

การหาปริมาณธาตุกำมะถันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร



นายโอภาส จิรเดชตระกูล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

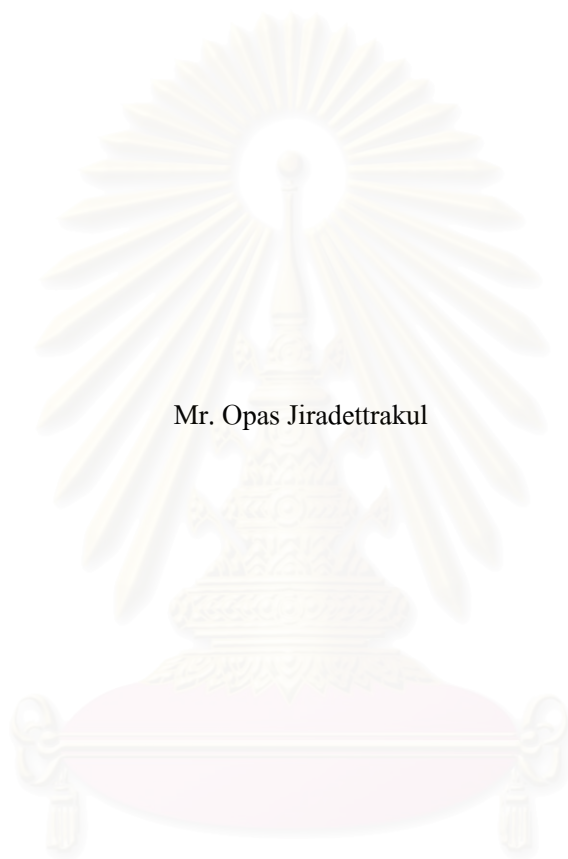
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-1751-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE ELEMENTS
IN PORTLAND CEMENT USED FOR BUILDING CONSTRUCTION



Mr. Opas Jiradetrakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-1751-9

โอกาส จิระเดชตระกูล : การหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร. (DETERMINATION OF NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE ELEMENTS IN PORTLAND CEMENT USED FOR BUILDING CONSTRUCTION) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สุพิชชา จันทรโยธา, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.จเด็จ เย็นใจ, 79 หน้า. ISBN 974-14-1751-9

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ในวัสดุที่ใช้สำหรับก่อสร้างอาคารซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ผลิตในประเทศไทย, หิน และทรายจากแหล่งต่าง ๆ ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี และได้ทำการคำนวณค่าสมมูลของเรเดียม, ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และดัชนีความเสี่ยง เพื่อประเมินอันตรายจากรังสีของวัสดุดังกล่าว ผลการวิจัยพบว่าค่าความเข้มข้นรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าอยู่ในช่วง $10.92 \pm 0.44 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $75.21 \pm 2.23 \text{ Bq kg}^{-1}$, $14.27 \pm 0.57 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $18.10 \pm 0.72 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $18.93 \pm 1.20 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $120.32 \pm 3.60 \text{ Bq kg}^{-1}$ ตามลำดับ, ทรายมีค่าอยู่ในช่วง $25.12 \pm 0.83 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $30.86 \pm 0.99 \text{ Bq kg}^{-1}$, $35.13 \pm 1.03 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $55.27 \pm 1.25 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $940.30 \pm 21.21 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $1131.93 \pm 25.36 \text{ Bq kg}^{-1}$ ตามลำดับ และหินมีค่าอยู่ในช่วง $13.12 \pm 0.50 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $15.84 \pm 0.58 \text{ Bq kg}^{-1}$, $24.01 \pm 0.78 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $29.05 \pm 0.91 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $302.88 \pm 7.60 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $417.11 \pm 10.01 \text{ Bq kg}^{-1}$ ตามลำดับ และพบค่าสมมูลของเรเดียม, ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และดัชนีความเสี่ยงภายใน และภายนอกสูงสุด เท่ากับ $197.05 \pm 4.73 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0.86 \pm 0.02 \text{ mGy y}^{-1}$, 0.53 และ 0.61 ตามลำดับ ในทรายจากจังหวัดสระบุรี นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากบล็อกคอนกรีตที่ผลิตจากส่วนผสมของวัสดุก่อสร้างเหล่านี้ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงสุดของบล็อกคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $0.79 \pm 0.01 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าเกณฑ์กำหนดความปลอดภัยที่กำหนดโดย US. EPA

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต.....จิระเดชตระกูล.....
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2548..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4570670521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: RADIUM EQUIVALENT ACTIVITY / RADON EXHALATION RATE

OPAS JIRADETTRAKUL : DETERMINATION OF NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE ELEMENTS IN PORTLAND CEMENT USED FOR BUILDING CONSTRUCTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D., THESIS COADVISOR : MR. CHADET YENCHAI , 79 pp ISBN 974-14-1751-9

The specific activities of ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K in building material samples were measured. The samples of building materials include 4 types of Portland cement Type-1, rocks and sands from various places. The radium equivalent activities (Ra_{eq}), absorbed dose rate (D) and hazard index (H_{ex} , H_{in}) were also calculated. The results showed that the specific activities of the three radionuclides ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K in Portland cement Type-1 samples range from $10.92 \pm 0.44 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $75.21 \pm 2.23 \text{ Bq kg}^{-1}$, $14.27 \pm 0.57 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $18.10 \pm 0.72 \text{ Bq kg}^{-1}$ and $18.93 \pm 1.20 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $120.32 \pm 3.60 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectively. In sand samples range from $25.12 \pm 0.83 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $30.86 \pm 0.99 \text{ Bq kg}^{-1}$, $35.13 \pm 1.03 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $55.27 \pm 1.25 \text{ Bq kg}^{-1}$ and $940.30 \pm 21.21 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $1131.93 \pm 25.36 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectively. In rock samples range from $13.12 \pm 0.50 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $15.84 \pm 0.58 \text{ Bq kg}^{-1}$, $24.01 \pm 0.78 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $29.05 \pm 0.91 \text{ Bq kg}^{-1}$ and $302.88 \pm 7.60 \text{ Bq kg}^{-1}$ - $417.11 \pm 10.01 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectively. It has been found that sand sample taken from Saraburee Province had the maximum values of Ra_{eq} , D, H_{ex} and H_{in} as $197.05 \pm 4.73 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0.86 \pm 0.02 \text{ mGy y}^{-1}$, 0.53 and 0.61 respectively. The radon exhalation from concrete blocks made of these materials were also measured. The highest radon exhalation level was found to be much lower the action level which set for building materials by US. EPA.

Department..... Nuclear Technology..... Student's signature..... *Opas Jiradettrakul*.....
 Field of study..... Nuclear Technology..... Advisor's signature..... *S. Luyde*.....
 Academic year... 2005..... Co-advisor's signature..... *Chadet Yenchai*.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.สุพิชชา จันทโรยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เจ็จ เย็นใจ อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งได้ตรวจทาน แก้ไข ต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชานิเวศลิษฐ์ทุกท่าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณชุติมา กรานรอด และคุณอรวรรณ ตรรคนาด ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้เครื่องมือ และการทดลองรวมทั้งคำแนะนำต่างๆ

สุดท้ายนี้คงจะขาดไปเสียไม่ได้ ขอกราบขอบพระคุณมารดา และบิดาของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย	3
1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2 ทฤษฎี	6
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.2 แหล่งกำเนิดของรังสี	8
2.3 ยูเรเนียม	12
2.4 ทอเรียม.....	13
2.5 เรดอน.....	13
2.6 สมดุลกัมมันตรังสี	16
2.7 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม.....	19
2.8 ค่าดัชนีความเสี่ยง	20
2.9 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ	21
2.10 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน	22
2.11 การวัดค่าความแรงรังสีจำเพาะ โดยระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา	25

บทที่	
2.12	การวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดค่าระดับความเข้มข้นของเรดอนที่มีชื่อทางการค้า RAD7..... 27
3	วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย..... 31
3.1	วัสดุ และสารเคมี..... 31
3.2	อุปกรณ์..... 32
3.3	เครื่องมือ..... 32
3.4	การดำเนินการวิจัย..... 33
4	ผลการวิจัย..... 47
4.1	ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมา..... 47
4.2	ผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง..... 53
4.3	ผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีต..... 60
5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... 65
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 65
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 69
รายการอ้างอิง 70
ภาคผนวก 72
ภาคผนวก ก 73
ภาคผนวก ข 75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 79

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1	นิวไคลด์รังสีตั้งต้นของคัมกัมในธรรมชาติ 1
1.2	ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ยูเรเนียม ทอเรียม และ โปแตสเซียมที่มีอยู่ในวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่มีรายงาน โดย NCRP 2
2.1	อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238 9
2.2	อนุกรมการสลายตัวของทอเรียม-232 9
2.3	นิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติที่อยู่นอกเหนืออนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 10
2.4	ค่าระดับความปลอดภัยของความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในวัสดุก่อสร้างกำหนดโดย United nations scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) 20
2.5	เกณฑ์กำหนดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยที่กำหนดโดย U.S. Environmental protection agency 24
4.1	ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับการก่อสร้าง 48
4.2	ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยง ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับการก่อสร้าง 51
4.3	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่างที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง 54
4.4	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 58
4.5	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างหินสำหรับการก่อสร้าง 59
4.6	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างทรายสำหรับการก่อสร้าง 60
4.7	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง 61

4.8 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของ
ตัวอย่างบล็อกริด..... 64

ก-1 กำลังอัดกริดต่ออัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 73



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1	แผนภาพแสดงอนุกรมการสลายตัวของ ^{238}U และ ^{232}Th 11
2.2	กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดสภาวะสมดุลแบบ เชคูลาร์..... 17
2.3	กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดสภาวะสมดุลแบบ ทรานเซียนต์ 18
2.4	กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่มีสมดุลทางรังสี..... 19
2.5	แผนผังการจัดระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา 25
2.6	การหาความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area) 26
2.7	เครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7 30
2.8	ลักษณะโครงสร้างภายในของเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน RAD7 30
3.1	ผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ห้วงรังสีแกมมา..... 34
3.2	ผังการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K , ค่าความแรงรังสีสมมูล ของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ..... 36
3.3	แผนผังการจัดระบบตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นเรดอนด้วยเครื่อง ตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 37
3.4	ผังการหาระยะเวลาที่ตัวอย่างเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน 38
3.5	ผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน 39
3.6	ผังการหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ต แลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง 40
3.7	ผังการเตรียมตัวอย่างบล็อกรังสีเพื่อวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ เรดอน 41
3.8	ผังการหาระยะเวลาที่ตัวอย่างบล็อกรังสีเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของ ก๊าซเรดอน 42
3.9	ผังการหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรังสีจาก ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 43
3.10	ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ทำการปิดผนึกสำหรับการวัดรังสี แกมมา 44

3.11	ภาชนะระบบปิดสำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน.....	44
3.12	เครื่องบดสารตัวอย่าง พร้อมโถบดตัวอย่าง.....	45
3.13	แบบขึ้นรูปคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. × 15 ซม. × 15 ซม และ ตัวอย่างคอนกรีต.....	45
3.14	ระบบวัดรังสีแกมมาของ CANBERRA และตัวอย่างภาพแสดงผลของ ระบบวัดรังสี.....	45
3.15	ระบบการตรวจวัดระดับความเข้มข้นเรดอนด้วยเครื่องตรวจวัดระดับความ เข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7	46
4.1	ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	49
4.2	ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง.....	49
4.3	ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายสำหรับ ก่อสร้าง.....	50
4.4	ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในตัวอย่างแต่ละประเภท.....	52
4.5	อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างแต่ละประเภท.....	52
4.6	ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอก และภายในร่างกายของตัวอย่างแต่ละ ประเภท.....	53
4.7	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาไฟ (สีเขียว)	55
4.8	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่างหิน จากจังหวัดกาญจนบุรี	56
4.9	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่าง ทรายจากจังหวัดสระบุรี.....	57
4.10	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 8 วันของตัวอย่างบล็อก คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ส่วนประกอบของเปลือกโลกมีสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดโลกปะปนอยู่ในปริมาณน้อยแต่ในระดับที่สามารถตรวจวัดได้ สารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ตั้งแต่การเกิดโลกเรียกว่า วัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Material) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า NORM มี NORM มากกว่า 60 ชนิด ที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ NORM ที่สำคัญ คือ ยูเรเนียม และทอเรียม ซึ่งสลายตัวให้ธาตุกัมมันตรังสีเป็นอนุกรมต่อเนื่องประมาณธาตุละ 10 กว่าชนิด ในสิ่งแวดล้อมจึงมี NORM ปะปนอยู่ทั่วไปไม่ว่าจะเป็น ดิน น้ำ อากาศ พืช สัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาคารบ้านเรือนที่ก่อสร้างจากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งเป็นสถานที่ที่มนุษย์อยู่ใกล้ชิดเกือบตลอดเวลาในชีวิตประจำวัน

ตารางที่ 1.1 นิวไคลด์รังสีตั้งต้นของต้นกำเนิดรังสีในธรรมชาติ[1]

นิวไคลด์	สัญลักษณ์	ครึ่งชีวิต	กัมมันตภาพหรือปริมาณ
ยูเรเนียม-235	^{235}U	7.04×10^8 ปี	0.72% ของยูเรเนียมธรรมชาติ
ยูเรเนียม-238	^{238}U	4.47×10^9 ปี	99.2745% ของยูเรเนียมธรรมชาติ ยูเรเนียมมีอยู่ในหินทั่วไปประมาณ 0.5-4.7 ppm
ทอเรียม-232	^{232}Th	1.41×10^{10} ปี	มีทอเรียมในหินทั่วไป 1.6-20 ppm และมีบนเปลือกโลกประมาณ 10.7 ppm
เรเดียม-226	^{226}Ra	1.60×10^3 ปี	0.42 pCi/g (16 Bq/kg) ในหินปูน และ 1.3 pCi/g (48 Bq/kg) ในหินแกรนิต
เรดอน-222	^{222}Rn	3.28 วัน	เป็นก๊าซเฉื่อย; มีกัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยต่อปีใน USA 0.016 pCi/L (0.6 Bq/m^3) ถึง 0.75 pCi/L (28 Bq/m^3)
โปแตสเซียม-40	^{40}K	1.28×10^9 ปี	กัมมันตภาพรังสีจากดิน 1-30 pCi/g (0.037-1.1 Bq/g)

วัสดุก่อสร้างมีส่วนประกอบเช่นเดียวกับดิน และหิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเปลือกโลก ทำให้มีไอโซโทปกัมมันตรังสีปะปนอยู่ ตารางที่ 1.2 แสดงระดับของยูเรเนียม ทอเรียม และโปแตสเซียมในวัสดุก่อสร้างทั่วไป

ตารางที่ 1.2 ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ยูเรเนียม ทอเรียม และโปแตสเซียมที่มีอยู่ในวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่มีรายงานโดย NCRP[1]

Material	Uranium		Thorium		Potassium	
	ppm	mBq/g (pCi/g)	ppm	mBq/g (pCi/g)	ppm	mBq/g (pCi/g)
Granite	4.7	63 (1.7)	2	8 (0.22)	4	1184 (32)
Sandstone	0.45	6 (0.2)	1.7	7 (0.19)	1.4	414 (11.2)
Cement	3.4	46 (1.2)	5.1	21 (0.57)	0.8	237 (6.4)
Limestone concrete	2.3	31 (0.8)	2.1	8.5 (0.23)	0.3	89 (2.4)
Sandstone concrete	0.8	11 (0.3)	2.1	8.5 (0.23)	1.3	385 (10.4)
Dry wallboard	1.0	14 (0.4)	3	12 (0.32)	0.3	89 (2.4)
By-product gypsum	13.7	186 (5.0)	16.1	66 (1.78)	0.02	5.9 (0.2)
Natural gypsum	1.1	15 (0.4)	1.8	7.4 (0.2)	0.5	148 (4)
Wood	-	-	-	-	11.3	3330 (90)
Clay Brick	8.2	111 (3)	10.8	44 (1.2)	2.3	666 (18)

จากหลักฐานยืนยันว่า ปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีก และโรมัน[2] คำว่า ซีเมนต์ มาจากภาษาลาติน มีความหมายทั่วไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความยึดส่วนต่างๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้งในปี พ.ศ.2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษได้คิดค้นซีเมนต์จนประสบ

ความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทาเหมือนกับหินที่ใช้ก่อสร้างบริเวณเมืองพอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษจึงเรียกวัตถุนี้ว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปลายศตวรรษที่ 19 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้ในปริมาณมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก รวมทั้งได้มีการเปิดโรงงานผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษเกิดขึ้น เช่น ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ.2383, ประเทศเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2398, ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ.2414 และประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ.2425 ในส่วนของประเทศไทยนั้น ได้มีการเริ่มผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ครั้งแรกในปี พ.ศ.2456

เนื่องจากอาคารบ้านเรือน หรืออาคารต่าง ๆ ที่มนุษย์อยู่อาศัยล้วนมีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แทบทั้งสิ้น ดังนั้น อาคารบ้านเรือนจึงมีธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติปะปนอยู่เสมอ ดังแสดงในตารางที่ 1.2

จากข้อมูลค่าความแรงรังสีที่มีอยู่ในที่พักอาศัยอันเนื่องมาจากวัสดุทางธรรมชาติ ที่มีธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติปะปนอยู่ และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ก็เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีค่าความแรงรังสีจำเพาะในปริมาณที่มากพอที่อาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในอาคารบ้านเรือน การทำวิจัยในครั้งนี้จึงเลือกปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้สำหรับการก่อสร้างอาคาร หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 มาทำการวิจัยเพื่อหาปริมาณความแรงรังสีที่ได้จากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 วิเคราะห์หาความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma Spectrometry)
- 1.2.2 วิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์หาปริมาณความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ได้แก่ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ด้วยเทคนิค Gamma Spectrometry
- 1.3.2 สุ่มวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน (Radon Exhalation Rate) จากตัวอย่างบล็อกคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเครื่องมือวัดก๊าซเรดอน RAD7

1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษา ค้นคว้า รวบรวมข้อมูล และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดระบบวิเคราะห์รังสีแกมมาโดยวิธี Gamma Spectrometry ที่เหมาะสม
- 1.4.3 เตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ยี่ห้อต่าง ๆ และทำการวิเคราะห์หาความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ
- 1.4.4 ขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีค่าความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ในปริมาณสูง และวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน
- 1.4.5 สรุปผลงานวิจัย และเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถทราบถึง ปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และปริมาณการสะสมของก๊าซเรดอนจากการขึ้นรูปปูนซีเมนต์ในการก่อสร้าง เพื่อทราบถึงอันตรายอันเนื่องมาจากกัมมันตภาพรังสีในบริเวณที่อยู่อาศัย สิ่งแวดล้อม และบุคคลที่ทำงานหรืออาศัยบริเวณนั้น ๆ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 I.P. Farai, J.A. Ademola.[3] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria. หรือ การวิเคราะห์หาค่า Radium equivalent activity ของบล็อกคอนกรีตที่ได้จากอาคารต่าง ๆ ใน 8 เมืองทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไนจีเรีย โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีต 130 ตัวอย่าง ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของค่าความแรงรังสีของธาตุกัมมันตรังสี ^{226}Ra 13.3 – 18.4 Bq/kg, ^{232}Th 28.2 – 71.6 Bq/kg และ ^{40}K 176.2 – 336 Bq/kg สำหรับค่า Radium equivalent activity ของตัวอย่างที่ได้มาจาก 8 เมืองอยู่ในช่วง 81 – 145 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 101 Bq/kg และค่ามากที่สุดของ External Hazard ตรวจวัดได้ที่ 0.39 ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ต่าง ๆ ล้วนอยู่ในขอบเขตของค่าความปลอดภัยที่กำหนดโดย UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

1.6.2 Khalid Khan, Hasan M. Khan.[4] ทำการศึกษาเรื่อง Natural gamma-emitting radionuclides in Pakistani Portland cement. ได้ศึกษาถึงอัตราการปลดปล่อยรังสีแกมมาจากธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากจังหวัดทางตอนบนของประเทศปากีสถาน และวัตถุดิบการก่อสร้างอื่น ๆ โดยวิธีการ Gamma-spectrometric techniques โดยใช้ High-purity germanium detector (HPGe) ได้ค่าความแรงรังสีจำเพาะของแต่ละธาตุกัมมันตรังสีในแต่ละวัตถุดิบการก่อสร้างดังนี้ ในปูนซีเมนต์พบว่ามีค่าความแรงรังสีจำเพาะที่เกิดจาก ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th $187.8\pm 63.5 - 573.2\pm 73.1$ Bq/kg ; หินปูน $54.5\pm 16.1 - 183.9\pm 31.4$ Bq/kg ; ยิปซัม $87.1\pm 30.7 - 297.1\pm 64.4$ Bq/kg ; หินชนวน $696.4\pm 79.1 - 1043.9\pm 85.0$ Bq/kg ; หินศิลาแดง $490.9\pm 54.5 - 570.2\pm 59.8$ Bq/kg และพบว่าค่าเฉลี่ยความแรงรังสีจำเพาะของ ^{40}K มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ที่ได้จากการวัดวัตถุดิบการก่อสร้างทุกชนิด แต่อย่างไรก็ตามความแรงรังสีจำเพาะที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อทางด้านรังสีต่อสุขภาพแต่อย่างใด

1.6.3 K. Kovler, A.Perevalov, V. Steiner, L.A. Metzger.[5] ศึกษาเรื่อง Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. ได้ศึกษาถึงการตรวจวัดค่าความแรงรังสีของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่มีอยู่ในวัตถุดิบการก่อสร้างอันได้แก่ เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ และอื่น ๆ เพื่อศึกษาถึงอันตรายที่เกิดจากรังสีต่อร่างกายมนุษย์ การศึกษาในครั้งนี้เน้นไปที่อิทธิพลของเถ้าลอยที่มีผลกระทบต่อ Radon exhalation rate ที่มาจากส่วนผสมของซีเมนต์ และวัตถุดิบการก่อสร้างอื่น ๆ โดยการวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอนของวัตถุดิบในการก่อสร้างที่นำมาผสมกับปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยในอัตราที่แตกต่างกันออกไป พบว่าอย่างไรก็ตามถึงจะมี ^{226}Ra ปริมาณสูงในเถ้าลอย แต่อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนกลับอยู่ในปริมาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับในปูนซีเมนต์ คือ 7.65% และ 0.52% ของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)[2]

ซีเมนต์ คือ ของผสมที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในสัดส่วนที่พอเหมาะ ซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำแล้วจะจับตัวแข็ง และมีกำลังอัดสูง จึงสามารถเป็นตัวประสานวัสดุชนิดเม็ด (aggregates) เช่น ทรายหยาบ และกรวด ให้เกาะตัวกันแน่นเป็นคอนกรีตได้ สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันเรียกว่า “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)” เนื่องจากสีของปูนที่คล้ายคลึงกับสีหินบนเกาะปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. วัตถุดิบเนื้อปูน (Calcareous component) มีปริมาณมากถึง 80 % ในส่วนผสมก่อนการเผา (raw mix) คือวัตถุดิบที่ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (CaCO_3) เป็นส่วนใหญ่ อาจเป็น หินปูน (limestone) ดินสอพอง หรือดินมาร์ล (marl) หินอ่อน (marble) หรือหินชอล์ก (chalk) ก็ได้ แต่สำหรับโรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศไทยนั้น ทุกแห่งใช้หินปูนเป็น วัตถุดิบ
2. วัตถุดิบเนื้อดิน (Argillaceous component) มีสัดส่วนประมาณ 15 – 18 % ในส่วนผสมก่อนการเผา และมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (alumina, Al_2O_3) มีสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย วัตถุดิบในกลุ่มนี้ได้แก่ หินดินดาน (shale) หรือดินเหนียว (clay)
3. วัตถุดิบปรับคุณภาพ (Corrective component) คือวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบ เนื้อปูน อะลูมินา ซิลิกา หรือสนิมเหล็กสูง ใช้เติมส่วนผสมของวัตถุดิบหลักสองตัวแรกในกรณีที่วัตถุดิบทั้งสองมีองค์ประกอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนด เช่นมีอะลูมินาต่ำเกินไป ต้องเติมตัวปรับคุณภาพที่เป็นแร่บอกไซต์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ถ้าเหล็กต่ำก็เติมแร่เหล็ก หรือเศษเหล็กลงไป เพื่อให้ส่วนผสมมีองค์ประกอบตามเกณฑ์ที่กำหนด
4. สารเติมแต่ง (Additive) คือวัตถุดิบที่เติมลงในปูนเม็ดภายหลังการเผา เพื่อปรับคุณสมบัติบางประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แร่ยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงระยะเวลาใน

การแข็งตัวของปูนให้ช้าลงเมื่อมีการผสมน้ำลงไปเพื่อใช้งาน ปริมาณของยิปซัมที่ใช้จะอยู่ในช่วง 3-5 % โดยน้ำหนักของปูนเม็ด ในบางกรณี การเติมตัวเติมลงไปก็เพียงเพื่อเพิ่มเนื้อปูน เช่นการเติมหินปูนบดในปริมาณ 10-20 % โดยน้ำหนักลงไปปูนเม็ด ซึ่งสามารถทำได้โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์

ตามมาตรฐาน โดยทั่วไปของประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

1. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา

2. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

3. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ไม่เหมาะในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจจะทำให้โครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

4. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหนา (Mass Concrete) เช่นการก่อสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าว

5. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้มีค่า C_3A ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ให้กำลังอัดช้า และให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.2 แหล่งกำเนิดของรังสี[6]

สิ่งมีชีวิตล้วนได้รับรังสีจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวตลอดเวลาทั้งทางตรง และทางอ้อม คือได้รับรังสีจากภายนอกร่างกายโดยตรง ได้แก่ รังสีจากธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งหมายถึง ธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ตั้งแต่เริ่มแรก (primordial radioactive elements) ในเปลือกโลกซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตยาวพอ ๆ กับอายุของโลกรวมทั้งธาตุกัมมันตรังสีลูกที่ได้จากการสลายตัว และจากรังสีคอสมิก รวมทั้งธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดจากอันตรกิริยาของรังสีคอสมิกกับธาตุเสถียรที่อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก และยังได้รับรังสีทางอ้อมจากร่างกายในร่างกายนั่นเอง ได้แก่ ธาตุกัมมันตรังสีที่มนุษย์รับเข้าไปในร่างกายอันเนื่องจากการรับประทานอาหาร, การดื่ม และการหายใจเป็นต้น ธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญ คือ ธาตุกัมมันตรังสีลูกของก๊าสเรดอน (radon) ซึ่งแผ่รังสีแอลฟาในระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์ได้รับนั้นมีทั้งแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

2.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติมีทั้งแหล่งกำเนิดที่เกิดจากนอกโลก ซึ่งได้แก่รังสีคอสมิก และธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกทำอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศของโลก และแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติบนพื้นโลกที่มีมาตั้งแต่เริ่มแรกเกิดของโลก (Primordial radioactive elements) เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่ค่าครึ่งชีวิตยาวมากประมาณหลายร้อยล้านปีขึ้นไป คือ อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม เช่น ^{238}U มีค่าครึ่งชีวิต 4.47×10^9 ปี และ ^{232}Th มีค่าครึ่งชีวิต 1.41×10^{10} ปี เป็นต้น รวมทั้งธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่นอกเหนือจากอนุกรมทั้งสองข้างต้นที่สำคัญมี 2 ตัวได้แก่ ^{40}K มีค่าครึ่งชีวิต 1.28×10^9 ปี และ ^{87}Rb มีค่าครึ่งชีวิต 4.7×10^{10} ปี

นอกจากนี้ ^{238}U และ ^{232}Th ยังเป็นต้นกำเนิดไอโซโทปรังสีอื่นอีกเป็นจำนวนมาก โดยมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปเสถียร อนุกรมการสลายตัวของ ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2 สำหรับไอโซโทปที่อยู่นอกเหนืออนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม และทอเรียม แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งไอโซโทปรังสีเหล่านี้จะปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในบรรยากาศ และพื้นผิวโลกที่เราอาศัยอยู่ ทำให้มนุษย์ได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติทั้งทางตรง และทางอ้อม

ตารางที่ 2.1 อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238

Nuclide	Half-life	Energy(MeV)			เปอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยรังสีแกมมา
		แอลฟา	บีตา	แกมมา	
²³⁸ U	4.47×10 ⁹ y	4.2	-	0.048	23
²³⁴ Th	24.1 d	-	0.19	0.09	4
²³⁴ Pa	1.17 m , 6.69 h	-	2.29	1.0	0.6
²³⁴ U	2.46×10 ⁵ y	4.8	-	0.05	28
²³⁰ Th	7.54×10 ⁴ y	4.8	-	0.068	24
²²⁶ Ra	1600 y	4.8	-	0.186	4
²²² Rn	3.82 d	5.49	-	0.5	0.07
²¹⁸ Po	3.10 m	6.00	-	-	-
²¹⁴ Pb	27 m	-	0.65	0.24	4
²¹⁴ Bi	19.9 m	5.5	1.5	0.61	47
²¹⁴ Po	164 μs	7.7	-	0.8	0.014
²¹⁰ Pb	22.6 y	-	0.016	0.046	81
²¹⁰ Bi	5.01 d	-	1.16	-	-
²¹⁰ Po	138.38 d	5.30	-	0.80	0.001
²⁰⁶ Pb		stable			

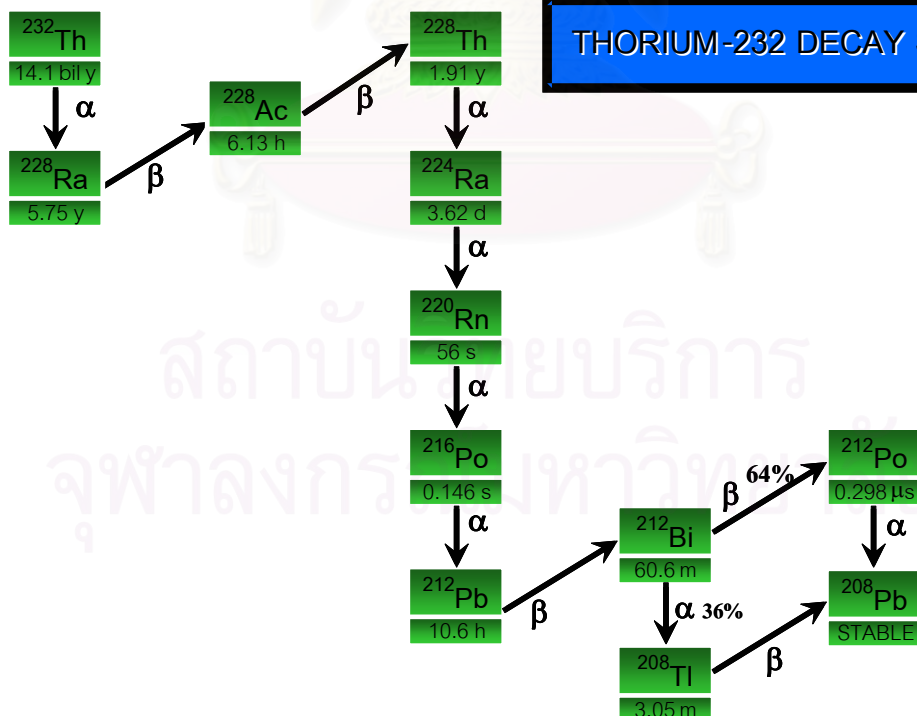
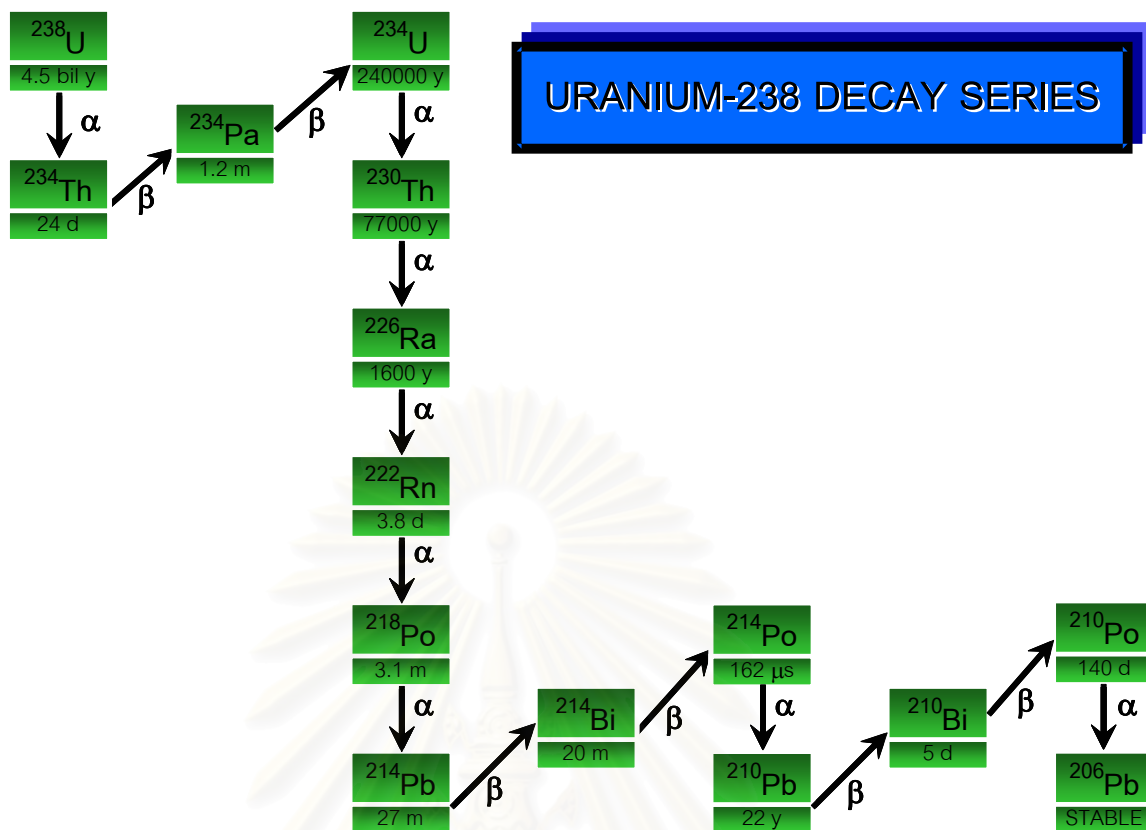
ตารางที่ 2.2 อนุกรมการสลายตัวของทอเรียม-232

Nuclide	Half-life	Energy(MeV)			เปอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยรังสีแกมมา
		แอลฟา	บีตา	แกมมา	
²³² Th	1.40×10 ¹⁰ y	4.0	-	0.06	23
²²⁸ Ra	5.76 y	-	0.054	-	-
²²⁸ Ac	6.15 h	-	1.11	0.09	30
²²⁸ Th	1.913 y	5.43	-	0.08	28
²²⁴ Ra	3.66 d	5.68	-	0.24	5
²²⁰ Rn	55.6 s	6.29	-	-	-
²¹⁶ Po	0.145 s	6.78	-	-	-
²¹² Pb	10.64 h	-	0.36	0.238	81
²¹² Bi	1.009 h	6.05	2.20	0.04	17
²¹² Po	0.29 μs	8.78	-	-	-
²⁰⁸ Tl	3.053 m	-	1.79	2.62	100
²⁰⁸ Pb		stable			

ตารางที่ 2.3 นิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติที่อยู่นอกเหนืออนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232

Nuclide	Decay mode	Half life (y)	Abundance (%)
⁴⁰ K	β, EC	1.28×10 ⁹	0.0117
⁸⁷ Rb	β	4.8×10 ¹⁰	27.83
¹¹⁵ In	β	5.1×10 ¹⁴	95.7
¹³⁸ La	β, EC	1.1×10 ¹¹	0.089
¹⁴⁷ Sm	α	1.06×10 ¹¹	15.5
¹⁷⁶ Lu	β	3.6×10 ¹⁰	2.61
¹⁸⁷ Re	β	4×10 ¹⁰	62.60
¹⁹⁰ Nd	α	6×10 ¹¹	0.013
¹⁴⁴ Nd	α	2.1×10 ¹⁵	23.8

จากตารางที่ 2.1 และ 2.2 พบว่า เรเดียม-226 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม และเรเดียม-228 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัวของอนุกรมทอเรียม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสีจากพื้นดิน สำหรับไอโซโทปของเรเดียมมีทั้งหมด 4 ตัวคือ เรเดียม-223 (half life= 11.4 วัน), เรเดียม-224 (half life= 3.6 วัน), เรเดียม-226 (half life= 1600ปี) และเรเดียม-228 (half life= 5.7 ปี) ซึ่งไอโซโทปตัวที่สำคัญของเรเดียมก็คือ เรเดียม-226 เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตยาวที่สุดเมื่อเทียบกับไอโซโทปตัวอื่น ๆ



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงอนุกรมการสลายตัวของ ^{238}U และ ^{232}Th

2.3 ยูเรเนียม (Uranium)

ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีโดยตัวมันเอง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในปฏิกิริยาปรมาณูสำหรับผลิตไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ธาตุยูเรเนียมยังเป็นต้นกำเนิดของธาตุเรเดียมซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในการรักษาโรคมะเร็ง ปัจจุบันธาตุยูเรเนียมที่มีอยู่ในแร่ และหินยังนำไปทำการวิเคราะห์หาอายุของแร่ และหินนั้น ๆ

คุณสมบัติทางกายภาพ ธาตุยูเรเนียมในธรรมชาติไม่พบว่าเป็นธาตุบริสุทธิ์ มักเกิดปะปนกับธาตุอื่น ๆ เสมอ สีของแร่ยูเรเนียมมีหลายสีเช่น ดำ, เขียว, เหลือง และสีอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการเกิดของแร่ยูเรเนียมและ ธาตุอื่น ๆ ที่เกิดร่วมด้วย ธาตุยูเรเนียมเป็นธาตุหนัก คือ มีความถ่วงจำเพาะถึง 19.05 มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,133 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ประมาณ 3,927 องศาเซลเซียส แร่ยูเรเนียมละลายได้น้ำง่าย

คุณสมบัติทางเคมี ยูเรเนียมมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ U นำหนักอะตอม 238.07 จำนวนอะตอม 92 โดยทั่วไปยูเรเนียมมีวาเลนซ์ +3, +4 และ +6 และมี oxides อยู่เพียง 4 ตัวคือ UO, UO₂, UO₃ และ UO₄ พบว่า UO นั้นจะพบเป็นชั้นบาง ๆ บนผิวของแร่ยูเรเนียม

ยูเรเนียมมี 3 ไอโซโทป คือ ²³⁸U, ²³⁵U และ ²³⁴U ชนิดที่มีมากที่สุดคือ ²³⁸U มีถึง 99.275% ค่าครึ่งชีวิตของธาตุยูเรเนียมแต่ละชนิดแตกต่างกัน ²³⁴U มีค่าครึ่งชีวิต 2.48×10⁵ ปี, ²³⁵U มีค่าครึ่งชีวิต 7.13×10⁸ ปี และ ²³⁸U มีค่าครึ่งชีวิต 4.51×10⁹ ปี

2.3.1 ชนิดการเกิดของแหล่งแร่ยูเรเนียม

- แบบที่เกิดเป็นสายแร่ โดยเกิดแทรกเข้ามาในหินที่อายุแก่กว่า เนื่องจากยูเรเนียมเกิดในช่วง Late magmatization ถูกพวก Volatile เป็นตัวนำมา
- แบบที่เกิดในหินชั้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในชั้นใดชั้นหนึ่งโดยเฉพาะ เกิดทั้งในหินทราย, หินกรวด, หินฟอสเฟต และหินดินดาน รวมถึงถ่านหินด้วย แหล่งแร่ยูเรเนียมที่สำคัญพบอยู่ในชั้นของหินทราย
- แบบที่เกิดในลานแร่ ซึ่งเป็นแร่แบบทุติยภูมิ ถูกพัดพาจากแหล่งกำเนิดมักเป็นพวก Pegmatite หินแกรนิตชนิดต่าง ๆ ถ้าถูกพัดพาไปไม่ไกลนักก็ยังคงเป็นของแข็งอยู่ แต่ถ้าถูกพัดพาไปไกลมากก็จะสลายตัวเป็นผง หรือละลายปนกับน้ำ
- แบบที่เกิดในหินอัคนี มักพบทั้งในพวก Alkali และ Acid igneous rock โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินแกรนิต ยูเรเนียมจะเกิดแบบกระจุกกระจายอยู่ในเนื้อหิน และเป็นแบบสายแร่ด้วย

2.4 ทอเรียม (Thorium)

ทอเรียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีอีกชนิดหนึ่งที่เพิ่งนำมาใช้ประโยชน์ทางนิวเคลียร์เมื่อไม่นานมานี้เอง เนื่องจากได้มีการค้นพบว่า ทอเรียมสามารถแปลงเป็นเชื้อเพลิงปรมาณูได้ดี และปริมาณทอเรียมในธรรมชาติก็มีมากพอกับยูเรเนียม

คุณสมบัติทางกายภาพ แร่ทอเรียมมีการกระจายอยู่ทั่วโลกโดยจะปะปนอยู่กับสินแร่ชนิดอื่นเฉลี่ยประมาณ 0.001 – 0.002 % ส่วนมากจะปะปนอยู่กับแร่ยูเรเนียม และในพวก rare earth ในแร่ทอเรียมไนท์ (Thorianite) และทอไรท์ (Thorite) จะมีทอเรียมปะปนถึง 90 % แต่แร่พวกนี้มีอยู่ไม่มากนักจึงไม่เหมาะจะนำมาแยกทอเรียมเป็นอุตสาหกรรม แร่ที่สำคัญและเหมาะแก่การอุตสาหกรรมก็คือ โมนาไซต์ ซึ่งมีทอเรียมไดออกไซด์ (ThO_2) อยู่สูงถึง 11 % และมีแร่ยูเรเนียมปะปนอยู่มากน้อยต่างกัน

คุณสมบัติทางเคมี ทอเรียมที่ปรากฏในธรรมชาติมีเลขอะตอม 90 และ เลขมวล 232 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 1.39×10^{10} ปี เป็นสารกัมมันตรังสีที่มีการสลายตัวโดยปลดปล่อยรังสีแอลฟา

แร่ทอเรียมมักพบปะปนอยู่กับยูเรเนียม และออกไซด์ของโลหะจำพวก rare earth ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของแร่ทอไรท์ (Thorite) และทอเรียมไนท์ (Thorianite) แต่แร่พวกนี้หายาก ส่วนใหญ่ได้จากแร่โมนาไซต์ ซึ่งพบอยู่เกือบทั่วไป

แร่โมนาไซต์ (Ce, La, Y, ThPO_4) เป็นแร่ที่มีส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุยูเรเนียม, ทอเรียม และ rare earth elements อื่น ๆ อยู่ในสารประกอบของ Phosphate มีลักษณะทางกายภาพที่สำคัญคือ มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล มีความวาวคล้ายยาง

2.5 เรดอน (Radon)

เรดอนเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดมาจากการสลายตัวของเรเดียม ซึ่งจะมี 3 ไอโซโทปด้วยกัน คือ เรดอน-219 หรือเรียกอีกชื่อว่า แอคตินอน (Actinon), เรดอน-220 เรียกอีกชื่อว่า ทอรอน (Thoron) และเรดอน-222 เรียกอีกชื่อว่า เรดอน (Radon) พบว่าแอคตินอนนั้นจะสลายตัวมาจากอนุกรมการสลายตัวแอคตินีียม (Actinium Series) ที่มียูเรเนียม-235เป็นธาตุตั้งต้น พบได้น้อยมากในธรรมชาติ เนื่องจากยูเรเนียม-235 มีน้อยมากในธรรมชาติ นอกจากนี้แอคตินอนก็ยังมีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 5 วินาทีเท่านั้น โอกาสที่จะมีแอคตินอนเกิดขึ้น และหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงน้อยมาก ดังนั้น แอคตินอนจึงไม่ใช่ไอโซโทปที่ก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อม ส่วนทอรอนจะสลายตัวมาจากอนุกรมทอเรียม (Thorium Series) ที่มีธาตุตั้งต้นคือทอเรียม-232 ถึงแม้ว่าทอเรียม-232 จะพบมากในธรรมชาติ แต่ทอรอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้นแค่ 55 วินาทีจึงมักมีการสลายตัวไปก่อนที่จะหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นทอรอนจึงไม่ใช่ไอโซโทปที่ก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อมเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณา

เรดอนพบว่า เรดอนจะสลายตัวมาจากอนุกรมยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-238 เป็นธาตุตั้งต้น จึงจะเห็นได้ว่านอกจากยูเรเนียม-238 จะพบมากในธรรมชาติแล้วนั้น เรดอนยังเป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวที่สุดคือ 3.82 วัน จึงสามารถฟุ้งกระจายไปในอากาศก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาเรื่องเรดอนจึงมักพิจารณาแค่เรดอน-222 เท่านั้น

คุณสมบัติเชิงเคมีของเรดอน พบว่าเรดอนมีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นก๊าซเฉื่อยแต่ก็ไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยสมบูรณ์ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับฟลูออไรด์เกิดเป็นเรดอนฟลูออไรด์ (Radon Fluoride) ได้ เช่นเดียวกับก๊าซเฉื่อยบางตัว เช่น คริปตอน (Krypton) และซีนอน (Xenon) และเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุหมู่ 8 ตัวอื่น ๆ พบว่าเรดอนเป็นธาตุที่มีจุดเดือด และจุดหลอมเหลวสูงที่สุด ก็จะมีจุดเดือด -61.8 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวเท่ากับ -71.0 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเรดอน พบว่าเรดอนสามารถละลายน้ำได้ แต่ความสามารถในการละลายจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ โดยเรดอนจะละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าน้ำที่อุณหภูมิสูง และเรดอนยังสามารถละลายได้ดีมากในตัวทำละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าเรดอนจะไม่มีสีในอุณหภูมิปกติ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงเรดอนจะเปล่งแสงสีเหลืองสุกใส และเมื่อลดอุณหภูมิลงอีกเรดอนจะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง

2.5.1 แหล่งกำเนิดเรดอน

2.5.1.1 แหล่งกำเนิดเรดอนภายนอกอาคาร

- ดิน จากการสำรวจพบว่า ค่าเฉลี่ยของก๊าซเรดอนที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศทั่วโลกประมาณ 80 % มาจากพื้นดินชั้นบน ซึ่งการฟุ้งกระจายของเรดอนมีส่วนสัมพันธ์กับเรเดียม และยูเรเนียมในดิน แม้ว่าธาตุเหล่านี้จะมีในดิน และหินเกือบทุกชนิดแต่ปริมาณจะแปรผันตามพื้นที่ และวัสดุทางธรณีวิทยา โดยทั่วไปความเข้มข้นของยูเรเนียมจะแสดงในหน่วย หนึ่งในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (ppm) หรือในเทอมของความแรงรังสีจำเพาะ (specific activity) แสดงในหน่วย pCi ของ ^{238}U ต่อกรัมของวัสดุ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของยูเรเนียมในหิน พบว่าหินแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมแตกต่างกัน เช่น หินแกรนิตจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูง โดยจะมีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 1.6 pCi/g หินบะซอลต์จะมีความเข้มข้นยูเรเนียมประมาณ 0.3 pCi/g ส่วนหินในชั้นเปลือกโลกจะมีความเข้มข้นยูเรเนียมเฉลี่ยประมาณ 1 pCi/g และในแง่บางชนิดอาจมีค่ามากกว่านี้ สำหรับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในแต่ละที่จะไม่เท่ากันขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้นเรเดียม และค่าความสามารถในการซึมผ่านของดิน นอกจากนี้ปริมาณน้ำในดินก็มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนด้วยคือ ในบริเวณที่มีปริมาณน้ำต่ำจะมีการปลดปล่อยของก๊าซเรดอนได้มากกว่าบริเวณที่มีปริมาณน้ำสูง รวมทั้งบริเวณที่มีความดันบรรยากาศ

สูงก็จะทำให้การปลดปล่อยของก๊าซเรดอนลดลงด้วย ดังนั้นอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจะแปรปรวนขึ้นกับเวลา และสถานที่

- น้ำใต้ดิน แหล่งกำเนิดก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่สำคัญเป็นอันดับสองคือน้ำใต้ดิน เนื่องจากน้ำใต้ดินจะเชื่อมกับหินในชั้นเปลือกโลก และแทรกซึมไปตามรูพรุน และช่องว่างในดิน และหิน จึงทำให้เรดอนที่ปลดปล่อยภายในช่องว่างนั้นละลายมากับน้ำ เมื่อน้ำขึ้นมาถึงผิวดินเรดอนส่วนใหญ่จะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ สำหรับความเข้มข้นของเรดอนนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหินในบริเวณนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบเรดอนที่ถูกปลดปล่อยจากน้ำใต้ดินสู่บรรยากาศนั้นพบว่ามีความเข้มข้นต่ำ คือประมาณหนึ่งในห้าของปริมาณเรดอนที่ถูกปลดปล่อยจากดิน

- แหล่งอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากน้ำทะเลอีกด้วย แต่ความเข้มข้นของยูเรเนียม และเรเดียมในน้ำทะเลมีค่าน้อยกว่าในดิน และหิน แม้ว่าความเข้มข้นของยูเรเนียมกับเรเดียมต่ำ แต่เรดอนมีความสามารถในการละลายน้ำสูง จึงทำให้มีการปลดปล่อยเรดอนจากผิวน้ำทะเลสู่บรรยากาศได้แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม

2.5.1.2 แหล่งกำเนิดเรดอนภายในอาคาร

- วัสดุก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุก่อสร้างทำมาจากหิน, ทราย และผลิตภัณฑ์จากแร่ ซึ่งมียูเรเนียม และเรเดียมเป็นองค์ประกอบ วัสดุก่อสร้างหลายชนิด เช่น อิฐ, กระเบื้องปูผนัง และคอนกรีตจะมีรูพรุน ดังนั้นจึงมีเรดอนจากวัสดุก่อสร้างหลุดออกสู่อากาศได้

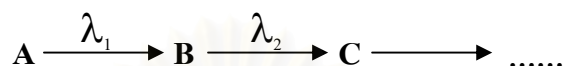
- น้ำใต้ดิน เรดอน และเรเดียมมีความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อมีน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ผ่านดิน และหินที่มีเรเดียมอยู่ เรเดียมก็จะสามารถละลาย และเคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดิน ดังนั้นเมื่อทำการสูบน้ำใต้ดินที่มีเรดอนมาใช้จะทำให้มีเรดอนหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

- ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากก๊าซธรรมชาติที่ถูกผลิตขึ้นที่ใต้ดินซึ่งจะมีเรดอนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เมื่อมีการเผาไหม้ก็จะมีเรดอนถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ปริมาณของเรดอนที่มาจากก๊าซธรรมชาติจะไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณเรดอนในอาคาร เนื่องจากบริเวณห้องครัวจะเป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทของอากาศ

- ดิน ในสภาวะปกติปริมาณเรดอนภายในอาคารที่ปลดปล่อยมาจากดินนั้นจะมีอัตราการปลดปล่อยขึ้นกับความเข้มข้นของเรเดียม และความดันบรรยากาศในบริเวณนั้น เมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้นอากาศที่มีความเข้มข้นของเรดอนต่ำจะถูกดันเข้าไปในดิน และเมื่อความดันลดลงอากาศในดินที่มีปริมาณเรดอนสูงก็จะออกมาจากดิน จะเห็นได้ว่าอาคารบ้านเรือนที่ตั้งอยู่บนพื้นดินจึงเปรียบเสมือนเป็นทางผ่านของเรดอน การปลดปล่อยเรดอนโดยตรงจากดินเข้าสู่อาคารนั้นจะมีคอนกรีตปิดทับดินอยู่จึงทำให้มีปริมาณเรดอนที่สามารถผ่านคอนกรีตออกมาได้น้อยมาก แต่หากอาคารมีรอยแตกเรดอนก็จะสามารถเล็ดลอดออกมาได้เช่นกัน

2.6 สมดุลกัมมันตรังสี (Radioactive equilibrium)[7]

มีสารกัมมันตรังสีหลายตัวที่เมื่อสลายตัวแล้วจะทำให้นิวเคลียสของตัวลูกที่ยังคงเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งก็จะสลายตัวต่อไปพร้อมกับก่อให้เกิดลูกของกัมมันตรังสีตัวใหม่ไปเรื่อย ๆ เช่น อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม เป็นต้น สมการทั่ว ๆ ไปสำหรับอนุกรมการสลายตัวแบบนี้คือ



เมื่อ A สลายตัวไปเป็น B และเมื่อ B สลายตัวต่อจะก่อให้เกิด C
 λ_1 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวในการเปลี่ยนแปลงของ A ไป B
 λ_2 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวในการเปลี่ยนแปลงของ B ไป C
 ให้ N_1^0 และ N_2^0 แทนจำนวนอะตอมของ A และ B ณ เวลาเริ่มต้น
 N_1 และ N_2 แทนจำนวนอะตอมของ A และ B ตามลำดับ ณ เวลาใด ๆ

สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีคือ

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} = \text{อัตราการเกิด} - \text{อัตราการสลายตัว}$$

ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณของ N_2 ในขณะใดขณะหนึ่งได้ดังสมการ

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (3)$$

แทนค่าสมการ (1) ลงใน (3)

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (4)$$

และเมื่อแก้สมการจะได้สมการสำหรับอนุกรมการสลายตัวดังนี้

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (5)$$

2.6.1 สมดุลแบบเซกูลาร์ (Secular equilibrium)

เป็นสมดุลทางรังสีที่มีเงื่อนไขกำกับว่า ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่จะต้องมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกหลายเท่า หรือมองอีกแง่หนึ่งคือ $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ถ้าจะให้เห็นได้ชัดของการเกิดสมดุลในแบบนี้แล้ว ความแตกต่างของค่าครึ่งชีวิตระหว่างนิวไคลด์แม่กับนิวไคลด์ลูกจะต้องต่างกัน 10^4 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์แม่จะไม่เปลี่ยนแปลงเท่าไร ในขณะที่ค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกเปลี่ยนแปลงไปหลายช่วงครึ่งชีวิต ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของเรเดียม-226 ไปเป็นเรดอน-222



สำหรับสมดุลทางรังสีระหว่างเรเดียม และเรดอนทำให้สมการ (5) เปลี่ยนแปลงง่ายขึ้น กล่าวคือ λ_1 นั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่า λ_2 และเช่นเดียวกันเมื่อเวลา t ผ่านไปนานหลายช่วงครึ่งชีวิตของเรดอน ผลคูณของ t และ λ_2 จะมีค่ามหาศาล ดังนั้น $e^{-\lambda_2 t}$ จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมการ (5) สามารถลดรูปได้เป็น

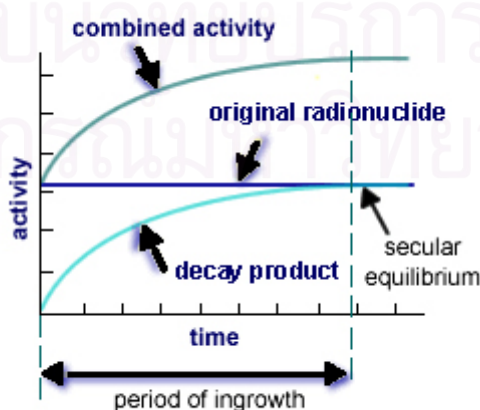
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (6)$$

แทนค่า N_1 จาก (1) ลงใน (6) จะได้

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (7)$$

หรือเมื่อเข้าสู่ระบบสมดุลแบบเซกูลาร์จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \dots \quad (8)$$



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดสภาวะสมดุลแบบเซกูลาร์[7]

2.6.2 สมดุลแบบทรานเซียนต์ (Transient equilibrium)

สมดุลนี้มีความคล้ายคลึงกับสมดุลแบบเซคูลาร์ในกรณีที่ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่มีค่ามากกว่านิวไคลด์ลูก แต่มากกว่าด้วยสัดส่วนเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 10 เท่า) เมื่อเทียบกับ 10^4 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่า $\lambda_1 < \lambda_2$

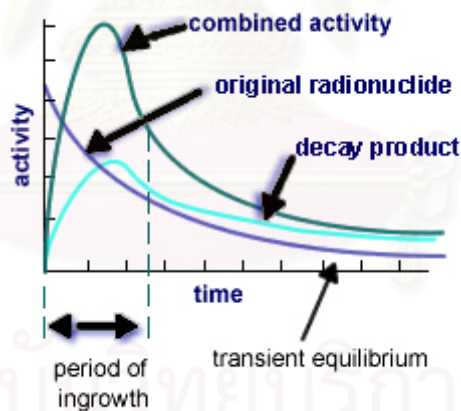
เมื่อเวลา t มีค่ามาก ๆ ค่า $e^{-\lambda_2 t}$ จะตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับ $e^{-\lambda_1 t}$ เมื่อมองว่าเทอม $e^{-\lambda_2 t}$ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมการ (5) จะเปลี่ยนให้ง่ายขึ้นเป็น

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (9)$$

เมื่อแทนค่า N_1 จาก (1) ลงใน (9) จะได้

$$N_1 \lambda_1 = N_2 (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (10)$$

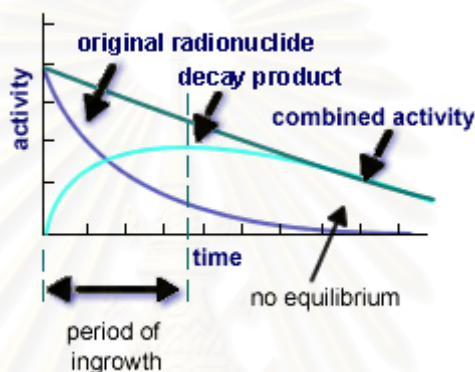
อย่างไรก็ตามในกรณีของสมดุลแบบทรานเซียนต์นั้น ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่สั้นกว่าในกรณีของสมดุลแบบเซคูลาร์ ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าค่าความแรงรังสีทั้งหมดจะลดลงตามเวลาดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดสภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์[7]

2.6.3 ไม่มีสมดุลทางรังสี (No equilibrium)

สมดุลทางรังสีจะไม่เกิดขึ้นถ้าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่มีน้อยกว่าของนิวไคลด์ลูก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าเริ่มต้นจากนิวไคลด์แม่แล้วพิจารณาความแรงรังสีจะพบว่า ความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกจะเพิ่มขึ้นผ่านจุดที่มากที่สุดแล้วลดลง ณ จุดที่ค่าความแรงรังสีมากที่สุดความชันของเส้นกราฟนิวไคลด์ลูก $dN_2/dt = 0$ สามารถคำนวณระยะเวลาของความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกจากเริ่มต้นจนมีค่ามากที่สุดได้ โดยอาศัยสมการดิฟเฟอเรนเชียล (5) โดยการตั้งสมการดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับศูนย์ แล้วคำนวณหาค่า t รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความแรงรังสี



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่มีสมดุลทางรังสี[7]

2.7 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม (Radium equivalent activity)[8]

วัสดุก่อสร้างอาคารโดยทั่วไปรวมทั้งซีเมนต์, หิน และทราย จะประกอบไปด้วยธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งธาตุกัมมันตรังสีที่มีบทบาทสำคัญได้แก่ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 จากการที่มีธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวอยู่ในวัสดุก่อสร้างทำให้เกิดการได้รับรังสีแกมมาจากภายนอก (External Exposure to Gamma rays) การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุเรเดียมในหน่วยของ ความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม เพื่อหาว่าวัสดุนั้นเหมาะสมที่จะนำไปทำประโยชน์ทางด้านใดได้บ้าง โดย Ra_{eq} เป็นค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักของกัมมันตภาพรังสีของ 3 นิวไคลด์ คือ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (11)$$

โดย Ra_{eq} คือ ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม (Bq/kg)
 A_{Ra} คือ ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ^{226}Ra (Bq/kg)

A_{Th} คือ ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ^{232}Th (Bq/kg)

A_K คือ ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ^{40}K (Bq/kg)

ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักมาจากการประมาณว่า ค่ากัมมันตภาพ 370 Bq kg⁻¹ ของ ^{226}Ra จะให้ค่าปริมาณรังสีแกมมา (gamma dose rate) เท่ากับ ^{232}Th 259 Bq kg⁻¹ และ ^{40}K 4,810 Bq kg⁻¹

ค่า Ra_{eq} จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยแต่ละประเภทจะบ่งชี้ว่าวัสดุนั้น ๆ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ใดได้หรือไม่

ตารางที่ 2.4 ค่าระดับความปลอดภัยของความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในวัสดุก่อสร้าง กำหนดโดย United nations scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR)[8]

Ra_{eq} (Bq kg ⁻¹)	ประเภท	สิ่งก่อสร้าง
< 370	1	บ้านเรือน อาคารที่พักอาศัย
370 – 740	2	โรงงานอุตสาหกรรม
740 – 2220	3	ถนน และสะพาน
2220 – 3700	4	สิ่งก่อสร้างที่ไม่มีผู้อยู่อาศัย
> 3700	5	ไม่สมควรก่อสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น

2.8 ค่าดัชนีความเสี่ยง (Hazard Index)[9]

ค่าดัชนีความเสี่ยง ใช้อธิบายได้ว่า บุคคลที่พักอาศัยอยู่ในอาคารจะได้รับความเสี่ยงอันตรายจากการได้รับรังสีจากภายนอก และภายในอันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง อาคารอย่างไร

2.8.1 External Hazard Index (H_{ex})

รังสีที่ได้รับจากภายนอกโดยส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมาที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่มาจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติภายนอกร่างกายเช่น จากพื้นดิน และจากวัสดุก่อสร้างอาคารบ้านเรือนเป็นต้น โดยดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกในร่างกายในกรณีที่บริเวณที่ทำการตรวจวัดมีลักษณะเป็นผนังคอนกรีตที่มีความหนา และไม่มีประตู หรือหน้าต่าง ซึ่งประมาณได้เช่นเดียวกับแอมเบอร์ระบบปิดที่ใช้ในการวิจัย สามารถหาค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกได้จากสมการ

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (12)$$

สำหรับกรณีที่เป็นบริเวณที่ทำการตรวจวัดมีลักษณะเป็นผนังคอนกรีตที่สามารถระบุความหนาได้ และมีประตู หรือหน้าต่าง สามารถหาค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกายได้จากสมการ

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{740} + \frac{A_{Th}}{520} + \frac{A_K}{9620} \quad (13)$$

หากค่า $H_{ex} = 1$ และ Ra มีความแรงรังสีจำเพาะ 370 Bq kg^{-1} พบว่าผู้ได้รับรังสีจากภายนอก ร่างกาย จะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดโดย ICRP มีค่าเท่ากับ 1.5 mGy y^{-1} [10] ดังนั้น ค่า H_{ex} จึงมีค่าไม่ควรเกิน 1

2.8.2 Internal Hazard Index (H_{in})

อันตรายจากรังสีภายในร่างกายจะมาจากก๊าซเรดอน, ทอรอน และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เป็นผลผลิตจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ซึ่งรังสีแอลฟาเป็นอันตรายอย่างยิ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกาย โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งจากทางระบบทางเดินหายใจ, ระบบย่อยอาหาร และแพร่ผ่านทางชั้นผิวหนัง เป็นต้น โดยดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากร่างกายใน ร่างกาย หาได้จากสมการ

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (14)$$

สำหรับความเสี่ยงจากอันตรายอันเนื่องมาจากรังสีจากร่างกายใน ร่างกาย ถ้าความเข้มข้นกัมมันตรังสีของเราเดียมมีค่าครึ่งหนึ่งของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนที่ยอมรับได้ (1.5 mGy y^{-1}) ดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากร่างกายใน ร่างกายจะมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นถ้าหากค่า H_{ex} และ $H_{in} > 1.0$ แสดงว่า วัสดุนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากมีความเสี่ยงอันตรายจากการได้รับรังสีจากภายนอก และภายในจากการใช้วัสดุดังกล่าวมาก

2.9 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rate in air)[11]

ปริมาณรังสีดูดกลืนอันเนื่องมาจากรังสีแกมมาจากร่างกายนอก ร่างกาย จากรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจาก ^{214}Pb และ ^{214}Bi ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกของ ^{226}Ra และเช่นเดียวกับอนุกรมการสลายตัวของ ^{232}Th และ ^{40}K ก็ปลดปล่อยให้รังสีแกมมา ส่งผลให้ร่างกายได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนรวมอันเนื่องมาจากรังสีแกมมาดังกล่าว ดังนั้นอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (mGy h^{-1}) สามารถคำนวณเปรียบเทียบได้จากค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K สำหรับการคำนวณ

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศที่ระดับความสูง 1 เมตรจากพื้นดินเหนือตัวอย่างวัสดุ
กัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D = 0.427A_U + 0.662A_{Th} + 0.0432A_K \quad (15)$$

โดย A_U คือ ค่าเฉลี่ยความแรงรังสีจำเพาะของ ^{238}U (Bq kg^{-1})
 A_{Th} คือ ค่าเฉลี่ยความแรงรังสีจำเพาะของ ^{232}Th (Bq kg^{-1})
 A_K คือ ค่าเฉลี่ยความแรงรังสีจำเพาะของ ^{40}K (Bq kg^{-1})

2.10 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน (Radon exhalation rate)[12,13]

ในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238 เรดอน-222 เป็นนิวไคลด์ลูกอันเนื่องมาจากการ
สลายตัวของเรเดียม-226 ซึ่งอนุกรมการสลายตัวนี้เป็นอนุกรมการสลายตัวแบบเชกูลาร์ และ
เนื่องจากยูเรเนียม-238 มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนาน (4.5×10^9 ปี) เป็นผลให้เรเดียม-226 ซึ่งเป็นหนึ่งใน
นิวไคลด์ลูกของอนุกรมยูเรเนียม-238 มีอัตราการเกิดอย่างต่อเนื่อง และเรดอน-222 ก็เป็นนิวไคลด์
ลูกนิวไคลด์หนึ่งที่เกิดจากการสลายตัวของเรเดียม-226 โดยเรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิต 1,601 ปี
ในขณะที่เรดอน-222 มีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นมากเพียง 3.8 วันเท่านั้น

อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถอธิบายได้โดย ค่าคงที่การสลายตัว (λ)
โดยที่ $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$ ซึ่ง $T_{1/2}$ ก็คือค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์นั้น ๆ และเนื่องจาก $\lambda_{Ra} \ll \lambda_{Rn}$ โดย λ_{Ra} ,
 λ_{Rn} คือค่าคงที่การสลายตัวของเรเดียม-226 และเรดอน-222 ตามลำดับ จากสมดุลกัมมันตรังสีแสดง
ให้เห็นว่า การสลายตัวของเรเดียม-226 ไปเป็น เรดอน-222 เป็นสมดุลกัมมันตรังสีแบบเชกูลาร์ ซึ่ง
สามารถคำนวณได้โดยสมการ (7)

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (7)$$

เรดอน-222 อยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการแพร่กระจายออกจากวัสดุตามธรรมชาติ
ต่าง ๆ โดยการกระจายผ่านออกมาทางรูพรุน หรือรอยแยกที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ๆ โดยเรเดียม-226
เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดเรดอน-222 อันเนื่องมาจากเรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนาน แต่
อย่างไรก็ตาม เรดอน-222 โดยส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะแพร่กระจายออกมาสู่ภายนอกได้ทั้งหมด
เนื่องจากถูกกักไว้ในบริเวณรูพรุนภายในวัสดุ จึงมีเพียงปริมาณของเรดอน-222 จำนวนน้อยที่
สามารถหลุดรอดแพร่กระจายออกสู่ภายนอกได้

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

$$Q = \lambda C_{Ra} \rho \frac{\eta}{p} \quad (16)$$

โดย	λ	คือ ค่าคงที่การสลายตัวของ ^{222}Rn ($2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)
	C_{Ra}	คือ ^{226}Ra activity concentration (Bq kg^{-1})
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (kg m^{-3})
	η	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการปลดปล่อยเรดอนในรูปพรุนของวัสดุ
	p	คือ ค่าความพรุนของวัสดุ

ภายหลังจากการแพร่กระจายของเรดอนภายในช่องว่างรูพรุนของวัสดุ เรดอนก็จะเริ่มสลายตัวทั้งภายในวัสดุ และบางส่วนก็จะแพร่กระจายออกมายังพื้นผิวของวัสดุ เมื่อไ้หรั้ก็ตามที้ขนาดความหนาของวัสดุมีค่าน้อยกว่าระยะที่เคลื่อนที่ไ้ของเรดอน (เช่น บล็อกคอนกรีตขนาดบาง) เรดอนก็จะแพร่กระจายไปทั่วทั้งภายในรูพรุนของวัสดุ และแพร่กระจายออกมายังอากาศภายนอกรอบ ๆ ตัววัสดุ ในกรณีนี้อัตราการผลิตเรดอนภายในรูพรุนของวัสดุ จะมีค่าเท่ากับอัตราการปลดปล่อยเรดอนออกสู่ภายนอก โดยทั่วไปการหาค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยเรดอนสามารถหาค่าไ้โดยการตรวจวัดหาค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุภายในแชมเบอร์แบบระบบปิด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยเรดอนในกรณีนี้สามารถทำไ้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความแรงรังสีของเรดอนภายนอกวัสดุ (A_{Rn}^{out}) กับค่าความแรงรังสีของเรดอนภายในวัสดุ (A_{Ra}) โดยสมการ

$$\eta = \frac{A_{Rn}^{out}}{A_{Ra}} \quad (17)$$

หากทราบค่าพื้นที่ผิวของวัสดุ (S) ก็สามารรถคำนวณหาค่า อัตราการปลดปล่อย (E , $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ไ้จากสมการ

$$E = \lambda \frac{A_{Rn}^{out}}{S} \quad (18)$$

และในกรณีที่วัสดุมีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถหาค่าอัตราการปลดปล่อยในเทอมของ อัตราการปลดปล่อยต่อมวลของวัสดุ ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) ไ้จากสมการ

$$E = \lambda \frac{A_{Rn}^{out}}{M} \quad (19)$$

ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่อยู่ในภาชนะระบบปิด และอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน สามารถคำนวณไ้จากสมการ

$$C_{(t)} = C_{\infty} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (20)$$

$$C_{\infty} = \frac{ES}{V\lambda} \quad (21)$$

$$E = \frac{C_{(t)}V\lambda}{S(1 - e^{-\lambda t})} \quad (22)$$

โดย	$C_{(t)}$	คือ ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3}) ที่เวลา t (s)
	C_{∞}	คือ ค่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของเรดอนที่เวลาสถานะอิมิตัว (Bq m^{-3})
	E	คือ อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุ ($\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	V	คือ ปริมาตรของแชมเบอร์ (m^3)
	λ	คือ ค่าคงที่การสลายตัวของ ^{222}Rn ($2.1 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$)
	S	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

สำหรับสมการที่ (20) ใช้คำนวณหาค่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซเรดอนที่เวลา infinite time (Bq m^{-3}) จากผลการตรวจวัดแบบต่อเนื่องที่เวลาต่าง ๆ เช่น การตรวจวัดโดยใช้เครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7 เป็นต้น

นอกจากนี้ สำหรับการตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, หิน, ทราย และบล็อกคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพ และความหนาแน่นแตกต่างกัน ก็สามารถคำนวณเปรียบเทียบหาค่าอัตราการปลดปล่อยเรดอนต่อมวล แสดงดังสมการ

$$E_{mass} = \frac{C_{(t)}\lambda V}{M(1 - e^{-\lambda t})} \quad (23)$$

โดย	E_{mass}	คือ อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนต่อมวล ($\text{Bq kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)
	M	คือ มวลของวัสดุ (kg)

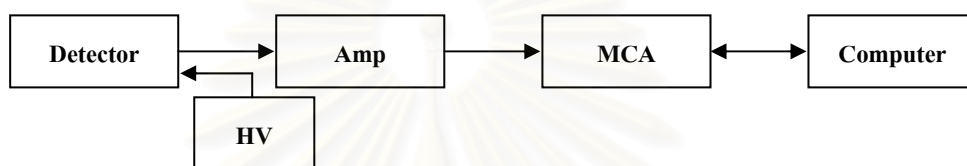
ตารางที่ 2.5 เกณฑ์กำหนดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยที่กำหนดโดย U.S. Environmental protection agency[13]

หน่วยงาน	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน	
	pCi/liter	Bq/m ³
U.S. EPA.	4	148

2.11 การวัดค่าความแรงรังสีจำเพาะโดยระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา

2.11.1 ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา[15]

โดยทั่วไปจะประกอบด้วย หัววัดรังสี และมัลติชัลแนลอนาไลเซอร์ โดยหัววัดจะต่ออยู่กับแอมพลิฟายเพื่อขยายสัญญาณ และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจ่ายกระแสให้กับหัววัดรังสีในแต่ละอันตรกิริยา พลังงานรังสีที่เข้ามาจะถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของหัววัดเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (MCA) และแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม

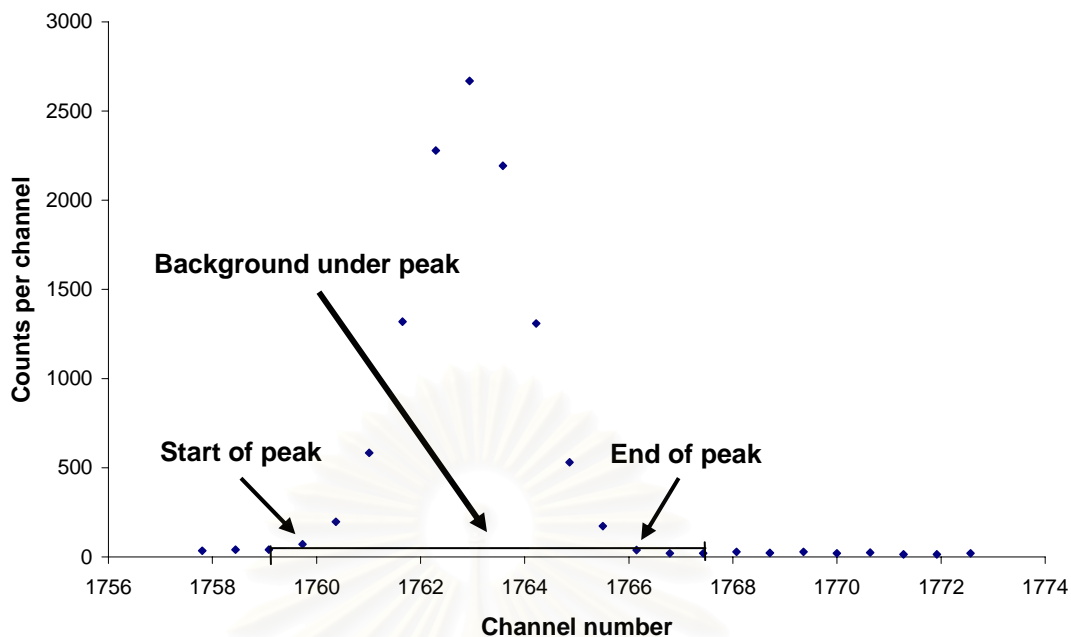


รูปที่ 2.5 แผนผังการจัดการระบบการวิเคราะห์รังสีแกมมา

ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมาสำหรับการทดลองนี้ใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High-purity germanium detectors, HPGe) ซึ่งเป็นหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detectors)

2.11.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา

สำหรับการหาความเข้มข้นรังสีจากการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ทำได้โดยการวัดอัตราการนับสำหรับแต่ละนิวไคลด์ที่มีอยู่ในสเปกตรัม พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการคำนวณหาความแรงรังสีก็คือ ความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area), เวลาที่ต้องการนับวัด (total live time) และเวลาที่ใช้จริง (total time) ของแต่ละโฟโตพีคสำหรับนิวไคลด์ที่ต้องการหาความแรงรังสี การเลือกโฟโตพีคขึ้นอยู่กับความแรงรังสีของนิวไคลด์นั้น ๆ เนื่องจากมีโฟโตพีคของนิวไคลด์ตัวอื่น ๆ จากตัวอย่างปรากฏอยู่ในสเปกตรัมด้วย ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อน โดยปกติจะเลือกใช้โฟโตพีคที่มีความเข้มสูงสุดเพราะโฟโตพีคที่มีความเข้มสูงสุดจะให้ความไวที่ดีกว่า ทำการหาพื้นที่ใต้พีค (total peak area) ที่สนใจโดยการรวมอัตราการนับของพีคในช่วงที่สนใจ และลบด้วยแบคกราวด์ใต้พีคในช่วงเดียวกัน จะได้ความเข้มรังสีสุทธิ ซึ่งก็คือค่าอัตราการนับของนิวไคลด์ที่ต้องการ



รูปที่ 2.6 การหาความเข้มรังสีสุทธิ (net peak area)

2.11.3 การดูดกลืน และพลังงานของโฟตอนแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาพุ่งผ่านสารรังสีดังกล่าวจะถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยากับอะตอมของวัสดุดูดกลืน โดยหลักใหญ่คือ ผลของโฟโตอิเล็กทริก, คอมป์ตัน และโดยผลผลิตคู่ ส่งผลให้ความเข้มของรังสีลดลงตามระยะทางที่พุ่งผ่านวัสดุดูดกลืนซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองของแต่ละสารนั่นเอง สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองได้จากสมการ

$$f_{ab} = \frac{\ln(I_0 / I_x)}{1 - (I_x / I_0)} \quad (24)$$

เมื่อ f_{ab} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง
 I_0 คือ ค่าอัตราการนับรังสีสุทธิที่ทะลุผ่านขณะไม่มีสารตัวอย่าง
 I_x คือ ค่าอัตราการนับรังสีสุทธิที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง

การคำนวณเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

$$A_{(Sample)} = A_{(Std)} \times \frac{Wt_{(Std)}}{Wt_{(Sample)}} \times \frac{R_{(Sample)}}{R_{(Std)}} \times \frac{f_{ab(Sample)}}{f_{ab(Std)}} \quad (25)$$

เมื่อ $A_{(Std)}$ คือ ความเข้มรังสีของสารมาตรฐาน (pCi g^{-1})
 $A_{(Sample)}$ คือ ความเข้มรังสีของสารตัวอย่าง (pCi g^{-1})

$W_{t(Std)}$	คือ น้ำหนักสารมาตรฐาน (g)
$W_{t(Sample)}$	คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)
$R_{(Std)}$	คือ อัตรานับรังสีสุทธิของสารมาตรฐาน (counts s ⁻¹)
$R_{(Sample)}$	คือ อัตรานับรังสีสุทธิของสารตัวอย่าง (counts s ⁻¹)
$f_{ab(Std)}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองของสารมาตรฐาน
$f_{ab(Sample)}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองของสารตัวอย่าง

2.12 การวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดค่าระดับความเข้มข้นของเรดอนที่มีชื่อทางการค้า RAD7

การตรวจวัดระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน[14] สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีความไวในการตรวจจับอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยตรง เมื่อก๊าซเรดอน และผลิตภัณฑ์ของมันเกิดการสลายตัว หรือทำการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ของก๊าซเรดอนแล้วทำการปรับเทียบกลับเป็นก๊าซเรดอน โดยทั่วไปการตรวจวัดก๊าซเรดอนจะทำได้ในเทอมของกัมมันตภาพ หรือความแรงรังสี (Activity) ซึ่งมีหน่วยเป็นเบกเคอเรล (Bq)

สำหรับวิธีการตรวจวัดก๊าซเรดอนสามารถพิจารณาได้เป็น 3 วิธีการหลัก คือ

2.12.1 Integrative sampling

เป็นการวัดแบบสะสมโดยเป็นการเฉลี่ยความเข้มข้นก๊าซเรดอนในช่วงเวลาที่กำหนด โดยวิธีการตรวจวัดก๊าซเรดอนที่มีลักษณะแบบนี้มีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยม และเป็นที่ปฏิบัติโดยทั่วไปมี 3 วิธีด้วยกัน คือ

2.12.1.1 Activated Charcoal Absorption, AC

การตรวจวัดรังสีโดยวิธีการนี้ เมื่อเริ่มทำการตรวจวัดรังสีต้องเปิดภาชนะบรรจุซึ่งมีผงถ่านกัมมันต์ (Charcoal granules) บรรจุอยู่ภายใน และตั้งทิ้งไว้ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัด โดยทั่วไปการตรวจวัดรังสีนี้จะใช้เวลาประมาณ 2 – 7 วัน ซึ่งก๊าซเรดอนในอากาศจะถูกดูดซับโดยผงถ่านกัมมันต์ เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดก็จะทำการปิดผนึกภาชนะบรรจุ และนำมาทำการวิเคราะห์กัมมันตรังสีแกมมาที่สลายตัวจากก๊าซเรดอนในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยเครื่องตรวจวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา (Gamma Spectrometer) ซึ่งอาจใช้หัววัดรังสีเปล่งแสงวาบ (Scintillation detector) หรือหัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำชนิด HPGe ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของ ²¹⁴Bi ซึ่งสลายตัวจากก๊าซเรดอน แล้วแปลงกลับไปเป็นความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

2.12.1.2 Alpha Track Detector (Filtered), AT

สำหรับการตรวจวัดรังสีแบบนี้ หัววัดที่ใช้จะเป็นแผ่นพลาสติกพิเศษ หรือแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีขนาดเล็กบรรจุอยู่ในภาชนะ ขณะทำการตรวจวัด อากาศบริเวณที่ทำการตรวจวัด จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกั้นบริเวณปากภาชนะ เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซเรดอน และตัวผลิตภัณฑ์ที่ได้วิ่งเข้าชนหัววัดรังสี จะทำให้เกิดความเสียหายเป็นรอยแฝงขึ้น การตรวจวัดโดยวิธีนี้โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาประมาณ 3 - 12 เดือน หรืออาจใช้เวลาในการตรวจวัดน้อยลง เมื่อทำการตรวจวัดในบริเวณที่มีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูง เมื่อครบกำหนดเวลาที่ใช้ตรวจวัดจะทำการปิดภาชนะที่ใช้ในการตรวจวัดแล้วนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยการนำหัววัดไปขยายรอยด้วยสารละลาย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำไปนับหาความหนาแน่นของรอยที่เกิดขึ้นบนหัววัดโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์ ความหนาแน่นของรอยต่อพื้นที่ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

2.12.1.3 Charcoal Liquid Scintillation, LS

วิธีการนี้จะอาศัยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Charcoal) ที่บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็กสำหรับใช้ตรวจวัดก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่าง โดยขณะทำการตรวจวัดจะเปิดฝาภาชนะ และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 2- 7 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ โดยวิธีการตรวจวัดเหมือนกับวิธีการตรวจวัดรังสีแบบ AC หลังจากครบกำหนดระยะเวลาแล้ว ทำการปิดฝาภาชนะแล้วนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการที่ใช้หัววัดรังสีชนิดเปล่งแสงวับในการวิเคราะห์ โดยนำผงถ่านกัมมันต์ที่ได้ และสารเรืองแสงมาทำการละลายในตัวทำละลาย และนำไปตรวจวัดด้วยหัววัดรังสีชนิดเปล่งแสงวับ สำหรับผลที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของจำนวนครั้งต่อนาที (Counts/minute) ซึ่งสามารถแปลงกลับมาเป็นความเข้มข้นก๊าซเรดอนได้

2.12.2 Grab sampling

เป็นการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนโดยตรวจวัดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของก๊าซเรดอนที่เวลาชั่วขณะใดขณะหนึ่ง แต่เนื่องจากระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนอาจแปรเปลี่ยนไปมาในช่วงเวลาด้วยปัจจัยหลายประการ วิธีการตรวจวัดแบบนี้จึงนิยมใช้ในการตรวจสอบในงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างของวิธีการตรวจวัดแบบนี้คือ

2.12.2.1 Grab radon, GC / Active charcoal

การตรวจวัดโดยวิธีการนี้จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวัดก๊าซเรดอน เนื่องจากต้องใช้ระบบดูดอากาศ หรือพัดลม เพื่อให้อากาศไหลผ่านผงถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในภาชนะ โดยทั่วไปในการตรวจวัดก๊าซเรดอนแต่ละตัวอย่างจะใช้ช่วงเวลาประมาณ 15 นาที ถึง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำภาชนะที่บรรจุผงถ่านกัมมันต์มาใส่ไว้ในภาชนะปิด แล้วนำกลับไป

วิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการ สำหรับการวิเคราะห์นั้นใช้หลักการเหมือนกับข้อ 2.12.1.1 และ 2.12.1.3

2.12.2.2 Grab Radon, GB / Pump-Collapsible Bag

หลักการตรวจวัดก๊าซเรดอน โดยวิธีการนี้ อาศัยถุงตัวอย่างที่ทำจากวัสดุที่ก๊าซเรดอนไม่สามารถเคลื่อนผ่านได้ ในการตรวจวัดผู้ทำการตรวจวัดจะใช้เครื่องสูบอากาศ (Pump) ดูดอากาศเข้าสู่ภายในถุง หลังจากนั้นปิดถุงแล้วนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะทำการถ่ายอากาศจากถุงไปสู่เซลล์เรืองแสง (Scintillation cell) เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซเรดอนเคลื่อนที่ชนกับซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ที่เคลือบไว้ด้านในของเซลล์ จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสง โดยจะถูกตรวจนับไว้ด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube, PMT) และจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งจะช่วยในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

2.12.3 Continuous Active Sampling

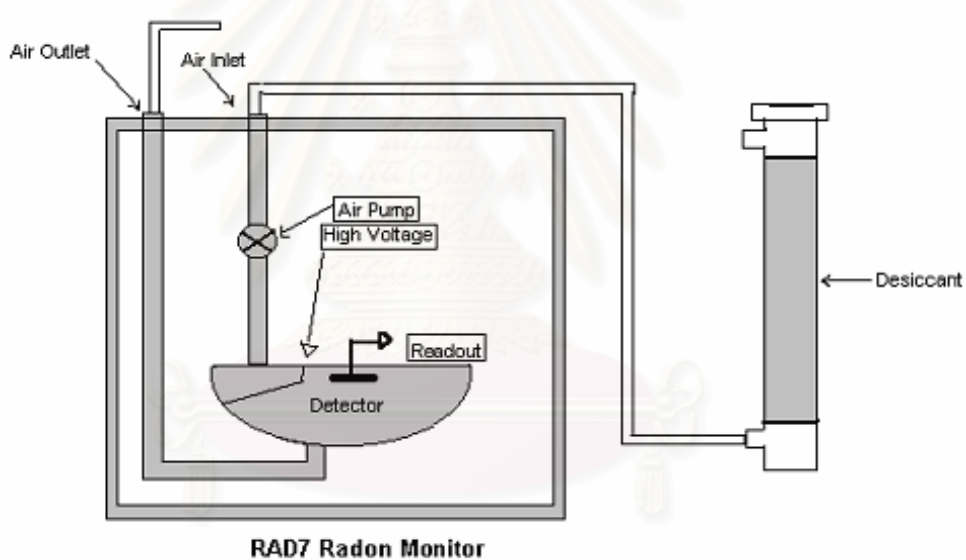
เป็นการตรวจวัดแบบซ้ำเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน โดยอัตโนมัติตลอดช่วงเวลาที่กำหนด วิธีการตรวจวัดแบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และจะใช้ก็ต่อเมื่อระบบการตรวจวัดแบบอื่นมีปัญหาหรือเนื่องจากพบว่ามีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่สูงผิดปกติ ตัวอย่างของวิธีการตรวจวัดแบบนี้คือ

2.12.3.1 Continuous Radon Monitoring, CR

การตรวจวัดโดยวิธีการนี้ประกอบด้วยเครื่องมือตรวจวัดก๊าซเรดอนซึ่งจะทำการบันทึกเวลาที่ใช้จริงในการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศจะถูกสูบ หรือถูกแพร่เข้าไปในบริเวณที่วางรอบหัววัดที่ประกอบด้วยหัววัดแอลฟาแบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอน หรือทอรอนถูกส่งผ่านเข้าไปในบริเวณที่วางรอบหัววัด การวิเคราะห์จะดำเนินการโดยแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้า และควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ระดับความเข้มข้นของเรดอน หรือทอรอนจะถูกเก็บบันทึกไว้ที่หน่วยความจำของเครื่อง และสามารถที่จะส่งผลไปยังเครื่องพิมพ์ได้โดยตรง เช่น เครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อเรียกทางการค้าว่า RAD7



รูปที่ 2.7 เครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7



รูปที่ 2.8 ลักษณะ โครงสร้างภายในของเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน RAD7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ และสารเคมี

- 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ผลิตในประเทศไทย 4 บริษัท
 - 3.1.1.1 ตราช้าง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด
 - 3.1.1.2 ตราที่พีไอ(สีแดง) บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด(มหาชน)
 - 3.1.1.3 ตราพญานาค(สีเขียว) บริษัท ชลประทานซีเมนต์ จำกัด
 - 3.1.1.4 ตราอินทรีเพชร บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด
- 3.1.2 หินสำหรับก่อสร้างจำนวน 3 ตัวอย่าง
 - 3.1.2.1 หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดกาญจนบุรี
 - 3.1.2.2 หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดชลบุรี
 - 3.1.2.3 หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดสระบุรี
- 3.1.3 ทรายหยาบสำหรับก่อสร้าง จำนวน 3 ตัวอย่าง
 - 3.1.3.1 ทรายหยาบสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดกาญจนบุรี
 - 3.1.3.2 ทรายหยาบสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดชลบุรี
 - 3.1.3.3 ทรายหยาบสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดสระบุรี
- 3.1.4 สารมาตรฐานแร่ยูเรเนียมของ IAEA รหัส RGU-1 ที่มียูเรเนียมเข้มข้น 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
- 3.1.5 สารมาตรฐานแร่ทอเรียมของ IAEA รหัส RGTb-1 ที่มีทอเรียมเข้มข้น 800 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
- 3.1.6 สารมาตรฐานแร่โปแตสเซียมของ IAEA รหัส RGK-1 ที่มีโปแตสเซียมเข้มข้น 448 กรัม/กิโลกรัม
- 3.1.7 ต้นกำเนิดรังสี ^{226}Ra แบบปิดผนึกเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 1980 ความแรงรังสี 0.964 μCi
- 3.1.8 กาวซิลิโคน

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 ภาชนะพลาสติกกลมใสแบบมีฝาปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 ซม. สูง 3.5 ซม.
- 3.2.2 ภาชนะพลาสติกสี่เหลี่ยมแบบมีฝาปิดขนาด 15 ซม. × 25 ซม. × 15 ซม.
(กว้าง×ยาว×สูง)
- 3.2.3 ภาชนะพลาสติกสี่เหลี่ยมแบบมีฝาปิดขนาด 23 ซม. × 34 ซม. × 16 ซม.
(กว้าง×ยาว×สูง)
- 3.2.4 ถาดทนความร้อนขนาด 8 นิ้ว × 12 นิ้ว × 12 นิ้ว (กว้าง×ยาว×สูง)
- 3.2.5 แบบขึ้นรูปคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. × 15 ซม. × 15 ซม.
(กว้าง×ยาว×สูง)
- 3.2.6 วาล์วทองเหลืองขนาด 0.25 นิ้ว
- 3.2.7 เส้นยางโอริงขนาด 0.25 นิ้ว
- 3.2.8 ถังน้ำพลาสติกขนาดต่าง ๆ
- 3.2.9 สายยางขนาด 0.25 นิ้ว
- 3.2.10 ตะแกรงร่อนขนาด 40 เมช
- 3.2.11 ถูชอล์ก

3.3 เครื่องมือ

- 3.3.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ของ CANBERRA มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV เท่ากับ 30 %
- 3.3.2 เครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (Multichannel analyzer; MCA) รุ่น Inspector 2000 พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงาน Genie-2000 ของ CANBERRA
- 3.3.3 เครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (RAD7)
- 3.3.4 เครื่องกำบังรังสี (Shield) ของ CANBERRA
- 3.3.4 เครื่องชั่งสาร
- 3.3.5 เตาไฟฟ้าชนิดปรับอุณหภูมิได้ (50 - 400 องศาเซลเซียส)
- 3.3.6 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 3.3.7 เครื่องบดตัวอย่าง

3.4 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคการวิเคราะห์รังสี แบ่งออกเป็นสองเทคนิคด้วยกันดังนี้

(1) เทคนิคการวิเคราะห์รังสีแกมมา หรือแกมมาสเปกโตรเมตรี เพื่อหาค่าความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง ด้วยหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงของ CANBERRA มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV เท่ากับ 30 % โดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้

- การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์รังสีแกมมา
- การตรวจวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างที่เตรียมไว้ และคำนวณปรับเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัด

(2) เทคนิคการวิเคราะห์รังสีแอลฟา เพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน (Radon Exhalation Rate) จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน, ทรายสำหรับก่อสร้าง และตัวอย่างบล็อกคอนกรีต ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7 โดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้

- การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน
- วิเคราะห์หาระยะเวลาในการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน
- การวิเคราะห์หาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และคำนวณปรับเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัด

3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน, ทรายสำหรับก่อสร้าง และสารมาตรฐาน ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี

3.4.1.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน, ทรายสำหรับก่อสร้าง, สารมาตรฐานยูเรเนียม, สารมาตรฐานทอเรียม และสารมาตรฐานโปแตสเซียม สำหรับการวัดหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K , ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี

(1) จัดเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง และสารมาตรฐานยูเรเนียม, ทอเรียม และโปแตสเซียมบรรจุลงในภาชนะความร้อน แล้วนำเข้าเตาไฟฟ้าชนิดปรับอุณหภูมิได้ ปรับอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

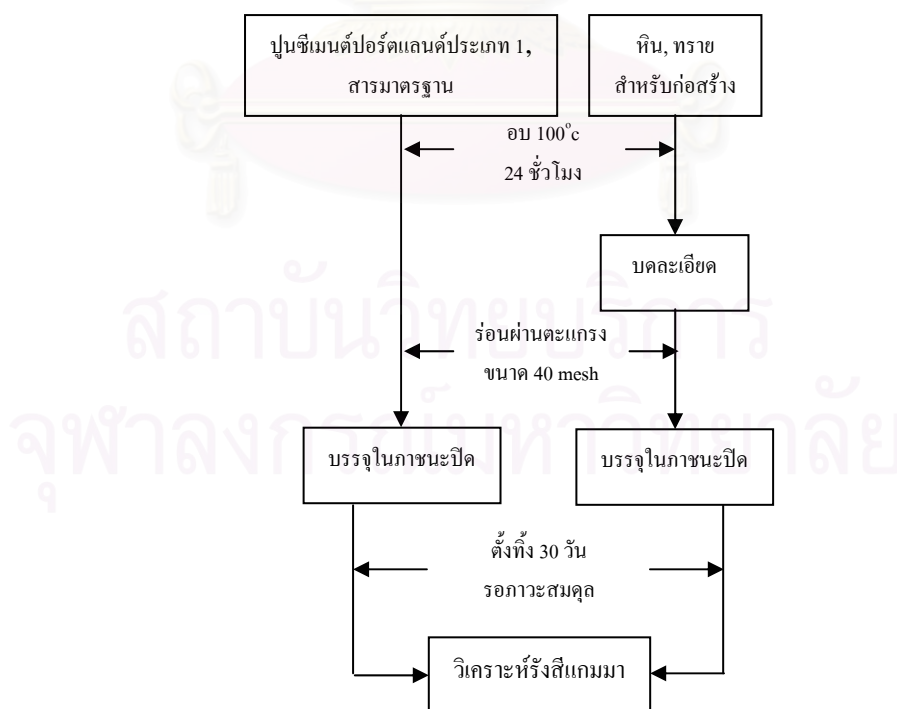
(2) นำตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง และสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อน และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องมาร้อนผ่าน

ตะแกรงร่อนขนาด 40 เมช จากนั้นบรรจุลงในภาชนะพลาสติกกลมแบบมีฝาปิด จำนวนอย่างละ 1 ตัวอย่าง บันทึกน้ำหนัก ทำการปิดผนึกภาชนะที่ใส่ตัวอย่างด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึม ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ โดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ระหว่าง ^{226}Ra กับ ^{222}Rn ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกของ ^{226}Ra พบว่า เพื่อจะให้เข้าสู่ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ ดังสมการที่ (7) ดังนั้นหากเริ่มต้นด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra จะต้องใช้เวลาประมาณ 7 เท่าของค่าครึ่งชีวิตนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{222}Rn (3.82 วัน) หรือประมาณ 27 วัน สำหรับการเข้าสู่ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ร้อยละ 99

(3) จัดเตรียมหิน และทรายสำหรับก่อสร้างอย่างละ 3 ตัวอย่างบรรจุลงใน ถาดทนความร้อน แล้วนำเข้าเตาไฟฟ้าชนิดปรับอุณหภูมิได้ ปรับอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(4) นำตัวอย่างหิน และทรายรวม 6 ตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อน และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จัดเก็บในถุงซิปล็อคกันความชื้น

(5) นำตัวอย่างหิน และทรายรวม 6 ตัวอย่างไปบดละเอียดด้วยเครื่องบด ตัวอย่างทีละตัวอย่าง จนได้ตัวอย่างทีละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 40 เมช บรรจุลงในภาชนะพลาสติกกลมแบบมีฝาปิดจำนวนอย่างละ 1 ตัวอย่าง บันทึกน้ำหนัก ทำการปิดผนึกภาชนะที่ใส่ตัวอย่างด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึม ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์



รูปที่ 3.1 ผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์วัดรังสีแกมมา

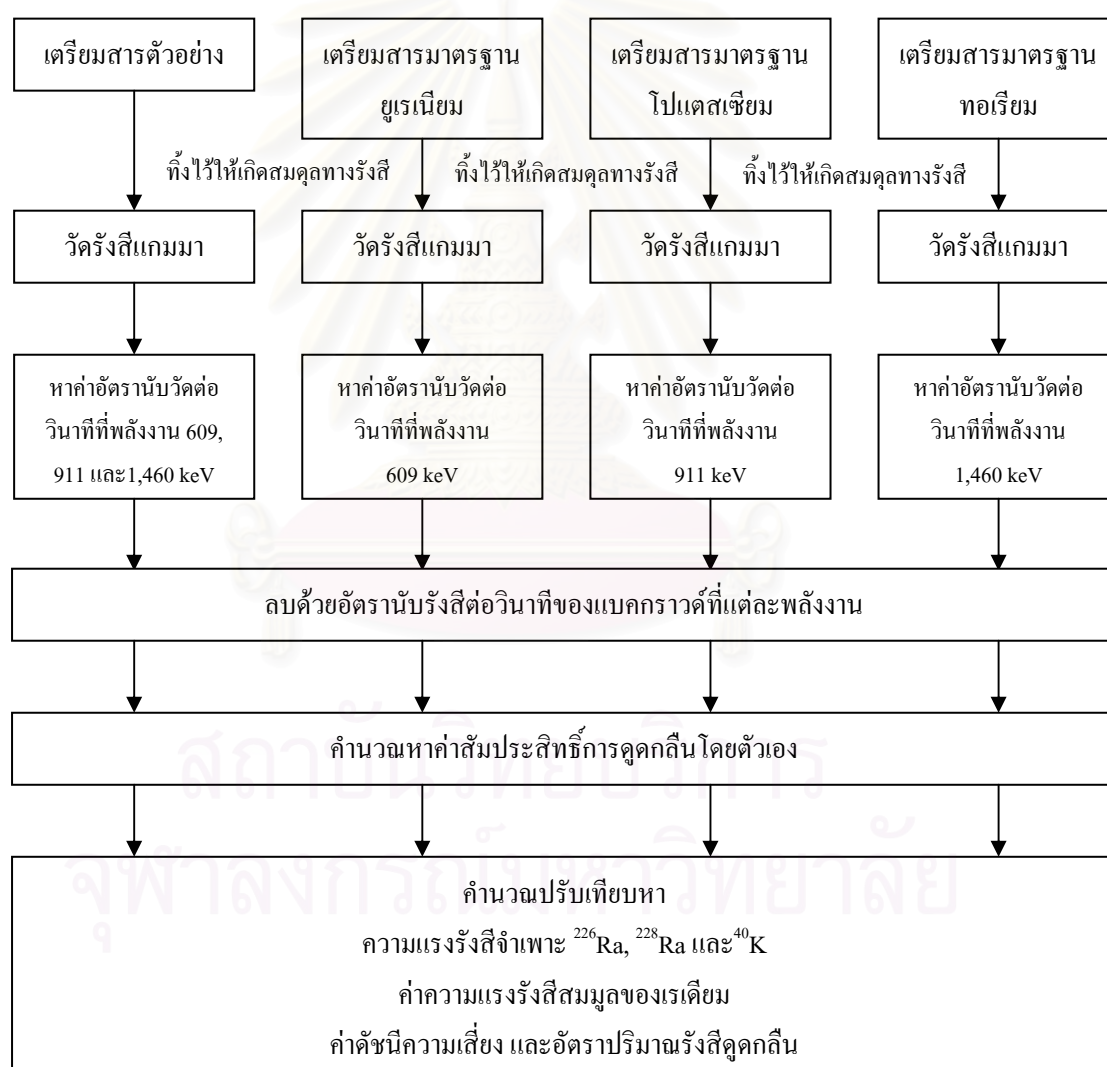
3.4.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K , ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน, ทราย, สารมาตรฐานยูเรเนียม, สารมาตรฐานทอเรียม และสารมาตรฐานโปแตสเซียม

- (1) จักระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา ดังรูปที่ 2.5
- (2) วัดรังสีแบคกราวด์ภายในวัสดุกำบังรังสีขณะที่ไม่มีตัวอย่างเป็นเวลา 3600 วินาที และหาค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของรังสีแกมมาพลังงาน 609 keV จาก ^{214}Bi , พลังงาน 911 keV จาก ^{228}Ac และพลังงาน 1,460 keV จาก ^{40}K
- (3) นำสารมาตรฐานยูเรเนียมที่ได้จากข้อ (2) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.1 เข้าวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 3600 วินาที หาค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 609 keV สำหรับคำนวณเปรียบเทียบหาความแรงรังสีจำเพาะของ ^{226}Ra ในตัวอย่าง
- (4) นำสารมาตรฐานทอเรียมที่ได้จากข้อ (2) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.1 เข้าวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 3600 วินาที หาค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 911 keV สำหรับคำนวณเปรียบเทียบหาความแรงรังสีจำเพาะของ ^{228}Ra ในตัวอย่าง
- (5) นำสารมาตรฐานโปแตสเซียมที่ได้จากข้อ (2) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.1 เข้าวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 3600 วินาที หาค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 1,460 keV สำหรับคำนวณเปรียบเทียบหาความแรงรังสีจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่าง
- (6) นำสารตัวอย่างที่ได้จากข้อ (5) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.1 เข้าวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 864,000 วินาที (24 ชั่วโมง) และหาค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 609 keV, 911 keV และ 1,460 keV
- (7) นำอัตรานับรังสีต่อวินาทีที่ได้จากข้อ (3) ถึง (6) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.2 ของสารมาตรฐานยูเรเนียม, สารมาตรฐานทอเรียม, สารมาตรฐานโปแตสเซียม และสารตัวอย่าง ตามลำดับ หักลบกับค่าอัตรานับรังสีต่อวินาทีของแบคกราวด์ที่ได้จากข้อ (2) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.2 ค่าที่ได้คือ ค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของสารมาตรฐาน (R_{Std}) และค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของสารตัวอย่าง (R_{Sample})
- (8) หาค่าการดูดกลืนโดยตัวเองของตัวอย่าง โดยการวางต้นกำเนิดรังสี ^{226}Ra ไว้บนภาชนะบรรจุที่ว่างเปล่า ทำการวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 600 วินาที และหาค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 609 keV ค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีที่ได้คือ I_0 ในสมการ (24)
- (9) วางต้นกำเนิดรังสี ^{226}Ra ไว้บนภาชนะบรรจุที่มีสารตัวอย่าง ทำการวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 600 วินาที และหาค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีของรังสีแกมมาที่พลังงาน 609 keV ค่าอัตรานับรังสีสุทธิต่อวินาทีที่ได้คือ I_x ในสมการ (24)

(10) หาค่าการดูดกลืนโดยตัวเองของสารมาตรฐาน โดยทำเหมือนกับข้อ (9) ในขั้นตอนที่ 3.4.1.2

(11) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองในตัวอย่าง และสารมาตรฐานตามสมการที่ (24)

(12) คำนวณหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K , ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}), ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) จากตัวอย่าง ตามสมการที่ (25), (11), (12), (14) และ (15) ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ผังการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K , ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทราย ด้วยวิธีการตรวจวัดรังสีแอลฟาซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- การหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน
- การวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

3.4.2.1 ขั้นตอนการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนเพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

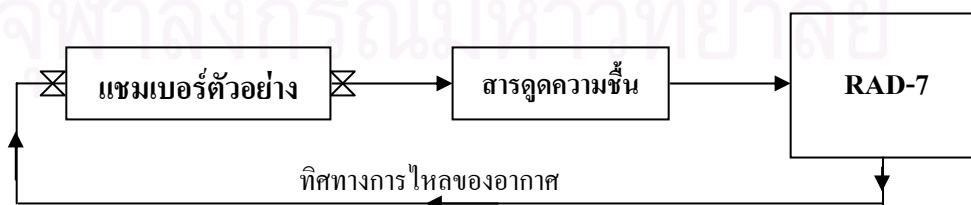
(1) ทำการเตรียมแชมเบอร์ระบบปิด โดยการต่อวาล์วของเหลือขนาด 0.25 นิ้ว จำนวน 2 วาล์ว และเส้นยางโอริงกันการรั่วซึมเข้ากับภาชนะพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 15 ซม. × 25 ซม. × 15 ซม. (กว้าง×ยาว×สูง) แบบมีฝาปิด โดยให้วาล์วทั้ง 2 อยู่ในด้านกว้างด้านละ 1 วาล์ว ทำการทาสีลิโคเนรอบรอยต่อต่าง ๆ เพื่อป้องกันการรั่วซึม ดังแสดงในรูปที่ 3.11

(2) สุ่มเลือกตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน, และทรายสำหรับก่อสร้างที่ผ่านการอบความร้อนไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้วอย่างละ 1 ตัวอย่าง ทำการบรรจุตัวอย่างแต่ละประเภท ลงในภาชนะพลาสติกกลมใสอย่างละ 2 ตัวอย่าง โดยไม่ต้องทำการปิดฝา บันทึกรุ่นน้ำหนัก

(3) บรรจุตัวอย่างที่เตรียมในข้อ (2) ขั้นตอนที่ 3.4.2.1 ลงในแชมเบอร์ระบบปิด และทำการปิดผนึกแชมเบอร์ ทาสีลิโคเนรอบรอยต่อเพื่อป้องกันการรั่วซึม

(4) ทำการไล่อากาศที่มีก๊าซเรดอนอยู่ในแชมเบอร์ออก โดยใช้การหมุนเวียนอากาศผ่านถ่านกัมมันต์ (Charcoal) เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้ก๊าซเรดอนถูกดักจับโดยถ่านกัมมันต์

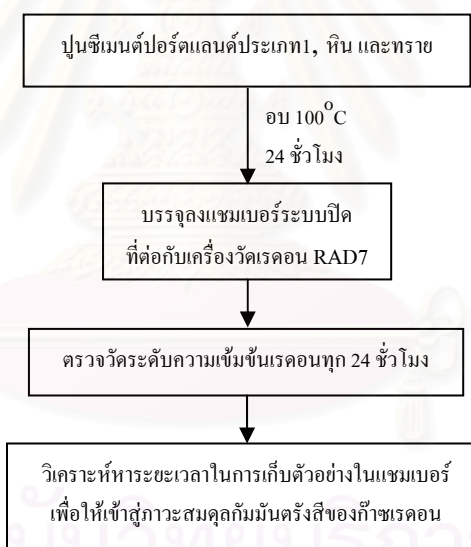
(5) นำแชมเบอร์ที่บรรจุตัวอย่าง และทำการไล่อากาศเรียบร้อยแล้วต่อเข้ากับเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการจัดระบบตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นเรดอนด้วยเครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7

(6) ทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่าง ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในทุก 24 ชั่วโมงเป็นระยะเวลาติดต่อกัน โดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{222}Rn ในช่วงที่มีการปลดปล่อยรังสีแอลฟาไปเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกต่าง ๆ คือ ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi และ ^{210}Po ซึ่งนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกของ ^{222}Rn มีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นมากเมื่อเทียบกับ ^{222}Rn โดยมี ^{214}Pb ที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวนานที่สุดในช่วงการสลายตัวของ ^{222}Rn นี้ ซึ่งมีค่าเพียง 26.8 นาที ดังนั้นหากเริ่มต้นด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{222}Rn จะต้องใช้เวลาประมาณ 7 เท่าของค่าครึ่งชีวิตนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูก ^{214}Pb หรือประมาณ 3 – 4 ชั่วโมง สำหรับการเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งประมาณได้ว่าปริมาณของ ^{222}Rn มีค่าเท่ากับปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูก

(7) วิเคราะห์ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้ เพื่อหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ที่เก็บตัวอย่างไว้ภายใน



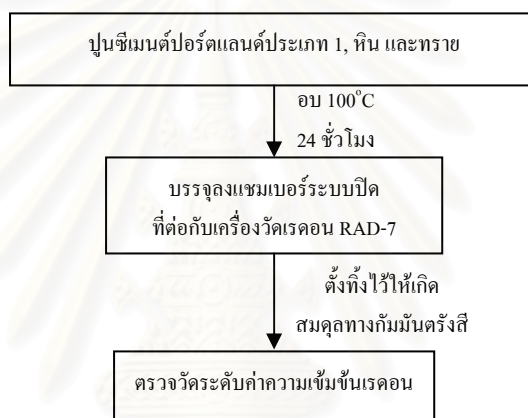
รูปที่ 3.4 ผังการหาระยะเวลาที่ตัวอย่างเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน

3.4.2.2 การวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่าง

(1) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7

(ก) ทำการเตรียมตัวอย่างทุกตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ (1) ถึง (5) ในขั้นตอนที่ 3.4.2.1

(ข) ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ในแชมเบอร์เป็นระยะเวลาที่วิเคราะห์ได้จาก 3.4.2.1 ให้เกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน เพื่อรอทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7



รูปที่ 3.5 ผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

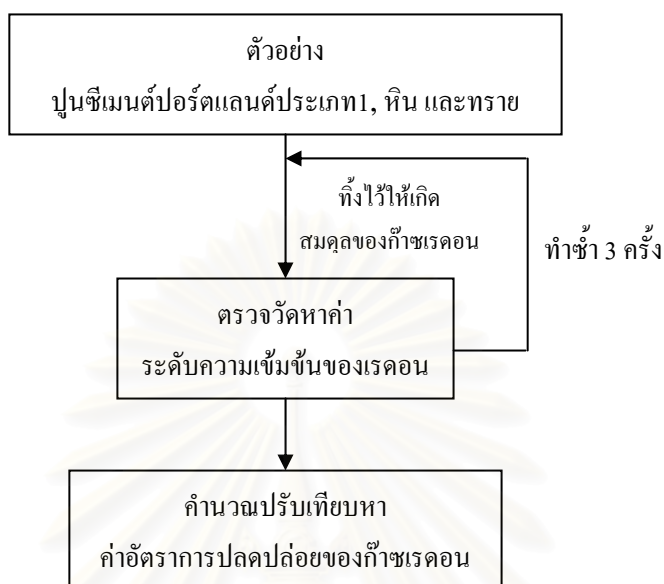
(2) ขั้นตอนการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

(ก) จัดระบบวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน โดยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ดังรูปที่ 3.3

(ข) ทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ของตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ (1) ข้อที่ 3.4.2.2 ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

(ค) ทำซ้ำข้อ (ข) ในขั้นตอนที่ (2) ข้อที่ 3.4.2.2 โดยทิ้งระยะเวลาห่างจากการทำการวัดในแต่ละครั้งเท่ากับระยะเวลาที่วิเคราะห์ได้จาก 3.4.2.1 เป็นจำนวน 2 ครั้ง

(ง) คำนวณหาค่าอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน จากค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ที่ได้จากเครื่องมือวัดก๊าซเรดอน RAD7 ตามสมการที่ (22)



รูปที่ 3.6 ผังการหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

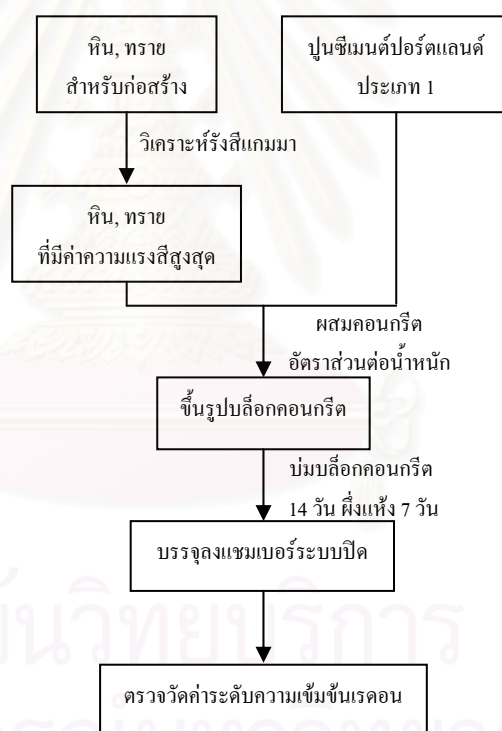
- การเตรียมตัวอย่างบล็อกคอนกรีต
- การหาระยะเวลาการเกิดสมมูลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน
- การวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7

3.4.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างบล็อกคอนกรีตขนาด 15 ซม. × 15 ซม. × 15 ซม. ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดก๊าซเรดอน RAD7

(1) ในขั้นตอนนี้จะต้องทำการเลือกตัวอย่าง หิน และทรายที่ใช้สำหรับก่อสร้างมาอย่างละ 1 ตัวอย่างเพื่อทำการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีต โดยเลือกตัวอย่างหิน และทรายจากขั้นตอนที่ 3.4.1.2 ที่ได้ผ่านขั้นตอนการวัดหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี แล้วคำนวณปรับเทียบค่าได้ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม และค่า

ดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายใน (H_{in}) ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณในข้อ (12) ขึ้นตอนที่ 3.4.1.2 มาอย่างละ 1 ตัวอย่าง เพื่อทำการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีต

(2) นำตัวอย่างหิน และทรายมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างด้วยอัตราส่วนต่อน้ำหนัก (กิโลกรัม) 290:705:1205: 1801 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์: ทราย:หิน:น้ำ) เพื่อให้ได้กำลังอัดเมื่ออายุ 28 วัน ที่ 250 kg/cm^2 [16] จากนั้นเทคอนกรีตใส่แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. \times 15 ซม. \times 15 ซม. ที่ทำความสะอาด และทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แต่ละชั้นตักด้วยเหล็กตัก 35 ที เมื่อตักถึงชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ เมื่อบล็อกคอนกรีตอยู่ตัวก็ทำการนำออกจากแบบหล่อคอนกรีต และบ่มทิ้งไว้ 14 วัน [2] จึงให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นบรรจุลงแซมเบอร์ระบบปิด และทำการปิดผนึกแซมเบอร์ ทาซิลิโคนรอบรอยต่อต่าง ๆ เพื่อป้องกันการรั่วซึม เพื่อรอทำการวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7



รูปที่ 3.7 ผังการเตรียมตัวอย่างบล็อกคอนกรีตเพื่อวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

3.4.3.2 ขั้นตอนการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน

(1) ทำการเตรียมแซมเบอร์ระบบปิด โดยการต่อวาล์วทองเหลืองขนาด 0.25 นิ้ว จำนวน 2 วาล์ว และเส้นยางโอริงกันการรั่วซึมเข้ากับภาชนะพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด

23 ซม. × 34 ซม. × 16 ซม. (กว้าง×ยาว×สูง) แบบมีฝาปิด โดยให้วาล์วทั้ง 2 อยู่ในด้านกว้างด้านละ 1 วาล์ว ทำการทาสีลิโคนรอบรอยต่อต่าง ๆ เพื่อป้องกันการรั่วซึม

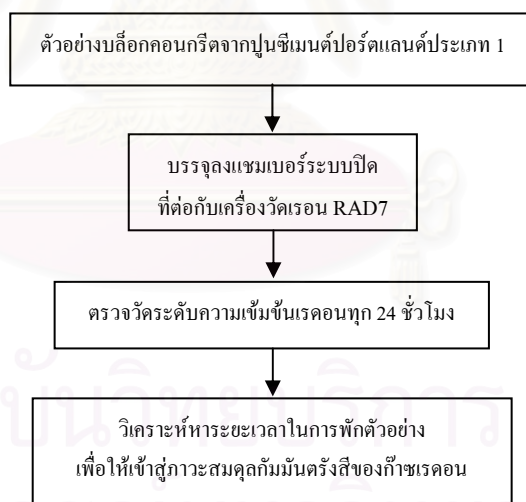
(2) บรรจุบล็อกคอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมในข้อ (2) ชั้นตอนที่ 3.4.3.1 ลงในแชมเบอร์ระบบปิด 1 บล็อกคอนกรีตตัวอย่างต่อ 1 แชมเบอร์ และทำการปิดผนึกแชมเบอร์ ทาสีลิโคนรอบรอยต่อเพื่อป้องกันการรั่วซึม

(3) ทำการไล่อากาศที่มีก๊าซเรดอนอยู่ในแชมเบอร์ออก โดยใช้การหมุนเวียนอากาศผ่านถ่านกัมมันต์ (Charcoal) เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้ก๊าซเรดอนถูกดักจับโดยถ่านกัมมันต์

(4) นำแชมเบอร์ที่บรรจุตัวอย่าง และทำการไล่อากาศเรียบร้อยแล้วต่อกับเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ดังรูปที่ 3.3

(5) ทำการตรวจวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในทุก 24 ชั่วโมงเป็นระยะเวลาติดต่อกันประมาณ 8 วัน

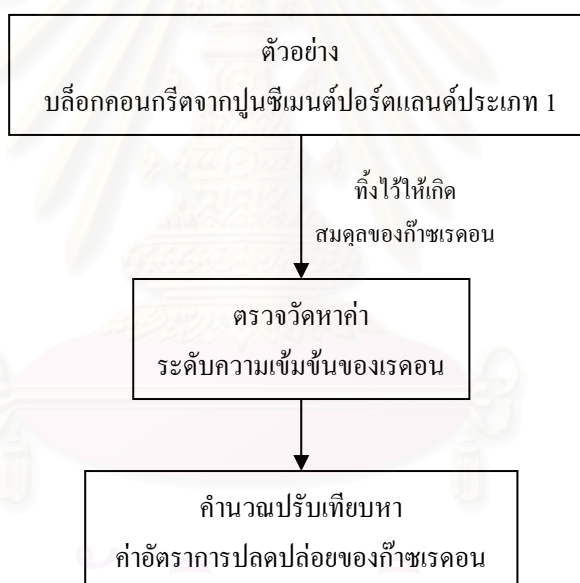
(6) วิเคราะห์ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้ เพื่อหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ที่เก็บตัวอย่างไว้ภายใน



รูปที่ 3.8 ผังการหาระยะเวลาที่ตัวอย่างบล็อกคอนกรีตเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน

3.4.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ของตัวอย่างบล็อกรังสีจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1

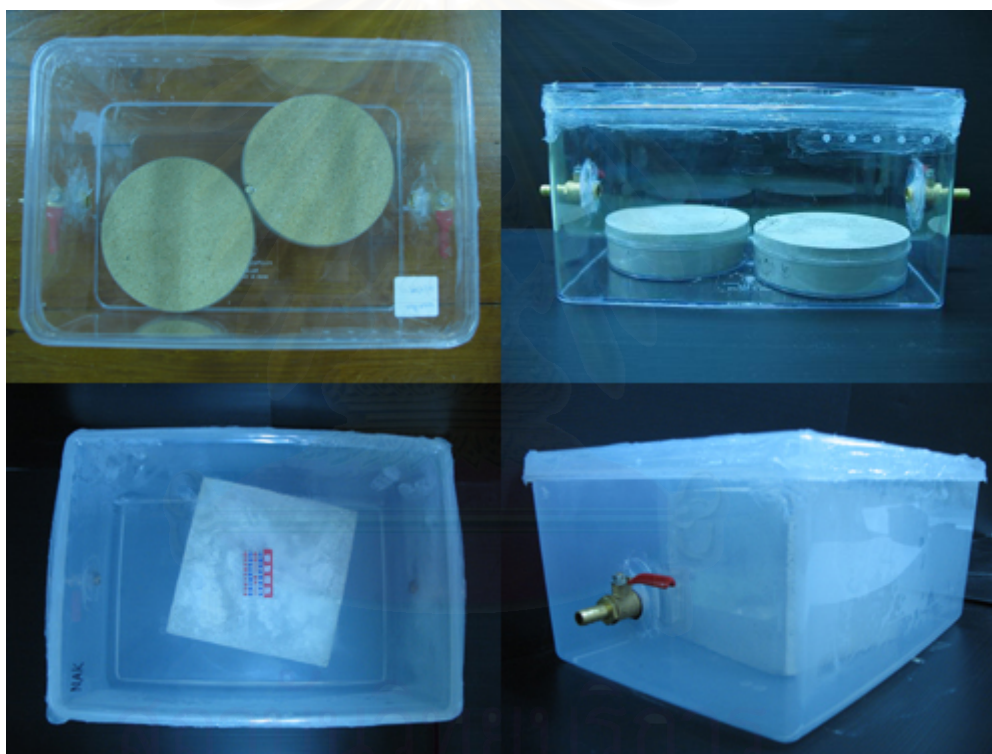
- (1) จัดระบบวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7
- (2) ทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรังสีในแชมเบอร์ที่ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลาที่วิเคราะห์ได้จากข้อ (6) ในขั้นตอนที่ 3.4.3.2 ให้เกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- (3) คำนวณหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในหน่วยของ $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ จากค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในหน่วยของ Bq m^{-3} จากเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ตามสมการที่ (22)



รูปที่ 3.9 ผังการหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรังสีจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ทำการปิดผนึกสำหรับการวัดรังสีแกมมา



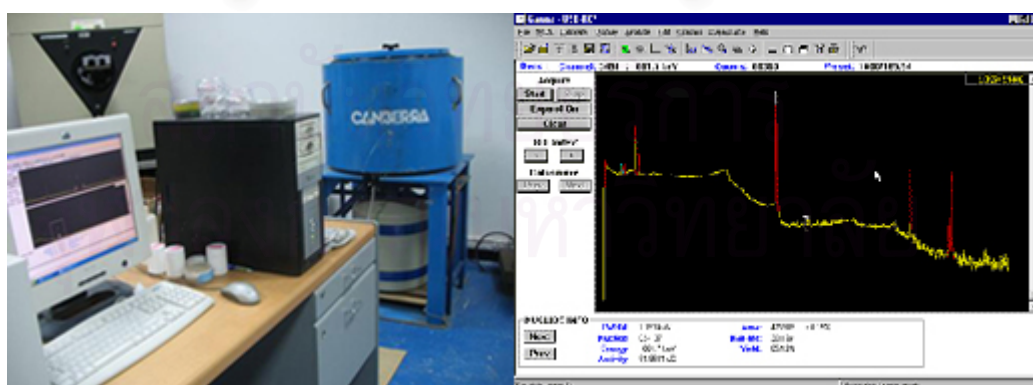
รูปที่ 3.11 ภาชนะระบบปิดสำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน



รูปที่ 3.12 เครื่องบดสารตัวอย่าง พร้อมโอบคตัวอย่าง



รูปที่ 3.13 แบบขึ้นรูปคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. × 15 ซม. × 15 ซม และตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.14 ระบบวัดรังสีแกมมาของ CANBERRA และตัวอย่างภาพแสดงผลของระบบวัดรังสี



รูปที่ 3.15 ระบบการตรวจวัดระดับความเข้มข้นเรดอนด้วยเครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- ส่วนของผลการวิจัยที่ได้จากการตรวจวัดด้วยระบบการตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีจำเพาะของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างโดยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma spectrometry) ด้วยหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)
- ส่วนของผลการวิจัยหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง
ซึ่งมีผลวิจัยดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมา

ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมาโดยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี ด้วยหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

- ผลการตรวจวัดหาปริมาณความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่าง
- ผลการวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยงของตัวอย่าง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จำนวน 4 ตัวอย่างจากบริษัทผู้ผลิตภายในประเทศ, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างจาก 3 แหล่ง ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับการก่อสร้าง

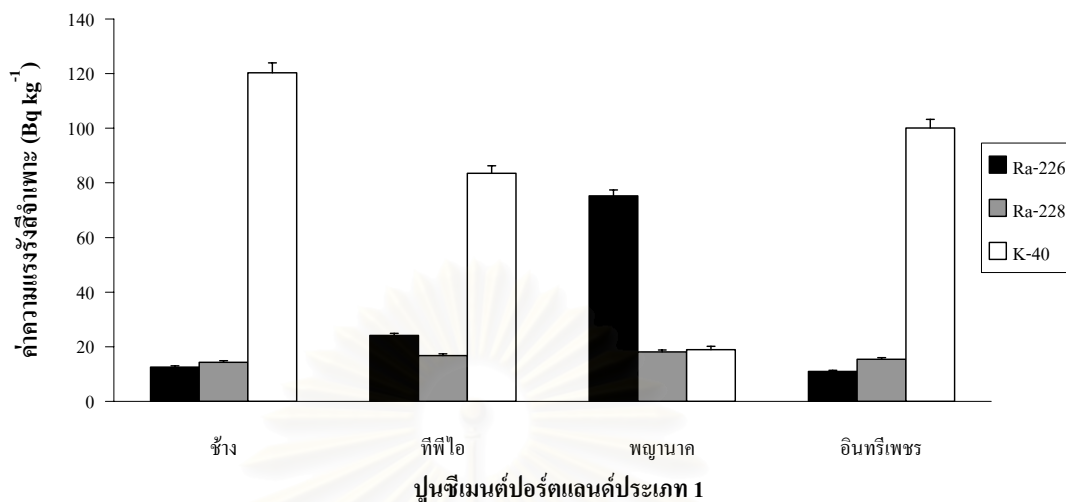
ตัวอย่าง	ค่าความแรงรังสีจำเพาะ (Bq kg^{-1})		
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1			
ตราช้าง	12.83±0.48	14.27±0.57	120.32±3.60
ตราที่ฟิไอ(สีแดง)	24.11±0.80	16.72±0.65	83.48±2.80
ตราพญานาค(สีเขียว)	75.21±2.23	18.10±0.72	18.93±1.20
ตราอินทรีเพชร	10.92±0.44	15.39±0.60	100.07±3.21
หินสำหรับก่อสร้าง			
จากจังหวัดกาญจนบุรี	15.33±0.57	29.05±0.91	417.11±10.01
จากจังหวัดชลบุรี	13.12±0.50	24.01±0.78	302.88±7.60
จากจังหวัดสระบุรี	15.84±0.58	27.86±0.91	355.47±8.85
ทรายหยาบสำหรับก่อสร้าง			
จากจังหวัดกาญจนบุรี	26.31±0.85	39.08±1.07	1023.13±22.98
จากจังหวัดชลบุรี	25.12±0.83	35.13±1.03	940.30±21.21
จากจังหวัดสระบุรี	30.86±0.99	55.27±1.25	1131.93±25.36

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าอยู่ในช่วง 10.92±0.44 ถึง 75.21±2.23 Bq kg^{-1} , 14.27±0.57 ถึง 18.10±0.72 Bq kg^{-1} และ 18.93±1.20 ถึง 120.32±3.60 Bq kg^{-1} ตามลำดับ

ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างจาก 3 จังหวัดแหล่งที่มา มีค่าอยู่ในช่วง 13.12±0.50 ถึง 15.84±0.58 Bq kg^{-1} , 24.01±0.78 ถึง 29.05±0.91 Bq kg^{-1} และ 302.88±7.60 ถึง 417.11±10.01 Bq kg^{-1} ตามลำดับ

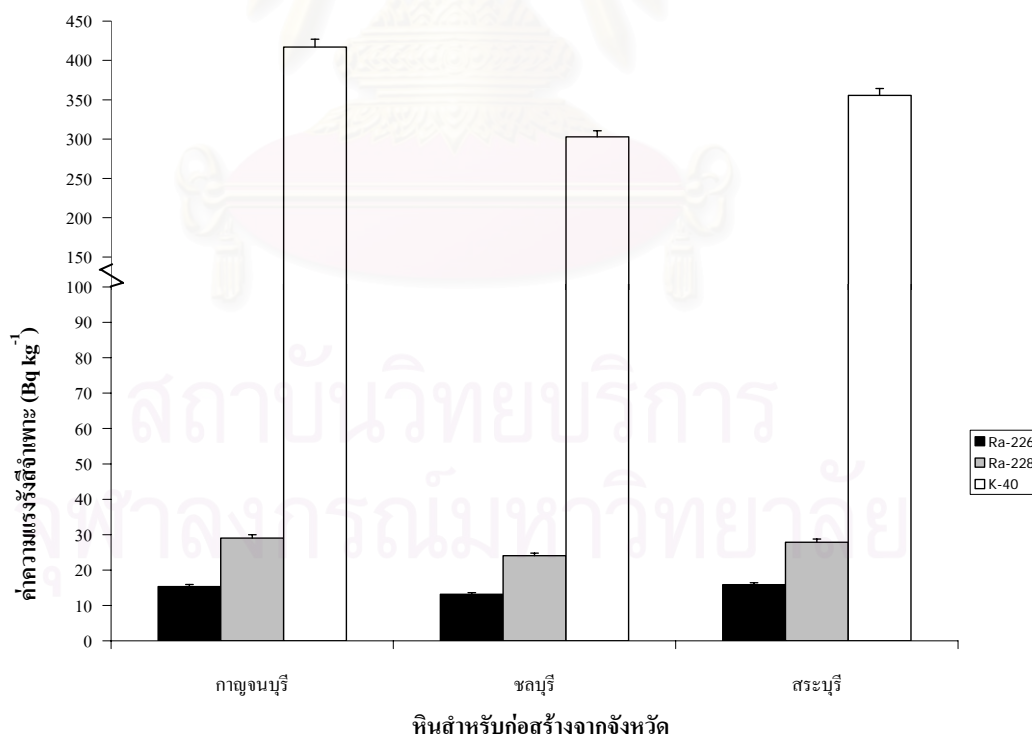
ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างจาก 3 จังหวัดแหล่งที่มา มีค่าอยู่ในช่วง 25.12±0.83 ถึง 30.86±0.99 Bq kg^{-1} , 35.13±1.03 ถึง 55.27±1.25 Bq kg^{-1} และ 940.30±21.21 ถึง 1131.93±25.36 Bq kg^{-1} ตามลำดับ

ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1



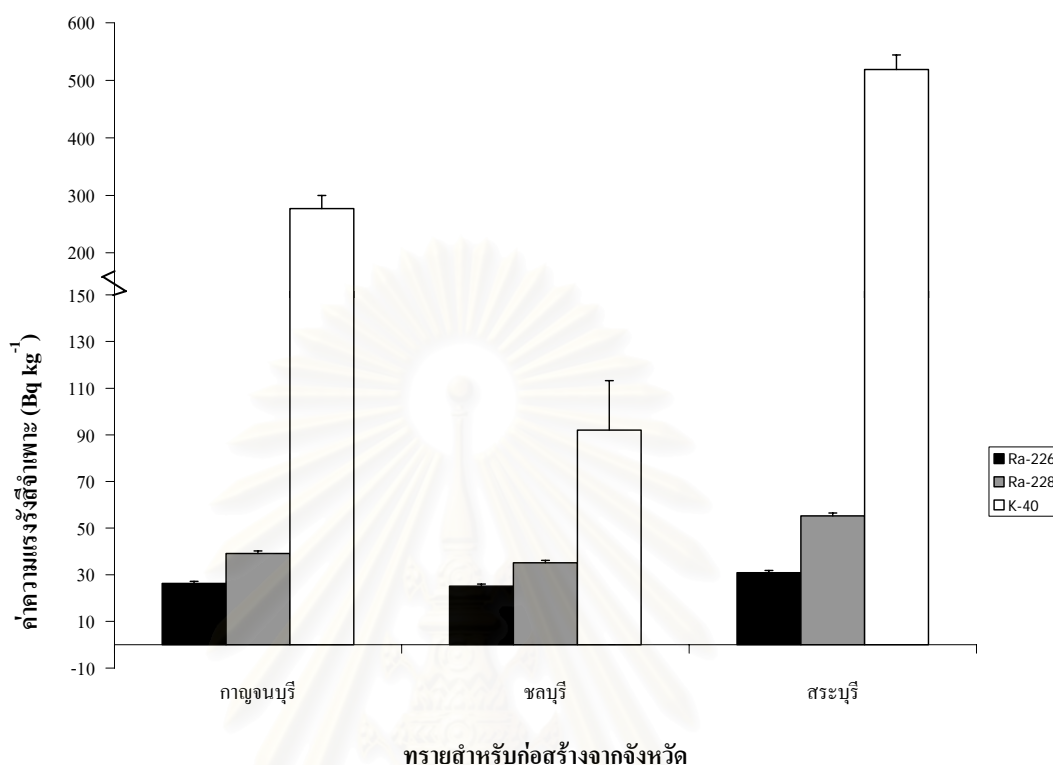
รูปที่ 4.1 ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง



รูปที่ 4.2 ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง

ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง



รูปที่ 4.3 ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง

4.1.2 ผลการคำนวณวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยงของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และ ทรายสำหรับก่อสร้าง

ผลการคำนวณวิเคราะห์หาค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยงของตัวอย่างแต่ละประเภท สามารถคำนวณหาได้จากผลข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับการก่อสร้างในข้อที่ 4.1.1 มาทำการคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยง และอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้สมการที่ (11), (12), (14) และ (15) ตามลำดับ ผลการคำนวณค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยง แสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยง ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับการก่อสร้าง

ตัวอย่าง	ความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม (Bq kg ⁻¹)	อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (mGy y ⁻¹)	ค่าดัชนีความเสี่ยง	
			H _{ex}	H _{in}
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1				
ตราช้าง	42.50±1.58	0.18±0.01	0.11	0.15
ตราทีฟไอ(สีแดง)	54.45±1.95	0.22±0.01	0.15	0.21
ตราพญานาค(สีเขียว)	102.55±3.35	0.39±0.01	0.28	0.48
ตราอินทรีเพชร	40.64±1.54	0.17±0.01	0.11	0.14
หินสำหรับก่อสร้าง				
จากจังหวัดกาญจนบุรี	88.99±2.64	0.38±0.01	0.24	0.28
จากจังหวัดชลบุรี	70.78±2.20	0.30±0.01	0.19	0.23
จากจังหวัดสระบุรี	83.05±2.57	0.35±0.01	0.22	0.27
ทรายหยาบสำหรับก่อสร้าง				
จากจังหวัดกาญจนบุรี	160.97±4.15	0.71±0.02	0.43	0.50
จากจังหวัดชลบุรี	147.76±3.94	0.65±0.02	0.40	0.47
จากจังหวัดสระบุรี	197.05±4.73	0.86±0.02	0.53	0.61

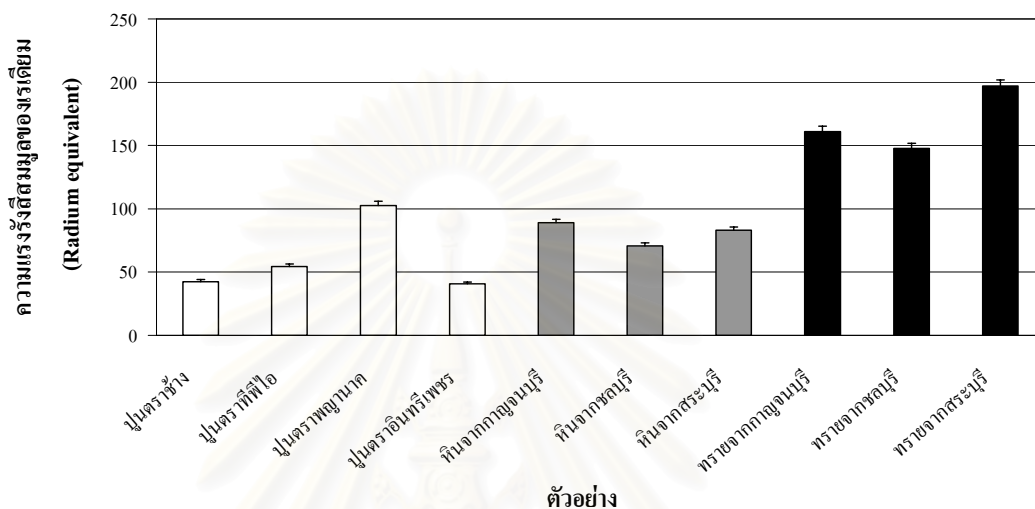
จากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าอยู่ในช่วง 40.64±1.54 ถึง 102.55±3.35 Bq kg⁻¹, หินสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 70.78±2.20 ถึง 88.99±2.64 Bq kg⁻¹ และทรายสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 147.76±3.94 ถึง 197.05±4.73 Bq kg⁻¹

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.17±0.01 ถึง 0.39±0.01 mGy y⁻¹, ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.30±0.01 ถึง 0.38±0.01 mGy y⁻¹ และของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.65±0.02 ถึง 0.86±0.02 mGy y⁻¹

ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอก (H_{ex}) และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายใน (H_{in}) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.11 – 0.28 และ 0.14 – 0.48

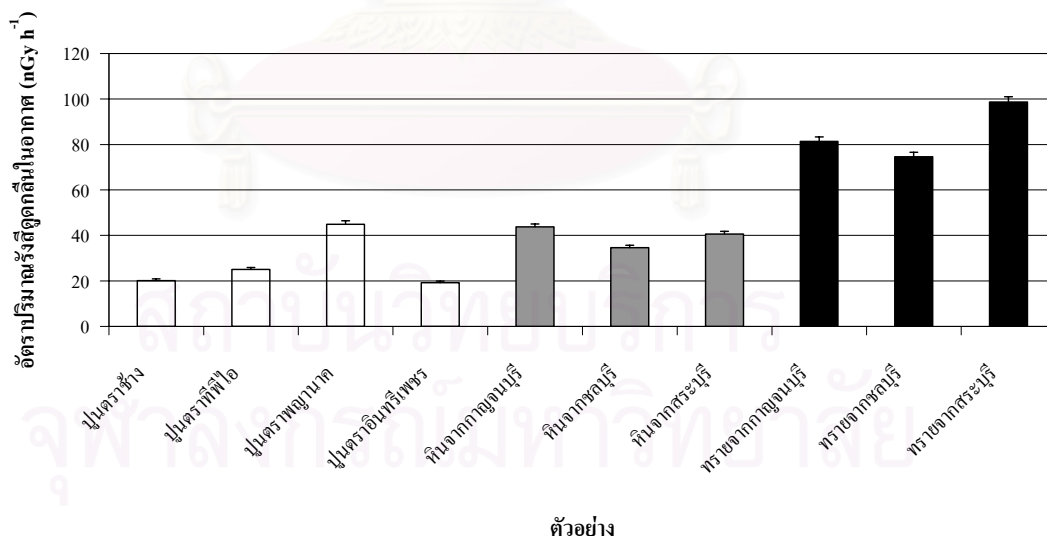
ตามลำดับ ของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.19 – 0.24 และ 0.23 – 0.28 ตามลำดับ และของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.40 – 0.53 และ 0.47 – 0.61 ตามลำดับ

ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมจากตัวอย่างแต่ละประเภท



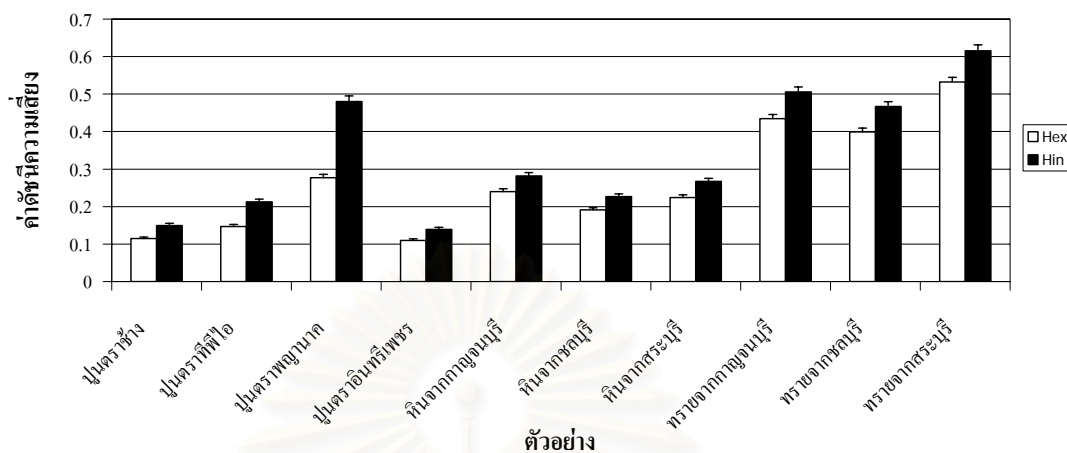
รูปที่ 4.4 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในตัวอย่างแต่ละประเภท

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างแต่ละประเภท



รูปที่ 4.5 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างแต่ละประเภท

ค่าดัชนีความเสี่ยงจากตัวอย่างแต่ละประเภท



รูปที่ 4.6 ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอก และภายในร่างกายของตัวอย่างแต่ละประเภท

4.2 ผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

สำหรับผลการศึกษ้อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

4.2.1 ผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

สำหรับผลของการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในแชมเบอร์ที่ผ่านขั้นตอนการไล่ก๊าซเรดอนภายในอากาศที่มีอยู่ก่อนภายในแชมเบอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงติดต่อกัน โดยจะทำการวัดตัวอย่างภายในแชมเบอร์ทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาติดต่อกันนาน 10 วัน เพื่อหาระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนเข้าสู่สมดุลทางกัมมันตรังสี สำหรับการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนนี้ได้เลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราพญานาค (สีเขียว) ที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม $104.34 \pm 0.21 \text{ Bq kg}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในร่างกาย 0.49, หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดกาญจนบุรี ที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม $128.36 \pm 1.71 \text{ Bq kg}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในร่างกาย 0.39 และทรายสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดสระบุรี ที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม $303.90 \pm 4.32 \text{ Bq kg}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในร่างกาย 0.90 อันเนื่องมาจากตัวอย่างทั้ง 3 ข้างต้น เป็นตัวอย่าง

ที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในร่างกายสูงสุดของตัวอย่างประเภทเดียวกัน เพื่อให้ได้ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในปริมาณที่ค่อนข้างจะสูงกว่าตัวอย่างอื่นในประเภทเดียวกัน ทำให้ง่ายต่อการหาแนวโน้มของระยะเวลาในการเกิดสมมูลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนในทางปฏิบัติของแต่ละประเภทตัวอย่าง

ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างทั้ง 3 ประเภท แสดงดังในตารางที่ 4.3

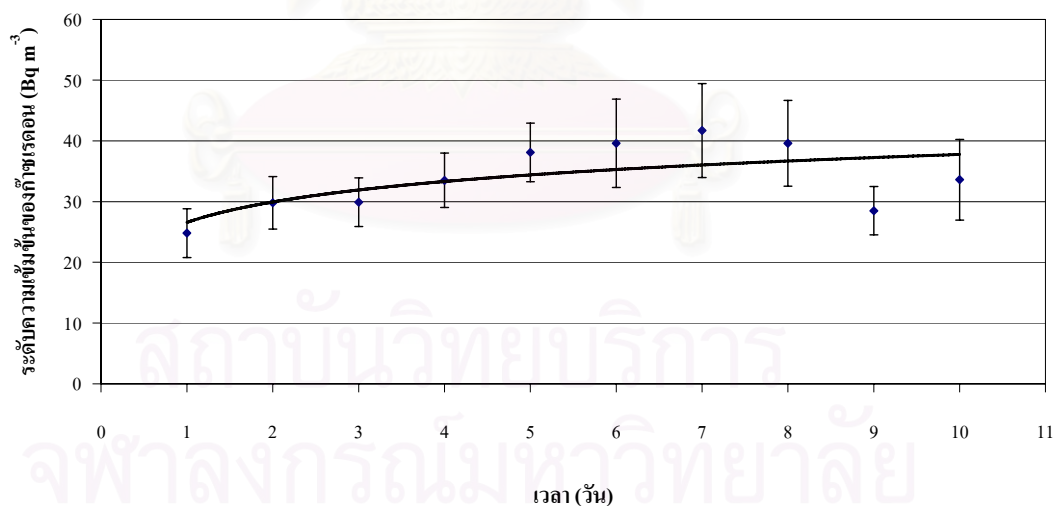
ตารางที่ 4.3 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่างที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	เวลาที่ทำการตรวจวัด (วัน)	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m ⁻³)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราพญานาค(สีเขียว)	1	24.8±4.02
	2	29.8±4.33
	3	29.9±4.01
	4	33.5±4.47
	5	38.1±4.83
	6	39.6±7.28
	7	41.7±7.73
	8	39.6±7.07
	9	28.5±3.96
	10	33.6±6.64
หินสำหรับก่อสร้าง จากจังหวัดกาญจนบุรี	1	22.6±3.83
	2	26.7±4.12
	3	29.0±4.28
	4	32.2±4.47
	5	35.4±4.63
	6	36.7±4.66
	7	37.6±4.74
	8	41.7±4.93
	9	44.7±5.29
	10	42.2±7.40

ตารางที่ 4.3 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในแต่ละตัวอย่างที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง (ต่อ)

ตัวอย่าง	เวลาที่ทำการตรวจวัด (วัน)	ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})
ทรายสำหรับก่อสร้าง จากจังหวัดสระบุรี	1	63.7±8.82
	2	91.6±10.12
	3	124.0±7.64
	4	138.0±12.15
	5	137.0±8.46
	6	140.0±8.11
	7	146.0±12.59
	8	155.0±12.90
	9	160.0±13.02
	10	159.0±12.88

ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ตราพญานาค

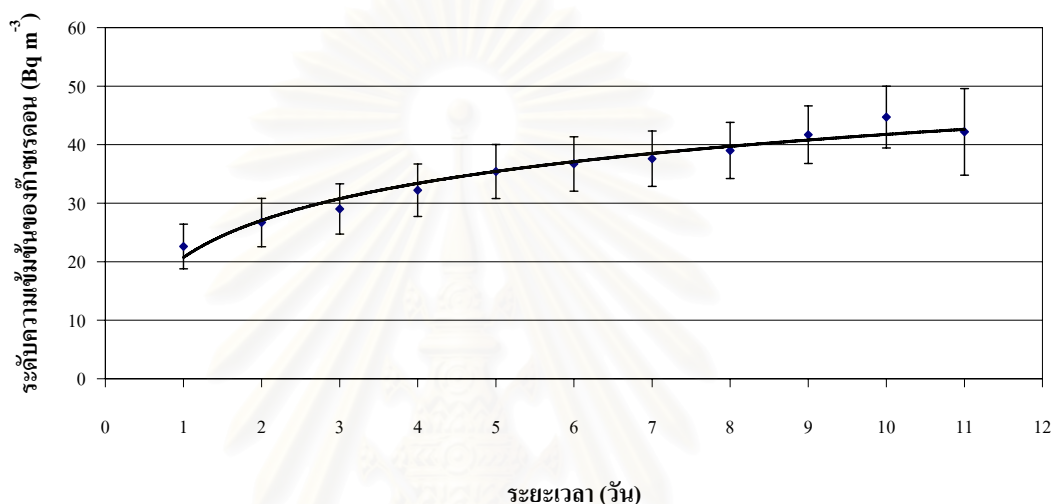


รูปที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราพญานาค(สีเขียวย)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนจะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีมีค่าอยู่ในช่วงวันที่ 7 เป็นต้นไป ดังนั้นในการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ

เรดอนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะทำการบรรจุตัวอย่างปูนซีเมนต์ลงในแอมเบอร์ และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแอมเบอร์ แล้วจึงทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยในแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอย่างต่อไป

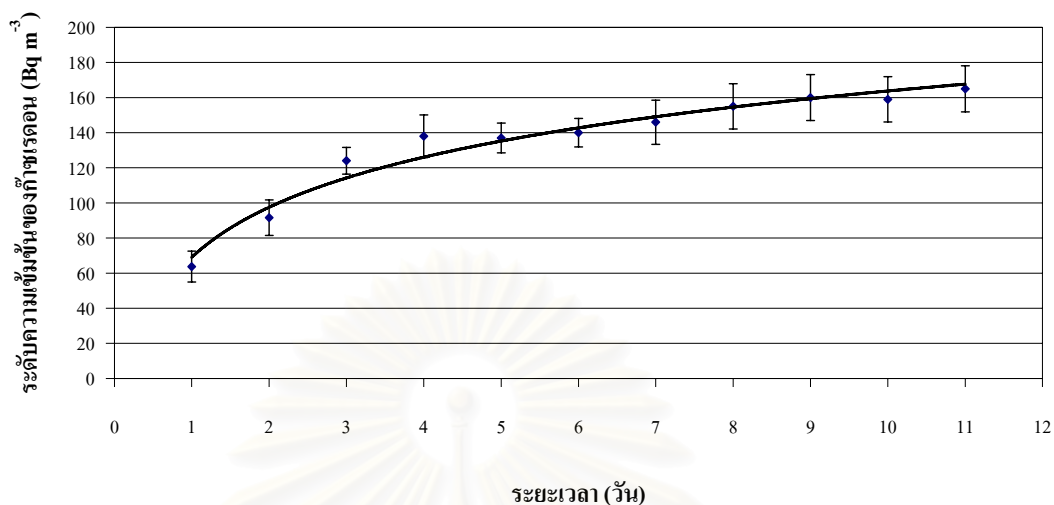
ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรี



รูปที่ 4.8 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรี

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนจะเข้าสู่ภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีมีค่าอยู่ในช่วงวันที่ 7 เป็นต้นไป ดังนั้นในการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง จะทำการบรรจุตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างลงในแอมเบอร์ และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแอมเบอร์ แล้วจึงทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยในแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอย่างต่อไป

ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรี



รูปที่ 4.9 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 10 วันของตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรี

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนจะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีมีค่าอยู่ในช่วงวันที่ 7 เป็นต้นไป ดังนั้นในการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง จะทำการบรรจุตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างลงในแชมเบอร์ และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ แล้วจึงทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยในแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอย่างต่อไป

จากผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนในแต่ละประเภทตัวอย่างพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายพญานาค(สีเขียว), หินจากจังหวัดกาญจนบุรี และทรายจากจังหวัดสระบุรี จะใช้ระยะเวลาประมาณ 7 วันในการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ตัวอย่าง ดังนั้นในการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างไว้ในแชมเบอร์ก่อนทำการตรวจวัดเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนที่ 7 วันก่อนทำการตรวจวัดในแต่ละครั้ง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

สำหรับผลของการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3}) ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยวัดตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง ที่ถูกบรรจุอยู่ในแชมเบอร์ และทำการตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน โดยระยะเวลา 7 วันนี้ได้มาจากผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนในข้อที่ 4.2.1 ซึ่งได้ค่าระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างอยู่ที่ 7 วัน แล้วจึงทำการตรวจวัดหาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของแต่ละตัวอย่างภายในแชมเบอร์เป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะทำการวัดติดต่อกันทุก 7 วัน แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยจากผลที่ได้มาทำการคำนวณเพื่อปรับเทียบค่าไปเป็นอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของแต่ละตัวอย่างด้วยสมการที่ (22) และ (23) ซึ่งค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างแสดงผลดังในตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	ระดับความเข้มข้น ของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})	อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน	
		ต่อพื้นที่ผิว ($\mu\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ต่อมวล ($\mu\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
ตราช้าง	20.4 ± 2.08	9.47 ± 0.97	0.53 ± 0.05
ตราทีพีไอ(สีแดง)	37.1 ± 3.95	17.24 ± 1.84	0.98 ± 0.10
ตราพญานาค(สีเขียว)	62.5 ± 4.90	26.43 ± 2.07	1.41 ± 0.11
ตราอินทรีเพชร	17.6 ± 3.01	8.18 ± 1.40	0.55 ± 0.09

จากตารางที่ 4.4 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราพญานาค(สีเขียว) มีค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงสุดคือ $62.5 \pm 4.90 \text{ Bq m}^{-3}$ รองลงมาคือ ตราทีพีไอ(สีแดง) $37.1 \pm 3.95 \text{ Bq m}^{-3}$, ตราช้าง $20.4 \pm 2.08 \text{ Bq m}^{-3}$ และตราอินทรีเพชร $17.6 \pm 3.01 \text{ Bq m}^{-3}$ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน กับผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสี

จำเพาะ ^{226}Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา พบว่า ค่าที่ได้มีค่าที่สัมพันธ์กันคือ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ตราพญานาค(สีเขียว) มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra ที่ $75.21 \pm 2.23 \text{ Bq kg}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายใน 0.49 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราที่พีไอ(สีแดง) มีค่าเท่ากับ $24.11 \pm 0.80 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.23 ตามลำดับ, ตราช้างมีค่าเท่ากับ $12.83 \pm 0.48 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.18 ตามลำดับ และตราอินทรีเพชรมีค่าเท่ากับ $10.92 \pm 0.44 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.16 ตามลำดับ มีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 4.5 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง

หินสำหรับการก่อสร้าง	ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})	อัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน	
		ต่อพื้นที่ผิว ($\mu\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ต่อมวล ($\mu\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
จากจังหวัดกาญจนบุรี	49.89 ± 4.67	21.11 ± 1.98	0.86 ± 0.08
จากจังหวัดชลบุรี	40.97 ± 3.37	17.33 ± 1.42	0.71 ± 0.06
จากจังหวัดสระบุรี	42.50 ± 3.82	17.98 ± 1.62	0.73 ± 0.07

จากตารางที่ 4.5 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรี มีค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงสุดคือ $49.89 \pm 4.67 \text{ Bq m}^{-3}$ รองลงมาคือ หินจากจังหวัดสระบุรี $42.50 \pm 3.82 \text{ Bq m}^{-3}$ และหินจากจังหวัดชลบุรี $40.97 \pm 3.37 \text{ Bq m}^{-3}$ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน กับผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา พบว่า ค่าที่ได้มีค่าที่สัมพันธ์กันคือ ตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรี มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra ที่ $128.36 \pm 1.71 \text{ Bq kg}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายใน 0.39 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดของตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้าง ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในของตัวอย่างหินจากจังหวัดสระบุรีมีค่าเท่ากับ $116.60 \pm 1.51 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.36 ตามลำดับ และหินจากจังหวัดชลบุรีมีค่าเท่ากับ $99.37 \pm 1.30 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.30 ตามลำดับ มีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 4.6 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของ ตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง

ทรายสำหรับการก่อสร้าง	ระดับความเข้มข้น ของก๊าซเรดอน (Bq m ⁻³)	อัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน	
		ต่อพื้นที่ผิว (μBq m ⁻² s ⁻¹)	ต่อมวล (μBq kg ⁻¹ s ⁻¹)
จากจังหวัดกาญจนบุรี	221.67±6.16	93.79±2.60	3.71±0.10
จากจังหวัดชลบุรี	165.67±7.70	77.00±3.58	2.90±0.13
จากจังหวัดสระบุรี	237.00±6.39	100.27±2.70	3.46±0.09

จากตารางที่ 4.6 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรี มีค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงสุดคือ 237.00±6.39 Bq m⁻³ รองลงมาคือ ทรายจากจังหวัดกาญจนบุรี 221.67±6.16 Bq m⁻³ และทรายจากจังหวัดชลบุรี 165.67±7.70 Bq m⁻³ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน กับผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ²²⁶Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา พบว่า ค่าที่ได้มีค่าที่สัมพันธ์กันคือ ตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรี มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ²²⁶Ra ที่ 303.90±4.32 Bq kg⁻¹ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายใน 0.90 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดของตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยค่าความแรงรังสีจำเพาะ ²²⁶Ra และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในของตัวอย่างทรายจากจังหวัดกาญจนบุรีมีค่าเท่ากับ 257.55±3.91 Bq kg⁻¹ และ 0.77 ตามลำดับ และทรายจากจังหวัดชลบุรีมีค่าเท่ากับ 236.52±3.61 Bq kg⁻¹ และ 0.71 ตามลำดับ มีค่าลดหลั่นลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากการตรวจวัด

4.3 ผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีต

สำหรับผลการศึกษ้อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

4.3.1 ผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอน เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

สำหรับผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะทำการตรวจวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยทำการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบขนาด 15 ซม. × 15 ซม. × 15 ซม. โดยเลือกตัวอย่าง

หิน และทรายสำหรับก่อสร้างที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในร่างกายที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งก็คือตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรี $128.36 \pm 1.71 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.39 ตามลำดับ และตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรี $303.90 \pm 4.32 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ 0.90 ตามลำดับ เพื่อนำตัวอย่างที่ได้มาเป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยหลังจากทำการหล่อบล็อกคอนกรีตจะต้องทำการบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 14 วัน หลังจากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงนำลงใส่ในแชมเบอร์ และทำการใส่ก๊าซเรดอนในอากาศที่มีอยู่ก่อนหน้าในแชมเบอร์ เพื่อทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน โดยทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดซ้ำทุก 24 ชั่วโมง เป็นระยะติดต่อกันนานประมาณ 8 วัน เพื่อหาระยะเวลาที่ก๊าซเรดอนเข้าสู่สมดุลทางกัมมันตรังสี

ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างตัวอย่างบล็อกคอนกรีตทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังในตารางที่ 4.7

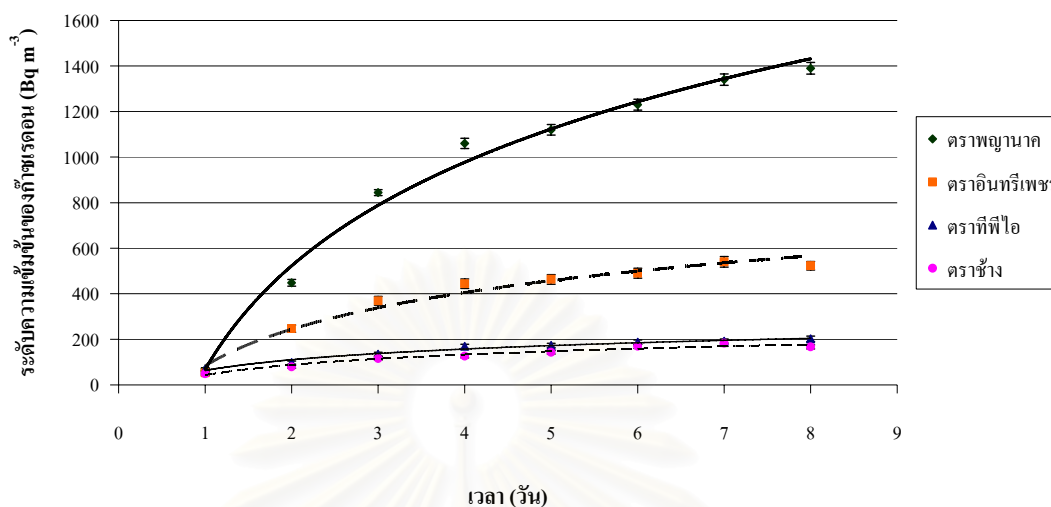
ตารางที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง

บล็อกคอนกรีตที่ผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เวลาที่ทำการตรวจวัด (วัน)	ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})
ตราช้าง	1	48.9 ± 8.0
	2	79.4 ± 6.2
	3	116 ± 7
	4	126 ± 8
	5	143 ± 8
	6	169 ± 9
	7	183 ± 14
	8	167 ± 9

ตารางที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ทำการวัดทุก 24 ชั่วโมง (ต่อ)

บล็อกคอนกรีตที่ผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เวลาที่ทำการตรวจวัด (วัน)	ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})
ตราทีพีไอ(สีแดง)	1	68±6
	2	98±7
	3	135±8
	4	169±9
	5	173±9
	6	188±9
	7	192±9
	8	202±12
ตราพญานาค(สีเขียว)	1	66.5±6.2
	2	448±15
	3	844±13
	4	1060±22
	5	1120±23
	6	1230±24
	7	1340±25
	8	1390±26
ตราอินทรีเพชร	1	53.1±8.2
	2	247±156
	3	369±19
	4	444±21
	5	463±21
	6	490±22
	7	540±23
	8	523±19

ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างบล็อกคอนกรีต



รูปที่ 4.10 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในช่วงระยะเวลา 8 วันของตัวอย่างบล็อกคอนกรีต จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

จากรูปที่ 4.10 จากผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนในตัวอย่างบล็อกคอนกรีตทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างบล็อกคอนกรีตทั้งหมดจะใช้ระยะเวลาประมาณ 7 วันในการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ตัวอย่าง ดังนั้นในการตรวจวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกคอนกรีต ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างบล็อกคอนกรีตไว้ในแชมเบอร์ก่อนทำการตรวจวัดเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนที่ 7 วันก่อนทำการตรวจวัด

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 ของตัวอย่าง

สำหรับผลของการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะทำการตรวจวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในหน่วยของ Bq m⁻³ ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7 โดยวัดตัวอย่างบล็อกคอนกรีต ที่ถูกบรรจุอยู่ในแชมเบอร์ และทำการตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน โดยระยะเวลา 7 วันนี้ได้มาจากผลการหาระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของก๊าซเรดอนในข้อที่ 4.3.1 ซึ่งได้ค่าระยะเวลาการเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสีของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตอยู่ที่ 7 วัน แล้วจึงทำการตรวจวัดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างภายในแชมเบอร์ แล้วจึงนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาทำการคำนวณเพื่อปรับเทียบค่าไปเป็นอัตรา

การปลดปล่อยก๊าซเรดอน ของแต่ละตัวอย่างด้วยสมการที่ (22) ซึ่งค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรอนกรีต แสดงผลดังในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรอนกรีต

บล็อกรอนกรีตจากปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ประเภท 1	ระดับความเข้มข้นของก๊าซ เรดอน (Bq m^{-3})	อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ($\text{mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
ตราช้าง	235±15	0.41±0.03
ตราทีฟไอ(สีแดง)	297±17	0.52±0.03
ตราพญานาค(สีเขียว)	2250±32	0.79±0.01
ตราอินทรีเพชร	667±18	0.23±0.01

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังตาราง 4.8 ค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอย่างบล็อกรอนกรีตจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างบล็อกรอนกรีตจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราพญานาค(สีเขียว) มีค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงสุดคือ $0.79 \pm 0.01 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ รองลงมาคือ ตราทีฟไอ(สีแดง) $0.52 \pm 0.03 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ตราช้าง $0.41 \pm 0.03 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และตราอินทรีเพชร $0.23 \pm 0.01 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน กับผลการวิเคราะห์ค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาพบว่า ค่าที่ได้มีค่าที่สัมพันธ์กันคือ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ตราพญานาค(สีเขียว) มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra ที่ $75.21 \pm 2.23 \text{ Bq kg}^{-1}$, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ $0.39 \pm 0.01 \text{ mGy y}^{-1}$ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายใน 0.48 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดของตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยงจากภายในของตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราทีฟไอ(สีแดง)มีค่าเท่ากับ $24.11 \pm 0.80 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0.22 \pm 0.01 \text{ mGy y}^{-1}$ และ 0.21 ตามลำดับ, ตราช้างมีค่าเท่ากับ $12.83 \pm 0.48 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0.18 \pm 0.01 \text{ mGy y}^{-1}$ และ 0.15 ตามลำดับ และตราอินทรีเพชรมีค่าเท่ากับ $10.92 \pm 0.44 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0.17 \pm 0.01 \text{ mGy y}^{-1}$ และ 0.14 ตามลำดับ มีค่าลดหลั่นลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากการตรวจวัด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทราย สำหรับก่อสร้างด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี

5.1.1.1 ความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

ผลการวิเคราะห์ความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรีพบว่า ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra อยู่ในช่วงระหว่าง 10.92 ± 0.44 ถึง $75.21 \pm 2.23 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{228}Ra อยู่ในช่วงระหว่าง 14.27 ± 0.57 ถึง $18.10 \pm 0.72 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ ^{40}K อยู่ในช่วงระหว่าง 18.93 ± 1.20 ถึง $120.32 \pm 3.60 \text{ Bq kg}^{-1}$

โดยที่ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายขนาด(สี่เหลี่ยม) มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra และ ^{228}Ra สูงที่สุดจากตัวอย่างทั้งหมด ในขณะที่ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายข้าง มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{40}K สูงที่สุดจากตัวอย่างทั้งหมด เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{40}K กับค่าประมาณความแรงรังสีจำเพาะที่มีอยู่ในวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างที่มีรายงานโดย NCRP ดังตารางที่ 1.2[1] พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายขนาด(สี่เหลี่ยม) มีค่าความแรงรังสีจำเพาะมากกว่าค่าประมาณความแรงรังสีจำเพาะที่มีรายงานโดย NCRP ซึ่งมีค่าเท่ากับ 46 mBq g^{-1} (46 Bq kg^{-1}) ในขณะที่ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 อีก 3 ตัวอย่างมีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra ไม่เกินค่าประมาณความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra ที่รายงานไว้โดย NCRP สำหรับค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{228}Ra และ ^{40}K ที่วิเคราะห์ได้พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าค่าประมาณความแรงรังสีจำเพาะที่มีรายงานโดย NCRP

5.1.1.2 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม, อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าดัชนีความเสี่ยงของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง

ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าความแรงรังสีจำเพาะเป็นค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมอยู่ในช่วง 40.64 ± 1.54 ถึง 102.55 ± 3.35 Bq kg⁻¹ โดยตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายพญานาค(สีเขียว) มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมสูงสุด, ในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 70.78 ± 2.20 ถึง 88.99 ± 2.64 Bq kg⁻¹ โดยตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรีมีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมสูงสุด และในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง 3 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 147.76 ± 3.94 ถึง 197.05 ± 4.73 Bq kg⁻¹ โดยตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรีมีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าอยู่ในลำดับประเภทที่ 1 ของระดับความปลอดภัยของความแรงรังสีสมมูลเรเดียมของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างที่กำหนดโดย UNSCEAR ดังตารางที่ 2.4[8] ซึ่งกำหนดไว้ว่า ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในวัสดุก่อสร้างใด ๆ มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq kg⁻¹ นั้นเหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย และบ้านเรือนได้อย่างปลอดภัย ซึ่งหมายความว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง ในการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้สำหรับก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยได้โดยปลอดภัย

นอกจากนี้ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าความแรงรังสีจำเพาะเป็นอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศอยู่ในช่วง 0.17 ± 0.01 ถึง 0.39 ± 0.01 mGy y⁻¹ โดยตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายพญานาค(สีเขียว) มีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสูงสุด, ในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.30 ± 0.01 ถึง 0.38 ± 0.01 mGy y⁻¹ โดยตัวอย่างหินจากจังหวัดกาญจนบุรีมีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสูงสุด และในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้าง 3 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.65 ± 0.02 ถึง 0.86 ± 0.02 mGy y⁻¹ โดยตัวอย่างทรายจากจังหวัดสระบุรีมีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศที่ยอมรับได้ที่กำหนดโดย ICRP ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 1.5 mGy y⁻¹[10] ดังนั้นตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง ในการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้สำหรับก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยได้โดยปลอดภัย

ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าความแรงรังสีจำเพาะไปเป็นค่าดัชนีความเสี่ยงอันเนื่องมาจากรังสีจากภายนอก (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ต

แผนผังประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง พบว่า ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอก และค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในร่างกาย ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.11 ถึง 0.28 และ 0.15 ถึง 0.48 ตามลำดับ, ในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.19 ถึง 0.24 และ 0.23 ถึง 0.28 ตามลำดับ และในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.53 และ 0.47 ถึง 0.61 ตามลำดับ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาหิน(สีเขียว), หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดกาญจนบุรี และทรายสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดสระบุรี มีค่าดัชนีความเสี่ยงเนื่องจากรังสีจากภายนอก และภายในร่างกายสูงที่สุดในตัวอย่างประเภทเดียวกัน เนื่องจากค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ในครั้งนี้มีค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอกอันเนื่องจากรังสีแกมมา และภายในอันเนื่องมาจากก๊าซเรดอนต่ำกว่า 1 ทุกประเภทตัวอย่าง ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้มีความปลอดภัยทางรังสีสำหรับการใช้เป็นวัสดุสำหรับการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างด้วยเครื่องมือวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของก๊าซเรดอนที่มีชื่อทางการค้าว่า RAD7

ในการหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างนั้น อันดับแรกจะต้องทราบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่สลายตัวออกมาจากธาตุเรเดียมที่มีอยู่ในตัวอย่างก่อน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างไว้ในแชมเบอร์ระบบปิดเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 7 วัน เพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสี และทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอากาศที่มีอยู่ภายในแชมเบอร์ระบบปิด จากนั้นจึงนำค่าที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่าง ซึ่งผลการวิเคราะห์หาค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้าง พบว่าค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 17.6 ± 3.01 ถึง 62.5 ± 4.90 Bq m⁻³, ในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 40.97 ± 3.37 ถึง 49.89 ± 4.67 Bq m⁻³ และในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 165.67 ± 7.70 ถึง 237.00 ± 6.39 Bq m⁻³ โดยตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาหิน(สีเขียว), หินสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดกาญจนบุรี และทรายสำหรับก่อสร้างจากจังหวัดสระบุรีมีค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงสุด เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากตัวอย่างในงานวิจัยนี้กับเกณฑ์กำหนดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัย (ตารางที่ 2.5) ที่กำหนดโดย U.S. EPA[13] ซึ่งกำหนดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ปลอดภัยต่อผู้อยู่อาศัยไว้ที่ไม่เกิน 148

Bq m⁻³ พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง และตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด สามารถที่จะนำไปเป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยที่มีค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนปลอดภัยต่อผู้อยู่อาศัย ในขณะที่ตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งหมายความว่าตัวอย่างทรายที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นวัสดุก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตาม ค่ากำหนดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่กำหนดโดย U.S. EPA นั้นเป็นค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในที่พักอาศัยที่ทำการปิดเพื่อให้ก๊าซเรดอนภายในที่พักอาศัยอยู่ในสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะภายในแชมเบอร์ระบบปิดเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระยะเวลานี้เป็นค่ากำหนด[14] ดังนั้นจึงพิจารณาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ตรวจวัดได้เมื่อทำการทิ้งตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างไว้ในแชมเบอร์เป็นเวลา 2 วัน (48 ชั่วโมง) ดังในรูปที่ 4.9 พบว่า ค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมีค่าอยู่ที่ประมาณ 92 Bq m⁻³ ดังนั้นทรายดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับอาคารที่พักอาศัยได้โดยปลอดภัยจากอันตรายทางกัมมันตภาพรังสี อันเนื่องมาจากทรายเป็นเพียงส่วนประกอบหนึ่งของวัสดุก่อสร้าง ซึ่งลักษณะการใช้งานจะต้องนำทรายสำหรับก่อสร้างไปผสมเข้ากับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น ๆ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และหินเป็นต้น ในงานวิจัยจึงได้ศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกคอนกรีต ซึ่งมีส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 290:1205:705 (kg) จะเห็นได้ว่าในส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด ทรายสำหรับก่อสร้างมีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักประมาณเพียง 35 % จากอัตราส่วนโดยน้ำหนักทั้งหมด

เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนตามสมการที่ (22) พบว่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 8.18±1.40 ถึง 26.43±2.07 μBq m⁻² s⁻¹, ในตัวอย่างหินสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 17.33±1.42 ถึง 21.11±1.98 μBq m⁻² s⁻¹ และในตัวอย่างทรายสำหรับก่อสร้างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 77.00±3.58 ถึง 100.27±2.70 μBq m⁻² s⁻¹ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขา (สีเขียว), หินจากจังหวัดกาญจนบุรี และทรายจากจังหวัดสระบุรี มีค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างในงานวิจัยนี้กับเกณฑ์กำหนดระดับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนภายในที่พักอาศัย พบว่า มีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดให้สำหรับที่พักอาศัยที่มีค่าไม่เกิน 74 mBq m⁻² s⁻¹ (74×10³ μBq m⁻² s⁻¹)[17] เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หิน และทรายสำหรับก่อสร้างที่ทำการวิเคราะห์ในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ก่อสร้างอาคารบ้านเรือนได้โดยปลอดภัยจากค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์หาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเครื่องมือวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน RAD7

เมื่อนำตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่าง, ตัวอย่างหิน และทรายสำหรับก่อสร้างชนิดที่มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม และค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงสุดมาผสมทำเป็นตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบ ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักตามมาตรฐานการผสมคอนกรีตสำหรับก่อสร้างอาคารพักอาศัย พบว่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตทั้ง 4 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.23 ± 0.01 ถึง 0.79 ± 0.01 $\text{mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ โดยตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทุกรูปแบบ (สีเขียว) มีค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงสุด เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตในงานวิจัยนี้กับเกณฑ์กำหนดระดับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนภายในที่พักอาศัย พบว่ามีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดให้สำหรับที่พักอาศัยที่มีค่าไม่เกิน 74 $\text{mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ดังนั้นตัวอย่างบล็อกรังสีคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทั้ง 4 ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ในครั้งนี้มีความปลอดภัยอันเนื่องมาจากอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

ผลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้จึงสรุปได้ว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ผลิตภายในประเทศไทย มีความปลอดภัยต่อการนำไปเป็นวัสดุสำหรับการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย โดยไม่มีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีต่อผู้ที่อาศัย หรือทำงานในบริเวณนั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัย แต่ถึงอย่างไรก็ตาม อาคารพักอาศัยโดยทั่วไปไม่ได้ใช้เพียงโครงสร้างที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เท่านั้น หากแต่ยังใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ เพื่องานที่แตกต่างกันออกไปเช่น ปูนซีเมนต์ฉาบผิว เป็นต้น ดังนั้นเพื่อการศึกษาต่อไป ควรทำการศึกษาถึงปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ได้จากปูนซีเมนต์ และวัสดุประเภทอื่น ๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างอีกด้วย

รายการอ้างอิง

1. Radiation information networks. Radioactivity in Nature. [Online]. Idaho State University. Available from: <http://www.physics.isu.edu/radinf/natural.htm>. [1991; May]
2. ชัชวาล เศรษฐบุตร, คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด, 2540.
3. I.P. Farai, J.A. Ademola. Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria. Journal of Environmental Radioactivity 79(2005) : 119 – 125.
4. Khalid Khan, Hasan M. Khan. Natural gamma-emitting radionuclides in Pakistani Portland cement. Applied Radiation and Isotopes 54(2001): 861 – 865.
5. K. Kovler, A. Perevalov, 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. Journal of Environmental Radioactivity 82(2005): 321 – 334.
6. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. การป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ2. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2546.
7. ธวัช ชิตตระการ, การตรวจและการวัดรังสี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
8. I.P. Farai, J.A. Ademola. Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria. Journal of Environmental Radioactivity 79(2005): 119 – 125.
9. P. Msaki, F.P. Banzi. Radioactivity in products derived from gypsum in Tanzania. Radiation Protection Dosimetry 91(2000): 409 – 412.
10. J. Beretka, P.J. Mathew. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. Health Physics Society 48(1985): 87 – 95.
11. Nour Khalifa Ahmed. Measurement of natural radioactivity in building materials in Oena city, Upper Egypt. Journal of Environmental Radioactivity 83(2005): 91 – 99.
12. K. Kovler, A. Perevalov, 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. Journal of Environmental Radioactivity 85(2005): 321 – 334.

13. Konstantin Kovler. Radon exhalation of hardening concrete: monitoring cement hydration and prediction of radon concentration in construction site. Journal of Environmental Radioactivity (2005): 1 – 13.
14. U.S. Environmental protection agency. Radon measurement methods. [Online]. Available from: <http://www.epa.gov/iaq/radon/methods.html>. [2003, June 25]
15. วิวัฒน์ จันทราพรชัย, ฟิสิกส์รังสี. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.
16. นรมิตร ลีวัฒนมงคล, รวมข้อมูลก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ รุ่งแสงการพิมพ์, 2538.
17. American Petroleum Institute. Bulletin on Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in oil & Gas Production. API Bulletin first edition (1992, April 1)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

1 กำลังอัดของคอนกรีต[16]

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น ๆ การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน คุณสมบัติหลักของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วคือ กำลังอัด ซึ่งกำลังอัดที่ค่าต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอาคาร กับสัดส่วนของการผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 กำลังอัดคอนกรีตต่ออัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

กำลังอัดเมื่ออายุ 28 วัน (kg cm ⁻³)	ผสมกับทรายละเอียด				ผสมกับทรายหยาบ			
	ซีเมนต์ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	น้ำ (kg)	ซีเมนต์ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	น้ำ (kg)
150	250	665	1275	170	250	735	1205	170
200	270	655	1275	180	270	725	1205	180
250	290	630	1275	180	290	705	1205	180
300	335	595	1275	180	335	665	1205	180
350	405	540	1275	180	405	610	1205	180
400	450	490	1275	180	450	575	1205	180

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกค่ากำลังอัดที่ 250 kg cm⁻³ ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดเฉลี่ยโดยทั่วไปที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอาคาร

2 การบ่มคอนกรีต[2]

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำได้โดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัว

หน้าที่สำคัญของการบ่ม มีด้วยกัน 2 ประการคือ

- ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
- รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตคือ

- เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลัง และความทนทาน
- เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

สำหรับกรรมวิธีการบ่มที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ใช้วิธีการขังน้ำ ซึ่งเหมาะสมกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบ วิธีการก็คือ การใช้ภาชนะที่สามารถกักเก็บน้ำได้บรรจุคอนกรีตที่แข็งตัวลงไปพร้อมกับน้ำ โดยให้น้ำท่วมพื้นวัสดุคอนกรีตตัวอย่าง โดยมีข้อควรระวังคือ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้บ่มจะต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียส

สำหรับระยะเวลาในการบ่มจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ อุณหภูมิที่ใช้บ่ม เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ถือได้ว่าจะมีผลต่อระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ซึ่งอาจจะถึง 1 เดือน หรือเพียง 3 วันสำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไปส่วนใหญ่ จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วันจนถึง 28 วัน โดยการบ่มขึ้นที่ 7 วันทำให้ได้กำลังของคอนกรีตสูงทัดเทียมกับกำลังคอนกรีตที่บ่มขึ้น 28 วัน ซึ่งตามมาตรฐานอเมริกาแนะนำให้ใช้เวลาบ่มขึ้น 7 วัน สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป แต่สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณมาก ๆ เช่นงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ จำเป็นจะต้องบ่มนานอย่างน้อย 2 สัปดาห์ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จะทำการบ่มคอนกรีตที่ระยะเวลาเท่ากับ 14 วัน

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเอง (f_{ab}) ของตัวอย่างปุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรานพยานาค(สีเขียว) ที่พลังงาน 609.2 keV ของ ^{226}Ra

- จากขั้นตอนที่ 3.4.1.2.8 ในบทที่ 3 ได้ค่า $I_0 = 86625$
- จากขั้นตอนที่ 3.4.1.2.9 ในบทที่ 3 ได้ค่า $I_x = 63434$

แทนค่า I_0 และ I_x ลงในสมการที่ (24)

$$f_{ab} = \frac{\ln(I_0 / I_x)}{1 - (I_x / I_0)} \quad (24)$$

$$f_{ab} = \frac{\ln(86625 / 63434)}{1 - (63434 / 86625)}$$

$$f_{ab} = 1.1639$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรานพยานาค(สีเขียว) มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยตัวเองเท่ากับ 1.1639

2 ความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra

การคำนวณหาค่าความแรงรังสี ของตัวอย่างปุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรานพยานาค(สีเขียว) ที่พลังงาน 609.2 keV ของ ^{226}Ra

จากสมการที่ (25)

$$A_{(\text{Sample})} = A_{(\text{Std})} \times \frac{Wt_{(\text{Std})}}{Wt_{(\text{Sample})}} \times \frac{R_{(\text{Sample})}}{R_{(\text{Std})}} \times \frac{f_{ab(\text{Sample})}}{f_{ab(\text{Std})}} \quad (25)$$

$$A_{(\text{Sample})} = 133.51 \times \frac{430}{430} \times \frac{0.1427}{9.6722} \times \frac{1.1639}{1.1280}$$

$$A_{(\text{Sample})} = 2.0324 \text{ pCi g}^{-1}$$

$$A_{(\text{Sample})} = 75.21 \text{ Bq kg}^{-1}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรานพยานาค(สีเขียว) มีค่าความแรงรังสีจำเพาะ ^{226}Ra เท่ากับ 75.21 Bq kg⁻¹

3 ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมจากตารางที่ 4.1 ของ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาหิน(สีเขียว)

จากสมการที่ (11)

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (11)$$

$$Ra_{eq} = 75.21 + 1.43(18.10) + 0.077(18.93)$$

$$Ra_{eq} = 102.55 \text{ Bq kg}^{-1}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรายภูเขาหิน(สีเขียว) มีค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมเท่ากับ $102.55 \text{ Bq kg}^{-1}$

4 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศจากตารางที่ 4.1 ของ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาหิน(สีเขียว)

จากสมการที่ (15)

$$D = 0.427A_U + 0.662A_{Th} + 0.0432A_K \quad (15)$$

$$D = 0.427(75.21) + 0.662(18.10) + 0.0432(18.93)$$

$$D = 44.91 \text{ nGy h}^{-1}$$

$$D = 0.39 \text{ mGy y}^{-1}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรายภูเขาหิน(สีเขียว) มีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนรังสีในอากาศเท่ากับ 0.39 mGy y^{-1}

5 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสี (H)

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีที่ 4.1 ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายภูเขาหิน (สีเขียว)

ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอก (H_{ex})

จากสมการที่ (12)

$$\begin{aligned}
 H_{ex} &= \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} & (12) \\
 H_{ex} &= \frac{75.21}{370} + \frac{18.10}{259} + \frac{18.93}{4810} \\
 H_{ex} &= 0.28
 \end{aligned}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรายภูเขาหิน (สีเขียว) มีค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอกเท่ากับ 0.28 ในห้องที่ปิดสนิท แต่สำหรับห้องที่มีขนาดของความหนา และมีหน้าต่าง ค่า H_{ex} ที่คำนวณจากสมการ (13) จะมีค่าเท่ากับ 0.14 ซึ่งให้ค่าน้อยลงกว่าค่าประมาณถึง 2 เท่า

ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายใน (H_{in})

จากสมการ (14)

$$\begin{aligned}
 H_{in} &= \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} & (14) \\
 H_{in} &= \frac{75.21}{185} + \frac{18.10}{259} + \frac{18.93}{4810} \\
 H_{in} &= 0.48
 \end{aligned}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรายภูเขาหิน (สีเขียว) มีค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายในเท่ากับ 0.48

6 ค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตารางที่ 4.4 ของ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายพูนานาค(สีเขียว)

จากสมการที่ (22)

$$E = \frac{C(t)V\lambda}{S(1 - e^{-\lambda t})} \quad (22)$$

$$E = \frac{62.5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \times 0.0071 \text{ m}^3 \times 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}}{0.049 \text{ m}^2 (1 - e^{-(2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \times 604800 \text{ s}^1)})}$$

$$E = 26.43 \mu\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

นั่นคือ ปูนซีเมนต์ทรายพูนานาค(สีเขียว) มีค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนเท่ากับ $26.43 \mu\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโอภาส จิระเดชระกุล เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2523 จังหวัดพังงา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จาก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย