การตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ : กรณีศึกษาโรงงานผลิตแผ่นยิมซัม

นางสาว ทิตย์ลดา พิชยศาศวัตกุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-14-1754-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF RADON-222 EMANATION RATE FROM GYPSUM BOARD CONTAINING PHOSPHOGYPSUM : A GYPSUM BOARD FACTORY CASE STUDY

Miss Titlada Pichayasasvatagul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-1754 -3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม
โดย	นางสาว ทิตย์ลดา พิชยศาศวัตกุล
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ จเด็จ เย็นใจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ จเด็จ เย็นใจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทิตย์ลดา พิชยศาศวัตกุล : การตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ : กรณีศึกษาโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม. (MEASUREMENT OF RADON-222 EMANATION RATE FROM GYPSUM BOARD CONTANING PHOSPHOGYPSUM : A GYPSUM BOARD FACTORY CASE STUDY) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุพิชชา จันทรโยธา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.จเด็จ เย็นใจ, 70 หน้า. ISBN 974-14-1754-3.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน-222 จากตัวอย่างแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ต่างกัน ระบบการตรวจวัดเป็นระบบปิดที่บรรจุแผ่นตัวอย่างไว้ภายในและปล่อยให้เกิดสมดุลทางกัมมันตภาพรังสีของก๊าซเรดอน และทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในภาชนะปิดด้วย 2 วิธี คือ วิธีการใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับ และวิธีการวัดโดยใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซเรดอน RAD-7 ผลการศึกษาพบว่า อัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอนต่อมวลของแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 30, 35 และ 38 % ที่ได้จากการใช้เทคนิคการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มีค่าเท่ากับ 21.707 ± 3.45, 38.34 ± 6.10 และ 23.213 ± 3.59 $\mu Bq \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ ตามลำดับ ในขณะที่ผลการศึกษาโดยใช้เครื่องมือวัด RAD-7 ให้ค่าที่สูงกว่าการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ 14.5 – 15 % นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากปริมาณเรเดียมที่มีทั้งหมดในแผ่นยิปซัม ซึ่งพบว่า แผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 30% ให้ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 สูงสุด คือ 11%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต ทิตย์ลดา พิชยศาศวัตกุล

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4570335321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD:EMANATION RATE/RADON-222 /PHOSPHOGYPSUM / GYPSUM BOARD

TITLADA PICHAYASASVATAGUL : MEASUREMENT OF RADON-222 EMANATION RATE FROM GYPSUM BOARD CONTAINING PHOSPHOGYPSUM : A GYPSUM BOARD FACTORY CASE STUDY. THESIS ADVISOR: AS SOC. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, PhD., THESIS COADVISOR : CHADET YENCHAI, 70 pp. ISBN 974-14-1754-3.

This research aims to measure the radon emanation rate from gypsum board that contained the different contents of phosphogypsum. The emanation rate was measured by hermetically closing the sample in chamber and allowing the radon activity to build up with time until it reaches the equilibrium before doing the measurement. The radon concentration in the chamber was measured by 2 methods; activated charcoal adsorption and radon gas instrument, namely RAD7. The result of mass emanation rate from gypsum boards containing 30, 35 and 38% were 21.707±3.45, 38.34±6.10, 23.213±3.59 $Bq.kg.^{-1}s^{-1}$, respectively, where charcoal adsorption method was applies. While the level of emanation rate measured by using RAD-7 instrument gave 14.5–15% higher than the level obtained by the charcoal adsorption method. In addition, the radon emanation fraction was also calculated and the highest value was found to be 11% in gypsum board containing 30% phosphogypsum.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Nuclear Technology	Student's signature	Titlada P.
Field of study	Nuclear Technology	Advisor's signature	S. Chanyotha
Academic year	2005	Co-advisor's signature	

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.สุพิชชา จันทรโยธา ที่ให้ความกรุณาสำหรับคำปรึกษา ข้อชี้แนะ และแนวทางการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการสละเวลาตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ จเด็จ เย็นใจ ที่กรุณาให้คำแนะนำ สำหรับการดำเนินงานวิจัยทั้งทางทฤษฎี และวิธีการทดลอง ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัทไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นยิปซัม เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณประพต บงกชมาลี ผู้จัดการโรงงานสาขาแหลมฉบัง และคุณวันเพ็ญ กอแก้ว Process Control ประจำโรงงานสาขาแหลมฉบัง บริษัทไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน) สำหรับการติดต่อ และประสานงานด้านเทคนิค และข้อมูลของแผ่นยิปซัม

ขอขอบคุณ คุณชุติมา กรานรอด สำหรับความช่วยเหลือ ในการดำเนินงานวิจัยทั้งทางทฤษฎี และการทดลอง จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณนันทนิช จิตต์ธรรม ที่คอยช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และคอยให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ ทุนบัณฑิตวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกๆท่าน และพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือ ความห่วงใย

ขอขอบคุณ คุณภานุวัฒน์ มาเสถียร สำหรับความช่วยเหลือ ความห่วงใย และให้คำปรึกษาตลอดมา

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และให้การสนับสนุนทุกๆด้าน ด้วยดีเสมอมา จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2. ทฤษฎี 4

2.1 แผ่นยิปซัมและองค์ประกอบของแผ่นยิปซัม 4

2.1.1 แผ่นยิปซัม 4

2.1.2 แร่ยิปซัม 5

2.1.3 ฟอสฟอยิปซัม 6

2.1.4 ดีซัลฟอยิปซัม 10

2.1.5 ลาฟาจ 11

2.2 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive Decay) 11

2.3 การสลายตัวแบบอนุกรม (Serial Decay) 14

2.3.1 ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ 14

2.3.2 ภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์ 17

2.4 คุณสมบัติของเรดอน-222 (Radon Characteristics) 20

2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน 21

บทที่ หน้า

2.5.1 Integrative Sampling 22
2.5.2 Grab Sampling 23
2.5.3 Continuous Active Sampling 23
2.6 แร่โมนาไซต์ 26
2.7 ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา 27
2.7.1 กลไกการทำงานของหัววัดสารรังสีกึ่งตัวนำ 28
2.7.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมา 30
2.8 อัตราการปลดปล่อยเรดอน (Radon Emanation Rate) 31
2.9 สัดส่วนการปลดล่อยเรดอน-222 (Radon Emanation Fraction) 34
3. วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย 35
3.1 วัสดุ และสารเคมี 35
3.2 อุปกรณ์ 35
3.3 เครื่องมือ 35
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง 36
3.5 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง 37
3.6 การดำเนินการวิจัย
3.6.1 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม 39
3.6.2 การคำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม 46
4. สรุปผลการทดลอง 50
4.1 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิค การดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ 50
4.1.1 การตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ 50
4.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ มาตรฐาน ด้วยวิธีหยดสารละลายมาตรฐาน เรเดียม-226 51
4.1.3 ผลการตรวจวัดอัตรานับรังสีแกมมาของตัวอย่างแผ่นยิปซัม โดยใช้ถ่าน กัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเรดอน 52
4.2 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิค การใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7 53
4.3 การคำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมซึ่งใช้เทคนิค แกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี หาความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ที่มี อยู่ในแผ่นยิปซัม 55

บทที่ หน้า

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 57
5.1 สรุปผลการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมโดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ 57
5.2 สรุปผลการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมโดยใช้เทคนิคการใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7 58
5.3 สรุปผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ด้วยเทคนิคแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี 59
5.4 ข้อเสนอแนะ 59
รายการอ้างอิง 61
ภาคผนวก ก 65
ภาคผนวก ข 66
ภาคผนวก ค 68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบของแผ่นยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัย 5

2.2 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีในฟอสฟอยิปซัมจากกระบวนการผลิตแบบ Wet Process ที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา 8

2.3 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีใน Phosphate Slag จากกระบวนการผลิตแบบ Wet Process ที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา 9

2.4 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีในฟอสฟอยิปซัมโดยฝ่ายประเมินค่ากัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม กองการวัดกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ 9

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของฟอสฟอยิปซัม 10

2.6 คุณสมบัติทางเคมีของฟอสฟอยิปซัม 10

2.7 จุดเดือดของก๊าซต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอากาศ 26

2.8 ปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอากาศ 26

4.1 ผลการนับรังสีแกมมาพลังงาน 609 keV. ของบิสมัท-214 จากถ่านกัมมันต์ 2 ภาชนะต่อกัน 50

4.2 ผลของความแรงรังสีของสารละลายเรเดียมที่หยดลงในถ่านกัมมันต์ 51

4.3 อัตราการนับรังสีแกมมาที่บิสมัท-214 พลังงาน 609 keV. 52

4.4 อัตราการนับรังสีแกมมา ก่อนและหลังแก้ค่าประสิทธิภาพของระบบ และปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอน และอัตราการปลดปล่อยจากตัวอย่างแผ่นยิปซัม 3 ชนิด ต่อมวล และพื้นที่ผิวด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ 53

4.5 ผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมด้วยเครื่องมือ RAD7 54

4.6 อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากตัวอย่างแผ่นยิปซัม 3 ชนิดต่อมวล และพื้นที่ผิว 54

4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในตัวอย่างแผ่นยิปซัมด้วยด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และเครื่องมือ RAD7 55

4.8 ความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ในแผ่นยิมซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 56

4.9 สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิมซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 56

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะของผลึกแร่ยิปซัม	6
2.2 กระบวนการการผลิตปุ๋ยเคมี	7
2.3 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อเรเดียม-226 กับเวลา	17
2.4 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของบิสมัท-214 ต่อเรดอน-222 กับเวลา	19
2.5 อนุกรมการสลายตัวของธาตุ ^{238}U, ^{235}U และ ^{232}Th	21
2.6 เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7	24
2.7 ลักษณะโครงสร้างภายในของ RAD7	24
2.8 สเปคตรัมรังสีแอลฟาจากเครื่อง RAD7	25
2.9 ลักษณะของผลึกโมนาไซต์	27
2.10 แผนภาพของหัววัดรังสีแบบ HPGe	29
2.11 แสดงแผนผังการจัดระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา	29
2.12 การหาความเข้มรังสีสุทธิ (Net peak area)	30
3.1 ภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม	37
3.2 อุปกรณ์การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน	38
3.3 ภาชนะพลาสติกบรรจุถ่านกัมมันต์	38
3.4 ภาชนะพลาสติกบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ปิดผนึกแล้ว	38
3.5 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ระบบปิดที่ใช้ตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอน จากแร่โมนาไซต์	39
3.6 การตรวจวัดประสิทธิภาพของก๊าซเรดอน จากแร่โมนาไซต์	40
3.7 ภาชนะพลาสติกที่ต่อ 2 ภาชนะเข้าด้วยกัน	40
3.8 แผนภาพ การต่ออุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นเรดอนกับภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์	41
3.9 รูปถ่าย การต่ออุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นเรดอนกับภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์	41
3.10 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	44
3.11 การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	45
3.12 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ระหว่างภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม กับเครื่องวัด RAD-7	46

ภาพประกอบ หน้า

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีของสารละลายเรเดียม กับอัตรานับรังสีแกมมา ของบิสมัท-214 51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

..

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในแต่ละปี ได้มีวัสดุเหลือใช้จำนวนมากที่ถูกผลิตขึ้นทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และครัวเรือน ส่วนใหญ่วัสดุเหลือใช้เหล่านี้ จะถูกจัดการด้วยวิธีการต่าง ๆ กันเช่น การเผาทำลาย การฝังกลบ การกองทิ้งไว้ ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นวิธีการซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และนอกจากนี้ยังส่งผลกระทบเรื่องของพื้นที่ในการจัดการกับวัสดุเหลือใช้ และคุณภาพของไอเสียที่เกิดจากการเผาแล้ว ดังนั้นจึงควรหาวิธีการที่สามารถจัดการกับวัสดุเหลือใช้ให้มีประสิทธิภาพ และส่งผลกระทบน้อยสุด การนำวัสดุเหลือใช้เหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการจัดการวัสดุเหลือใช้ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตสินค้า วัสดุเหลือใช้ที่เกิดในประเทศไทยมีมากมาย ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านหิน ตะกรันเหล็กที่เกิดจากการถลุงเหล็ก หรือฟอสฟอยิปซัมที่เกิดจากการผลิตปุ๋ยเคมี เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ การนำเถ้าลอย และตะกรันเหล็กมาใช้งานในคอนกรีต เป็นที่ยอมรับ และใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ฟอสฟอยิปซัม ถึงแม้ว่าจะเป็นวัสดุที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากยังไม่ได้ถูกนำมาศึกษาอย่างจริงจัง และยังมีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อนอยู่ด้วย

ฟอสฟอยิปซัมเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริก ซึ่งเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของปุ๋ยเคมี ในการผลิตปุ๋ยเคมี 1 ตัน จะทำให้เกิดฟอสฟอยิปซัมขึ้น 5 ตัน[1] ซึ่งทำให้ปริมาณฟอสฟอยิปซัมทั่วโลก เพิ่มขึ้นปีละมากกว่า 300 ล้านตันต่อปี[2] และในประเทศไทยเฉพาะที่บริษัทปุ๋ยแห่งชาติ (มหาชน) แห่งเดียว มีมากกว่า 5 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากการที่ปริมาณของฟอสฟอยิปซัมเพิ่มขึ้นอย่างมากในแต่ละปี และยังไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ก่อให้เกิดปัญหาตามมา เช่น พื้นที่ในการกักเก็บจำกัด ไม่เพียงพอกับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของฟอสฟอยิปซัม มลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อมจากสิ่งเจือปน และสารกัมมันตรังสีปนเปื้อน ทัศนวิสัยถูกทำลาย ความสูญเสียทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการลงทุนศึกษาวิธีกำจัด ดังนั้นการนำฟอสฟอยิปซัมกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณของฟอสฟอยิปซัมที่เกิดขึ้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากฟอสฟอยิปซัมที่เกิดจากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกนี้ จะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับยิปซัมจากธรรมชาติ ต่างกันตรงที่ฟอสฟอยิปซัมมีสิ่งเจือปนและสารกัมมันตรังสีปนเปื้อนอยู่ด้วย ทำให้ไม่สามารถนำมาแปรสภาพได้อย่างเต็มที่ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำฟอสฟอยิปซัมมาศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำฟอสฟอยิปซัมมาปรับปรุงใช้เป็นองค์ประกอบในการทำแผ่นยิปซัมอย่างเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน และสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหาอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในแผ่นยิปซัมชนิดที่มีฟอสฟอยิปซัมในระดับต่างๆกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาระบบดูดซับเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัม

1.3.2 ตรวจวัดรังสีแกมมาของนิวไคลด์ลูกจากวัสดุดูดซับเรดอน-222

1.3.3 หาอัตรา และสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ของแผ่นยิปซัมชนิดต่างๆ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีข้อมูล และผลงานที่เกี่ยวข้องกับการนำฟอสฟอยิปซัมไปแปรสภาพและการแผ่รังสีของฟอสฟอยิปซัม

1.4.2 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี ข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการตรวจวัดปริมาณเรดอน-222

1.4.3 ตั้งสมมติฐาน และออกแบบการทดลอง พร้อมกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการดำเนินการทดลอง

1.4.4 ทำการเก็บตัวอย่างแผ่นยิปซัมที่มีปริมาณของฟอสฟอยิปซัมผสมอยู่ที่ปริมาณต่างกัน

1.4.5 ออกแบบ และจัดทำระบบตรวจจับเรดอน-222 และหาประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมผสมอยู่ที่ความเข้มข้นต่างกัน

1.4.6 จัดระบบวัดรังสีแกมมา และทดสอบประสิทธิภาพการวัด

1.4.7 วัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างเพื่อนำไปประเมินหาค่าปริมาณเรดอน-222

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

1.4.9 สรุป และประเมินผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคการวิเคราะห์หาอัตรา และสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมชนิดต่างๆ รวมทั้งได้แนวทางในการนำฟอสฟอยิปซัมมาผสมในแผ่นยิปซัมได้อย่างปลอดภัยต่อผู้บริโภค และการส่งออก

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ในปี ค.ศ.1994 W.M.Arafa และคณะ[3] แห่งมหาวิทยาลัยกาตาร์ ประเทศกาตาร์ ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคเพื่อหาปริมาณเรดอน-222ในอาคารโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเรดอน-222ในอาคาร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเรดอน-222 และใช้หัววัดรังสี 2 หัววัด แทนการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีหัววัดเดียว ซึ่งต้องให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับก๊าซเรดอนอย่างน้อย 4 วันถึงจะนำมาวัดรังสี

1.6.2 ในปี ค.ศ.2003 E.R.van der และคณะ[4] แห่ง Nuclear Geophysics Division, ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Determination of radon release rates of two types of gypsum board received from IBR, Haelen, the Netherlands” โดยใช้กระบวนการของ NGD-KVI คือ ให้ ไนโตรเจนเหลวไหลผ่านตู้เก็บแผ่นยิปซัมที่อัตราการไหล 400 ml/min และ ความชื้นสัมพันธ์ 50เปอร์เซนต์ และใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับก๊าซที่ออกมาจากตู้เก็บแผ่นยิปซัมนั้น พบว่าแผ่นยิปซัมที่ทำมาจากธรรมชาติ มีอัตราการฟุ้งกระจาย ประมาณ 1.5–2 $\mu Bq\ kg^{-1}\ s^{-1}$ และแผ่นยิปซัมที่ทำมาจากฟอสฟอยิปซัม มีอัตราการฟุ้งกระจาย ประมาณ 10 $\mu Bq\ kg^{-1}\ s^{-1}$

1.6.3 ในปี ค.ศ. 2000 J .Hofmann และคณะ[5] ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Natural Radionuclide Concentrations in Materials Processed in the Chemical Industry and the Related Radiological Impact” โดยศึกษาเกี่ยวกับปริมาณรังสีที่ประชาชนได้รับจากวัสดุผนัง และฝ้าที่เคลือบด้วยฟอสฟอยิปซัมหนา 1 เซนติเมตร ของห้องที่มีขนาด กว้าง 4 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 2.5 เมตร โดยคิดเป็นน้ำหนักของฟอสฟอยิปซัมทั้งหมดเท่ากับ 1300 กิโลกรัม โดยมีสมมติฐานว่า เวลาที่คนอยู่ในห้องทั้งหมด 8,760 ชั่วโมง ต่อปี พบว่าบุคคลนั้นจะได้รับปริมาณรังสี (radiation dose) ประมาณ 0.5 ไมโครซีเวิร์ตต่อปี

1.6.4 ในปี พ.ศ. 2542 นายวิทิต ผึ่งกัน[6] วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคเพื่อหาปริมาณเรดอน-222 ในอาคารโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ทำได้ด้วยการดูดอากาศภายในห้องต่างๆ ตึกภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี โดยเลือกห้องที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน รวมทั้งทดลองวัดที่เวลาต่างกัน ซึ่งพบว่าก๊าซเรดอน-222 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.059-1.4 pCi/L และยังพบว่าวิธีนี้สามารถนำไปวัดปริมาณก๊าซเรดอน-222 ในอากาศในระดับปกติได้สะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 แผ่นยิปซัมและองค์ประกอบของแผ่นยิปซัม

2.1.1 แผ่นยิปซัม[7] คือ แผ่นกระดาษกาวเหนียวสองด้าน มีปูนพลาสเตอร์เป็นแกนกลาง ใช้สำหรับผนังกั้นห้อง และเพดาน แผ่นยิปซัมนี้ผลิตจากแร่ยิปซัม ซึ่งเป็นแร่อโลหะชนิดหนึ่ง โดยการย่อยก้อนหินยิปซัมบริสุทธิ์ให้มีขนาดเล็ก ๆ ประมาณ 2 ถึง 3 นิ้ว แล้วนำมาย่อยอีกครั้ง จนเหลือเม็ดเล็กประมาณ 1/2 นิ้ว แล้วเข้าเตาเผาไล่น้ำออก เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสภาพเป็นปูนพลาสเตอร์ หลังจากนั้นจะนำไปผสมกับสารเคมี และเยื่อต่าง ๆ เพื่อประกอบกันเข้าเป็นแผ่นยิปซัม และนำไปอบด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อให้แผ่นยิปซัมแห้งสนิท โดยทั่วไปแล้วแผ่นยิปซัมจะแบ่งออกเป็น

2.1.1.1 แผ่นยิปซัมชนิดธรรมดา[8] มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ กันความร้อนและเสียง ตามมาตรฐานAmerican Society for Testing and Material ข้อกำหนดที่ C36 (ASTM C36) มาตรฐาน British Standard ข้อกำหนดที่ 1230 (BS1230) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ข้อกำหนดที่ 219-2524 ตามลำดับ ใช้สำหรับติดตั้งฝ้าเพดานหรือผนังภายในทั่วไป

2.1.1.2 แผ่นยิปซัมชนิดทนความชื้น[8] มีคุณสมบัติสามารถทนความชื้นได้เป็นพิเศษ เพราะเนื้อกระดาษของแผ่นยิปซัมผลิตจากกระดาษเหนียวพิเศษผสมแว๊กซ์ และภายในเนื้อยิปซัมยังมีสารลดการดูดซึมความชื้น (Silicone) โดยแผ่นยิปซัมจะดูดน้ำไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน BS1230 ใช้สำหรับติดตั้งฝ้าเพดาน ภายนอก หรือ ฝ้าเพดาน ภายในห้องน้ำ และยังสามารถใช้กับผนังห้องน้ำได้ โดยปูกระเบื้องทับแผ่นยิปซัมอีกชั้น

