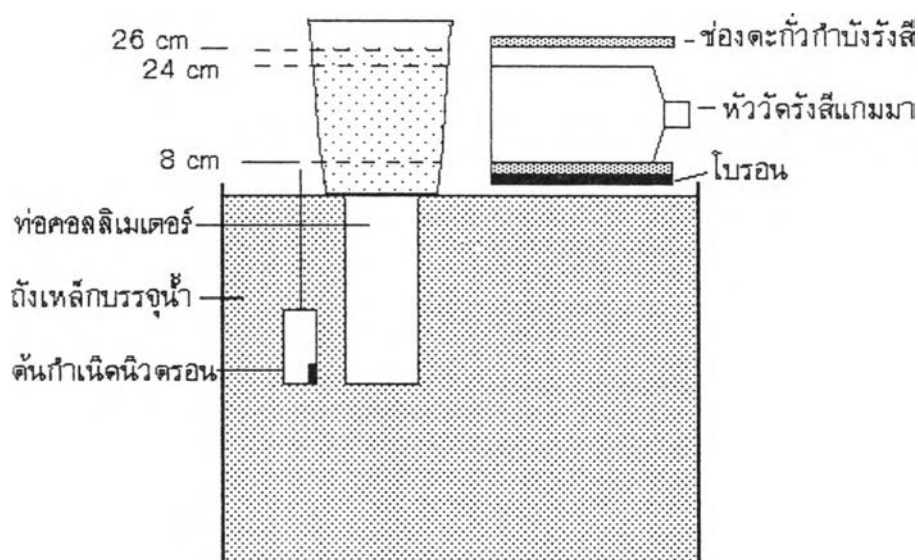
รูปที่ 3.9 ภาพแสดงการทดสอบ ผลของระยะห่างของต้นกำเนิดนิวตรอน กับปลายท่อคอลลิเมเตอร์

2.3 การศึกษาผลของความสูงของตัวอย่างและภาชนะที่ใช้บรรจุ การพิจารณาเลือกภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างในการศึกษา ในการทดลองนี้เลือกใช้ถังพลาสติก เนื่องจากต้อง

2.3 การศึกษาผลของความสูงของตัวอย่างและภาชนะที่ใช้บรรจุ การพิจารณาเลือกภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างในการศึกษา ในการทดลองนี้เลือกใช้ถังพลาสติก เนื่องจากต้องใช้ใส่ตัวอย่างจำนวนหลายชนิด และสะดวกต่อการยกย้าย ขนาดของถังพลาสติกเลือกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้นถัง (ส่วนที่สัมผัสกับลำนิวตรอนเป็นส่วนแรก) มีขนาดใหญ่กว่าท่อคอลลิเมเตอร์เพื่อที่จะได้รับนิวตรอนที่ขึ้นจากท่อได้หมด และสามารถใส่บรรจุตัวอย่างปริมาณมาก (ประมาณ 20 กิโลกรัม) โดยที่ความสูงของตัวอย่างอยู่ในระดับเดียวกับขอบบนหัววัด จากการทดลองบรรจุตัวอย่างพบว่าต้องใช้ถังพลาสติกขนาดกลาง คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้น 25 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปาก 30 เซนติเมตร สูง 31 เซนติเมตร จึงบรรจุตัวอย่างได้ตามที่ต้องการ

อีกปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ คือ ความสูงของตัวอย่าง กล่าวคือเทอร์มินัลนิวตรอนจะสามารถทะลุผ่านตัวอย่างได้จนถึงที่ความสูงระดับหนึ่งเท่านั้น เพราะเมื่อให้ลำเทอร์มินัลนิวตรอนผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ปฏิกริยาจะเริ่มเกิดตั้งแต่ผิว (ความสูง 0 ซม.) ไปจนถึงความสูงระดับต้นๆ ดังนั้นในช่วงนี้ผลการวัดจะแปรผันตามปริมาณสารตัวอย่างที่เกิดปฏิกริยา และที่ความหนาระดับหนึ่ง ที่รังสีนิวตรอนไม่สามารถผ่านขึ้นไปทำปฏิกริยาได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาที่ต้องการวัด ผลการวัดจะเริ่มคงที่ และแปรผันตามความเข้มข้นหรืออัตราส่วนของธาตุนั้นในตัวอย่าง ความหนาในระดับนี้จึงใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้ เรียกว่าความหนาอิ่มตัว (saturation thickness)

การพิจารณาค่าความหนาอิ่มตัวของตัวอย่างต่างๆ อาจใช้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่งนั้นมาพิจารณา ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก โดยมีปริมาณแคลเซียมมากที่สุด ดังนั้นจึงทำการทดสอบกับตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมสูง และปริมาณแคลเซียมต่ำ โดยใช้ผลวิเคราะห์จากวิธีเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) เลือกตัวอย่างแคลเซียมสูงมาทำการทดสอบ การจัดระบบวิเคราะห์นำผลของการทดลอง 2.1 และ 2.2 มาใช้ คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ไกลจากหัววัดรังสีแกมมา และอยู่ห่างจากปลายท่อคอลลิเมเตอร์ 4 เซนติเมตร และจัดให้หัววัดรังสีแกมมาอยู่ลึกเข้ามาจากปากช่องกำบังรังสี 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการทดสอบ ผลของความสูงของตัวอย่าง

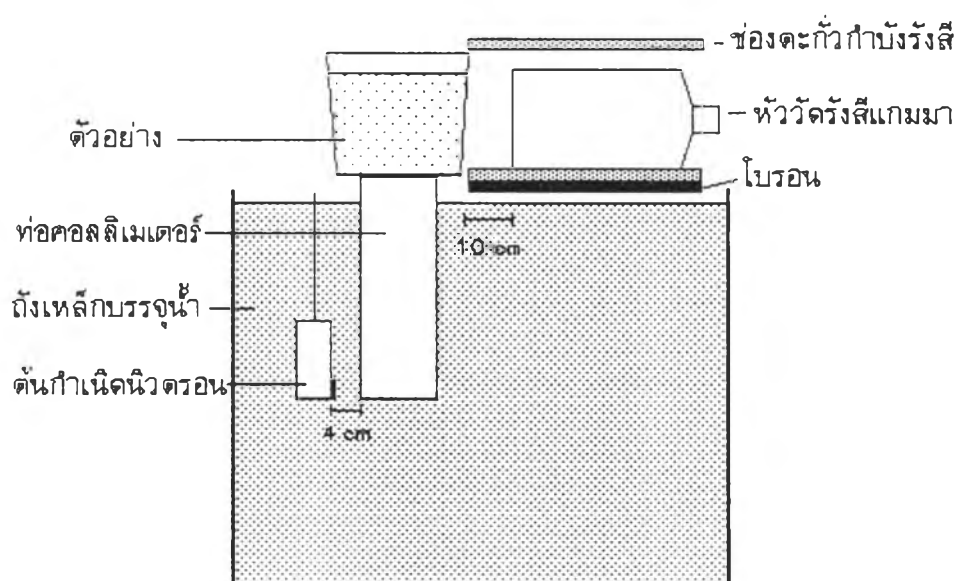
2.3.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวอย่าง กับค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม โดยใช้ตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมสูง คือ ตัวอย่างปูน B มีปริมาณแคลเซียม 41.44% โดยน้ำหนัก การทดลองได้วัดแบบควอดรนต์เพื่อคำนวณค่าอินทิกรัลของพีค 6.420 MeV ต่อดินแดนของพีคของ 6.857 MeV (B_{Ca}/B_{Pb}) จากนั้นวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากตัวอย่างที่ความสูง 4, 8, 12, 16, 20, 24, 26 และ 28 เซนติเมตร (เนื่องจากมีขีดจำกัดของปริมาณสารตัวอย่างที่มีอยู่) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13 และ 4.14

2.3.2 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวอย่างกับค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม โดยใช้ตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำแต่พบว่า มีขีดจำกัดในการวัดตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำมาก ๆ คือ ถ้าปริมาณแคลเซียมในสารตัวอย่างนั้นต่ำเกินไปก็จะไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงต้องแบ่งหัวข้องานทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.2.1 ทดสอบหาตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำสุดที่สามารถวัดได้ โดยเลือกจากตัวอย่าง ได้แก่ ดินดานตัวอย่างที่ 5 (shale 5) ,ดินดานตัวอย่างที่ 7 (shale 7) และหินปูนตัวอย่างที่ 3 (limestone 3) มีปริมาณแคลเซียม 3.66%, 13.69% 21.54% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การทดสอบนี้จัดให้สารตัวอย่างทุกชนิดมีความสูงเท่ากันหมด คือ 26 เซนติเมตร ได้ผลดังตารางที่ 4.7

2.3.2.2 ทดสอบหาความสัมพันธ์ของความสูงของตัวอย่าง กับ ค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม โดยใช้ตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำที่สุดที่ทำการวัดได้ นั่นคือ เลือกตัวอย่างผลการทดลองที่ 2.3.2.1 นำมาทำการทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาจาก ตัวอย่างที่มีความสูง 4, 8, 12, 24, 26 และ 27 เซนติเมตร (เนื่องจากมีขีดจำกัดของปริมาณสาร ตัวอย่างที่มีอยู่) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 และ 4.16

3. การทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 6.420 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบ และหาปริมาณของแคลเซียมในสารตัวอย่าง โดยพิจารณาผลจากการ ศึกษาที่ผ่านมา และจัดการทดลอง ดังนี้คือ จัดตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนที่ด้านไกลจากหัว วัดรังสีแกมมา และอยู่ห่างจากปลายท่อคอลลิเมเตอร์ 4 เซนติเมตร จัดตำแหน่งของหัววัดรังสี แกมมาอยู่ลึกมาภายในช่องกำบังรังสี 10 เซนติเมตร และกำหนดให้ความสูงของสารตัวอย่างอยู่ที่ 25 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงการจัดระบบวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

ได้ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ดังนี้

3.1 การทดสอบสร้างกราฟเปรียบเทียบ และหาปริมาณแคลเซียม ครั้งที่ 1 โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ หินปูนตัวอย่างที่ 2 , หินปูนตัวอย่างที่ 6 , หินปูนตัวอย่างที่ 3 , ตัวอย่างปูนซีเมนต์ B และทดสอบหาปริมาณแคลเซียมในตัวอย่างหินปูนตัวอย่างที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ A ซึ่งมีปริมาณแคลเซียม 54.72%, 45.55%, 21.54%, 41.44%, 55.4% และ 34% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทำการทดลองวัดแบบคกราวด์ และตัวอย่าง 6 ตัวอย่าง นานครั้งละ 2,000 วินาที ได้ผลการคำนวณจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในสารตัวอย่าง (% wt) และค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม ดังแสดงตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.17 และ 4.18

3.2 การทดสอบสร้างกราฟเปรียบเทียบ และหาปริมาณแคลเซียมครั้งที่ 2 โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างสำหรับเปรียบเทียบ คือ หินปูนตัวอย่างที่ 2 ตัวอย่างปูน B ตัวอย่างปูน A และหินปูนตัวอย่างที่ 3 และทดสอบหาปริมาณแคลเซียมในตัวอย่างปูน C ปูน D ทำการทดลองวัดแบบคกราวด์และตัวอย่างทั้ง 6 นานครั้งละ 2,000 วินาที ได้ผลการคำนวณจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในสารตัวอย่าง (% wt) และค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของแคลเซียม ดังแสดงตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.19 และ 4.20

4. การทดลองวัดรังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 7.64 MeV จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบ และหาปริมาณของเหล็กในสารตัวอย่าง โดยใช้สเปกตรัมเดียวกับการวิเคราะห์แคลเซียม การจัดระบบการวิเคราะห์ทำเช่นเดียวกับการวิเคราะห์แคลเซียมทุกประการ โดยหาอินทิกรัลของโฟโตพีค 7.64 MeV ได้ผลการสร้างกราฟเปรียบเทียบ ดังแสดงตารางที่ 4.11 และ 4.12 และรูปที่ 4.21 , 4.22 และ 4.23

ค. การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนี้ แตกต่างจากการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคพรอมต์แกมมา ในหัวข้อ ก. และ ข. เนื่องจากเทคนิคพรอมต์แกมมาสามารถทำการวัดรังสีที่เกิดขึ้นได้ในทันที (prompt) ส่วนเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ทำการวัดรังสีแกมมาที่สลายตัวจากไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน สำหรับธาตุที่ควรวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันนี้ พิจารณาเลือกจากค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา (cross section ; σ) ดังต่อไปนี้

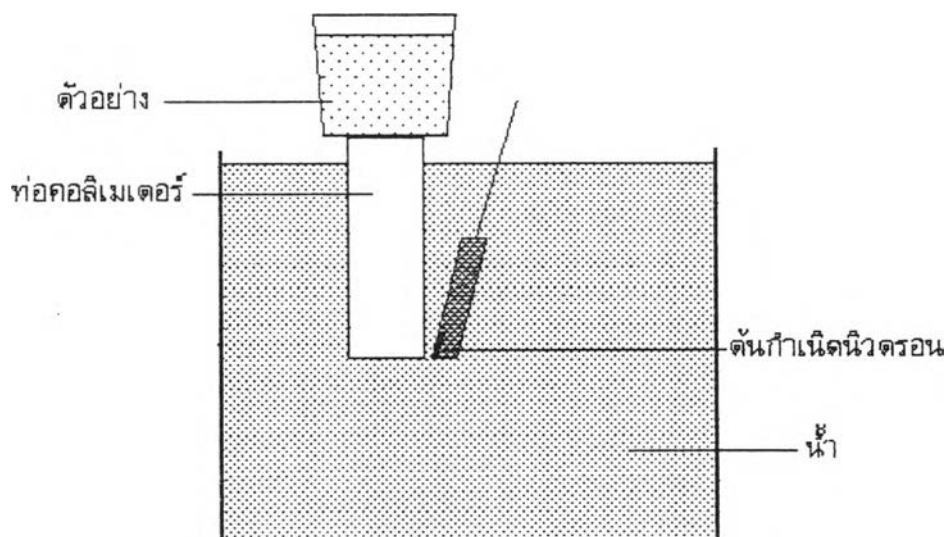
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

| ธาตุ | abundance (%) | จากปฏิกิริยา | cross section (σ , bams) | half life of product | พลังงาน (MeV) |
|------|---------------|---|----------------------------------|----------------------|---------------|
| Al | 100 | $^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$ | 0.232 ± 0.003 | 2.3 min | 1.78 |
| Ca | 0.185 | $^{48}\text{Ca} (n, \gamma) ^{49}\text{Ca}$ | 1.09 ± 0.14 | 8.8 min | 3.084 |
| Fe | 0.31 | $^{58}\text{Fe} (n, \gamma) ^{59}\text{Fe}$ | 1.4 ± 0.1 | 45.5 d | 1.292 |
| Si | 3.09 | $^{28}\text{Si} (n,p) ^{28}\text{Al}$ | | 2.3 min | 1.78 |

จากตารางจะเห็นได้ว่า หากใช้นิวตรอนที่มีฟลักซ์ต่ำ ธาตุที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสี ได้แก่ แคลเซียม และ อลูมิเนียม ที่พลังงาน 3.07 MeV และ 1.779 MeV ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตสั้น โอกาสของการเกิดปฏิกิริยาสูง และพลังงานของรังสีแกมมาเหมาะสมสำหรับการวัด โดยได้ทดสอบความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ของธาตุทั้งสองจากผลการวัด พบว่า ไม่สามารถทำการวิเคราะห์แคลเซียมโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันได้ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ในธรรมชาติ (natural) ของแคลเซียม-49 ที่เกิดปฏิกิริยามีเพียง 0.185% ของแคลเซียมในธรรมชาติ และอะลูมิเนียมที่เกิดปฏิกิริยามี 100% งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันเพื่อการวิเคราะห์อะลูมิเนียมเท่านั้น

1. การออกแบบและจัดระบบอานรังสีเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{238}\text{Pu-Be}$ ความแรง 5 คูรี

ลักษณะการอานรังสีทำเช่นเดียวกับงานวิจัย ข. (การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน) คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนถูกจัดอยู่ในน้ำ มีการส่งผ่านลำนิวตรอนขึ้นมาทางท่อคอลลิเมเตอร์อะลูมิเนียม ตัวอย่างบรรจุใส่ภาชนะพลาสติกวางอยู่บนปากท่อคอลลิเมเตอร์ การอานรังสีนิวตรอนแก่ตัวอย่างเริ่มจากด้านใต้ของตัวอย่าง เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันใช้ช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอนเช่นเดียวกับ เทคนิคพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน แต่ระบบอานรังสีนิวตรอนเพื่อเทคนิคนี้ ต่างจากระบบอานรังสีนิวตรอนเพื่อเทคนิคพรอมต์แกมมาเล็กน้อยคือ การจัดระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับปลายท่อคอลลิเมเตอร์ ในเทคนิคพรอมต์แกมมามีการจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนให้อยู่ในระยะห่าง 4 เซนติเมตร จากปลายท่อคอลลิเมเตอร์ จะให้ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากเทอร์มัลนิวตรอนที่ดีที่สุด แต่ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ไม่ต้องคำนึงถึงค่าเบคกราวด์จากต้นกำเนิดนิวตรอน ที่มีผลต่อการวัด เพราะสามารถแยกระบบวัดรังสีแกมมาไว้ในที่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนได้ การจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน จึงสามารถจัดให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ที่ปลายคอลลิเมเตอร์ได้ เพื่อให้ลำนิวตรอนสามารถอานตัวอย่างได้อย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 3.12

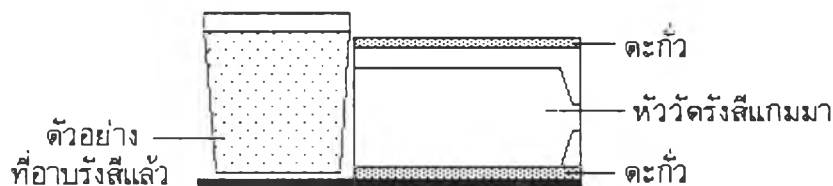


รูป 3.12 ภาพแสดงการจัดระบบอานรังสีนิวตรอน สำหรับเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

2. การออกแบบและจัดระบบวัดรังสีแกมมา โดยใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ขนาด 5 นิ้ว x 5 นิ้ว

รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นภายหลังการอาบรังสีนิวตรอนของอะลูมิเนียม มีค่าครึ่งชีวิตสั้นคือ 2.28 นาที ดังนั้นการจัดระบบวัดรังสีแกมมาจึงควรจัดให้อยู่ใกล้กับบริเวณที่อาบรังสีมากที่สุด ซึ่งมีความเป็นไปได้ 2 ทาง ทางแรกคือ จัดให้ระบบวัดรังสีแกมมาอยู่ที่จุดอาบรังสีนิวตรอน เมื่อครบกำหนดเวลาการอาบรังสี ก็เกิดต้นกำเนิดนิวตรอนลงที่กำบังรังสี และทำการวัดรังสีแกมมา จากตัวอย่างทันทีแต่ปัญหาคือ ค่าแบคกราวด์สูง เพราะต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้มีความแรงแรงรังสีสูง และถูกจัดให้อยู่ในถังน้ำ เมื่อตั้งต้นกำเนิดนิวตรอนลงน้ำ ก็ยังมีรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย (ดังที่อธิบายในงานวิจัย ข. หัวข้อ 2) และยังมีปัญหาเมื่อต้องการจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้งที่มีการอาบรังสี ดังนั้นการจัดระบบวัดรังสีแกมมาในงานวิจัยนี้จึงใช้ทางเลือกที่ 2 คือ จัดให้ระบบวัดรังสีแกมมาอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดอาบรังสีนิวตรอน และมีค่าแบคกราวด์ต่ำ

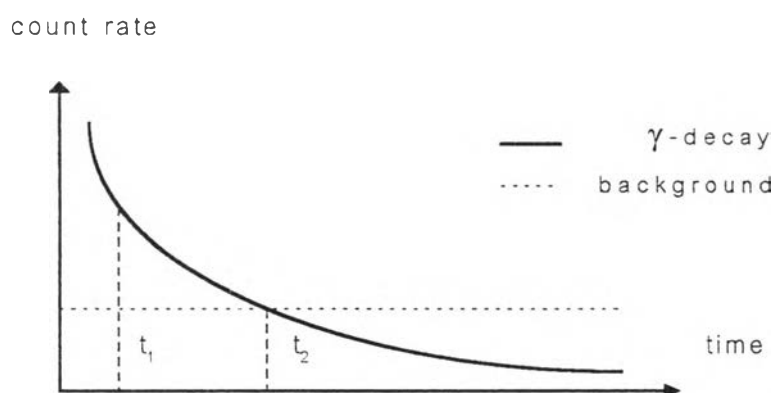
หัววัดรังสีแกมมาโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ถูกจัดวางอยู่ในช่องกำบังรังสีซึ่งทำด้วยตะกั่ว (เช่นเดียวกับงานวิจัย ข.) ตำแหน่งหัววัดรังสีแกมมา อยู่ที่ริมของช่องกำบังรังสีพอดี เนื่องจากบริเวณที่ทำการทดลองไม่มีต้นกำเนิดรังสีอื่นใด การจัดให้หัววัดอยู่ใกล้กับตัวอย่างมากที่สุด จะทำให้มีประสิทธิภาพการวัดที่ดีที่สุด ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมาแสดงไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจัดระบบวัดรังสีแกมมา

3. การกำหนดเวลาที่ทำกรอาบรังสีนิวตรอน เวลาที่ทำกรอาบรังสีนิวตรอนแก้ตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ เนื่องจากในขณะที่มีการอาบรังสีนิวตรอน อะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นจะเกิดขึ้น และเริ่มสลายตัวให้รังสีแกมมาไปพร้อม ๆ กัน(ดังที่อธิบายไว้ในบททฤษฎี) จนกระทั่งอัตราการเกิดและอัตราการสลายตัวเท่า ๆ กัน ที่เวลานี้ เรียกว่า เวลาอิ่มตัวของกรอาบรังสี (saturated time of activation) พบว่าเท่ากับ 5-6 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของธาตุนั้น การอาบรังสีนิวตรอนโดยใช้เวลาเท่ากับเวลาอิ่มตัว เหมาะสำหรับธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองธาตอะลูมิเนียม ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.28 นาที ดังนั้นจึงกำหนดให้ อาบรังสีนิวตรอนนาน 15-20 นาที

4. การทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับการวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากนิวตรอนแอคติเวชัน เทียบกับค่าแบคกราวด์พลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยานิวตรอนแอคติเวชันของอะลูมิเนียม อยู่ในระดับพลังงาน 1.78 MeV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแบคกราวด์ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของลูกหลานโปแตสเซียม (K-daughter) ที่ 1.78 MeV จากตัวอย่างที่ใช้เอง และจากผนังและพื้นห้องที่ทำการทดลองด้วย จากทฤษฎีพบว่ารังสีแกมมาที่เกิดขึ้นหลังจากการอาบรังสี มีอัตราการสลายตัวแบบเอกซ์โปเนนเชียลที่ลดลง (decreasing exponential decay) กล่าวคืออัตราการสลายตัวหลังจากสิ้นสุดการอาบรังสีทันที ($t=0$ วินาที) จะมีอัตราสูงสุดและจะค่อย ๆ ลดลงจนหมดไป ขณะเดียวกันค่าแบคกราวด์จะคงที่อยู่ที่ระดับหนึ่ง ช่วงเวลาที่อะลูมิเนียมสลายตัวให้รังสีแกมมาสูงกว่าแบคกราวด์คือช่วง $t=0$ วินาที ถึง $t=t_2$ แต่ในทางปฏิบัติต้องเสียเวลาช่วงหนึ่งไปในการย้ายตัวอย่าง ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง t_1 เวลาการวัดจริงคือช่วง t_1 ถึง t_2 (ดังแสดงในรูปที่ 3.14) ดังนั้นจึงต้องกำหนดระยะเวลาในการวัดให้เหมาะสม เพื่อที่จะได้ค่าวัดที่มาจากปฏิกิริยาอาบนิวตรอน สูงกว่าค่าวัดจากแบคกราวด์



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสลายตัวให้รังสีแกมมากับเวลา (หลังจากสิ้นสุดการอาบรังสี)

การทดสอบทำโดยวัดแบคกราวด์จากตัวอย่างก่อนที่จะนำไปอบรังสีนิวตรอน เป็นเวลา 50, 100, 120, 150 และ 200 วินาทีตามลำดับ และอบรังสีนิวตรอนแก่ ตัวอย่างปูน A1หนัก 20 กิโลกรัม เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งและนำมาวัดนาน 50, 100, 120, 150 และ 200 วินาที ตามลำดับ ทำการอินทิเกรต (integrate) โฟโตพีคที่ระดับพลังงาน 1.78 MeV ทั้งที่สเปกตรัมของแบคกราวด์และที่สเปกตรัมของตัวอย่างที่อบรังสี ทำการคำนวณหาสัดส่วนของพีคต่อแบคกราวด์ (integral peak to background ratio ; P/B) จากสูตร

$$\text{Integral P/B} = \frac{P}{B} \quad (3)$$

โดย P : อินทิกรัลของโฟโตพีคที่ 1.78 MeV จากอะลูมิเนียม

B : อินทิกรัลของโฟโตพีคที่ 1.76 MeV จากแบคกราวด์

นำผลการวัดมาเปรียบเทียบกันและเลือกค่าที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองต่อไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.24

5. การทดสอบวัดรังสีแกมมาจากนิวตรอนแอกติเวชันแบบซ้ำ (cyclic activation) จากผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสม สำหรับการวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างที่อบรังสีนิวตรอนแล้วพบว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 50 วินาที ซึ่งจัดว่าเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก จึงนำเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบซ้ำมาใช้

เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันแบบซ้ำ (Cyclic neutron activation analysis) คือ การนำตัวอย่างไปอบรังสีนิวตรอนตามเวลาที่กำหนด (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ เวลาอิมิตัว) และนำมาวัดตามเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างไปอบรังสี และนำมาวัดเช่นเดิม โดยเพิ่มรวมกับสเปกตรัมครั้งก่อน ทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าการวัดที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการทำนิวตรอนแอกติเวชันแบบซ้ำ 10 ครั้ง เนื่องจากจำนวนนับในแต่ละครั้งอยู่ในหลักร้อย และต้องการให้จำนวนนับอยู่ในหลักพัน

การทดสอบการอบรังสีแบบซ้ำ จะทำกับตัวอย่างปูน A1 โดยใช้เวลาอบรังสีนิวตรอนนาน 20 นาที และทำการวัดรังสีแกมมาตาม 50 วินาทีในแต่ละครั้ง จำนวนครั้งของการอบรังสีและวัดรังสีแกมมา คือ 10 ครั้ง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.25

6. การทดสอบวัดรังสีแกมมาจากการอบนิวตรอนแบบซ้ำ กับตัวอย่างจำนวน 4 ชนิด เพื่อทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบ ได้ทำการทดสอบโดยใช้เวลาในการอบรังสีนิวตรอน และเวลาในการวัดรังสีแกมมาที่กำหนดไว้จากข้อ 3, 4 และ 5 กับตัวอย่างซึ่งทราบปริมาณอะลูมิเนียมจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ จำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ หินปูนตัวอย่างที่ 4 (L4) ดินดานตัวอย่างที่ 3 (S3) ตัวอย่างปูน A1 และปูน B ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.26 และ 4.27

7. การทดสอบวัดรังสีแกมมาจากการอบนิวตรอนแบบซ้ำ กับตัวอย่างจำนวน 6 ชนิด เพื่อทำการหาปริมาณของอะลูมิเนียมในตัวอย่าง จากกราฟเปรียบเทียบ ได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 6 โดยใช้ตัวอย่าง ปูน B, หินปูนตัวอย่างที่ 4 (L4), raw meal 10 (RM10) และตัวอย่างปูนซีเมนต์สำหรับหาปริมาณอะลูมิเนียม 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ปูน C, ปูน D และปูน A2 และสร้างกราฟเปรียบเทียบเช่นเดียวกับตัวอย่างในข้อ 6 เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณของอะลูมิเนียมในตัวอย่างอื่น ๆ ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.28