2.1.1.3 แผ่นยิปซัมชนิดทนไฟ[8] มีคุณสมบัติภายในเนื้อยิปซัมผสมใยแก้ว (Fiber Glass) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุทนไฟ กระดาษที่ใช้ห่อหุ้มแผ่นยิปซัมเป็นกระดาษเหนียวอัดแน่นพิเศษ สามารถออกแบบให้ทนไฟได้นานตั้งแต่ 1-3 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C36 และมาตรฐาน BS1230 ตามลำดับ ใช้สำหรับติดตั้งบริเวณทางหนีไฟ ห้องครัว โรงภาพยนตร์ หรือใช้หุ้มโครงสร้างเหล็กเพื่อป้องกันการเสียกำลังเมื่ออาคารเกิดเพลิงไหม้

2.1.1.4 แผ่นยิปซัมชนิดอะลูมิเนียมฟอยล์[8] เป็นแผ่นยิปซัมที่ปิดทับด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ สำหรับสะท้อนรังสีความร้อน สามารถสะท้อนได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีความร้อนผ่านเข้าไปในห้องน้อยลง ตามมาตรฐาน ASTM C36

แผ่นยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัย เป็นแบบชนิดธรรมดา มีองค์ประกอบแยกตามประเภทดังนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของแผ่นยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบของแผ่นยิปซัม	ชนิดที่ 1 (%)	ชนิดที่ 2 (%)	ชนิดที่ 3 (%)
1. แร่ยิปซัม	42.8	41.4	42.5
2. ฟอสฟอยิปซัม	30.0	35.0	38.0
3. ดีซัลฟอยิปซัม (Desulphogypsum)	10.8	10.1	9.7
4. ลาฟาจ (Lafarge)	5.3	5.4	5.7
5. แผ่นยิปซัมที่ไม่ได้มาตรฐานนำมาบด (Waste)	11.1	8.1	4.1

จากตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของแผ่นยิปซัม มีรายละเอียดดังนี้

2.1.2 แร่ยิปซัม[9]

แร่ยิปซัม คือ แร่เกลือจืด เป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เป็นผลึกสีขาว หรือไม่มีสี มักมีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาล เป็นมลทินปนอยู่ มีความวาวคล้ายแก้วมุก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 เนื้อแร่โปร่งใสจนกระทั่งโปร่งแสง ดังแสดงตามรูปที่ 2.1 อาจเรียกชื่อต่างกันออกไปตามลักษณะของเนื้อแร่ คือ ชนิดซาตินสปาร์ (Satinspar) เป็นแร่ยิปซัมลักษณะที่เป็นเนื้อเสี้ยน มีความวาวคล้ายไหม ชนิดอะลาบาสเทอร์ (Alabaster) มีเนื้อเป็นมวลเม็ดอัดกันแน่น และชนิดซีลีไนต์ (Selenite) ใสไม่มีสี เนื้อแร่เป็นแผ่นบางโปร่งใส มีปฏิกิริยาเป็นกลาง ละลายในน้ำได้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเนื้อยิปซัม อาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.2.1 ยิปซัมที่เกิดตามธรรมชาติจากการตกตะกอนของทะเลเก่าที่เป็นแอ่งใหญ่ในประเทศไทยพบแหล่งใหญ่เกิดอยู่ในบริเวณพื้นที่จังหวัดพิจิตร นครสวรรค์ และในพื้นที่ภาคใต้ เป็นแร่ยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์ 96-98 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยธาตุแคลเซียม (Ca) 23 เปอร์เซ็นต์ กำมะถัน (S, ในรูปของซัลเฟต) 17 เปอร์เซ็นต์ เป็นชนิดที่เหมาะสมต่อการใช้ในการเกษตรได้ดี

2.1.2.2 ยิปซัมที่เกิดจากผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยเคมี ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตในการผลิตกรดฟอสฟอริกของหินฟอสเฟต ส่วนที่เป็นผลพลอยได้มีชื่อเรียกว่า “Phosphogypsum” (PG) หรือ “Superphosphate”

รูปที่ 2.1 ลักษณะของผลึกแร่ยิปซัม[9]

2.1.3 ฟอสฟอยิปซัม[10]

ฟอสฟอยิปซัม คือ ยิปซัมสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง (Synthetic Gypsum) ที่ได้จากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกด้วยการสกัดหินฟอสเฟตแบบ Wet Process

สินแร่ฟอสเฟตปกติจะอยู่ในรูปของ แคลเซียมฟอสเฟต $(Ca_3PO_4)_2$ หรือ ที่เรียกว่าแร่ฟอสฟอไรท์(Phosphorites) ฟอสเฟตอาจอยู่ในรูปของ $Ca_5[(PO_4)_3(F)]$ หรือแร่ Apatite โดยทั่วไป แร่ฟอสฟอไรท์จะมียูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติปนอยู่ประมาณ 20-300 ส่วนในล้าน หรือ 260 - 370 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (7-100 พิโคคูรีต่อกรัม) และมีทอเรียมอยู่ประมาณ 1-5 ส่วนในล้าน หรือ 3.7-22.2 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (0.1 - 0.6 พิโคคูรีต่อกรัม) ส่วนในแร่ Apatite จะมีปริมาณยูเรเนียมน้อยกว่าแร่ฟอสฟอไรท์ นอกจากนี้ในสินแร่ฟอสเฟตยังพบเรเดียม-226, ตะกั่ว-210 (^{210}Pb) และโพโลเนียม-210 (^{210}Po) ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238

ในกระบวนการสกัด Phosphate Rock ทางอุตสาหกรรม มี 2 กระบวนที่ใช้ คือ Wet Process และ Thermal Process ในกระบวนการ Wet Process ส่วนใหญ่จะใช้กรดซัลฟูริกในการย่อยสลาย ผลิตผลที่ได้จะอยู่ในรูปของ Phosphoric Acid และกาก Hydrated Calcium Sulfate, $CaSO_4.nH_2O$ (Gypsum) ซึ่งกากจะมีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า "Phosphogypsum, PG" หรือ Superphosphate ส่วนกระบวนการ Thermal Process จะได้กากในรูป Phosphate slag

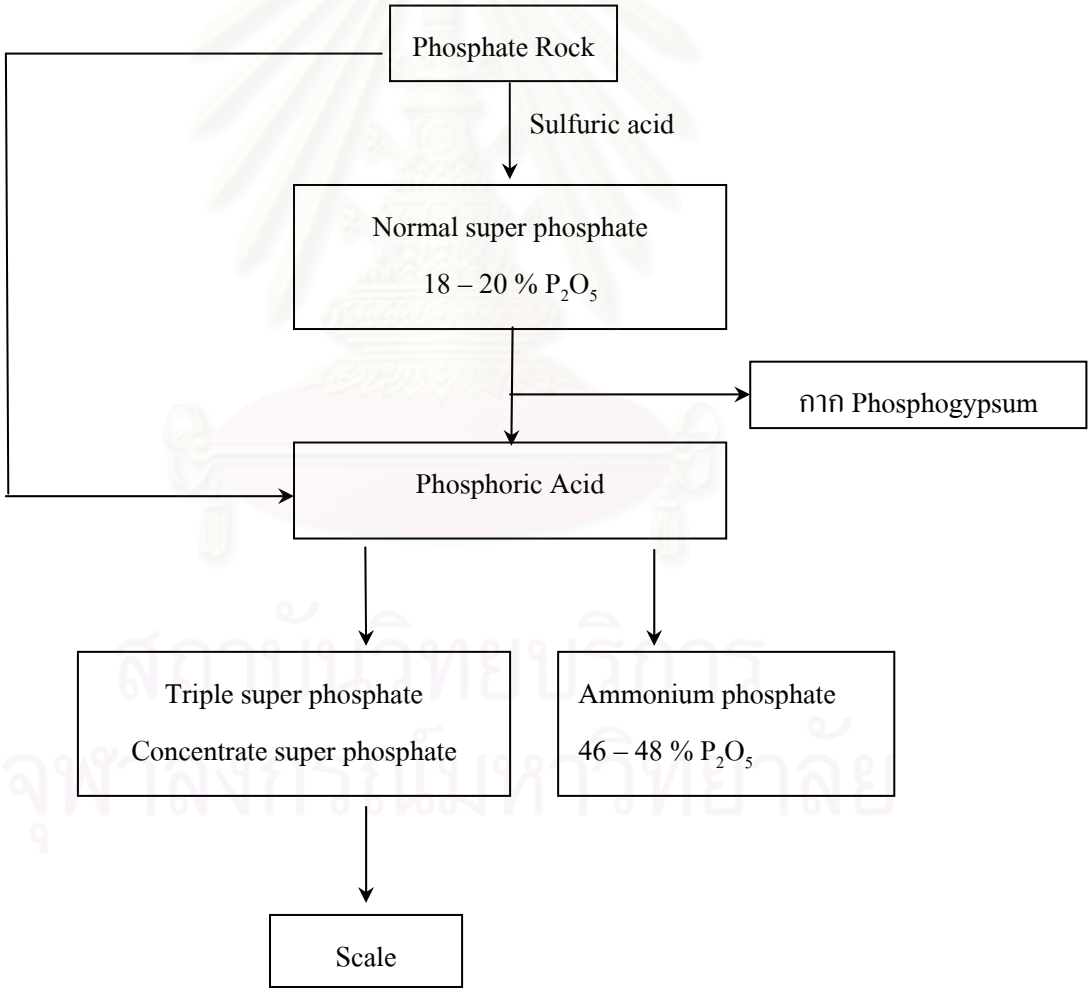
ในกระบวนการสกัดแบบ Thermal process นั้น ทำโดยการเผา Phosphate Rock ที่อุณหภูมิ 1300 ^{o}C จะได้ผลิตภัณฑ์ ฟอสฟอรัส และ กาก Calcium Silicate (Slag) ซึ่งมีลักษณะวาวคล้ายแก้ว กากที่ได้จากวิธีสกัดแบบ Thermal Process นี้จะมีการแพร่กระจายของก๊าซเรดอนซึ่งเป็นธาตุหนึ่งในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียมต่ำกว่า วิธีการสกัดหรือย่อยสลายแบบ Wet Process เนื่องจากก๊าซเรดอนมีสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ออกจากวัสดุคล้ายแก้วต่ำ

การผลิตปุ๋ยเคมี จะเริ่มจากการละลายหินฟอสเฟตด้วยกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก เพื่อจะได้กรดฟอสฟอริก ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นที่จะนำไปผลิตปุ๋ยเคมี รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี โดยมีลำดับดังนี้

1. ละลายหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริก จะได้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยที่มีชื่อว่า Normal Super Phosphate ซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกกับฟอสฟอยิปซัม (แคลเซียมซัลเฟต) ถ้าแยกแคลเซียมซัลเฟต ของเหลวที่ได้ คือ กรดฟอสฟอริก

2. ละลายหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริก จะได้ปุ๋ยอีกประเภทหนึ่ง ที่เรียกว่า Triple Super Phosphate

3. ผสมกรดฟอสฟอริกกับแอมโมเนีย จะได้ปุ๋ยแอมโมเนียฟอสเฟต (DAP, MAP)



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี

จะเห็นว่าในกระบวนการย่อยสลายแบบ Wet Process ยูเรเนียม และ ทอเรียม-232 ที่มีอยู่ในแร่ฟอสเฟตส่วนใหญ่ จะละลายอยู่ในส่วนของกรดฟอสฟอริก ส่วน เรเดียม-226 ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับแคลเซียม จะตกตะกอนร่วม (Co- Precipitate) กับ $CaSO_4.nH_2O$ หรือ PG ในรูปของ $^{226}RaSO_4$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ ($K_{sp}=4.25x10^{-11}$) ดังนั้นจึงทำให้ PG มี เรเดียม-226 ปนเปื้อน และสามารถตรวจวัดความแรงรังสีได้

เนื่องจากกระบวนการสกัดแบบ Thermal Process เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง ฝุ่นและอากาศที่ถูกปลดปล่อยออกทางปล่องอากาศ (Stack) จึงอาจพบว่ามีปริมาณตะกั่ว-210 (Pb-210) และพอโลเนียม-210 (Po-210) สูง ในกระบวนการสกัดแบบนี้จึงควรมีระบบดักจับฝุ่นและก๊าซที่ปลดปล่อยออกมา

รายละเอียดของความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีที่พบในฟอสฟอยิปซัม และ Phosphate slag ที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกาและฟอสฟอยิปซัมที่ผลิตในประเทศไทยดังแสดงตามในตารางที่ 2.2 ,2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีในฟอสฟอยิปซัมจากกระบวนการผลิตแบบ Wet Process ที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา[10]

สารกัมมันตรังสี	ความแรงรังสีจำเพาะ (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)
U-238	220
U-234	230
Th-230	480
Ra-226	1220
Pb-210	960
Po-210	960
U-235	10
Pa-231	10
Ac-227	10
Th-232	9
Ra-228	9
Th-228	52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีใน Phosphate Slag จากกระบวนการผลิตแบบ Wet Process ที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา[10]

สารกัมมันตรังสี	ความแรงรังสีจำเพาะ (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)
U-238	92
U-234	88
Th-230	1190
Ra-226	1260
Pb-210	1260
Po-210	1260
U-235	50
Pa-231	50
Ac-227	50
Th-232	30
Ra-228	30
Th-228	30

ตารางที่ 2.4 ความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีในฟอสฟอยิปซัมโดยฝ่ายประเมินค่ากัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม กองการวัดกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ[11]

สารกัมมันตรังสี	ปริมาณสารกัมมันตรังสี (เบคเคอเรล ต่อกิโลกรัม)		
	ฟอสฟอยิปซัม	แร่ยิปซัม	หินฟอสเฟต
โปแตสเซียม-40	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้	1033.1±13.1
เรเดียม-226	307.4 ±4.9	4.2 ± 1.2	64.5 ± 3.4
ยูเรเนียม-238	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้
ทอเรียม-232	7.8 ± 1.4	ต่ำมากอ่านค่าไม่ได้	110.9 ± 2.3

ในส่วนคุณสมบัติเฉพาะของฟอสฟอยิปซัมนั้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ รายละเอียดดังแสดงตามตารางที่ 2.5 และ2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของฟอสฟอยิปซัม[11]

คุณสมบัติทางกายภาพ	เปอร์เซ็นต์
คุณสมบัติทางกายภาพ	
ความชื้น	< 10.0
ขนาดเม็ด	
> 2.00 มม.	18.8
2.00 - 0.50 มม.	7.2
0.50 - 0.15 มม.	8.9
0.15 - 0.075 มม.	37.9
< 0.075 มม.	27.2

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของฟอสฟอยิปซัม[11]

คุณสมบัติทางเคมี	ปริมาณธาตุ
CaO (แคลเซียมออกไซด์)	33 เปอร์เซ็นต์
S (กำมะถัน)	13.95 เปอร์เซ็นต์
TOTAL P_2O_5 (ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด)	0.37 เปอร์เซ็นต์
K O (โพแทสเซียม)	200 ส่วนในล้าน
Mg (แมกนีเซียม)	260 ส่วนในล้าน
Fe (เหล็ก)	140 ส่วนในล้าน
Zn (สังกะสี)	50 ส่วนในล้าน

2.1.4 ดีซัลฟอยิปซัม (Desulphogypsum , DSG) [12,13]

ดีซัลฟอยิปซัม คือ ยิปซัมสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง (Synthetic gypsum) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท โดยประเภทที่นิยมนำมาใช้มากสุด คือ Flue Gas Desulfurization (FGD) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซเชื้อเพลิง (Flue Gas) กับน้ำปูนหรือหินปูน ทั้งในรูปของการฉีดพ่นฝอย หรือใส่เข้าไปเป็นของเหลว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดซัลเฟตหรือซัลไฟต์ขึ้นเป็นของแข็ง คือ ยิปซัมสังเคราะห์ สารตัวนี้สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์

ได้ เช่น ถมที่ดิน หรือทำแผ่นยิปซัม กระบวนการ FGD นี้ สามารถลดซัลเฟอร์ได้ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์

2.1.5 ลาฟาจ (Lafarge)[14]

ลาฟาจ คือ ทรายที่มีแคลเซียมในปริมาณสูง มีลักษณะเป็นเม็ดของแข็ง สีขาวหรือเทา ไม่มีกลิ่น น้ำหนักถ่วงจำเพาะ 2.7 มีจุดเดือด มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และไม่ละลายน้ำ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับแรงกระแทก

2.2 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive Decay) [15,16,17]

สารกัมมันตรังสี (Radioactive Material) มีการสลายตัวตลอดเวลา อัตราการสลายตัวนี้ไม่ขึ้นกับอิทธิพล ต่างๆ เช่น สถานะทางเคมี อุณหภูมิ ความดัน และอายุของนิวเคลียส อัตราการสลายตัว ของสารกัมมันตรังสีใดๆ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนอะตอมของกัมมันตรังสีในขณะนั้น

ถ้า N คือ จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสี และ $\frac{-dN}{dt}$ คือ อัตราการสลายตัวที่เวลา t ใดๆ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{-dN}{dt} \quad \propto \quad N(t) \qquad (2.1)$$

$$\frac{-dN}{dt} \quad = \quad \lambda N(t) \qquad (2.2)$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่การสลายตัว (Decay Constant) ทำการอินทิเกรต (Integral) สมการที่ (2.2) จะได้

$$-\int_{o}^{t} \frac{dN}{N} \quad = \quad \lambda \int_{o}^{t} dt$$

$$-\ln N(t) \quad = \quad \lambda N(t)$$

ให้ N_0 คือ จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีที่เวลา t = 0

N คือ จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีที่เวลา t = t

ดังนั้น เมื่อ t = 0 $-\ln N_0 = c$

เมื่อ t = t $-\ln N = \lambda t - \ln N_0$

$$-\ln \frac{N}{N_0} = \lambda t$$

$$N(t) = N_o e^{-\lambda t} \qquad (2.3)$$

ถ้าเวลาผ่านไป $T_{1/2}$ จำนวนอะตอมจะเหลืออยู่เพียงครึ่งหนึ่งของอะตอมเริ่มแรก คือ N_0 /2 แล้ว $T_{1/2}$ จะเรียกว่าครึ่งชีวิต (Half – life) ซึ่งคำนวณได้โดยการแทนค่า $t = T_{1/2}$ และ $N = N_0/2$ ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$\frac{N_0}{2} = N_o e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (2.4)$$

ค่าอายุเฉลี่ย (Mean life) ของอะตอมของสารกัมมันตรังสี หมายถึง ค่าที่ได้จากการรวมของอายุทุกๆ อะตอมของนิวไคลด์ก่อนการสลายตัว หารด้วยจำนวนอะตอมทั้งหมด ดังนั้น

$$\tau = \int_0^\infty \frac{t\lambda N(t)dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda} \qquad (2.5)$$

อัตราการสลายตัว เรียกว่า “กัมมันตภาพรังสี” หรือ “ความแรงรังสี” ซึ่งนิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า “Activity , A” จะเขียนค่ากัมมันตภาพรังสีเป็นรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$A = \frac{-dN}{dt} \qquad (2.6)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.2) และ (2.6) จะได้ว่า

$$A = \lambda N(t) \qquad (2.7)$$

และจากสมการ (2.3) เมื่อนำ λ คูณทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$
$$A = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (2.8)$$

หน่วยของกัมมันตภาพรังสี นิยมใช้เป็นหน่วย “คูรี (Curie) ” ย่อเป็น Ci

ความแรงรังสี 1 Ci หมายถึง สารกัมมันตสีมีการสลายตัว 3.7 x 10^{10} ครั้งต่อวินาที ซึ่งเท่ากับความแรงรังสีของเรเดียม-226 บริสุทธิ์น้ำหนัก 1 กรัม

1 Ci	=	3.7 x 10^{10}	disintergration per second (dps)
1 Ci	=	10^{-3}	kCi (Kilocurie)
	=	10^{-6}	MCi (Megacurie)
	=	10^{3}	mCi (Millicurie)
	=	10^{6}	μCi (Microcurie)
	=	10^{12}	pCi (Picocurie) etc.

ในปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้หน่วย Becquerel (Bq) แทน dps โดยที่

1 Bq = 1 dps

และใน SI unit นิยมเขียนหน่วย dps เป็น s^{-1} อย่างไรก็ตามหน่วย Ci ยังเป็นที่ใช้แพร่หลายอยู่ในปัจจุบันเนื่องจากความเคยชิน

ในบางครั้งค่า Activity หรือ ค่าความแรงรังสี จะบอกเป็นความแรงต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตร เช่น Ci/g , **μ**Ci/ml เป็นต้น ซึ่งเราเรียกว่า “ความแรงรังสีจำเพาะ” (Specific Activity)

2.3 การสลายตัวแบบอนุกรม (Serial Decay) [15,16,17]

การสลายตัวแบบอนุกรมนี้เป็นการสลายตัวแบบเป็นระบบ โดยกล่าวว่าเมื่อสารกัมมันตรังสี A สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี B ซึ่งจะสลายตัวต่อไปอีก ในระบบนี้จะมีทั้งการสลายตัว และมีการเกิดของสารขึ้นด้วย กระบวนการนี้เรียกว่า “การเกิดและการสลายตัวทางรังสี” (Radioactive Build up and Decay)

การสลายตัวแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ และสารกัมมันตรังสีที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น สารกัมมันตรังสีธรรมชาติที่มีการสลายตัวแบบอนุกรม ได้แก่ การสลายตัวแบบยูเรเนียม ทอเรียม และแอคติเนียม ส่วนสารกัมมันตรังสีที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น ได้แก่ สารที่มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชัน (Fission) เช่น สทรอนเซียม-90 (Sr-90) ซึ่งเกิดมาจากคริปตรอน-90 (Kr-90)

การสลายตัวแบบอนุกรมนั้น จะเกิดภาวะสมดุลได้ 2 แบบ คือ

2.3.1 ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ (Secular Equilibrium)

2.3.2 ภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์ (Transient Equilibrium)

การเกิดภาวะสมดุลทั้งสองแบบนี้อธิบายโดยละเอียดได้ ดังนี้

2.3.1ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ (Secular Equilibrium)

ถ้าสารกัมมันตรังสี A สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี B และสารกัมมันตรังสี B สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี C ดังสมการที่ (2.9)

$$\mathbf{A} \xrightarrow{\lambda_1} \mathbf{B} \xrightarrow{\lambda_2} \mathbf{C} \qquad (2.9)$$

การที่จะเกิดภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ของสารกัมมันตรังสี A กับสารกัมมันตรังสี B ได้ก็ต่อเมื่อ ค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี A มีค่ามากๆ เมื่อเทียบกับค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี B ($T_{1/2}(A) >> T_{1/2}(B)$) ดังนั้นค่าคงที่ของการสลายตัวของ A จะมีค่าน้อยๆ เมื่อเทียบกับ B นั่นคือ $\lambda_A << \lambda_B$ เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ปริมาณของ B ก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการสลายตัวของ B เป็น C เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดจะถึงจุดที่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C ซึ่งเป็นภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ ตัวอย่างของการเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเมื่อเกิดภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ ได้แก่การเกิดสมดุลของเรเดียม-226 (Ra-226) กับเรดอน-222 (Rn-222) โดยเรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิต 1600 ปี ส่วนเรดอน-222 มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน

จากสมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี จะได้ว่า

อัตราที่เปลี่ยนไป = อัตราการเกิด – อัตราการสลายตัว

โดย อัตราที่เปลี่ยนไป หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสี B ในขณะใดขณะหนึ่ง

อัตราการเกิด หมายถึง อัตราการเกิดของสารกัมมันตรังสี B หรืออัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี A

อัตราการสลาย หมายถึง อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี B

จากสมการการสลายตัวข้างต้น สามารถเขียนในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \qquad (2.10)$$

ถ้าเริ่มต้นมี จำนวนอะตอมของ A เป็น N_0 ที่เวลา t เป็นศูนย์ จะได้

$$N_A(t) = N_o e^{-\lambda_A t} \qquad (2.11)$$

จะได้

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B \qquad (2.12)$$

ซึ่งจะหาค่าจำนวนอะตอม B (N_B) ในรูปของเวลา t โดยฟังก์ชั่นของ Explicit Function ได้ว่า

$$N_B = N_A^0(h_A e^{-\lambda_A t} + h_B e^{-\lambda_B t}) \qquad (2.13)$$

เอาสมการที่ (2.13) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.12) เพื่อหาค่า h_A และ h_B ได้

$$e^{-\lambda t}(-h_A\lambda_A - \lambda_A + h_B\lambda_B) = 0 \qquad (2.14)$$

ค่า $e^{-\lambda t}$ จะมีค่าเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะเวลา t ของการสลายตัวเกิดขึ้นตลอดเวลาจึงมีค่าเสมอ จากสมการที่ (2.14) จะได้ว่า

$$-h_A\lambda_A - \lambda_A + h_B\lambda_B = 0$$

$$h_A(\lambda_B - \lambda_A) = \lambda_A$$
$$h_A = \frac{\lambda_A}{(\lambda_B - \lambda_A)}$$

ส่วนค่า h_B ถูกกำหนดโดยจำนวนอะตอมของ B ที่เวลา t เป็น 0 จะได้จากสมการที่ (2.13) ว่า

$$h_A + h_B = 0$$
$$h_A = -h_B \tag{2.15}$$

ดังนั้นสมการที่ (2.13) จะได้จำนวนอะตอม B (N_B) จึงเป็น

$$N_B = \frac{N_A^0 X_A}{\lambda_B - \lambda_A}(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \tag{2.16}$$

ดังนั้นจำนวนกัมมันตภาพรังสี คือ

$$N_B\lambda_B = \frac{N_A^0 \lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \tag{2.17}$$

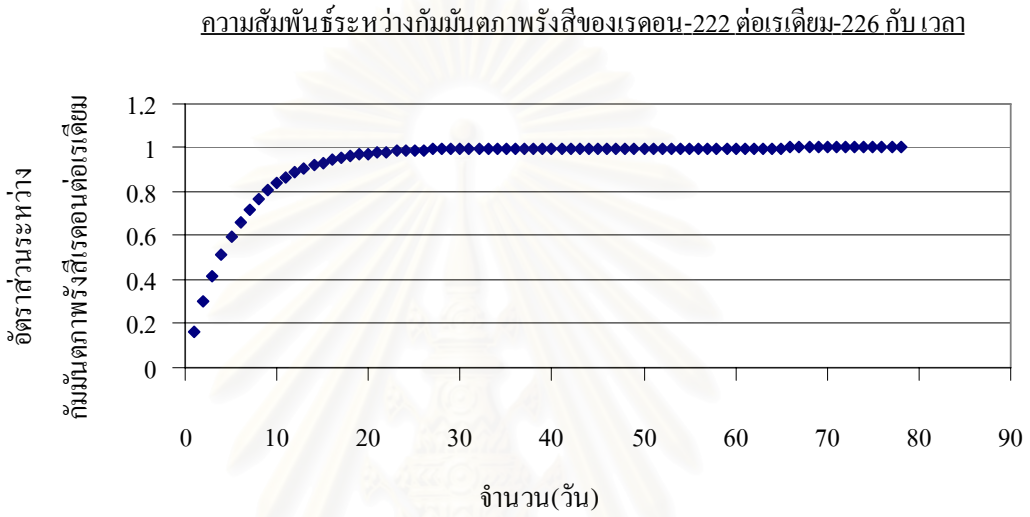
หรือ

$$N_B\lambda_B = \frac{(N_A\lambda_A)\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}(1 - e^{-(\lambda_B - \lambda_A)t}) \tag{2.18}$$

การเกิดสมดุลของเรเดียม-226 กับเรดอน-222 ดังที่กล่าวมาแล้วจะสามารถหาจำนวนของอะตอมเรดอน-222 หรือ กัมมันตรังสีของเรดอน-222 เมื่อทราบจำนวนอะตอมของเรเดียม-226 ถ้าให้จำนวนอะตอมของเรเดียม-226 เป็น N_A และเวลาครึ่งชีวิตเป็น T_A ส่วนจำนวนอะตอมของเรดอน-222 เป็น N_B และเวลาครึ่งชีวิตเป็น T_B สามารถจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อเรเดียม-226 ในรูปของค่าเวลาครึ่งชีวิตจากสมการที่ (2.18) ได้เป็น

$$\frac{N_B\lambda_B}{N_A\lambda_A} = \frac{T_A\left[1 - (e^{-(\frac{T_A - T_B}{T_A} \times \lambda_B t})\right]}{T_A - T_B} \tag{2.19}$$

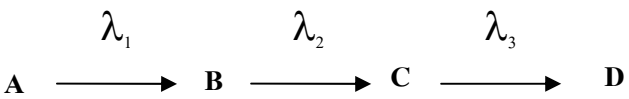
จากสมการที่ (2.19) เราจะกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อเรเดียม-226 ว่าเป็นค่า “Build up Factor” โดยเริ่มจากเรเดียม-226 สลายตัวเป็นเรดอน-222 ตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไปจนถึงภาวะสมดุล เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 28 วัน จึงจะถึงจุดสมดุล ซึ่งในทางปฏิบัติกำหนดว่าที่จุดสมดุลจะพิจารณาภายหลังจากเวลาผ่านไปเท่ากับ 7 เท่าของค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นใหม่ หรือของเรดอน-222



รูปที่ 2.3 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อเรเดียม-226 กับเวลา

2.3.2 ภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์ (Transient Equilibrium)

การที่จะเกิดภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์นั้น เมื่อค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารตั้งต้นมีค่ามากกว่าค่าเวลาครึ่งชีวิตของผลผลิตไม่มากนัก ($T_A > T_B$) หลังจากอยู่ในภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์แล้ว กัมมันตภาพรังสีของ B จะลดลงด้วยค่าครึ่งชีวิตของ A ตัวอย่างการสลายตัวแบบเกิดภาวะสมดุลอย่างไม่ถาวรนี้ได้แก่ การสลายตัวของเรดอน-222 เป็นผลผลิตค่าครึ่งชีวิตสั้นพอโลเนียม-218 (Po-218) ตะกั่ว-214 (Pb-214) บิสบัท -214 (Bi-214) และพอโลเนียม-210 (Po-210) โดยเรดอน-222 มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน พอโลเนียม- 218 มีค่าครึ่งชีวิต 3 นาที ตะกั่ว -214 มีค่าครึ่งชีวิต 26.8 นาที และบิสมัท–214 มีค่าครึ่งชีวิต 19.7



เมื่อเวลา t > 4 ชั่วโมงขึ้นไปจะเกิดภาวะสมดุลขึ้นดังสมการการสลายตัวอย่างต่อเนื่องของเบทแมน (Bateman Equation) ซึ่งเงื่อนไขว่า เมื่อเริ่มต้น t=0 จะมีแต่อะตอมของธาตุแรกเท่านั้น คือ อะตอมของ A_0 ส่วนอะตอมของธาตุอื่นๆ โดย A,B,C,….,M,N เป็นศูนย์หมด และกำหนดให้ λ_A , λ_B , λ_C ,……., λ_M , λ_N เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของธาตุ A,B,C,……,M,N ตาลำดับ เมื่อเวลา t ใดๆ จำนวนอะตอมของ N จะหาได้จากการอินทิเกรตสมการ

$$\frac{dN}{dt} = M\lambda_M - N\lambda_N \tag{2.20}$$

ซึ่ง M ถูกกำหนดค่ามาจาก สมการการสลายตัวแบบอนุกรมเหมือนสมการที่ (2.20) สำหรับผลบวกของผลผลิตทั้งหมด N ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.20) เป็น

$$N = A_0(h_a e^{-\lambda_a t} + h_b e^{-\lambda_b t} + ... + h_m e^{-\lambda_m t} + h_n e^{-\lambda_n t} \tag{2.21a}$$

และค่าคงที่ของสมการ(2.21a) หาได้จากค่าคงที่ของการสลายตัว ดังนี้

$$\begin{aligned}
h_a &= \frac{\lambda_a}{\lambda_n - \lambda_a} \times \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_a} \times ..... \times \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_n} \\
h_b &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_b} \times \frac{\lambda_b}{\lambda_n - \lambda_b} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_b} \times ..... \times \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_b} \\
h_m &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_m} \times \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_m} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_m} \times ..... \times \frac{\lambda_m}{\lambda_n - \lambda_m} \\
h_n &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_n} \times \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_n} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_n} \times ..... \times \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_n}
\end{aligned} \tag{2.21b}$$

จากเงื่อนไขที่กล่าวว่า เมื่อ N=0 ที่ t=0 จะได้ว่า ค่าคงที่ในสมการที่ (2.21b) มีผลรวมเป็นศูนย์

$$h_a + h_b + h_c + ... + h_m + h_n = 0 \tag{2.21c}$$

ในสมการที่ (2.21) กล่าวได้ว่าเป็นสมการเบทแมนทั่วๆไปของเบทแมน และจากตัวอย่างสมการการสลายตัวของเรดอน-222 เป็นผลผลิตค่าครึ่งชีวิตสั้นของเรดอนตามแผนภูมิดังข้างต้น จะสามารถหาค่าจำนวนอะตอม D ในเทอมของ $\mathrm{Exp}(-\lambda_a t)$ ได้ดังนี้

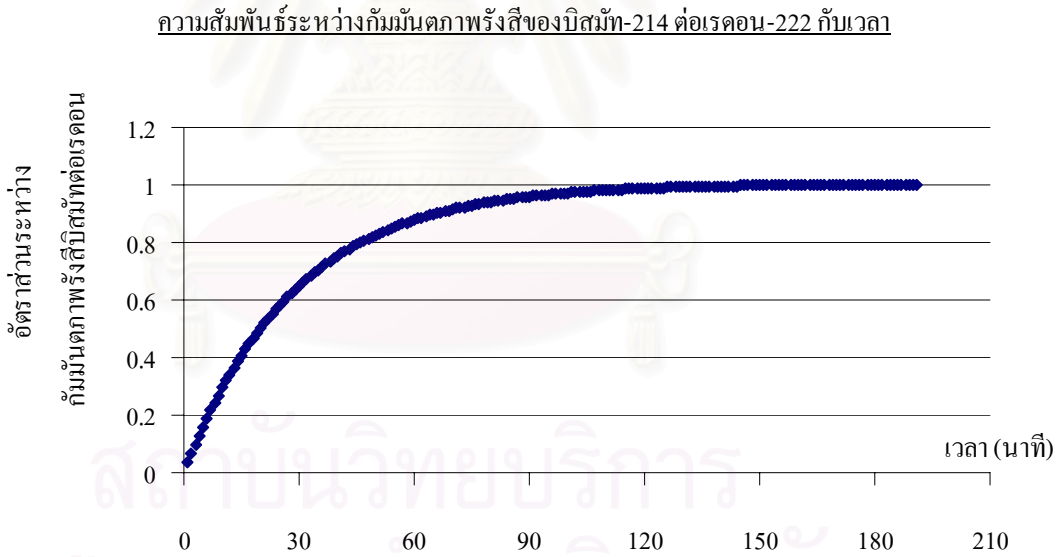
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$D = \frac{\lambda_a}{\lambda_d - \lambda_a} \times \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_a} \times A_o . e^{-\lambda_a t} \quad (2.22)$$

ถ้ากำหนดให้ค่ากัมมันตภาพรังสีของ D คือ $N_d \lambda_d$ และของ A คือ $N_a \lambda_a$ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ใหม่ ในรูปอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของ D ต่อ A เป็น

$$\begin{aligned} \frac{N_D \lambda_d}{N_a \lambda_a} &= \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \times \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_a} \times \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_a} \\ &= \frac{T_a}{T_a - T_b} \times \frac{T_a}{T_a - T_c} \times \frac{T_a}{T_a - T_d} \\ &= 1.0089 \end{aligned} \quad (2.23)$$

ค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของ D (Bi-214) ต่อ A (Rn-222) สามารถหาได้เมื่อเวลา t ต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0 ถึงภาวะสมดุล (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2.4 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของบิสมัท-214 ต่อเรดอน-222 กับเวลา

2.4 คุณสมบัติของเรดอน-222 (Radon Characteristics)[18]

สัญลักษณ์ : Rn

Atomic Number: 86

Atomic mass: (222.0) amu

จุดหลอมเหลว : -71.0°C (202.15°K,-95.8°F)

จุดเดือด : - 61.58°C (211.5°K,-79.24°F)

จำนวนโปรตอน / อิเล็กตรอน : 86

จำนวนนิวตรอน : 136

รัศมีอะตอม : 1.34 (A°)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ : ไม่มีสีเมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติ แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง เรดอนจะเปล่งแสงสีเหลืองสุกใสและเมื่อลดอุณหภูมิลงอีกเรดอนจะมีสีส้มแดง เรดอนเป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น อยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อย

ความหนาแน่น : (gas ที่ 1 atm และ 0 องศาเซลเซียล) : 9.73 g/L

(liquid ที่ boiling point) : 4.4 [19]

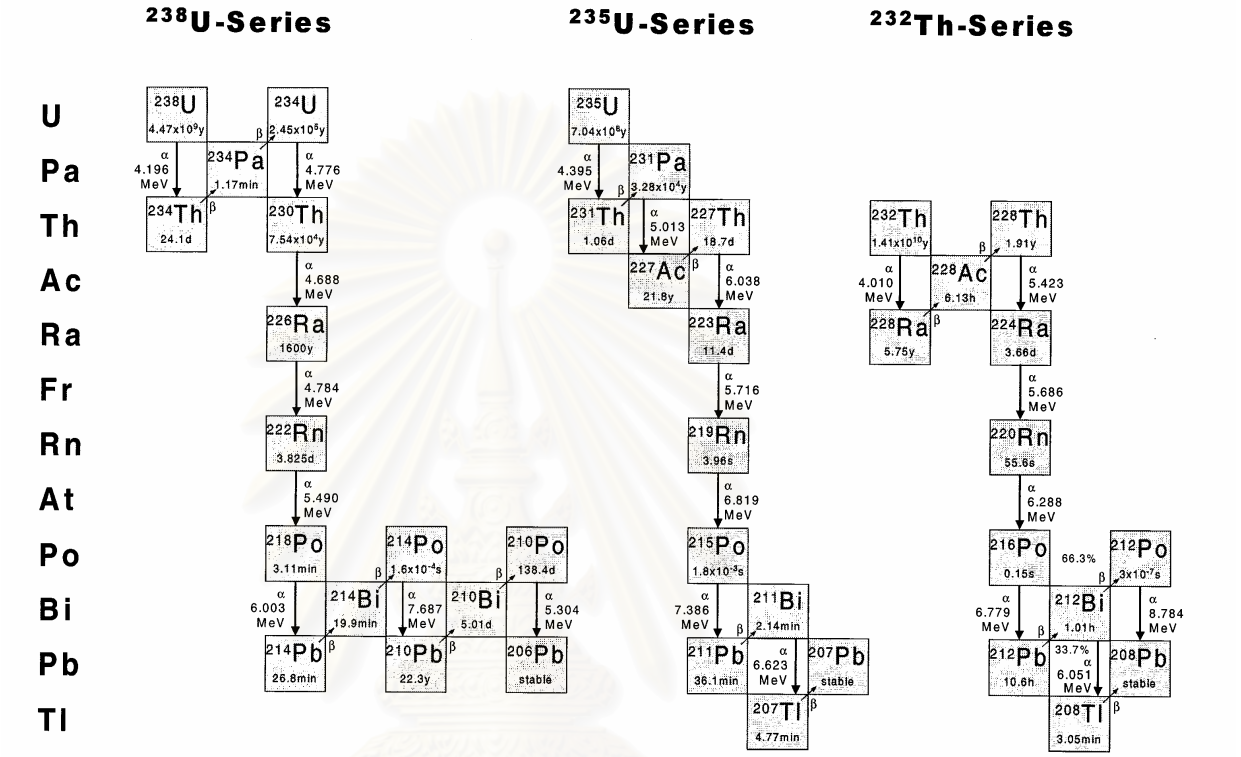
ความสามารถในการถูกละลายได้ (โดยที่น้ำเป็นตัวทำละลาย) : 510,230,169 cm^3/kg. ที่ 0 20 และ 30 องศาเซลเซียล ตามลำดับ[19]

ไอโซโทปและการค้นพบ : เรดอนในที่นี้จะหมายถึง เรดอนไอโซโทป 222 ส่วนเรดอนไอโซโทป 220 จะถูกเรียกว่า โทรอน (Thoron) และเรดอนไอโซโทป 219 จะถูกเรียกว่า แอคตินอน (Actinon)

ก๊าซแอคตินอน หรือ เรดอน-219 นั้นสลายตัวให้รังสีแอลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1904 โดย Friedrich O.Giessel และAndreloris Debierne ส่วนก๊าซโทรอน หรือ เรดอน-220 สลายตัวให้รังสีแอลฟาเช่นกัน และมีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1899 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ R.B.Owens และ Ernest Rutherford ส่วนเรดอน-222 เป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตนานที่สุด คือ 3.82 วัน ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1900 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อ Friedrich Ernst Dorn ซึ่งตอนแรกใช้ชื่อ ไนตอน (Niton) และถูกเปลี่ยนชื่อเป็นเรดอนเมื่อปี ค.ศ.1923

การเกิดปฏิกิริยา : เนื่องจากอะตอมของเรดอนมีจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ 8 ซึ่งมี Electron configuration คือ $[Xe].4f^{14}.5d^{10}.6s^2.6p^6$ จึงไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอื่นๆ แต่เรดอนก็ไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยที่สมบูรณ์เพราะมีสารประกอบเกิดขึ้นเป็นเรดอนฟลูออไรด์ (Radon Fluoride) เหมือนกับก๊าซเฉื่อยบางตัว เช่น คริปตอน (Krypton) และซีนอน(Xenon) ซึ่งเป็นสารประกอบนี้ถูกค้นพบเมื่อ ค.ศ.1962

การเกิดและการสลายตัวของก๊าซเรดอน : เรดอนมีอยู่ทั่วไปในอากาศโดยแพร่กระจายออกมาจากพื้นดินผิวโลกจากการสลายตัวของเรเดียมในดิน หินและทราย เรดอนในธรรมชาติมีอยู่ 3 ไอโซโทป คือ เรดอน-219 เรดอน-220 และเรดอน-222 ซึ่งมาจากการสลายตัวของอนุกรมแอกติเนียม ทอเรียม และยูเรเนียม ตามลำดับ ดังแสดงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อนุกรมการสลายตัวของธาตุ ^{238}U, ^{235}U และ ^{232}Th [20]

2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน[21]

การตรวจวัดระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีความไวในการตรวจจับอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยตรง เมื่อก๊าซเรดอนและผลิตผลของมันเกิดการสลายตัว หรือทำการตรวจวัดผลิตผลของก๊าซเรดอนแล้วทำการปรับเทียบกลับเป็นก๊าซเรดอน โดยทั่วไปการตรวจวัดก๊าซเรดอนจะทำกันในเทอมของกัมมันตภาพหรือความแรงรังสี (Activity) ซึ่งมีหน่วยเป็นเบคเคอเรล (Becquerel, Bq)

สำหรับวิธีการตรวจก๊าซเรดอนสามารถพิจารณาได้เป็น 3 วิธีการหลัก คือ

2.5.1 Integrative Sampling

เป็นการวัดแบบสะสมโดยเป็นการเฉลี่ยความเข้มข้นก๊าซเรดอนในช่วงเวลาที่กำหนด วิธีการตรวจวัดก๊าซเรดอนที่มีลักษณะแบบนี้มีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมและเป็นที่ปฏิบัติโดยทั่วไปมี 3 วิธีด้วยกัน คือ

2.5.1.1 AC-Activated Charcoal Absorption

การตรวจวัดโดยวิธีการนี้ เมื่อเริ่มทำการตรวจวัดต้องเปิดฝากระป๋องซึ่งมีผงถ่านกัมมันต์บรรจุอยู่ภายใน ตั้งทิ้งไว้ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัด โดยทั่วไปการตรวจวัดนี้จะใช้เวลาประมาณ 2 – 7 วัน ซึ่งก๊าซเรดอนในอากาศจะถูกดูดกลืนโดยผงถ่าน (Charcoal granules) เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดก็จะทำการปิดผนึกกระป๋อง และนำกลับมาทำการวิเคราะห์รังสีแกมมาที่สลายตัวจากก๊าซเรดอนที่ห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยเครื่องตรวจวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา (Gamma–Spectrometer) ซึ่งอาจใช้หัววัดวัดรังสี Scintillation detector หรือหัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ ชนิด HPGe ในการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของบิสมัท (Bi-214) ซึ่งสลายตัวจากก๊าซเรดอน แล้วคำนวณกลับไปเป็นความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากบริเวณที่ต้องการตรวจวัด

2.5.1.2 AT-Alpha Track Detector (Filtered)

สำหรับการตรวจวัดแบบนี้ ฟิล์มวัดที่ใช้จะเป็นฟิล์มพลาสติกพิเศษหรือแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีขนาดเล็ก บรรจุอยู่ภายในภาชนะขนาดเล็ก ขณะทำการตรวจวัดอากาศบริเวณนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกั้นที่ครอบไว้ปากภาชนะ อนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซเรดอนจะวิ่งเข้าชนฟิล์มวัดรังสี จะทำให้เกิดความเสียหายเป็นรอยแผลขึ้น การตรวจวัดโดยวิธีนี้โดยทั่วไปใช้เวลาประมาณ 3-12 เดือน หรืออาจใช้เวลาในการตรวจวัดน้อยลง เมื่อทำการตรวจวัดในบริเวณที่มีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูง เมื่อครบกำหนดเวลาที่ใช้ตรวจวัดจะทำการปิดภาชนะที่ใช้ในการตรวจวัด แล้วนำกลับมาวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ โดยการนำฟิล์มไปขยายรอยด้วยสารละลาย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำไปนับความหนาแน่นรอยที่เกิดขึ้นบนฟิล์มโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์ ความหนาแน่นรอยต่อพื้นที่จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

2.5.1.3 LS- Charcoal Liquid Scintillation

วิธีนี้จะอาศัยผงถ่านกัมมันต์ (Activated–Charcoal) ที่บรรจุอยู่ในขวดขนาดเล็ก สำหรับใช้ตรวจวัดก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่าง ขณะทำการตรวจวัดจะเปิดฝาขวดและใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 2- 7 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ ส่วนอื่นๆเหมือนกับวิธีการตรวจแบบ AC หลังจากครบกำหนดแล้ว ปิดฝาขวดและนำกลับมายังห้องปฏิบัติการเพื่อทำการวิเคราะห์ การตรวจวัดโดยวิธีนี้ใช้หัววัดรังสีชนิด Scintillation ในการวิเคราะห์ต้องนำผงถ่านกัมมันต์ และสาร

เรืองแสงมาทำการละลายในตัวทำละลาย ผลที่ได้ออกมาเป็นจำนวนครั้งต่อนาที (Counts/minute) ซึ่งสามารถแปลงกลับมาเป็นความเข้มข้นก๊าซเรดอนได้

2.5.2 Grab Sampling

แต่เนื่องจากระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนในบริเวณที่สนใจอาจแปรเปลี่ยนไปมาในช่วงเวลาต่างๆ ด้วยปัจจัยหลายประการ การตรวจวัดแบบ Grab Sampling เป็นการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงสั้น ๆ ที่เวลาชั่วขณะใดขณะหนึ่ง วิธีการตรวจวัดแบบนี้นิยมใช้ในการตรวจสอบในงานอุตสาหกรรม การตรวจวัดแบบนี้มีหลายวิธีดังนี้ คือ

2.5.2.1 GC-Grab radon / Active charcoal

การตรวจวัดโดยวิธีนี้จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวัดก๊าซเรดอน เนื่องจากต้องใช้ระบบดูดอากาศหรือพัดลม เพื่อให้อากาศไหลผ่านผงถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในกระป๋อง โดยทั่วไปในการตรวจวัดก๊าซเรดอนแต่ละตัวอย่าง จะใช้ช่วงเวลาประมาณ 15 นาที ถึง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำกระป๋องที่บรรจุผงถ่านกัมมันต์มาใส่ไว้ในภาชนะปิด แล้วนำกลับไปวิเคราะห์ผลที่ห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์นั้นใช้หลักการเหมือนกับข้อ 2.5.1.1 หรือ 2.5.1.3

2.5.2.2 GB-Grab Radon / Pump-Collapsible Bag

หลักการตรวจวัดก๊าซเรดอนโดยวิธีการนี้ อาศัยถุงตัวอย่างที่ทำจากวัสดุที่ก๊าซเรดอนไม่สามารถเคลื่อนผ่านได้ ในการตรวจวัดผู้ทำการตรวจวัดจะใช้เครื่องสูบอากาศ (Pump) ที่ยกได้ดูดอากาศใส่ถุง หลังจากนั้นปิดถุงแล้วนำกลับมาวิเคราะห์ยังห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะทำการถ่ายอากาศจากถุงไปสู่เซลล์เรืองแสง (Scintillation Cell) เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซเรดอนเคลื่อนที่ชนกับซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ที่เคลือบไว้ด้านในของเซลล์ ซึ่งจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงความยาวคลื่นแสง โดยจะถูกตรวจนับไว้ด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultipliertube,PMT) จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งจะช่วยในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

2.5.3 Continuous Active Sampling

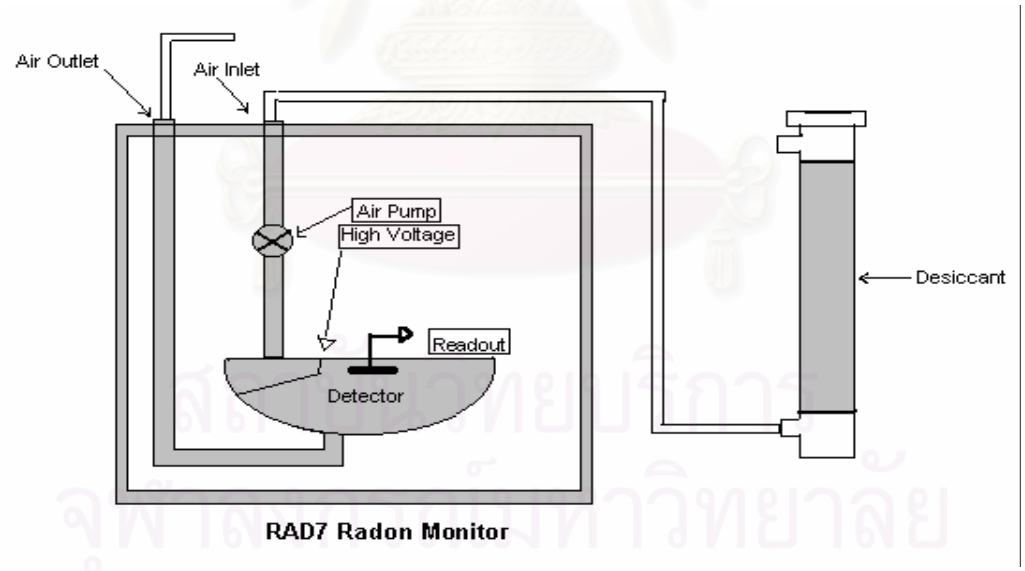
เป็นการตรวจวัดแบบเป็นจังหวะต่อเนื่องกันโดยอัตโนมัติตลอดช่วงเวลาที่กำหนด วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและจะใช้ต่อเมื่อการวัดแบบอื่นมีปัญหา หรือพบว่า บริเวณที่ต้องการตรวจวัดมีระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงผิดปกติ ตัวอย่างของวิธีการตรวจวัดแบบนี้ คือ

2.5.3.1 CR- Continuous Radon Monitoring

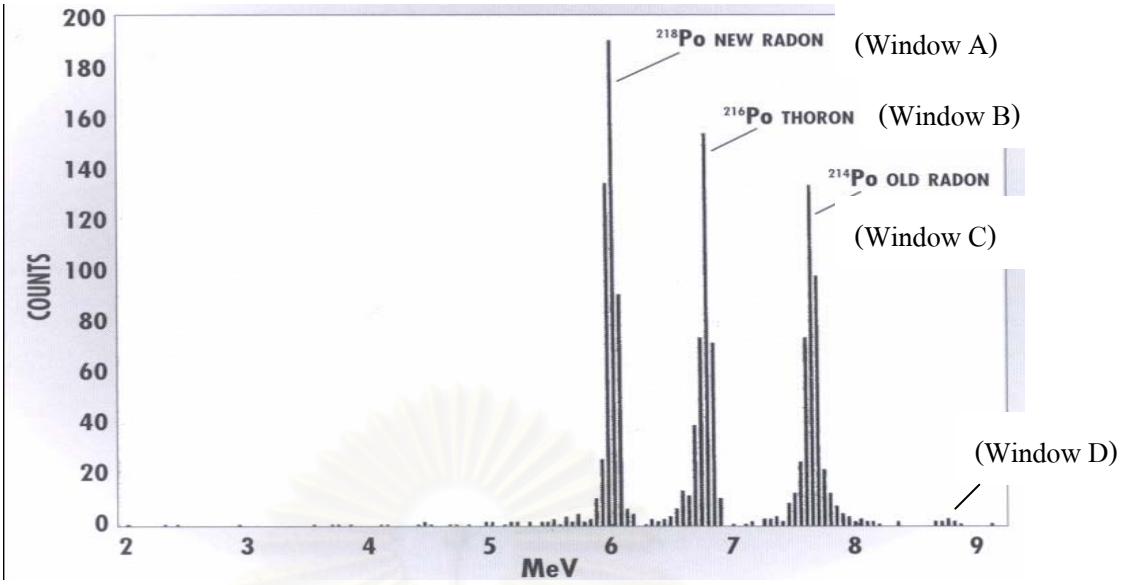
การตรวจวัดโดยวิธีการนี้ประกอบด้วยเครื่องมือตรวจวัดก๊าซเรดอนซึ่งจะทำการบันทึกเวลาที่ใช้จริงในการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง อากาศจะถูกสูบหรือถูกแพร่เข้าไปในห้องวัด

ที่ประกอบด้วยหัววัดแอลฟาแบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอนหรือโทรอน วิ่งผ่านเข้าไปในห้องวัด (Chamber) การวิเคราะห์จะดำเนินการด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยที่ความเข้มข้นของเรดอนหรือโทรอนจะถูกเก็บหรือบันทึกไว้ที่หน่วยความจำของเครื่อง และสามารถที่จะส่งผลไปยังเครื่องพิมพ์โดยตรง เช่น เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอนที่มีชื่อเรียกทางการค้า ว่า RAD7

รูปที่ 2.6 เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7[22]



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างภายในของ RAD7[22]



รูปที่ 2.8 สเปคตรัมรังสีแอลฟาจากเครื่อง RAD7[22]

สเปกตรัมใน รูปที่ 2.8 เป็นสเปกตรัมผลวิเคราะห์ก๊าซเรดอนที่พิมพ์ออกมาจากเครื่อง RAD7 โดย แสดงผลของค่าอัตรานับแยกตามหน้าต่าง (window) ดังนี้

- หน้าต่าง A : ค่าอัตรานับสุทธิของ ^{218}Po
- หน้าต่าง B : ค่าอัตรานับสุทธิของ ^{216}Po
- หน้าต่าง C :ค่าอัตรานับสุทธิของ ^{214}Po
- หน้าต่าง D :ค่าอัตรานับสุทธิของ ^{212}Po

โดยระดับความเข้มข้นของเรดอน จะมาจาการวัด ^{218}Po (นิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกของเรดอน) ของหน้าต่าง A (ช่วงเวลาที่ยังไม่ถึงสมดุลกัมมันตรังสีจะใช้ผลรวมของหน้าต่าง A และ C) ในขณะที่หน้าต่าง B และ D จะให้ค่าระดับความเข้มข้นของโทรอน

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้กับวิธีการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ตามวิธีการในข้อ 2.5.1.1 แต่เนื่องจากปริมาณของก๊าซเรดอน ในวัสดุตามธรรมชาติมีปริมาณต่ำ จึงต้องใช้เทคนิคการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน-222 โดยอาศัยหลักการที่ว่า องค์ประกอบของอากาศมีปริมาณ และจุดเดือดที่แตกต่างกันซึ่งจะสามารถแยกออกจากกันได้ ดังแสดงตามตารางที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

ในการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน จะใช้ไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิที่ –196 องศาเซลเซียลเป็นตัวหล่อเย็นระบบ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจุดเดือดของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบ จะเห็นว่าก๊าซออกซิเจน อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ และเรดอน จะเปลี่ยนสถานะจากก๊าซเป็นของเหลว

เนื่องจากจุดเดือดของก๊าซเหล่านี้สูงกว่าอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ยกเว้นก๊าซไนโตรเจนที่จะยังคงสภาพเป็นก๊าซอยู่จึงสามารถออกไปได้ ทำให้สามารถกำจัดก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีปริมาณ 78.08 เปอร์เซ็นต์ ในอากาศออกไปได้ โดยที่ก๊าซเรดอนจะยังคงเป็นของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงอยู่

ตารางที่ 2.7 จุดเดือดของก๊าซต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอากาศ[23]

ก๊าซ	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
ไนโตรเจน	-195.80
ออกซิเจน	-182.96
อาร์กอน	-185.70
คาร์บอนไดออกไซด์	-65.00
เรดอน	-61.80

ตารางที่ 2.8 ปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอากาศ[23]

ส่วนประกอบของอากาศ	ปริมาณ (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไนโตรเจน	78.0840
ออกซิเจน	20.9460
อาร์กอน	0.92400
คาร์บอนไดออกไซด์	0.03300
นีออน	0.00182
ฮีเลียม	0.00520
อื่นๆ	0.0006

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการดูดซับก๊าซเรดอนบนถ่านกัมมันต์ ซึ่งผู้วิจัยจะต้องทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สารต้นกำเนิดของก๊าซเรดอน จึงควรกล่าวถึงคุณสมบัติของแร่โมนาไซต์ไว้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

2.6 แร่โมนาไซต์[24]

แร่โมนาไซต์ คือ แร่ประกอบส่วนย่อยในหินแกรนิตไนท์ และเพกมาไทท์ มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเม็ดทราย เป็นแร่ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง จึงมักพบเกิดอยู่ร่วมกับแร่หนัก เช่น แร่แมกเนไทท์ แร่อิลเมไนท์ แร่รูไทล์ แร่กาเหนต และแร่เซอร์คอน ในประเทศไทย พบในแหล่งแร่ดีบุก หาดทราย และตามลำธารทั่วไปที่ใกล้กับภูเขา คุณสมบัติเฉพาะของแร่โมนาไซต์ คือ

2.6.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เป็นรูปผลึกระบบออร์โธรอมบิก (ผลึกโต) แต่ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นผลึกเล็กมาก มีลักษณะมวลเมล็ดคล้ายเม็ดทราย (ทรายโมนาไซท์) สีเหลือง สีเหลืองออกเขียว หรือสีน้ำตาลแดง มีความวาวคล้ายขี้ผึ้ง โปร่งแสง เปราะร่วน รอยแตก เว้าโค้ง หรือไม่เรียบ ถ้าเป็นผลึกจะเห็นรอยแยกแนวเรียบชัดในบางก้อน แต่มักจะไม่ค่อยเห็น เพราะโครงสร้างของผลึก ถูกทำลายโดยกัมมันตรังสี ดังแสดงตามรูปที่ 2.9 มีค่าความแข็ง 5.0-5.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ 4.6-5.4 และค่าความถ่วงจำเพาะจะสูงขึ้นถ้ามีทอเรียมมากขึ้น

2.6.2 คุณสมบัติทางเคมี มีสูตรทางเคมีว่า (Ce, La, Y, Th) PO_4 แร่โมนาไซท์ไม่หลอมละลายและไม่ละลายในกรดเกลือ และถ้าหลอมละลายกับโซเดียมคาร์บอเนตจะสามารถละลายในกรดไนตริกได้ หรือใส่ในสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต จะให้ตะกอนสีเหลือง (เป็นการทดสอบฟอสเฟตวิธีหนึ่ง)

รูปที่ 2.9 ลักษณะของผลึกโมนาไซต์[24]

2.7 ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา[25]

สำหรับระบบวิเคราะห์รังสีแกมมาสำหรับการทดลองนี้ใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High-purity Germanium Detectors) ซึ่งเป็นหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detectors) ซึ่งข้อดีของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำคือ

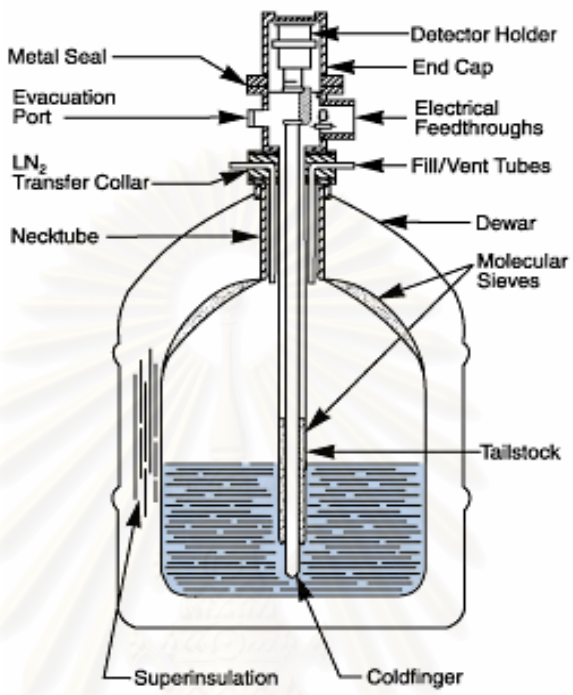
- มีความสามารถในการแยกแยะพลังงานสูง
- มีขนาดเล็ก
- มี Rise Time ของการเกิดสัญญาณที่เร็วมาก (Rise Time หมายถึง ช่วงของเวลาที่สัญญาณมีขนาดจาก 10 เปอร์เซ็นต์ – 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าแอมปลิจูด)
- การตอบสนองมีการแปรเปลี่ยนเชิงเส้น กับ พลังงานที่ Deposited ในหัววัด
- ไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก Entrance Window ของหัววัด

ข้อจำกัดในการใช้งานหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ คือ ราคาของหัววัดสูงมากเมื่อเทียบกับหัววัดรังสีแบบอื่นๆ และข้อจำกัดที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ความจำเป็นที่ต้องให้มีการทำงานของหัววัดที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ-196 องศาเซลเซียส เป็นตัวลดอุณหภูมิ เหตุผลประการหนึ่งเป็นเพราะสารกึ่งตัวนำมีความสามารถในการนำกระแสได้สูง เมื่ออุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้นขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าที่เข้มจ่ายให้แก่หัววัดจะมีขนาดสูงมากจนทำให้หัววัดเกิดความเสียหายอย่างแน่นอน

2.7.1 กลไกการทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ[25]

เมื่อนำสารเจือ (Impurity) มาเติมลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ดังที่เรียกว่าการโด๊ป (Doping) สารเจือที่เติมลงไปนี้แม้จะมีปริมาณน้อย แต่มีผลทำให้การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อนำสารเจือซึ่งเป็นธาตุในกลุ่ม 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส มาเติมลงในสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิคอน ทำให้ได้อิเล็กตรอนเป็นตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority Carriers) เรียกสารกึ่งตัวนำนี้ว่าชนิดเอ็น (N-Type) แต่ถ้าเติมลงด้วยสารเจือซึ่งเป็นธาตุในกลุ่ม 3 ของตารางธาตุ เช่นธาตุโบรอน ทำให้ได้โฮลเป็นตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ เรียกสารกึงตัวนำนี้ว่า ชนิดพี (P-Type) เมื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีให้เชื่อมต่อกันเกิดรอยต่อที่เรียกว่า P-N Junction อิเล็กตรอนจากผลึกชนิดเอ็นจะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลึกชนิดพี และโฮลจากผลึกชนิดพี จะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลึกชนิดเอ็น เกิดเป็นแนวขั้วไฟฟ้าบวกในผลึกชนิดเอ็น และแนวขั้วไฟฟ้าลบในผลึกชนิดพี โดยมีรอยต่ออยู่ตรงกลาง จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจากแนวขั้วบวกไปยังแนวขั้วลบ ตรงบริเวณระหว่างแนวขั้วไฟฟ้าจะไม่มีตัวนำประจุเหลืออยู่เลย เรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ(Depletion Region) บริเวณปลอดพาหะเป็นเสมือนตัวกลางในการวัดรังสีชนิดบรรจุด้วยก๊าซเมื่อต่อขั้วศักย์ไฟฟ้าบวกเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และต่อขั้วลบเข้ากับด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี เรียกการต่อลักษณะนี้ว่า Reverse Bias จะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวกว้างขึ้น เมื่อ

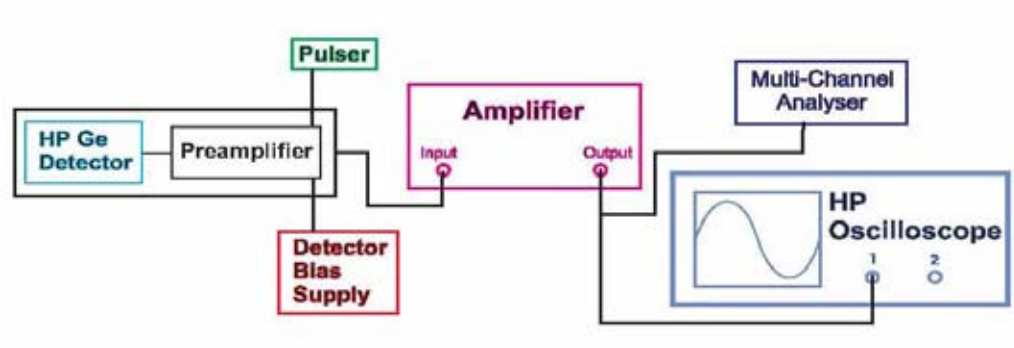
รังสีตกกระทบในบริเวณปลอดพาหะ เกิดการถ่ายโอนพลังงานได้เป็นคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล จำนวนมาก เกิดการเคลื่อนที่ประจุไปตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้า และเกิดมีกระแสไหลในวงจรที่ต่อครบ



รูปที่ 2.10 แผนภาพของหัววัดรังสีแบบ HPGe[26]

ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา โดยทั่วไปจะประกอบด้วย หัววัด และมัลติชัลแนล อนาไลเซอร์โดยหัววัดจะต่ออยู่กับแอมพลิฟาย เพื่อขยายสัญญาณ และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจ่ายกระแสให้กับหัววัด ในแต่ละอันตรกิริยาพลังงานรังสีที่เข้ามาจะถ่ายทอดให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของหัววัดเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (Multi-Channel Analyzer) และแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม

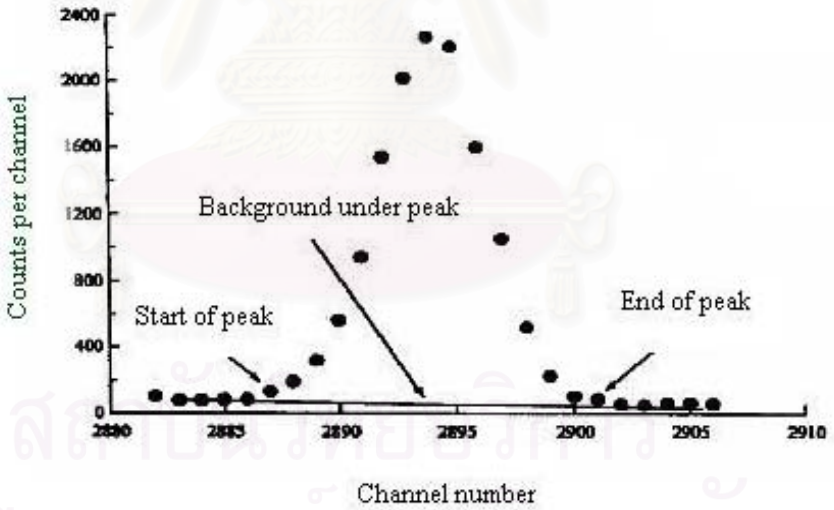
ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา โดยทั่วไปจะประกอบด้วย หัววัดรังสีแกมมา และมัลติชัลแนลอนาไลเซอร์โดยหัววัดจะต่ออยู่กับแอมพลิฟาย เพื่อขยายสัญญาณ และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจ่ายกระแสให้กับหัววัด ในแต่ละอันตรกิริยา พลังงานรังสีที่เข้ามาจะถ่ายทอดให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของหัววัดเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง และแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม



รูปที่ 2.11 แสดงแผนผังการจัดระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา [27]

2.7.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา [28]

สำหรับการหาความเข้มรังสีจากการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ทำได้โดยการวัดอัตราการนับสำหรับแต่ละนิวไคลด์ที่มีอยู่ในสเปกตรัม พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการคำนวณหาความเข้มรังสีคือ ความเข้มรังสีสุทธิ (Net Peak Area) เวลาที่ต้องการนับวัด (Total live Time) และเวลาที่ใช้จริง (Total Clock Time) ของแต่ละโฟโตพีคสำหรับนิวไคลด์ที่ต้องการหาความเข้มรังสี



รูปที่ 2.12 การหาความเข้มรังสีสุทธิ (Net peak area) [26]

การเลือกโฟโตพีคขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีของนิวไคลด์นั้น ๆ เนื่องจาก มีโฟโตพีคของนิวไคลด์ตัวอื่น ๆ จากตัวอย่างปรากฏอยู่ในสเปกตรัมด้วย ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อน

โดยปกติจะเลือกใช้ โฟโตพีคที่มีความเข้มสูงสุด เนื่องจากให้ความไวที่ดีกว่า โดยทำการหาพื้นที่ใต้พีค (Total Peak Area) ที่สนใจโดยการรวมอัตราการนับของพีคในช่วงที่สนใจ และ

ลบด้วยแบคกราวนด์ใต้พีคในช่วงเดียวกัน จะได้ความเข้มรังสีสุทธิ คือค่า อัตราการนับของนิวไคลด์ที่ต้องการ

2.8 อัตราการปลดปล่อยเรดอน -222 (Radon Emanation Rate)[29]

อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถอธิบายได้โดย ค่าคงที่การสลายตัว (λ) โดยที่ $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ซึ่ง $T_{1/2}$ คือค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์นั้นๆ และเนื่องจาก $\lambda_{Ra} << \lambda_{Rn}$ โดย λ_{Ra}, λ_{Rn} คือค่าคงที่การสลายตัวของเรเดียม-226 และ เรดอน-222 ตามลำดับ จากสมดุลกัมมันตรังสีแสดงให้เห็นว่า การสลายตัวของเรดียม-226 เปลี่ยนไปเป็นเรดอน-222 เป็นสมดุลกัมมันตรังสีแบบเซคูลาร์อย่างซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \tag{2.24}$$

เรดอน-222 อยู่ในสถานะก๊าซ ง่ายต่อการแพร่กระจายออกจากวัสดุตามธรรมชาติต่างๆ โดยกระจายผ่านออกมาทางรูพรุนหรือรอยแยกที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ๆ โดยเรเดียม-226 เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดเรดอน-222 อันเนื่องมาจากเรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนาน แต่อย่างไรก็ตาม เรดอน-222 โดยส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะแพร่กระจายออกมาสู่ภายนอกได้ทั้งหมด เนื่องจากถูกกักไว้ในบริเวณรูพรุนภายในวัสดุ จึงมีเพียงปริมาณของเรดอน-222 จำนวนน้อยที่สามารถหลุดรอดแพร่กระจายออกสู่ภายนอกได้

อัตราการเกิดเรดอน-222 (^{222}Rn production rate) แทนด้วยสัญลักษณ์ Q ($Bq \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$) ในช่องว่างภายในวัสดุแสดงได้ดังสมการ

$$Q = \lambda C_{Ra} \rho \frac{\eta}{p} \tag{2.25}$$

โดย λ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน-222 มีค่าเท่ากับ $2.1 \times 10^{-6}\ s^{-1}$

C_{Ra} ^{226}Ra activity concentration ($Bq \cdot kg^{-1}$)

ρ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ ($kg \cdot m^{-3}$)

η ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการปลดปล่อยเรดอนในรูพรุนของวัสดุ

p ค่าความพรุนของวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภายหลังจากการแพร่กระจายของเรดอนภายในช่องว่างรูพรุนของวัสดุ เรดอนก็จะเริ่มสลายตัวทั้งภายในวัสดุ และบางส่วนก็จะแพร่กระจายออกมายังพื้นผิวของวัสดุ เมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดความหนาของวัสดุมีค่าน้อยกว่าระยะที่เคลื่อนที่ได้ของเรดอน (เช่น แผ่นยิปซัมขนาดบาง) เรดอนก็จะแพร่กระจายไปทั่วทั้งภายในรูพรุนในวัสดุ และแพร่กระจายออกมายังอากาศรอบๆ ภายนอกตัววัสดุ ในกรณีนี้อัตราการผลิตเรดอนภายในรูพรุนของวัสดุ จะมีค่าเท่ากับอัตราการปลดปล่อยเรดอนออกสู่ภายนอก A_{Rn}^{out} ถ้าหากทราบค่าพื้นที่ผิวของวัสดุ (Surface) ก็สามารถที่จะคำนวณหาค่า อัตราการปลดปล่อย $E = Bq.m^{-2}.s^{-1}$ ได้จากสมการ

$$E = \lambda \frac{A_{Rn}^{out}}{S} \tag{2.26}$$

และในกรณีที่วัสดุมีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถหาค่าอัตราการปลดปล่อยในเทอมของอัตราการปลดปล่อยต่อมวลของวัสดุ $M = Bq.kg^{-2}.s^{-1}$ ได้จากสมการ

$$E = \lambda \frac{A_{Rn}^{out}}{M} \tag{2.27}$$

ระดับความเข้มข้นของเรดอนที่อยู่ในภาชนะระบบปิด และอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{(t)} = C_{\infty}(1 - e^{-\lambda t}) \tag{2.28}$$

$$C_{\infty} = \frac{ES}{V\lambda} \tag{2.29}$$

นำไปแทนค่าในสมการ (2.24) และ (2.25) จะได้อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในรูปของพื้นที่ผิวและน้ำหนักของวัสดุ ตามลำดับ คือ

$$E_{surface} = \frac{C_{(t)}V\lambda}{S\left(1 - e^{-\lambda t}\right)} \tag{2.30}$$

$$E_{mass} = \frac{C_{(t)}V\lambda}{A\left(1 - e^{-\lambda t}\right)} \tag{2.31}$$

โดย $C_{(t)}$ ค่าระดับความเข้มข้นของเรดอน $(Bq.m^{-3})$ ที่เวลา (s)

C_{∞} ค่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของเรดอนที่สภาวะอิ่มตัว $(Bq.m^{-3})$

E อัตราการปลดปล่อยเรดอนของวัสดุ $(Bq.m^{-2}.s^{-1}, Bq.kg^{-2}.s^{-1})$

V ปริมาตรของภาชนะปิด (ลูกบาศก์เมตร, m^{-3})

λ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน-222 มีค่าเท่ากับ 2.1 x 10^{-6} s^{-1}

S พื้นที่ผิวของวัสดุ (ตารางเมตร, m^{-2})

A มวลของวัสดุ (กิโลกรัม, kg)

สำหรับสมการที่ (2.28) ใช้คำนวณหาค่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของเรดอนที่เวลา infinite time $(Bq.m^{-3})$ จากผลการตรวจวัดแบบต่อเนื่องที่เวลาต่างๆ ด้วยวิธีการวัดความเข้มข้นเรดอน หัวข้อ 2.5

2.9 สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 (Radon Emanation Fraction)[29]

สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 (η) หมายถึง สัดส่วนความเข้มข้นเรดอนที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่าง โดยทั่วไปการหาสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{E}{I_{Rn} \times \lambda_{Rn}} \tag{2.32}$$

โดย E อัตราการปลดปล่อยเรดอนของวัสดุ $(Bq.kg^{-2}.s^{-1})$

I_{Rn} ความเข้มข้นของเรเดียม-226 $(Bq.kg^{-1})$

λ_{Rn} ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน-222 มีค่าเท่ากับ 2.1 x 10^{-6} s^{-1}

ถ้า ค่า (η) >1 หมายความว่า ความเข้มข้นเรดอนที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณมากกว่าอยู่ในตัวอย่าง แต่ถ้า (η) <1หมายความว่า ความเข้มข้นเรดอนที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณน้อยกว่าที่อยู่ตัวอย่าง

โดยปัจจัยทางกายภาพของวัสดุที่ปนเปื้อนเรเดียม (Ra-bearing material) มีผลต่อการหาสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน เช่น การกระจายเรเดียมในวัสดุ ลักษณะของวัสดุ (เนื้อวัสดุจับตัวกันแน่น หรือ หลวม) ขนาดของรูพรุน ความชื้น เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ที่คำนวณจากค่าปริมาณความเข้มข้นเรดอน-222 จากวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และตรวจวัดด้วยเครื่องมือ RAD7 ตามลำดับ สำหรับค่าความแรงรังสีของเรเดียมภายในวัสดุ (I_{Rn}) จะใช้วิธีวัดโดยตรงจากรังสีแกมมาพลังงาน 186 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของเรเดียม-226 แล้วคำนวณเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานแร่ยูเรเนียมชนิดผงและใช้วิธีวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงานต่ำของสารมาตรฐาน และแผ่นยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัยในการคำนวณปรับแก้ค่าผลการวิเคราะห์รังสีแกมมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ และสารเคมี

3.1.1 ไนโตรเหลว

3.1.2 ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์

3.1.3 แร่โมนาไซต์ ปริมาณ 1 กิโลกรัม

3.1.4 ถ่านกัมมันต์ของ Calgon Activated Carbon ชนิด PCB ขนาด 6 x 16 mesh

3.1.5 สารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ความแรงรังสี 0.001 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร

3.1.6 แผ่นยิปซัม ชนิดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ชนิดละ 6 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาด กว้าง 0.40 เมตร ยาว 0.60 เมตร หนา 0.01 เมตร และมีน้ำหนัก 0.90 กิโลกรัม

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 วาล์ว ขนาด 3 หุน

3.2.2 ปั๊มดูดอากาศ

3.2.3 แผ่นอะรีลิค ขนาดกว้าง 0.66 เมตร ยาว 0.66 เมตร สูง 0.42 เมตร

3.2.4 กล่องโฟม ขนาดกว้าง 0.16 เมตร ยาว 0.29 เมตร สูง 0.16 เมตร

3.2.5 กล่องพลาสติกมีฝาปิด ขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.42 เมตร สูง 0.30 เมตร

3.2.6 ภาชนะโลหะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร สูง 0.12 เมตร รวมปริมาตร 0.37 ลูกบาศก์เมตร ตรงกลางด้านบน และด้านข้างของภาชนะมีท่อโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร สูง 0.10 เมตร พร้อมติดวาล์วที่ปลายท่อ

3.2.7 ภาชนะพลาสติกแบบกลมมีฝาปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร สูง 0.05 เมตร เจาะรูที่ด้านบน และด้านล่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ฝาด้านบนเชื่อมต่อด้วยท่อพลาสติกยาว 0.02 เมตร

3.2.8 กล่องพลาสติกกลมแบบใสมีฝาปิด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.12 เมตร สูง 0.05 เมตร

3.3 เครื่องมือ

3.3.1 เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ที่มีชื่อการค้าว่า RAD-7

3.3.2 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)ที่มีประสิทธิภาพ 30% ประเภท Coaxial Germanium Detector ของบริษัท CANBERRA

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (Multichannel Analyzer; MCA) รุ่น Inspector 2000 ของ Canberra

3.3.4 เครื่องคอมพิวเตอร์

3.3.5 โปรแกรม Genie-2000 ของ Canberra

3.3.6 เครื่องวัดความชื้น

3.3.7 เครื่องวัดอุณหภูมิ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง แบ่งออกเป็น

3.4.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

3.4.2 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม คำนวณได้จากปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่วัดได้จากตัวอย่าง โดยในการศึกษานี้ได้ใช้ 2 เทคนิค ในการหาปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอน ดังนี้

3.4.2.1 เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนย่อย ดังนี้

- การตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนจากแร่โมนาไซต์ ด้วยถ่านกัมมันต์
- การเตรียมถ่านกัมมันต์มาตรฐานที่ให้ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่แน่นอน
- การตรวจวัดอัตรานับรังสีแกมมาของแผ่นยิปซัม โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเรดอน

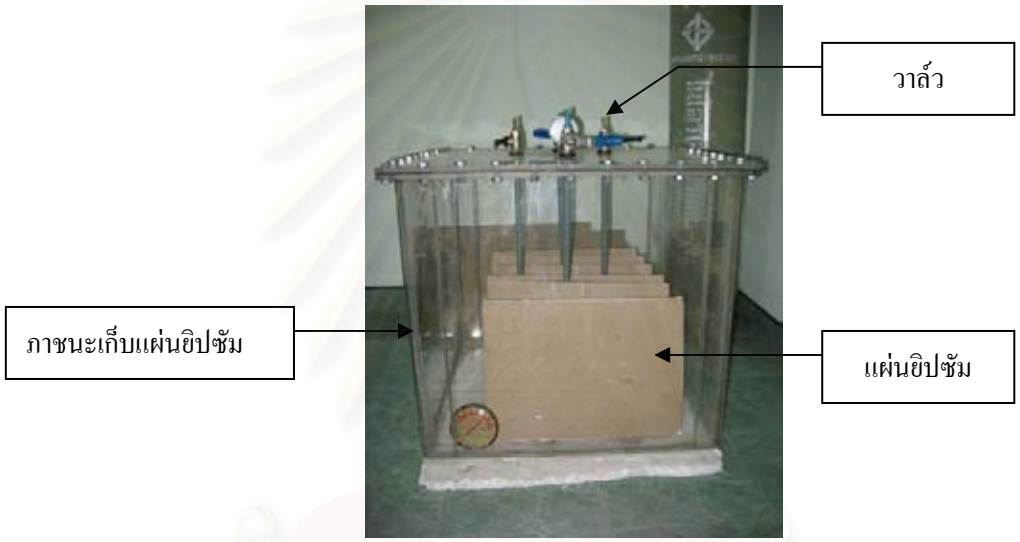
3.4.2.2 เทคนิคการใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7

3.4.3 การคำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนต่อปริมาณเรเดียมที่มีอยู่ในแผ่นยิปซัม ซึ่งใช้เทคนิคแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี หาความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ที่มีอยู่ในแผ่นยิปซัม

3.5 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

ก. การสร้างภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม

ในการทดลองนี้เป็นการตรวจวัดก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยออกมาจากแผ่นยิปซัม ที่บรรจุอยู่ในภชนะที่ปิดสนิท โดยภาชนะดังกล่าวเตรียมจากนำแผ่นอะครีลิก ขนาด 0.66 x 0.66 x 0.42 มาประกอบเป็นกล่องลูกบาศก์ ขนาดความจุ 0.18 ลูกบาศก์เมตร ฝาด้านบนติดวาล์วพร้อมเครื่องวัดความดัน เพื่อให้อากาศสามารถเข้าและออกจากภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ได้ ภายในมีเครื่องวัดความชื้น และเครื่องวัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ดังแสดงตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม

ข. การสร้างอุปกรณ์การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

เนื่องจากปริมาณก๊าซเรดอนที่ทำการตรวจวัมีความเข้มข้นน้อย จึงต้องสร้างภาชนะดักจับก๊าซเรดอนให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น เพื่อที่สามารถจะตรวจวัดได้ด้วยระบบวัดรังสี โดยได้ทำการนำท่อทองแดงขนาด 3 หุน มาขดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ซึ่งขดได้รวม 10 รอบ (10 ชั้น) โดยปลายด้านหนึ่งให้ติดวาล์ว เพื่อให้เป็นขาเข้าของก๊าซ ส่วนปลายอีกด้านต่อเข้ากับภาชนะโลหะทรงกระบอก เพื่อรองรับของเหลวที่ถูกควบแน่นด้วยไนโตรเจนเหลว และด้านบนของภาชนะมีท่อโลหะ พร้อมติดวาล์วสำหรับให้ก๊าซเรดอนออก ดังแสดงตามรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

ค. การสร้างอุปกรณ์ภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์

ภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ดูดซับก๊าซเรดอน เตรียมจากการนำภาชนะพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร มีปริมาตร 251.42 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ มีขนาดใกล้เคียงเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดรังสี HPGe ขนาด 3 นิ้ว (7.62 เซนติเมตร) บรรจุถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใส่ในภาชนะพลาสติก ภาชนะละ 80 กรัม ดังแสดงตามรูปที่ 3.3 หลังจากบรรจุถ่านกัมมันต์แล้ว ปิดผนึกภาชนะพลาสติก ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ให้แน่น โดยไม่ให้มีอากาศผ่านเข้าออกได้ ดังแสดงตามรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.3 ภาชนะพลาสติกบรรจุถ่านกัมมันต์

รูปที่ 3.4 ภาชนะพลาสติกบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ปิดผนึกแล้ว

3.6 การดำเนินการวิจัย

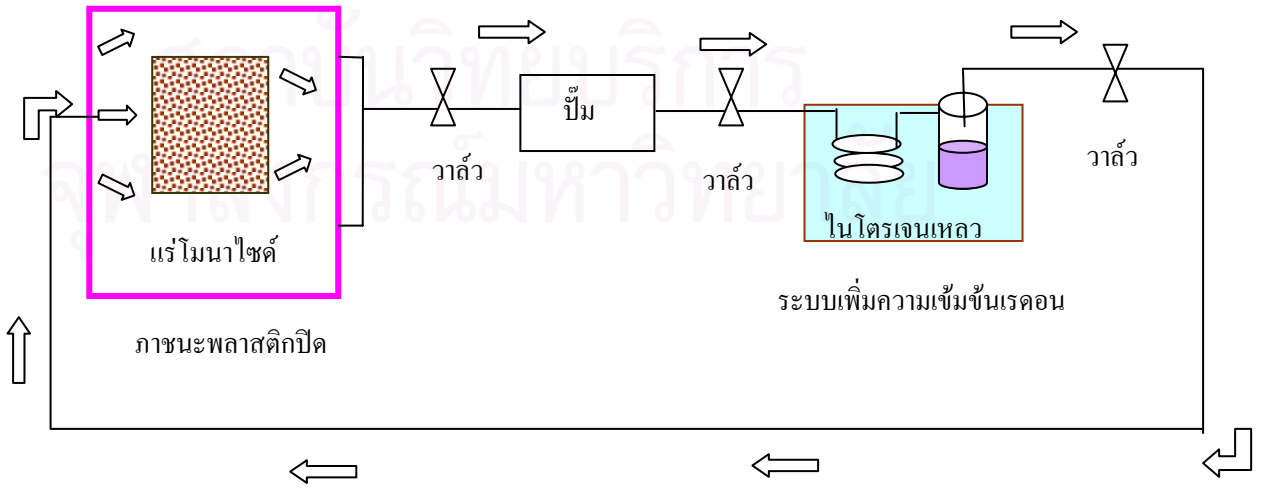
3.6.1 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม ซึ่งต้องทราบค่าปริมาณความเข้มข้นเรดอน โดยในการศึกษานี้ได้ใช้เทคนิค 2 เทคนิค คือ

เทคนิคที่ 1 เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนย่อยดังนี้

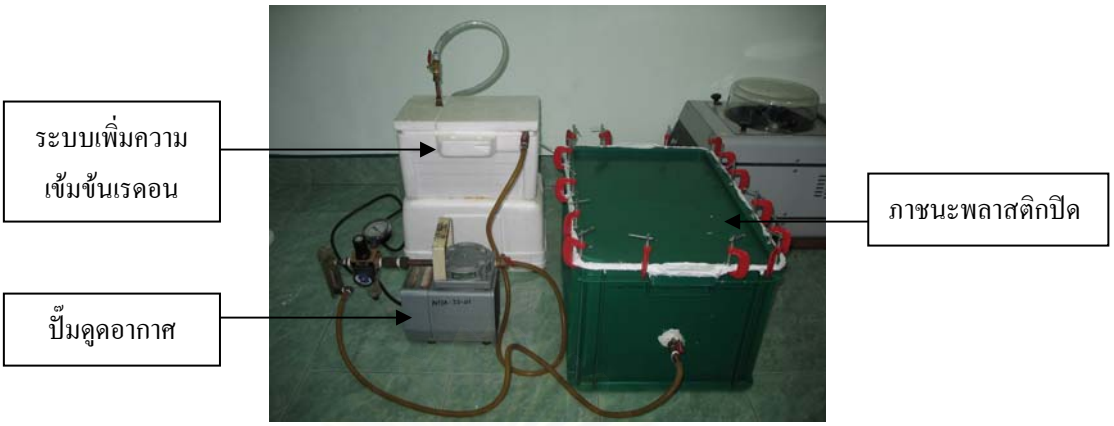
1) การตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์

ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้แร่โมนาไซต์ ซึ่งมีแร่ยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบ และเป็นต้นกำเนิดก๊าซเรดอน โดยมีรายละเอียดของการตรวจวัด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำแร่โมนาไซต์ ปริมาณ 500 กรัม บรรจุลงในภาชนะพลาสติก ปิดฝาให้แน่นด้วยสกรูยึด จากนั้นต่อสายยางขาออกเข้ากับปั๊มดูดอากาศ ซึ่งต่ออยู่กับระบบอุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่อยู่ในกล่องโฟมบรรจุไนโตรเจนเหลว โดยปลายขาออกของภาชนะโลหะทรงกระบอก จะต่อเข้ากับภาชนะภาชนะพลาสติกปิดที่บรรจุแร่โมนาไซต์ จากนั้นเปิดวาล์วทุกตัว เพื่อให้ก๊าซสามารถหมุนเวียนผ่านระบบเพิ่มความเข้มข้นเรดอน กับกล่องพลาสติกมีฝาปิด ดังแสดงตามแผนภาพรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ระบบปิดที่ใช้ตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนจากแร่โมนาไซต์

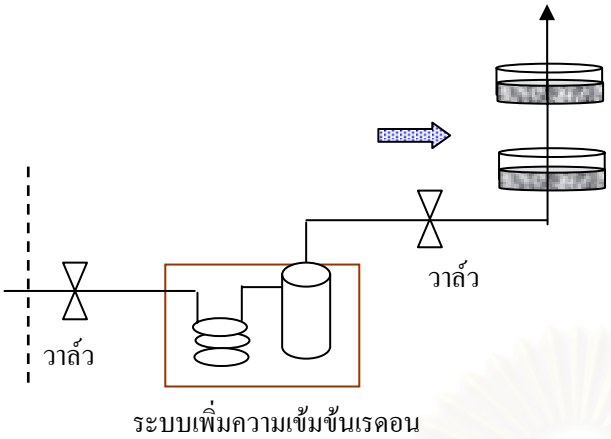


รูปที่ 3.6 การตรวจวัดประสิทธิภาพของก๊าซเรดอน จากแร่โมนาไซต์

ขั้นตอนที่ 2 เปิดปั๊ม และปรับให้มีอัตราการไหลของอากาศในระบบประมาณ 3 ลิตรต่อนาที ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก๊าซเรดอนที่สลายตัวจากเรเดียม-226 จะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวในภาชนะโลหะทรงกระบอก ระหว่างที่รอการเพิ่มความเข้มข้นก๊าซเรดอนให้นำถ่านกัมมันต์ที่อบแล้วจำนวน 80 กรัม ใส่ในภาชนะพลาสติก 2 อัน แล้ว ต่อเชื่อมเข้าด้วยกันปิดผนึกภาชนะให้แน่น ดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 ภาชนะพลาสติกที่ต่อ 2 ภาชนะเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อครบเวลา 1 ชั่วโมง ให้ปิดปั๊มและปิดวาล์วทุกตัว จากนั้นถอดสายยางขาเข้าของกล่องพลาสติกที่บรรจุแร่โมนาไซต์ และนำไปสวมกับปลายท่อล่างของภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์ ดังแสดงตามแผนภาพรูปที่ 3.8 และรูปถ่ายที่ 3.9 จากนั้นค่อยๆ เทไนโตรเจนเหลวออกจากกล่องโฟม เพื่อให้อุณหภูมิของอุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ของเหลวที่ควบแน่นอยู่ในภาชนะโลหะทรงกระบอกระเหยกลายเป็นก๊าซผ่านถ่านกัมมันต์อย่างช้า



รูปที่ 3.8 แผนภาพการต่ออุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นเรดอนกับภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์

รูปที่ 3.9 รูปถ่ายการต่ออุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นเรดอนกับภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อของเหลวที่อยู่ในภาชนะโลหะทรงกระบอก ระเหยกลายเป็นก๊าซผ่านถ่านกัมมันต์หมดแล้ว ให้ปิดภาชนะพลาสติกบรรจุถ่านกัมมันต์ให้สนิท แล้วทิ้งไว้ให้ถึงจุดสมดุลทางกัมมันตรังสีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาวัดรังสีแกมมาจากบิสมัท-214 ด้วยหัววัด HPGe ที่มีประสิทธิภาพ 30%

ขั้นตอนที่ 5 จากนั้นให้ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วจึงคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้สูตร ดังนี้

ความแรงรังสีที่วัดได้จะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอน-222 ได้ดังนี้

กำหนดให้ 1) ปริมาณก๊าซเรดอนดูดจากแร่โมนาไซต์ = x

2) ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเรดอน = E

3) ปริมาณก๊าซเรดอนที่ถูกดูดซับในภาชนะที่ 1 = a

4) ปริมาณก๊าซเรดอนที่ถูกดูดซับในภาชนะที่ 2 = b

โดย

$$\frac{a}{E} = x \qquad (3.1)$$

$$\frac{b}{E} = x - a \qquad (3.2)$$

จะได้

$$E = \frac{a-b}{a} \quad (3.3)$$

2) การเตรียมถ่านกัมมันต์มาตรฐานที่ให้ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่แน่นอน

ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

การวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบจากภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม จำเป็นต้องเตรียมถ่านกัมมันต์มาตรฐานที่ทราบปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่แน่นอน จึงใช้วิธีการหยดสารละลายเรเดียมที่ทำการปรับเทียบแล้วลงในถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำถ่านกัมมันต์ที่อบแล้ว มาใส่ในภาชนะพลาสติก 4 อัน ปริมาณ 80 กรัม โดยภาชนะที่ 1 ปิดฝาให้สนิท เก็บไว้เป็นแบรกกราวนด์

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ความแรงรังสี 0.00025 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ซึ่งเตรียมจากการหยดสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ที่มีความแรงรังสี 0.001 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร ลงในถ่านกัมมันต์ของภาชนะที่ 2 โดยหยดให้กระจายทั่วบริเวณถ่านกัมมันต์ แล้วปิดฝาให้สนิท

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ความแรงรังสี 0.00050 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ซึ่งเตรียมจากการหยดสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ที่มีความแรงรังสี 0.001 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร ลงในถ่านกัมมันต์ของภาชนะที่ 3 โดยหยดให้กระจายทั่วบริเวณถ่านกัมมันต์ แล้วปิดฝาให้สนิท

ขั้นตอนที่ 4 เตรียมสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ความแรงรังสี 0.00090 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ซึ่งเตรียมจากการหยดสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ที่มีความแรงรังสี 0.001 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.90 มิลลิลิตร ลงในถ่านกัมมันต์ของภาชนะที่ 4 โดยหยดให้กระจายทั่วบริเวณถ่านกัมมันต์ แล้วปิดฝาให้สนิท

ขั้นตอนที่ 5 ทิ้งไว้ให้ถึงจุดสมดุลทางกัมมันตรังสี แล้วนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ภาชนะมาวัดรังสีแกมมา จากพีคบิสมัท-214 ด้วยหัววัด HPGe ที่มีประสิทธิภาพสัมพันธ์ 30%

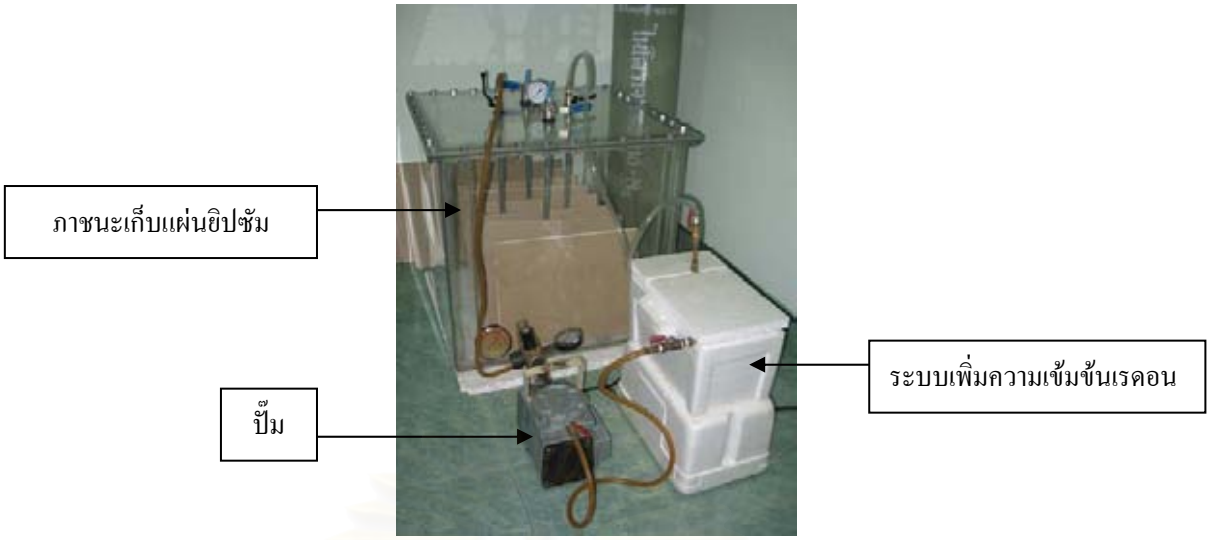
3) การตรวจวัดอัตรานับรังสีแกมมาของแผ่นยิปซัม โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเรดอน

ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นยิปซัมชนิดที่ 1 จำนวน 6 แผ่น มาบรรจุในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม แล้วปิดผนึกภาชนะให้สนิท แล้วจึงไล่เรดอนในอากาศภายในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที (ภาคผนวก ก) และทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน (ภาคผนวก ข)

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อครบ 7 วัน นำอุปกรณ์เพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ที่อยู่ในกล่องโฟมบรรจุไนโตรเจนเหลว ต่อเข้ากับปั๊ม และภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม โดยต่ออุปกรณ์เหมือนดังแผนภาพรูปที่ 3.6 และ 3.7 แต่เปลี่ยนจากภาชนะพลาสติกที่บรรจุแร่โมนาไซต์เป็นภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ดังเสดงตามรูปที่ 3.10

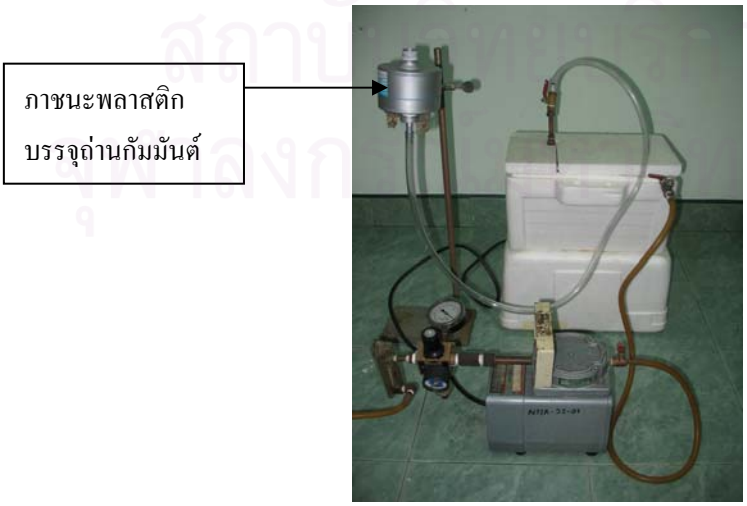
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดลองเหมือนกับหัวข้อ การตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ของขั้นตอนย่อยที่ 2 แต่ในการทดลองนี้ จะใช้ภาชนะพลาสติก 2 อัน ที่ภายในบรรจุถ่านกัมมันต์ที่อบแล้ว จำนวน 80 กรัม โดยภาชนะส่วนที่ 1 เก็บไว้เป็นแบรกกราวนด์ และภาชนะส่วนที่ 2 เก็บไว้เป็นตัวดูดซับก๊าซเรดอน

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ให้ปิดปั๊มพร้อมปิดวาล์วขาเข้าของท่อทองแดงและขาออกของภาชนะโลหะทรงกระบอก จากนั้นให้ถอดสายยางที่สวมติดกับภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม แล้วนำไปสวมกับภาชนะพลาสติกส่วนที่ 2 ดังแสดงตามรูปที่ 3.11 แล้วเทไนโตรเจนเหลวออกจากกล่องโฟม



รูปที่ 3.11 การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อของเหลวที่อยู่ในภาชนะโลหะทรงกระบอก ระเหยกลายเป็นก๊าซผ่านถ่านกัมมันต์หมดแล้ว ให้ปิดภาชนะพลาสติกให้สนิท แล้วทิ้งไว้ให้ถึงจุดสมดุลทางกัมมันตรังสีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาวัดรังสีแกมมาจากบิสมัท-214 ด้วยหัววัด HPGe ที่มีประสิทธิภาพสัมพันธ์ 30%

ขั้นตอนที่ 6 ให้ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนเป็นแผ่นยิปซัมชนิดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

เทคนิคที่ 2 เทคนิคการใช้เครื่องมือวัดก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7 ดังนี้

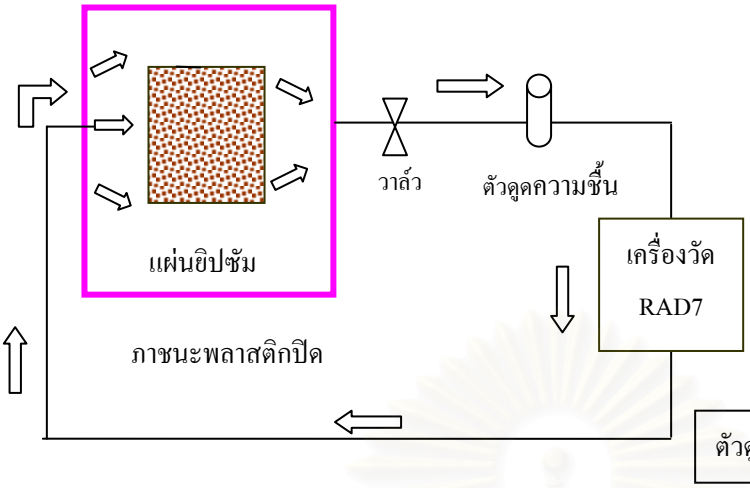
ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ RAD7 เป็นเครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูง เทียบเคียงได้กับหัววัดชนิด Ionization Chamber ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ [30]

ขั้นตอนการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ RAD7 มีดังนี้

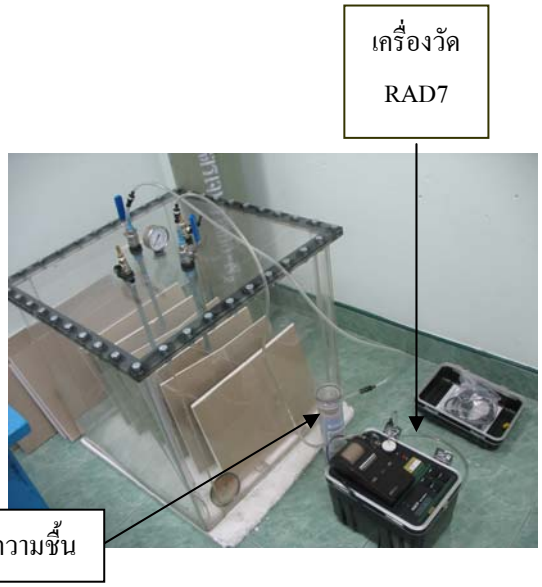
ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นยิปซัมชนิดที่ 1 จำนวน 6 แผ่น มาบรรจุในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม และทำการปิดผนึกภาชนะให้สนิท

ขั้นตอนที่ 2 ไล่อากาศภายในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ก๊าซเรดอนฟุ้งกระจายจากแผ่นยิปซัม

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อครบ 7 วัน ให้ต่อเครื่องวัด RAD7 เข้ากับภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ดังแสดงตามแผนภาพรูปที่ 3.12 และรูปถ่ายที่ 3.13 แล้วจึงทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน



รูปที่ 3.12 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ระหว่างภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม กับเครื่องวัด RAD-7



รูปที่ 3.13 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนด้วยเครื่องวัดRAD7

ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนเป็นแผ่นยิปซัมชนิดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

3.6.2 การคำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผนยิปซัม ซึ่งใช้เทคนิคแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี หาความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ที่มีอยู่ในแผ่นยิปซัม

ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นยิปซัมทั้ง 3 ชนิด มาบด อบ และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 25 เมช และทำการปิดผนึกในภาชนะพลาสติกใสแบบกลมให้สนิท

ขั้นตอนที่ 2 จัดระบบวัดรังสีแกมมา และวัดรังสีแบคกราวนด์ภายในวัสดุกำบังรังสี ขณะไม่มีตัวอย่างเป็นเวลา 10800 วินาที และหาค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาที ของรังสีแกมมาที่พลังงาน 186 keV จากเรเดียม -226

ขั้นตอนที่ 3 นำสารมาตรฐานยูเรเนียม เข้าวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 3600 วินาที หาค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาที ของรังสีแกมมาที่พลังงาน 186 keV สำหรับคำนวณปรับเทียบหาความแรงรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ในตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 4 นำตัวอย่างที่เตรียมไว้จากขั้นตอนที่ 1 เข้าวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 18000 วินาที และหาค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 186 keV จากเรเดียม-226

ขั้นตอนที่ 5 นำอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 และ 4 ของสารมาตรฐานยูเรเนียม และตัวอย่าง ตามลำดับ หักลบกับค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของแบคกราวนด์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 ค่าที่ได้คือ ค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของสารมาตรฐาน (R_{std}) และค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของตัวอย่าง (R_{sample}) ในสมการที่ 3.5

เนื่องจากพลังงานของรังสีแกมมาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการหาค่าการแก้ดูดกลืนโดยตัวเองของสารมาตรฐาน และตัวอย่างก่อน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 6 แบ่งเป็น 5 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

ก) วัดรังสีแบคกราวนด์ภายในวัสดุกำบังรังสี ขณะไม่มีตัวอย่างเป็นเวลา 600 วินาที และหาค่าอัตรานับสุทธิของรังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากเรเดียม-226

ข) ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากต้นกำเนิดรังสีเรเดียม-226 ส่งผ่านสารมาตรฐานโดยวัดรังสีเป็นเวลานาน 600 วินาที และหาค่าอัตรานับสุทธิของรังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากเรเดียม-226

ค) ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากต้นกำเนิดรังสีเรเดียม-226 ส่งผ่านตัวอย่างโดยวัดรังสีเป็นเวลานาน 600 วินาที และหาค่าอัตรานับสุทธิของรังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากเรเดียม-226

ง) ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากต้นกำเนิดรังสีเรเดียม-226 ส่งผ่านสารภาชนะเปล่า (ชนิดเดียวกับที่ใส่ตัวอย่างและสารมาตรฐาน) โดยวัดรังสีเป็นเวลานาน 600 วินาที และหาค่าอัตรานับสุทธิของรังสีแกมมาพลังงาน 186 keV จากเรเดียม-226

จ) นำอัตรานับรังสีสุทธิที่ได้ในขั้นตอนย่อย ข) , ค) และ ง) ตามลำดับ หักลบกับค่าอัตรานับรังสีสุทธิ ของแบคกราวนด์ที่ได้ในขั้นตอนย่อย ก) ค่าที่ได้ คือ

- ค่าอัตรานับรังสีสุทธิที่ทะลุผ่านสารมาตรฐาน และตัวอย่าง (I)
- ค่าอัตรานับรังสีสุทธิที่ขณะไม่มีสารมาตรฐาน และตัวอย่าง (I_0)

ขั้นตอนที่ 7 นำค่าอัตรานับรังสีสุทธิที่ได้ในขั้นตอนย่อย จ) ไปคำนวณหาค่าการดูดกลืนตัวเองของสารมาตรฐาน ($f_{ab(std)}$) และตัวอย่าง ($f_{ab(sample)}$) ได้จากสมการที่ (3.4)

$$f_{ab} = \frac{In\left(I_0 / I_x\right)}{1-\left(I_x / I_0\right)} \qquad (3.4)$$

เมื่อ f_{ab} = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง

I_0 = ค่าอัตรานับวัดรังสีสุทธิที่ทะลุผ่านขณะไม่มีสารตัวอย่าง (จำนวนนับ ต่อวินาที)

I_x = ค่าอัตรานับวัดรังสีสุทธิที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง (จำนวนนับ ต่อวินาที)

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าความแรงรังสีเรเดียม-226 ในตัวอย่างดังสมการที่ (3.5)

$$A_{Ra(sample)} = A_{Ra(Std)} \times \frac{wt_{(Std)}}{wt_{(sample)}} \times \frac{R_{(sample)}}{R_{(Std)}} \times \frac{f_{ab(sample)}}{f_{ab(Std)}} \qquad (3.5)$$

เมื่อ A_{Ra} = ความแรงรังสีของเรเดียม (เบคเคอเรลต่อกรัม)

Wt = น้ำหนัก (กรัม)

R = อัตรานับรังสีสุทธิของสารมาตรฐาน (จำนวนนับต่อวินาที)

f_{ab} = ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนโดยตัวเอง

<u>หมายเหตุ</u> การคำนวณค่า ความแรงรังสีคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{C}{M} N_A \times 10^{-6} \times \left(\frac{0.693}{t_{1/2}}\right) \times abundance\ \ factor \qquad (3.6)$$

เมื่อ A = ความแรงรังสี (เบคเคอเรลต่อกรัม)

C = ความเข้มข้น (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

M = มวลอะตอม (กรัม ต่อโมล)

abundance factor = อัตราส่วนโดยอะตอมในธรรมชาติ

10^{-6} = Conversion factor (1/ppm หรือ กิโลกรัมต่อมิลลิกรัม)

$t_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิต (วินาที)

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้สมการที่ (2.32)

$$\eta = \frac{E}{I_{Rn} \times \lambda_{Rn}} \qquad (2.32)$$

โดย E อัตราการปลดปล่อยเรดอนของวัสดุ $(Bq.kg^{-2}.s^{-1})$

I_{Rn} ความเข้มข้นของเรเดียม-226 $(Bq.kg^{-1})$

λ_{Rn} ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน-222 มีค่าเท่ากับ 2.1 x 10^{-6} s^{-1}

หมายเหตุ ขั้นตอนที่ 7,8 และ 9 แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์

ผลการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1.1 การตรวจวัดประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์

ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับก๊าซเรดอนแสดงในตารางที่ 4.1 สรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอนของถ่านกัมมันต์ คือ $84.13 \pm 0.42\%$

ตารางที่ 4.1 ผลการนับรังสีแกมมาพลังงาน 609.3 keV ของบิสมัท-214 จากถ่านกัมมันต์ 2 ภาชนะต่อกัน

ครั้งที่	อัตรานับรังสีสุทธิ (จำนวนนับสุทธิต่อวินาที)		ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอน (%)
	ภาชนะที่ 1 (a)	ภาชนะที่ 2 (b)	ภาชนะที่ 1 (E)
1	4.091 ± 0.026	0.728 ± 0.003	82.20 ± 0.83
2	5.732 ± 0.031	0.784 ± 0.005	86.32 ± 0.72
3	5.495 0.026	0.943 ± 0.002	83.87 ± 0.62

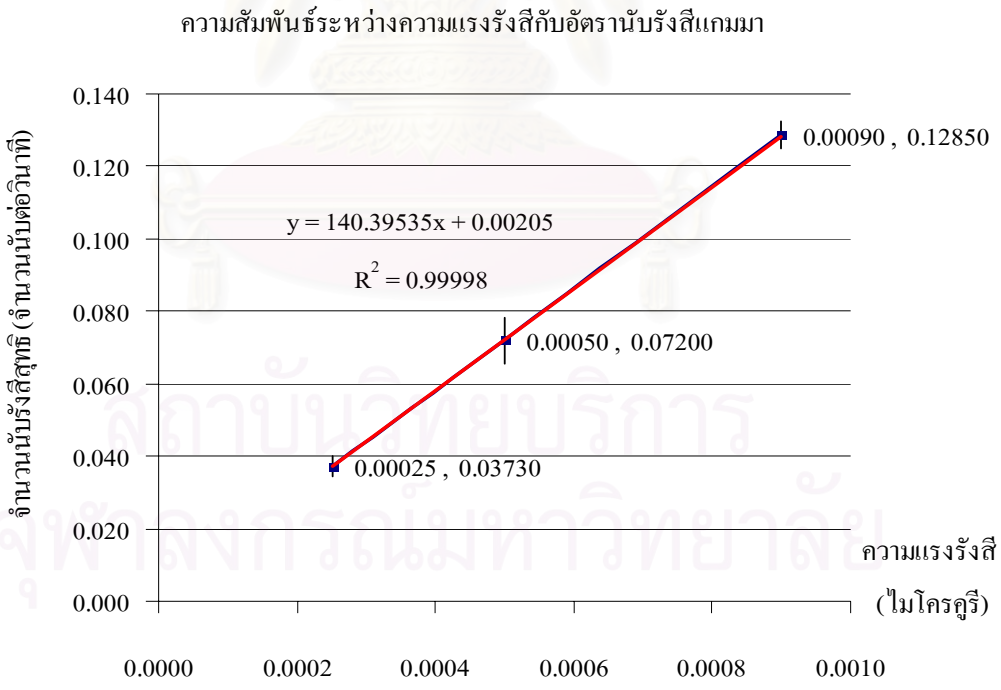
หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

4.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ มาตรฐาน ด้วยวิธีหยดสารละลายมาตรฐานเรเดียม-226

จากการตรวจวัดรังสีแกมมาของบิสมัท-214 ที่พลังงาน 609.3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของถ่านกัมมันต์ที่หยดสารละลายเรเดียม-226 ที่มีความแรงรังสี 0.00025, 0.0005 และ 0.0009 ไมโครคูรีตามลำดับ และทิ้งไว้ให้เกิดสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสี เป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งจะแสดงผลดังตามตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลของความแรงรังสีของสารละลายเรเดียม-226 ที่หยดลงในถ่านกัมมันต์

ความแรงรังสีของสารละลายเรเดียม ที่หยดลงในถ่านกัมมันต์ (ไมโครคูรี)	อัตรานับรังสีแกมมาของบิสมัท-214 ที่พลังงาน 609.3 keV (จำนวนนับสุทธิต่อวินาที)
0.00025	0.0373 ± 0.0028
0.00050	0.0720 ± 0.0064
0.00090	0.1285 ± 0.0038



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีของสารละลายเรเดียม กับอัตรานับรังสีแกมมาของบิสมัท-214

4.1.3 ผลการตรวจวัดอัตรานับรังสีแกมมาของตัวอย่างแผ่นยิปซัมโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเรดอน

ผลการตรวจวัดอัตรานับรังสีแกมมาที่บิสมัท-214 พลังงาน 609.3 keV ซึ่งในแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการนับรังสีแกมมาที่บิสมัท-214 พลังงาน 609.3 keV

ตัวอย่าง	อัตรานับรังสีแกมมาของบิสมัท-214 ที่พลังงาน 609.3 keV (จำนวนนับสุทธิต่อวินาที)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ชนิดที่ 1 (PG 30%)	0.10983 ± 0.040	0.10891 ± 0.032	0.10975 ± 0.041	0.10950 ± 0.022
ชนิดที่ 2 (PG 35%)	0.12208 ± 0.042	0.12488 ± 0.035	0.12932 ± 0.036	0.12543 ± 0.021
ชนิดที่ 3 (PG 38%)	0.12968 ± 0.040	0.13412 ± 0.037	0.13860 ± 0.036	0.13402 ± 0.022

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.3 มาแก้ค่าประสิทธิภาพระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ตารางที่ 4.1) และนำมาแทนในความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.1 จะได้ปริมาณความเข้มข้นเรดอนจากถ่านกัมมันต์ในรูปของไมโครคูรี ต่อปริมาตรของอากาศที่ดูดออกมาจากภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ที่เท่ากับ 0.183 ลูกบาศก์เมตร (183 ลิตร) จากนั้นนำผลที่ได้จากความสัมพันธ์มาคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อมวลตัวอย่าง ($Bq.kg^{-1}.s^{-1}$) และต่อพื้นที่ผิวของตัวอย่าง ($Bq.m^{-2}.s^{-1}$) แสดงดังตารางที่ 4.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 อัตรานับรังสีแกมมาของบิสมัท-214 ก่อนและหลังการแก้ค่าประสิทธิภาพของระบบและปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และอัตราการปลดปล่อยจากตัวอย่างแผ่นยิปซัม 3 ชนิด ต่อมวลและพื้นที่ผิวด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	อัตรานับรังสีแกมมาก่อนการแก้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (จำนวนนับสุทธิต่อวินาที)	อัตรานับรังสีแกมมาหลังแก้ค่าประสิทธิภาพ ของระบบดูดซับ(จำนวนนับสุทธิต่อวินาที)	ปริมาณความเข้มข้นเรดอน (pCi/L) , Bq/m^3	อัตราการปลดปล่อยเรดอน ต่อมวลตัวอย่าง ($\mu Bq.kg^{-1}.s^{-1}$)	อัตราการปลดปล่อยเรดอน ต่อพื้นที่ตัวอย่าง ($\mu Bq.m^{-2}.s^{-1}$)
ชนิดที่ 1 (PG30%)	0.10950 ± 0.022	0.13015 ± 0.026	(4.98 ± 0.023) 184.542 ± 34.55	18.912 ± 3.54	33.404 ± 6.25
ชนิดที่ 2 (PG35%)	0.12543 ± 0.021	0.1491 ± 0.025	(5.72 ± 0.0211) 211.812 ± 33.74	21.707 ± 3.45	38.340 ± 6.10
ชนิดที่ 3 (PG38%)	0.13402 ± 0.022	0.1593 ± 0.026	(6.12 ± 0.0220) 226.510 ± 35.09	23.213 ± 3.59	41.011 ± 6.35

4.2 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิคการใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7

ในการทดลองนี้ได้ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7 จากแผ่นยิปซัมชนิดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ชนิดละ 6 แผ่น ซึ่งจะแสดงผลเป็นปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัมในหน่วย Bq/m^3 ดังแสดงผลตามตารางที่ 4.5 และนำผลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อมวลของตัวอย่าง และต่อพื้นที่ผิวของตัวอย่าง ดังแสดงผลตามตารางที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเรดอนจากแผ่นยิปซัมด้วยเครื่องRAD7

ตัวอย่าง	ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq/m^3)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ชนิดที่ 1 (PG30%)	271.632 ± 21.60	222..133 ± 23.52	213.007 ± 17.63	217.592 ± 12.16
ชนิดที่ 2 (PG35%)	245.590 ± 22.45	251.929 ± 24.18	247.258 ± 15.92	248.260 ± 12.21
ชนิดที่ 3 (PG38%)	262.188 ± 23.56	260.869 ± 17.36	270.972 ± 18.25	264.676 ± 11.49

ตารางที่ 4.6 อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากตัวอย่างแผ่นยิปซัม 3 ชนิดต่อมวล และพื้นที่ผิว

ตัวอย่าง	อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อมวลของตัวอย่าง ($\mu Bq.kg^{-1}.s^{-1}$)	อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อพื้นที่ของตัวอย่าง ($\mu Bq.m^{-2}.s^{-1}$)
ชนิดที่ 1 (PG30%)	22.29 ± 2.35	33.38 ± 2.35
ชนิดที่ 2 (PG35%)	25.39 ± 2.38	44.85 ± 2.38
ชนิดที่ 3 (PG38%)	27.12 ± 2.25	47.91 ± 2.25

ผลการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในแผ่นยิปซัมทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการหาความเข้มข้นก๊าซเรดอนจากการดูดซับถ่านกัมมันต์ (ตารางที่ 4.4) และจากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัด RAD7 (ตารางที่ 4.5) ซึ่งให้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากตัวอย่างแผ่นยิปซัม ด้วยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และด้วยการใช้เครื่องวัด RAD7

ตัวอย่าง	อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อมวลของตัวอย่าง ($\mu Bq.kg^{-1}.s^{-1}$)		อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่อพื้นที่ของตัวอย่าง ($\mu Bq.m^{-2}\ s^{-1}$)	
	ถ่านกัมมันต์	เครื่องวัด RAD7	ถ่านกัมมันต์	เครื่องวัด RAD7
ชนิดที่ 1 (PG30%)	18.912 ± 3.54	22.29 ± 2.35	33.404 ± 6.25	39.38 ± 2.35
ชนิดที่ 2 (PG35%)	21.707 ± 3.45	25.39 ± 2.38	38.340 ± 6.10	44.85 ± 2.38
ชนิดที่ 3 (PG38%)	23.213 ± 3.59	27.12 ± 2.25	41.001 ± 6.35	47.91 ± 2.25

จากตารางที่ 4.7 สรุปได้ว่าอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดระหว่างวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ กับวิธีตรวจวัดด้วยเครื่องวัด RAD7 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ แผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 สูงสุด และแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัด RAD7 มีค่าสูงกว่าวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ประมาณ 14.5-15%

4.3 การคำนวณหาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม ซึ่งใช้เทคนิคแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี หาความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ที่มีอยู่ในแผ่นยิปซัม

ผลการตรวจวัดความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี พบว่า ในแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38 % มีปริมาณเรเดียม-226 สูงสุด เท่ากับ 251.686 ± 9.525 Bq/kg และแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30 % มีปริมาณเรเดียมต่ำสุด เท่ากับ 166.322 ± 7.038 Bq/kg ดังแสดงผลในคอลัมน์ที่ 2 ของตารางที่ 4.8 การหาสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จะพิจารณาได้จาก อัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน จากตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัดความเข้มข้นรังสีจำเพาะ ด้วยวิธีถ่านกัมมันต์ และวิธีตรวจวัดด้วยเครื่องวัด RAD7 เทียบกับปริมาณความเข้มข้นเรดอน-222 ที่มีอยู่ในตัวอย่างจริง แสดงผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ในแผ่นยิมซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นรังสีจำเพาะของ เรเดียม- 226 ในแผ่นยิมซัม (Bq/kg)
ชนิดที่ 1 (PG30%)	166.322 ± 7.038
ชนิดที่ 2 (PG35%)	212.300 ± 8.500
ชนิดที่ 3 (PG38%)	251.686 ± 9.525

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิมซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222	
	ถ่านกัมมันต์	เครื่องวัด RAD7
ชนิดที่ 1 (PG30%)	9.583 ± 1.840	11.299 ± 1.283
ชนิดที่ 2 (PG35%)	8.617 ± 1.416	10.078 ± 1.027
ชนิดที่ 3 (PG38%)	7.773 ± 1.240	9.080 ± 0.828

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

จากตารางที่ 4.9 สรุปได้ว่า สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30%, 35% และ 38% ในกรณีที่คำนวณอัตราปลดปล่อยเรดอน-222 โดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มีค่าเท่ากับ 9.583 ± 1.840%, 8.617 ± 1.416% และ 7.773 ± 1.240% ตามลำดับ โดยที่ค่าสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% มีค่าต่ำสุด และสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% มีค่าสูงสุด

เมื่อพิจารณาสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 กรณีที่คำนวณอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากเครื่องมือ RAD7 พบว่า แผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30%, 35% และ38% มีค่าสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 เท่ากับ $11.299 \pm 1.283\%$, $10.078 \pm 1.027\%$ และ $9.080 \pm 0.828\%$ ตามลำดับ และสอดคล้องกับกรณีที่ตรวจวัดโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ นั่นคือ แผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% มีค่าสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่ำสุด และสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% มีค่าสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากปริมาณความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอนที่วัดได้จากตัวอย่างแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 30% , 35% และ 38% ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้ได้ใช้ 2 เทคนิค ในการหาปริมาณความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอน คือ เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ และเทคนิคการใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า เครื่อง RAD7 และได้ศึกษาสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างข้างต้น ซึ่งใช้เทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี ในการหาความเข้มข้นรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ที่มีอยู่ในแผ่นยิปซัม โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์

เนื่องด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก จึงสามารถดูดซับก๊าซเรดอนไว้ในรูพรุนได้ดี ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ในการหาความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอน จึงได้ทำการหาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเรดอนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าเท่ากับ 84.13 $\pm$ 0.42% เพื่อนำไปใช้แก้ค่าหาความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างทั้งหมด

ผลการทดลอง จากการนำแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 30%, 35% และ 38% ตามลำดับ ที่เก็บไว้ในภาชนะระบบปิด มาหาปริมาณความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอนโดยเทคนิคการดูดซับก๊าซเรดอน หลังการแก้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับและปรับเทียบกับค่ามาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 184.542 ± 34.55, 211.812 ± 33.74 และ 226.510 ± 35.09 Bq/m^3 และนำมาคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน พบว่า มีค่าเท่ากับ 18.912 ± 3.54 (33.404 ± 6.25), 21.707 ± 3.45 (38.340 ± 6.10) และ 23.213 ± 3.59 (41.011$\pm$6.35) $\mu Bq.kg^{-1}.s^{-1}$ ($\mu Bq.m^{-2}s^{-1}$) ตามลำดับ ซึ่งพบว่า แผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 สูงสุด และแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่ำสุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่า อัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 มีค่าผันแปรตามปริมาณของฟอสฟอยิปซัมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแผ่นยิปซัมชนิดนั้น ๆ

5.2 สรุปผลการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัม โดยใช้เทคนิคการใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือ RAD7

เพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดที่ได้สรุปดังข้อ 5.1 จึงได้ทำการตรวจวัดซ้ำ ด้วยเครื่องวัด RAD7 ซึ่งผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นรังสีจำเพาะของก๊าซเรดอน จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30%, 35% และ 38% พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 217.592 ± 12.16 , 248.260 ± 12.21 และ 264.676 ± 11.49 ตามลำดับ และเมื่อนำไปคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยเรดอนในหน่วยต่อมวลตัวอย่าง (พื้นที่ผิวตัวอย่าง) พบว่า มีค่าเท่ากับ 22.29 ± 2.35 (33.38 ± 2.35), 25.39 ± 2.38 (44.85 ± 2.38) และ 27.12 ± 2.25 (47.91 ± 2.25) $\mu Bq.kg^{-1}.s^{-1}$ ($\mu Bq.m^{-2}.s^{-1}$) ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนระหว่างวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ กับวิธีตรวจวัดด้วยเครื่องวัด RAD7 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน นั่นคือแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 สูงสุด และแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% จะมีอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ที่ได้จากการตรวจวัดโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าวิธีการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ RAD7 ประมาณ 14.5–15 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของเทคนิคการวัดโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นั้น สรุปได้ว่า สามารถใช้เทคนิคนี้ตรวจวัดหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการตรวจวัดโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และเครื่องมือ RAD7 ยังมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบที่ถูกพัฒนาขึ้น และปัจจัยต่าง ๆเช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน ที่ต้องควบคุมให้คงที่ขณะทำการตรวจวัด

เมื่อพิจารณาอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม ทั้งวิธีการตรวจวัดโดยใช้ถ่านกัมมันต์ และเครื่องวัด RAD7 พบว่าอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดให้สำหรับที่อยู่อาศัยโดยหน่วยงาน US.EPA คือ 74 $mBq.m^{-2}.s^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นยิปซัมดังกล่าวสามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในอาคาร บ้านเรือน สำนักงาน และที่อยู่อาศัยได้ ซึ่งค่าอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในแผ่นยิปซัม มีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบต่างๆ ได้ถูกบีบอัดแน่นและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยังเคลือบด้วยด้วยกระดาษเรียบ มีความหนา จึงทำให้ก๊าซเรดอน ไม่สามารถเล็ดลอดออกไปได้สะดวก

5.3 สรุปผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ด้วยเทคนิคแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรี

ผลการตรวจวัดความเข้มรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี พบว่า ในแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 38% มีปริมาณเรเดียม-226 สูงสุด เท่ากับ 251.686 ± 9.525 Bq/kg และแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัม 30% มีปริมาณเรเดียมต่ำสุด เท่ากับ 166.322 ± 7.038 Bq/kg

ผลการหาสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ของแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมแตกต่างกัน พบว่า แผ่นยิปซัมที่มีปริมาณฟอสฟอยิปซัมผสมอยู่ในปริมาณสูงกว่าจะมีสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ต่ำกว่าแผ่นยิปซัมที่มีปริมาณฟอสฟอยิปซัมผสมอยู่น้อยกว่า นั่นคือ ปริมาณฟอสฟอยิปซัมแปรผกผันกับสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ทั้งนี้เพราะปริมาณฟอสฟอยิปซัมที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ของแผ่นยิปซัมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ หรือมีความเป็นรูพรุนมาก ส่งผลให้สัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 มีค่าลดลง ตามสมการที่ (2.25) อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ขอข้อมูลจากบริษัท ไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน) เกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดของแผ่นยิปซัม ที่ได้จากกระบวนการผลิต พบว่า การเพิ่มปริมาณฟอสฟอยิปซัม จะทำให้วัตถุดิบ หรือองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผ่นยิปซัมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ และส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง[31]

เนื่องจากสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ขึ้นกับค่าความพรุน และรูปทรงของตัวอย่างแผ่นยิปซัม รวมถึงปัจจัยอื่นๆ ที่จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรดอนออกมาจากตัวอย่าง ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 กับค่าความพรุนของแผ่นยิปซัม ในเชิงลึกต่อไป

5.4 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอยิปซัมเป็นองค์ประกอบโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ควรทดลองใช้ Dry Ice ผสม Acetone ทำหน้าที่หล่อเย็นให้กับระบบแทนไนโตรเจนเหลวเนื่องจาก Dry Ice ผสม Acetone มีอุณหภูมิ -85 องศาเซลเซียล จะทำให้องค์ประกอบอื่นๆของอากาศยังคงเป็นก๊าซไหลออกไปได้ ยกเว้นเรดอนซึ่งเป็นของเหลว ทำให้ได้ก๊าซเรดอนในอัตราส่วนที่สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Chang, Wen F.; David A. Chin and Robert Ho. (1989). Phosphogypsum for Secondary Road Construction. Florida Institute for Phosphate Research, Publication No. 01-033-077, Bartow,FL.
2. Samadi, M., Remmelzwaal, A., Beukes, H., Van der Walt, M., Vermeulen, M., Van Huyssteen, C.W., Van Engelen, V.W.P. & Barnard, R.O., 1999.The development of the South African SOTER and WOCAT. Proc. FAO/ISCW Expert Consultation on Land Resources inventories/SOTER, National Soil Degradation Assessment and its Impacts on Soil Productivity 83-92. Pretoria, South Africa.
3. W.M.Arafa,H.Almeimi,L.Al-Houty and Abou-Leila. Some Improvement of Charcole Measurement Techniques Used for Indoor Radon Measurement in Quatar. Radiat.Phys.Chem.44,12 (19894):237-240.
4. E.R.Van der Graff,R,ten Have. Determination of Radon Rates of Two Types Gypsum Board. Nuclear Geophysics Division, 2003.
5. J.Hofmann,et al 2000. Natural Radionuclide Concentrations in Materials Processed in the Chemical Industry and the Related Radiological Impact European Commission Nuclear Safety and the Environment Report EUR 19264.
6. วิทิต ผึ่งกัน. การพัฒนาเทคนิคเพื่อหาปริมาณเรดอน –222 ในอาคารโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2542.
7. สำนักงานสามัญศึกษา จังหวัดขอนแก่น. แหล่งที่มา : http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/p74.htm. [2004, January 15]
8. บริษัทไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน). แหล่งที่มา : http://www.thaigypsum.com/thai/Product/categorylist.asp [2003,November 2]
9. Amethyst Galleries'Mineral Gallery [Online]. Available from : http://www.galleries.com/default.htm [2003, November 12]
10. รายงานผลการวิเคราะห์การหาปริมาณเรเดียม –226 ในตัวอย่างยิปซัมโดยวิธีแกมมาเรย์สเปกโตรเมตรีเสนอต่อการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย โดยรองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว , ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา ,2544.
11. บริษัทปุ๋ยแห่งชาติ จำกัด มหาชน. ผลิตภัณฑ์ใหม่ สารปรับปรุงดินแคลฟอสฟลัส., แหล่งที่มา: http://www.nfc.co.th [2003 , June 25]

12. Replacement Nottinghamshire Minerals Local Plan. Available from : http://www.nottinghamshire.gov.uk/large-static/mineralslocalplan/depo-chapter-10.pdf [2004 , July 15]
13. Amalgamated Construction [online]. Available from : http://www.amco-construction .co.uk /project.efm.pid = 83
14. Lafarge North American. Material Safety Data Sheet
15. T.E.Hodgson,E.Gadioli and E.Gadioli Erba. Introduction Nuclear Physics. Clarendon Oxford,1977.
16. Kenneth S.,Krane. Introductory Nuclear Physic. John Willey&Son Publisher,1980.
17. Larmarsh,John R.Introduction to Nuclear Engineering. 2nd Edition . Massachusetts : Addision – Wesley Publishing Company ,1983.
18. Betor,Yinon.Chemiced Element.Com-Radon [Online]. Available from : http://www.chemical elements.com /elements / m.html [2003,Mar 20]
19. National council on Radiation Protection and Measurement (NCAP). Measurement of Radon and Radon Paughters in Air. NCRP report No. 97 ,Bethesda , Md (1998).
20. Jost Eikenbery. Radium Isotope Systematics in Nature : Applications in Geochuronolosy and Hydrogeochemistry. Paul Scherrer Institute , 2002.
21. U.S. Environmental Protection Agency. Radon Measurement Methods (Online). Available from : http://www.epa.gov/iaq/radon/methods.html (2003,June 25)
22. Wilcot John Speelman , Modelling and Measurement of Radon Diffusion Through Soil for Application on Mine Tailing Dams. ,December 2004.
23. http://www.jongouline .com/mindesc/monazite.html.
24. John Mc Mory, Robert C.Ray.Chemistry. New Jersy : Prentice – Hall International,1995.
25. วิวัฒน์ จันทราพรชัย. พิสิกส์รังสี . ภาควิชาพิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
26. Operation of HPGe Detector. Available from : http://www.upei.ca/~phys221/lm/operation/ ody_operation.html (2006,Jan 15)
27. Determine of Physics Integrated Laboratory. High – Resolution Gamma Ray Spectroscopy .University of Guelph.
28. K.ovler,A.Perevalor,V. Steiner,L.A.Metzger.,Radon Exhalation of Cementitious Materials Made with Coal Fly ash: Part 1-Scientific Background and Testing of the Cement and Fly ash Emanation., Feb 2005.

29. S.-C.Leet,C-K.Kim,D-M.Lee and H.-D.Kang. ,Natural Radionuclides and Radon Exhalation Rates in Building Materials used in South Korea., Oct 2000.
30. การหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ในผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์พลอยได้และกากจากอุตสาหกรรมแร่หิน,ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,เมษายน 2549.
31. คุณวันเพ็ญ กอแก้ว Process Control ปริมาณฟอสฟอยิปซัมมีผลต่อกำลังอัด,27 เมษายน 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

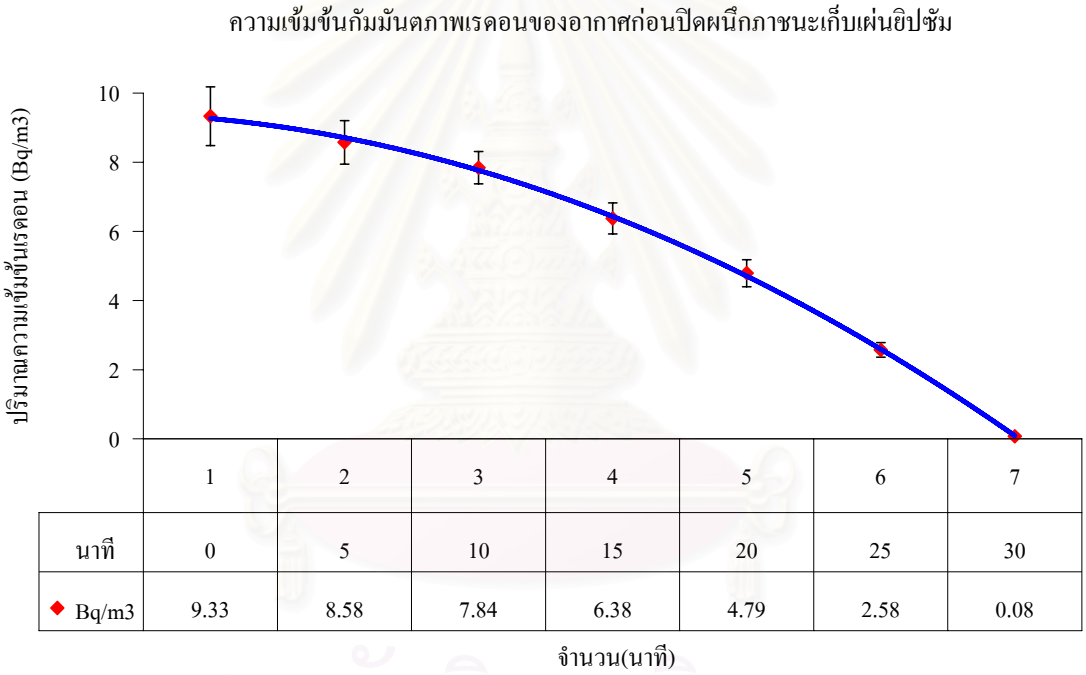
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>การหาระยะเวลา ของการไล่เรดอนในอากาศ ด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังปิดผนึกภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม</u>

การไล่เรดอนในอากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเรดอนในอากาศที่มีอยู่ในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือการควบคุมให้ภายในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม มีก๊าซเรดอนที่เกิดจากการฟุ้งกระจายที่มาจากตัวอย่างเท่านั้น

ในการทดสอบนี้ ได้นำเครื่อง RAD7 ต่อเข้ากับภาชนะเก็บแผ่นยิปซัมที่มีขนาด 0.183 ลูกบาศก์เมตร เพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน 99.99 เปอร์เซ็นต์ ไล่เรดอนในอากาศ ที่มีอยู่ภายในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนขณะไล่เรดอนในอากาศ ด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากรูปที่ ก.1 พบว่าการไล่เรดอนในอากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน ก่อนปิดผนึกภาชนะเก็บแผ่นยิปซัมให้สนิท จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความเข้มข้นเรดอนในอากาศจึงมีค่าลดลงจนถึงศูนย์

ภาคผนวก ข

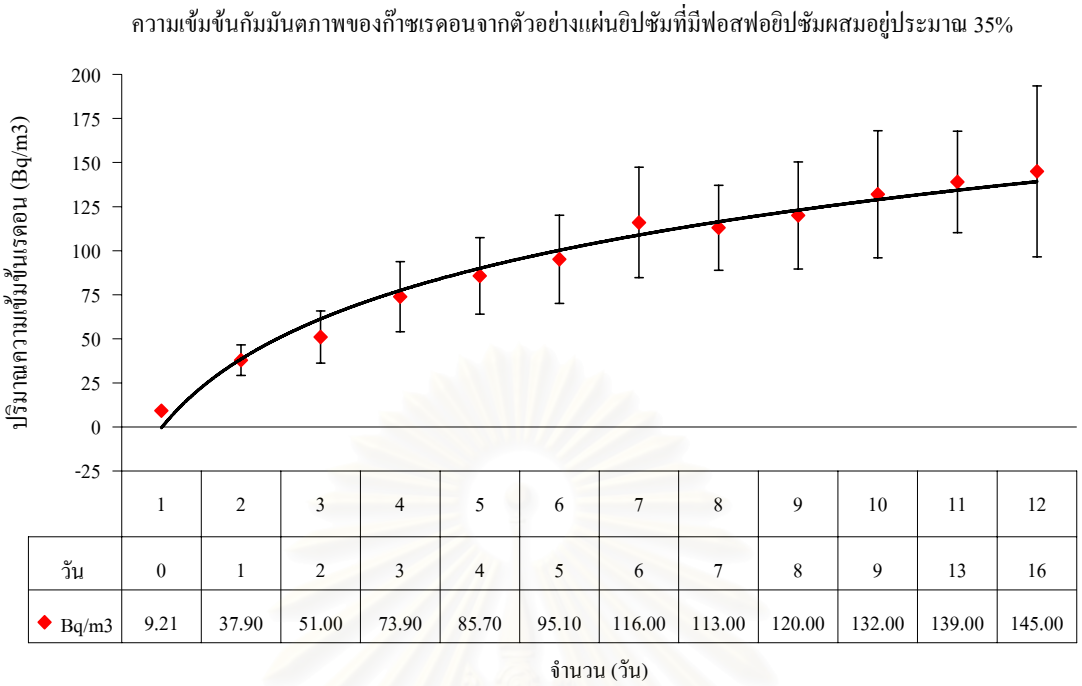
การหาระยะเวลาอิ่มตัวของปริมาณการฟุ้งกระจายของก๊าซเรดอนในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัมโดยโครงการวิจัย NORM

จากรายงานหลักเล่มที่ 2 เรื่อง การหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และกากจากอุตสาหกรรมแร่หิน ได้ทำการทดลอง โดยนำแผ่นยิปซัมที่มีแร่ฟอสฟอยิปซัมอยู่ประมาณ 35 % ใส่ในภาชนะปิดที่มีขนาด 66 x 66 x 42 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้เครื่อง RAD7 ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในภาชนะทุกวัน วันละ 4 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์อย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ ข.1 และรูปที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากแผ่นยิปซัมภายในภาชนะเก็บแผ่นยิปซัม

เวลาในการตรวจวัด (วัน)	ปริมาณการฟุ้งกระจายของก๊าซเรดอน (Bq/m^3)
0	9.21 ±0.00
1	37.90 ±8.67
2	51.00 ±14.80
3	73.90 ±19.90
4	85.70 ±21.70
5	95.10±25.00
6	116.00 ±31.30
7	113.00 ±24.10
8	120.00 ±30.40
9	132.00 ±36.10
13	139.00 ±28.80
16	145.00 ±48.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ฟุ้งกระจายออกมาในช่วงระยะเวลา 2 สัปดาห์ จากตัวอย่างแผ่นยิปซัมที่มีแร่ฟอสฟอยิปซัม 35 %

จากรูปที่ ข.1 พบว่าระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนเข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสี อยู่ในช่วงวันที่ 6 เป็นต้นไป ดังนั้นในการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่าง จะใส่แผ่นยิปซัมในภาชนะปิดและทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลของเรดอนในภาชนะปิดแล้วจึงทำการตรวจวัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

<u>ตัวอย่าง</u> การคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเรดอน จากตารางที่ 4.1 การทดลองครั้งที่ 1 โดยใช้สมการที่ (3.3)

$$E = \frac{a-b}{a}$$

โดย

- ปริมาณก๊าซเรดอนที่ถูกดูดซับไว้ในภาชนะที่ 1 (a) เท่ากับ 4.091±0.026 จำนวนนับสุทธิต่อวินาที
- ปริมาณก๊าซเรดอนที่ถูกดูดซับไว้ในภาชนะที่ 2 (b)เท่ากับ 0.728±0.003 จำนวนนับสุทธิต่อวินาที
- แทนค่าลงในสมการที่ (3.3) จะได้ ประสิทธิภาพการดูดซับเรดอนครั้งที่ 1 (%E) เท่ากับ 82.20 ± 0.8

โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนหาจากสมการ ดังนี้

$$U = x \pm y \quad , \quad \sigma_U = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{0.026^2 + 0.003^2} = 0.026$$

$$U = \frac{x}{y} \quad , \quad \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$$

$$, \quad \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{(a-b)}}{a-b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2$$

$$, \quad \sigma_U{}^2 = \left[\left(\frac{\sigma_{(a-b)}}{a-b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2\right] U^2$$

แทนค่าลงในสูตร

$$\sigma_U{}^2 = \left[\left(\frac{0.026}{4.091-0.728}\right)^2 + \left(\frac{0.026}{4.091}\right)^2\right] x\ .8220^2$$

$$\sigma_U = 0.83\%$$

<u>ตัวอย่าง</u> การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองในแผ่นยิปซัมชนิดที่ 3 (ฟอสฟอยิปซัม 38%) ที่พลังงาน 186 keV ของ ^{226}Ra

จากข้อ 3.6.5 ขั้นตอนที่ 6 (จ) ในบทที่ 3 ได้ค่า $I_0 = 13189$ และ $I_x = 7312$

แทนค่า I_0 และ I_x ลงในสมการที่ (3.4) $f_{ab} = \frac{\ln(I_0 / I_x)}{1-(I_x / I_0)}$ ได้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง $f_{ab} = \frac{ln(13189/7312)}{1-(7312/13189)}$

$= 1.3238$

นั่นคือ ในตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง เท่ากับ 1.3238

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าความแรงรังสีของเรเดียม-226 ในตัวอย่างแผ่นยิปซัมชนิดที่ 3 (ฟอสฟอยิปซัม 38%โดยใช้สมการที่ (3.5)

$$A_{(Sample)} = A_{(Std)} \times \frac{Wt_{(Std)}}{Wt_{(Sample)}} \times \frac{R_{(Sample)}}{R_{(Std)}} \times \frac{f_{ab(Sample)}}{f_{ab(Std)}}$$

จะได้ว่าความแรงรังสีจำเพาะในตัวอย่าง

$$A_{(Sample)} = 4.94 \times \frac{430}{440} \times \frac{0.139}{3.159} \times \frac{1.3238}{1.1280}$$

$= 251.686$ Bq/kg.

ตัวอย่าง การคำนวณสัดส่วนการปลดปล่อยเรดอน-222 ของแผ่นยิปซัมชนิดที่ 3 (ฟอสฟอยิปซัม 38%) โดยใช้สมการที่ (2.32)

$$\eta = \frac{E}{I_{Ra} \times \lambda_{Rn}}$$

โดย E $= 23.213 \pm 3.59$ $\mu Bq.kg^{-2}s^{-1}$ (จากตารางที่ 4.7 โดยเลือกอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 ในหน่วยของน้ำหนักด้วยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์)

I_{Ra} $= 251.68 \pm 9.525$ $Bq.kg^{-1}$

λ_{Rn} = ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน-222 = 2.1×10^{-6} s^{-1}

แทนค่าลงในสมการที่ (2.32)

$$\eta = \frac{23.213 \times 10^{-6}}{251.68 \times 2.1 \times 10^{-6}}$$

$\eta = 0.078 = 7.773\%$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิตย์ลดา พิชยศาศวัตกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสายน้ำผึ้ง ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ.2544 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษา 2545 สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย