การประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติและแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้าง และในอาคารเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

Assessment of Natural Radionuclides and Radon Gas in Building Materials and Indoor Schools Building In the Southern Part of Yala Province

สุวนันท์ แดงวิไล

Suwanan Daengwilai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Applied Physics
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติและแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้าง และในอาคารเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

Assessment of Natural Radionuclides and Radon Gas in Building Materials and Indoor Schools Building In the Southern Part of Yala Province

สุวนันท์ แดงวิไล

Suwanan Daengwilai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Applied Physics
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติและแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้างและในอาคารเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

ผู้เขียน นางสาวสุวนันท์ แดงวิไล

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(ดร.อุดร ยังช่วย)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)

.....กรรมการ

(ดร.สุนารี บดีพงศ์)

.....กรรมการ

(ดร.อุดร ยังช่วย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เถกิง วงศ์ศิริโชติ)

รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....
(ดร.อุดร ยังช่วย)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....
(นางสาวสุวนันท์ แดงวิไล)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....
(นางสาวสุวนันท์ แดงวิไล)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติและแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้างและในอาคารเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

ผู้เขียน นางสาวสุวนันท์ แดงวิไล

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง จำนวน 41 ตัวอย่าง โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี ด้วยหัววัดเจอมาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เพื่อประเมินดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้อง และศึกษาปริมาณแก๊สเรดอนในอาคารเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา เนื่องจากบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลามีสภาพทางธรณีวิทยาที่ประกอบด้วยหินตะกอน หินแปร และมีหินอัคนีชนิดหินแกรนิต กระจายตัวอยู่ในบริเวณต่าง ๆ นอกจากนั้นมีการทำอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งวัสดุก่อสร้างเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิต หินปูน และมักจะมีส่วนประกอบของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ที่เป็นต้นกำเนิดของการปลอดปล่อยแก๊สเรดอน ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพและเพิ่มโอกาสการเป็นมะเร็งปอดของผู้อยู่อาศัยในบริเวณดังกล่าวในระยะยาวได้

พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน ดิน ทราย บริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลามีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) โดยตัวอย่างหินจะพบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra และ ^{40}K สูงสุดที่โรงเรียนบ้านปะเด็ง อำเภอธารโต ส่วน ^{232}Th มีค่าสูงสุดในโรงเรียนเบตง (วีระราษฎร์ประสาน) อำเภอเบตง ตัวอย่างดินนั้นพบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th มีค่าสูงสุดโรงเรียนบ้านวังใหม่ อำเภอเบตง ส่วน ^{40}K มีค่าสูงสุดในโรงเรียนบ้านไทยพัฒนา อำเภอธารโต และสำหรับตัวอย่างทรายพบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th มีค่าสูงสุดในโรงเรียนบ้านศรีนคร อำเภอธารโต ส่วน ^{40}K มีค่าสูงสุดในโรงเรียนเขื่อนบางลาง อำเภอบันนังสตา

สำหรับค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีทั้ง 5 ค่านั้นได้แก่ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน (H_{in}) และอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) และปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) พบว่าตัวอย่างหินค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีทั้ง 5 ค่านั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่วนตัวอย่างดิน และทราย ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน และอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ มีเพียงปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปีเท่านั้นที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

ส่วนปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนภายในอาคารเรียน บริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.12±3.42 Bq/m^3 โดยมีค่าสูงสุดที่โรงเรียนบ้านทรายแก้ว อำเภอบันนังสตา และต่ำสุดที่โรงเรียนบ้านตาเนาะปูเต๊ะ อำเภอบันนังสตาโดยทุกโรงเรียนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารไว้ที่ 148 Bq/m^3 โดยในพื้นที่ที่ศึกษามีสภาพธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตแต่มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนไม่สูงมากนัก เนื่องจากอาคารเรียนส่วนใหญ่จะมีการเปิดประตูหน้าต่างอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการลดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

คำสำคัญ : กัมมันตภาพรังสี ; ค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสี ; วัสดุก่อสร้าง ; จังหวัดยะลา ; หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

Thesis Title Assessment of Natural Radionuclides and Radon Gas in Building Materials and Indoor Schools Building In the Southern Part of Yala Province

Author Miss Suwanan Daengwilai

Major Program Applied Physics

Academic Year 2022

ABSTRACT

The objectives of this research was to investigate the amount of natural radioactive substances, including ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K in 41 samples in building materials using the gamma spectrometry analysis system with a highly pure geranium detector (HPGe), to assess the relevant radioactive hazard index and to study the amount of radon gas in the school building in lower part of Yala Province because the lower part of Yala province has geological conditions that consist of sedimentary rocks, metamorphic rocks, and granite igneous rocks scattered in various areas. There are also construction industries where most of these building materials are granite, limestone and often contain naturally occurring radionuclides ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K, which are the source of radon emissions which result in health problems and increase the chances of lung cancer of residents in the area in the long run.

It was found that the mean radioactive contents of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K in rock, soil, sand samples in the lower part of Yala Province were higher than the world average for soil (UNSCEAR, 2000) and the world average for building materials (UNSCEAR, 1993). In the rock samples, the highest concentrations of ^{226}Ra and ^{40}K were found at Ban Padeng School, Than To District. As for ^{232}Th, it had the highest value in Betong School (Weerarat Prasarn), Betong District. Soil samples showed that the radioactive content of ^{226}Ra, ^{232}Th was the highest at Ban Wang Mai School, Betong District. ^{40}K was highest in Ban Thai Pattana School, Than To District, and for sand samples, ^{226}Ra, ^{232}Th was highest in Ban Sri Nakhon School, Than To District, while ^{40}K was highest in Bang Lang School, Bannang Sata District.

For the five radiation hazard indices, including the radium equivalent (Ra_{eq}), external hazardous index (H_{ex}), internal hazardous index (H_{in}) and the amount of gamma radiation absorbed (D) and annual radiation dose (E), it was found that all 5 radiation hazard index values of the stone samples were lower than the specified standards. For the soil and sand samples, the radium equivalent radioactivity, the external hazardous index, the internal hazardous index, and the absorbed gamma radiation dose rate were higher than the standard set. Only the annual radiation dose was below the established standard.

In terms of radon concentrations within school buildings in the lower part of Yala Province, the mean values were 9.12±3.42 Bq/m^3, with the highest values at Ban Sai Kaew School, Bannang Sata District and lowest at Ban Tanohputeh School, Bannang Sata District. All schools were below the threshold set by the US EPA for indoor radon levels of 148 Bq/m^3. In the study area, the geology was granite but the concentration of radon gas was not very high because most of the school buildings have windows and doors open, which could the concentration of radon inside the building.

Keywords : Radioactivity ; Radiological Hazard Index ; building materials ; Yala Province; High-Purity Germanium Detectors (HPGe)

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจาก ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2564 และ ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2565 และจากความช่วยเหลือของบุคคลต่าง ๆ จำนวนมาก ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความกรุณาช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ขอขอบคุณ ดร.อุดร ยังช่วย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ คอยให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ หลักการ กระบวนการในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้ความรู้ทางด้านวิชาการ คำชี้แนะในงานวิจัย และคอยช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบคุณอาจารย์นราธิป เพ่งพิศ อาจารย์ประจำสาขาวิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่คอยให้ความรู้การใช้โปรแกรม Quantum GIS 3.2

ขอขอบพระคุณผู้อำนวยการสถานศึกษาทั้ง 41 โรงเรียนที่ได้กรุณาให้ใช้พื้นที่ในการสำรวจตลอดจนคอยช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและอนุญาตให้ใช้เครื่องมือวิจัยและเครื่องมือวิเคราะห์ทุกชนิดที่จำเป็นต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณพ่อและแม่รวมไปถึงทุกคนในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุวนันท์ แดงวิไล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(13)
สารบัญภาพ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎี	7
2.1 ธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Material)	7
2.1.1 ธาตุกัมมันตรังสี	7
2.1.2 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี	9
2.1.3 กฎการสลายตัว	10
2.1.4 หน่วยวัดรังสี	13
2.2 แหล่งกำเนิดรังสี (Source of Radiation)	16
2.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติ (Natural Sources of Radiation)	16
2.2.2 แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น	18
2.3 ประโยชน์ของรังสี	20
2.3.1. ด้านอุตสาหกรรม	20
2.3.2 ด้านการแพทย์	20
2.3.3 ด้านการเกษตร	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 โทษของรังสี	21
2.4.1. เม็ดเลือด	21
2.4.2. ระบบทางเดินอาหาร	21
2.4.3 ระบบผิวหนังและเส้นผม	21
2.4.4 ระบบประสาท	21
2.4.5 ระบบสืบพันธุ์	21
2.5 ก๊าซเรดอน	22
2.5.1 ก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง	22
2.5.2 ก๊าซเรดอนในอากาศ	28
2.5.3 ก๊าซเรดอนกับโรคมะเร็ง	28
2.5.4 ระดับอ้างอิงก๊าซเรดอน	30
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสารกัมมันตรังสีและก๊าซเรดอน	30
2.6.1 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)	30
2.6.2 อุปกรณ์บันทึกรอย (Alpha Track - etch Film)	31
2.7 สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ	32
2.7.1 การวิเคราะห์ค่ากัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง	32
2.7.2 การศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร	37
2.8 พื้นที่ทำการศึกษา	38
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	40
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์	40
3.1.1 ศึกษาปริมาณกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้างวัสดุ	40
3.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร	40
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	41
3.2.1 ศึกษาสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง	41
3.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารด้วยถ้วยแทรคแอดดีเทคเตอร์	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย	50
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน, ดิน และ ทราย	50
4.1.1 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน	50
4.1.2 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน	58
4.1.3 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย	66
4.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารด้วยถ้วยแทรคแอดดีเทคเตอร์	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
บทที่ 6 บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก	94
ภาคผนวก ข	96
ภาคผนวก ค	102
ภาคผนวก ง	105
ภาคผนวก จ	106
ประวัติผู้เขียน	107

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่	2.1 สรุปการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีประเภทต่าง ๆ	9
ตารางที่	2.2 ค่าคงตัวการสลายและครึ่งชีวิตของบางนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สำคัญ	12
ตารางที่	2.3 แสดงหน่วยวัดรังสีประเภทต่าง ๆ	14
ตารางที่	2.4 ปัจจัยถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (W_R)	15
ตารางที่	2.5 ปัจจัยถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อ (W_T)	15
ตารางที่	2.6 สรุปค่าสถิติพื้นฐานของหินแกรนิตของประเทศอียิปต์	27
ตารางที่	2.7 สถิติผู้ป่วยโรคมะเร็งปอดของประชากรจังหวัดยะลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2565	29
ตารางที่	3.1 จำนวนนับใต้สเปกตรัมของสารกัมมันตรังสีภูมิหลัง	43
ตารางที่	3.2 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีจากสารมาตรฐาน IAEA-375 สำหรับตัวอย่างดิน	44
ตารางที่	3.3 ประสิทธิภาพการนับวัดของพลังงานรังสีในวัสดุก่อสร้าง	45
ตารางที่	3.4 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดในตัวอย่างที่เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเจอมา	46
ตารางที่	4.1 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน	50
ตารางที่	4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K	55
ตารางที่	4.3 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน	56
ตารางที่	4.4 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างหิน	57
ตารางที่	4.5 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน	58
ตารางที่	4.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน	63
ตารางที่	4.7 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน	64
ตารางที่	4.8 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างดิน	65
ตารางที่	4.9 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย	66
ตารางที่	4.10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K	71
ตารางที่	4.11 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย	72

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างทราย 73

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน (Bq/m^3) 74

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ ของค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน 78

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าปริมาณรังสีสมมูล (DT) ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็ง ในตลอดช่วงชีวิต 79

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่ 2.1 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า 8

ภาพที่ 2.2 แสดงการสลายของนิวไคลน์กัมมันตรังสี 11

ภาพที่ 2.3 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมทอเรียม 16

ภาพที่ 2.4 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมยูเรเนียม 17

ภาพที่ 2.5 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมแอกทิเทียม 17

ภาพที่ 2.6 รายละเอียดของแหล่งที่มาต่างๆ ของรังสีจากธรรมชาติ 20

ภาพที่ 2.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซเรดอนในที่พักอาศัย 23

ภาพที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นขอเรดอนเฉลี่ยต่อปีที่อยู่อาศัยที่สร้างขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ 24

ภาพที่ 2.9 แสดงธรณีสัณฐานของจังหวัดยะลา ประเทศไทย 39

ภาพที่ 3.1 แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และบตง จังหวัดยะลา 41

ภาพที่ 3.2 อบตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง 42

ภาพที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง 42

ภาพที่ 3.4 กราฟปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสี (Energy Calibration Curve) 43

ภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกัมมันตภาพรังสีกับระดับพลังงาน 45

ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 47

ภาพที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ภายในห้องเรียนของอาคาร 47

ภาพที่ 3.8 กระบวนการกัดรอย (Etching) เพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม 48

ภาพที่ 3.9 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายผ่านฟิล์ม CR-39 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า 49

ภาพที่ 4.1 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน 53
โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

ภาพที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ 54

ภาพที่ 4.3 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน 56

ภาพที่ 4.4 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน 61
โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

ภาพที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ 62

ภาพที่ 4.6 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน 64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่ 4.7 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K 69

ภาพที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ 70

ภาพที่ 4.9 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย 72

ภาพที่ 4.10 แผนภาพการกระจายตัวความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร 77

ภาพที่ 4.11 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ของค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน 78

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พื้นที่ตอนใต้ของจังหวัดยะลา มีลักษณะเป็นเทือกเขาหินแกรนิต และมีการทำเหมืองแร่ดีบุกในหลายพื้นที่ เช่น ในอำเภอบันนังสตา อำเภอเมืองยะลา อำเภอรามัน อำเภอยะหา และอำเภอเบตง นอกจากนี้จังหวัดยะลายังมีอุตสาหกรรมก่อสร้างหลายประเภท ได้ แก่อุตสาหกรรมหินปูน อุตสาหกรรมหินแกรนิตประดับ เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2559) อุตสาหกรรมก่อสร้างเหล่านี้เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดแก๊สเรดอนภายในอาคาร เนื่องจากก๊าซเรดอน (^{222}Rn) เป็นผลิตภัณฑ์เกิดจากการสลายตัวของแร่ยูเรเนียม (^{238}U) และเรเดียม (^{226}Ra) โดยเฉพาะวัสดุก่อสร้างที่ทำมาจากหินแกรนิต เนื่องจากหินแกรนิตมีปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) สูงกว่าหินชนิดอื่น ๆ จากการศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างในประเทศอียิปต์ ด้วยหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) ของ Shoeib และ Thabayneh (2014) พบว่า อิฐซีเมนต์ อิฐแดง หินแกรนิต และเซรามิก มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงกว่าค่ามาตรฐาน โดยหินแกรนิตมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนสูงที่สุด อีกทั้งดินซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยพบว่าดินบริเวณเทือกเขาหินแกรนิตทางตอนใต้ของจังหวัดยะลา มีศักย์ทางเรดอนสูง (พวงทิพย์, 2562) ประกอบกับ พวงทิพย์ (2546) ได้ศึกษาปริมาณยูเรเนียมในตะกอนดินในพื้นที่จังหวัดยะลา ซึ่งพบว่ามีปริมาณยูเรเนียมสูง ถ้านำดินในพื้นที่มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจะมีผลต่อการเพิ่มของแก๊สเรดอนในอาคารบ้านเรือน สอดคล้องกับ Nguyễn-Văn และคณะ (2020) ศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนในบ้านเรือนบริเวณตอนเหนือของเวียดนาม ที่ใช้ดินจากที่ราบสูงดงแวนมาสร้างบ้านเรือน พบว่าก๊าซเรดอนจากดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย ซึ่งการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ และความชื้นที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพรุนของดิน และหิน (ฉันท์ทิพ, 2552) หากวัสดุก่อสร้างมีส่วนผสมของทรายที่เกิดจากธรรมชาติก็จะยิ่งทำให้มีค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมากขึ้นไปอีกด้วย (Corrêa et al., 2020)

ก๊าซเรดอนเกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของยูเรเนียม พบได้ในดิน หิน และน้ำบาดาล เมื่อประชาชนนำดิน หิน หรือทรายที่มีธาตุยูเรเนียมเจือปนมาก่อสร้างอาคาร วัสดุเหล่านั้นก็จะปล่อยก๊าซเรดอนออกมาตามปริมาณธาตุยูเรเนียมที่ปะปนอยู่ ผ่านรอยแตกรอยแยกของผนังอาคารบ้านเรือน ทำให้ก๊าซเรดอนฟุ้งกระจายในอาคารสูงไปด้วย และหากประชาชนที่อาศัยในอาคารบ้านเรือนสูดดมหรือสัมผัสเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดได้ (Lorenzo-Gonzalez et al., 2021)

ทั้งนี้เพราะว่าระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนภายในบ้านเรือนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดมะเร็งปอด (US National Academy of Sciences, NAS-BEIR VI, 1998) เมื่อประชาชนหายใจเอาก๊าซเรดอนเข้าไปในร่างกายจะเกิดการสลายตัวให้ธาตุ โพโลเนียม ตะกั่ว และบิทมัส และปล่อยรังสีอัลฟาพลังงานสูงออกมาทำลายเซลล์เยื่อบุทางเดินหายใจ เนื้อเยื่อต่าง ๆ ภายในปอด และจะทำลายเซลล์ชั้น Epithelium ของหลอดลมปอด (Bronchi) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเกิดโรคมะเร็ง จากการศึกษาการอยู่รอดจากมะเร็งปอดในผู้ไม่สูบบุหรี่ (Lung Cancer Research In Never Smokers) เมื่อสัมผัสก๊าซเรดอนในอาคารในปริมาณที่สูงขึ้น พบว่ามีผลกระทบเชิงลบต่อการอยู่รอด (Casal-Mouriño et al., 2020)

จึงถือได้ว่าก๊าซเรดอนจัดเป็นมลภาวะภายในอาคารที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่ง (ธัชพงศ์, 2549) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้างได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) และวิเคราะห์ปริมาณแก๊สเรดอนภายในอาคารเพื่อดูความสัมพันธ์หว่างความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้าง และในอาคารเรียน เพราะการได้รับก๊าซเรดอนเข้าไปในร่างกายปริมาณมากและเป็นระยะเวลายาวนาน จะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุก่อสร้างมีส่วนผสมของดิน หินทรายและแร่ธาตุต่างๆ เช่น ^{232}U, ^{232}Th , ^{40}K, ^{226}Ra, ^{222}Rn และ ^{220}Rn เป็นต้น ทำให้ในวัสดุเหล่านี้มีปริมาณกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ปะปนอยู่ด้วยในปริมาณต่างๆ กัน ปริมาณของกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่ตกค้างในวัสดุก่อสร้าง หากมีเกินมาตรฐานจะส่งผลต่อสุขภาพ และก่อให้เกิดการเจ็บป่วยของผู้อยู่อาศัยในระยะยาว โดยเฉพาะธาตุเรเดียมที่สามารถสลายตัวให้ก๊าซเรดอนได้ แพร่กระจายตัวอยู่ในอาคารบ้านเรือน ซึ่งก๊าซเรดอนจัดเป็นสารกัมมันตรังสีที่สำคัญที่สุด ที่หลายประเทศกำลังให้ความสนใจ เนื่องจากพบว่า ก๊าซเรดอนเป็นหนึ่งในสารก่อมะเร็งปอดในมนุษย์รองจากบุหรี่ จากการรายงานขององค์การอนามัยโลก (WHO) (Chenhua Wang, 2022) เช่น Ba และคณะ (2021) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในตัวอย่างดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับสร้างบ้านเรือนเพื่ออยู่อาศัย และวัดปริมาณ ^{222}Rn ภายในอาคาร ในเมืองโฮจิมินห์ซ ประเทศเวียดนามเพื่อการประเมินปริมาณรังสีที่มีผลต่อความเสี่ยงที่จะเกิดโรคมะเร็งของประชาชากร พบว่าดินที่นำมาใช้สร้างที่อยู่อาศัยของประชากร ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน

ก๊าซเรดอน เป็นก๊าซกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม ปราศจากสีและกลิ่น มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซทั้งหมดในธรรมชาติ มีอยู่ 3 ไอโซโทป ได้แก่ ก๊าซแอคตินอน (^{219}Rn) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรม แอคติเนียม เมื่อสลายตัวจะให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที และก๊าซโทรอน (^{220}Rn) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมทอเรียม เมื่อสลายตัวจะให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ส่วนก๊าซเรดอน (^{222}Rn) เป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตนานที่สุดคือ 3.82 วัน โดยก๊าซแอคตินอน และก๊าซโทรอน มีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นมาก แพร่กระจายไปได้ไม่ไกลก็สลายตัวหมด ปริมาณก๊าซทั้งสองที่พบบนโลกจึงมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับก๊าซเรดอนซึ่งใช้เวลานานกว่าในการสลายตัว จึงมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์มากกว่า แหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอน สามารถแบ่งได้ 4 แหล่งใหญ่ ๆ ได้แก่ ยูเรเนียมในดิน น้ำบาดาล วัสดุก่อสร้าง และก๊าซธรรมชาติ โดยต้นกำเนิดของก๊าซเรดอนคือ แร่ยูเรเนียม สามารถพบแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในดินและหิน ปริมาณยูเรเนียมในดินและหิน จึงนับเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ในการใช้ประเมินศักย์เรดอน (Radon Potential) ของพื้นที่นั้น (ธัชพงศ์, 2549)

ก๊าซเรดอน จัดเป็นมลพิษทางอากาศภายในอาคารที่สำคัญชนิดหนึ่งและเป็นสาเหตุของมะเร็งในมนุษย์โดยองค์กรระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยโรคมะเร็ง (IARC) ในปี 231 (IARC, 2012) เมื่อนำ หิน ดิน ทรายมาใช้ในการสร้างอาคาร วัสดุเหล่านี้จะปล่อยก๊าซเรดอนออกมา โดย Dentoni และคณะ (2020) ได้ศึกษาสารกัมมันตรังสี และอัตราการปลอดปล่อยก๊าซเรดอนในหิน 18 ชนิด ของเมืองซาร์ดิเนีย ประเทศอิตาลี พบว่า การปลดปล่อยก๊าซเรดอนขึ้นอยู่กับปริมาณเรเดียม และการศึกษาของ Cosma และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในประเทศโรมาเนีย พบว่าก๊าซเรดอนในดิน และก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างเป็นแหล่งที่มาของการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

ภายในอาคาร นอกจากนั้น Murphy และคณะ (2021) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงการเป็นมะเร็งปอดของประชากรในสาธารณรัฐไอร์แลนด์ จากการได้รับก๊าซเรดอนในบ้านเรือน โดยโดยใช้แผ่นฟิล์มชนิด CR-39 ไปติดตั้งไว้ในห้องนั่งเล่นและห้องนอน พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงถึง 97.83 $Bq{\cdot}m^{-3}$ และมีประชากรป่วยเป็นโรคมะเร็งปอดประมาณ 350 ราย และเสียชีวิต 255 รายต่อปี เนื่องจากการสัมผัสก๊าซเรดอน แสดงให้เห็นว่าก๊าซเรดอนเป็นหนึ่งในสาเหตุการเสียชีวิตสูงสุด ก๊าซเรดอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เรเดียม และยูเรเนียม ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในดิน หินและน้ำ ซึ่งสามารถที่จะพบได้ทุก ๆ ที่บนพื้นโลก ดังนั้นในบรรยากาศทั่วไป จึงมีก๊าซเรดอนปะปนอยู่ ซึ่งจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณแร่เรเดียมและยูเรเนียมที่มีอยู่ในบริเวณนั้น ยูเรเนียมพบอยู่ในหินชนิดต่าง ๆ เช่น หินแกรนิต หินดินดาน หินฟอสเฟส และยางมะตอย ยูเรเนียมจะแตกตัว เป็นเรเดียม และจากนั้นจะแตกตัวปลดปล่อยก๊าซเรดอนออกมาในที่สุด ซึ่งก๊าซเรดอนนี้จะสามารถระเหยผ่านชั้นดินมาสู่บรรยากาศได้ สำหรับกลไกในการก่อมะเร็งนั้น เกิดจากการที่มนุษย์หายใจเอาก๊าซเรดอนเข้าไป ซึ่งจะสลายตัวเป็นโปโลเนียม และสามารถจับบนผิวของอนุภาคฝุ่นละอองที่หายใจเข้าไปด้วยได้ นอกจากนี้สามารถเข้าไปฝังตัวในระบบทางเดินหายใจได้ในทุกระดับ จากนั้นรังสีอัลฟาพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมา จะทะลุทะลวงทำลายเซลล์ที่อยู่โดยรอบได้โดยตรง โดยสันนิษฐานว่ารังสีที่ทำลายชั้น Epithelium ของหลอดลมปอด (Bronchi) เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเกิดมะเร็ง (ฉันท์ทิพ, 2552)

Kang, Seo และ Jin (2019) ได้ศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ที่มีการสัมผัสกับเรดอนในประเทศเกาหลีนั้น พบว่าการได้รับก๊าซเรดอนอาจทำให้เกิดมะเร็งปอด และ Tirmarche และคณะ (2010) ได้ศึกษาความเสี่ยงในการทำงานของคนงานเหมืองแร่ยูเรเนียมที่มีการสัมผัสและสูดดมก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยของประชาชน พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งปอดเช่นกัน สอดคล้องกับ Lorenzo-Gonzalez และคณะ (2021) ได้ศึกษาความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดจากการสัมผัสเรดอนในที่อยู่อาศัยบริเวณทางตะวันตกเฉียงเหนือ ในประเทศสเปน ยืนยันว่าการสัมผัสก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยเป็นปัจจัยเสี่ยงของมะเร็งปอด ส่วนในประเทศเกาหลี Noh และคณะ (2020) มีการประเมินโรคมะเร็ง ปอดที่เกิดจากการสัมผัสก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยในประเทศเกาหลีระหว่างปี 2549-2558 พบว่ามีจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นในช่วงการศึกษาถึง 1.34 เท่า และในประเทศไทยก็ได้มีการศึกษาวามสัมพันธ์ของก๊าซเรดอนกับการเป็นมะเร็งปอดในจังหวัดเชียงใหม่ พงศ์เทพ (2550) พบว่าก๊าซเรดอนมีอิทธิพลต่อการเกิดมะเร็งปอด

ไมมูน และคณะ (2555) ได้ศึกษากัมมันตภาพจำเพาะและแผนภาพทางรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน บริเวณจังหวัดยะลา ประเทศไทย โดยใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงและระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี พบว่าในอำเภอบันนังสตา และอำเภอกาบังจะมีปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะ สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ นอกจากนั้น พวงทิพย์ และคณะ (2562) ได้ศึกษาความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างบริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา โดยใช้เทคนิค Close-Can และวัดก๊าซเรดอนด้วยเครื่อง ATMOS

ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซเรดอน อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอน และปริมาณรังสียังผล มีค่าเฉลี่ย 49.24±8.43 Bq/m^3, 16.25±3.00 mBq/kg·h และ 1.24±0.21 mSv/y ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในตำบลลิดล มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิงที่กำหนดโดย WHO และในส่วนของปริมาณรังสียังผล พบว่าตำบลลิดล แกะรอ และกอตอตือระ มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง คือ 1 mSv/y กำหนดโดย ICRP

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา

1.3.2 เพื่อประเมินดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องจากวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา

1.3.3 เพื่อคำนวณและเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ภายในอาคารเรียน บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา กับระดับอ้างอิง (Reference Level) ทั่วโลก

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีของของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา รวมทั้งหมด 123 ตัวอย่าง โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องจากวัสดุก่อสร้าง

1.4.2 ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารเรียน โดยการนำแผ่นฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ไปติดตั้งที่ระดับพื้นภายในห้องเรียน จำนวน 1 จุด รวมทั้งหมด 41 โรงเรียนในพื้นที่บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา เป็นระยะเวลา 1 เดือน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณ อำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำเป็นแผนภาพทางรังสีในบริเวณดังกล่าว

1.5.2 ทราบปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายในร่างกาย และค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปี จากวัสดุก่อสร้างได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและใช้เป็นแนวทางในการป้องกันอันตรายที่เกิดจากสารกัมมันตรังสีพื้นหลังได้

1.5.3 ทราบปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอากาศภายในอาคารเรียนในพื้นที่ทางตอนใต้ของจังหวัดยะลาเพื่อนำไปประเมินความเสี่ยงจากการได้รับเรดอนได้ และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำเป็นแผนภาพคอนทัวร์ในบริเวณดังกล่าว

บทที่ 2
ทฤษฎี

ก๊าซเรดอน เป็นก๊าซกัมมันตรังสี ที่ปราศจากสีและกลิ่น เกิดจากการสลายตัวทางรังสีของเรเดียม (^{226}Ra) ในอนุกรมยูเรเนียม (^{238}U) มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ในดิน หิน ทราย และน้ำบาดาล นอกจากนี้สามารถพบก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะวัสดุก่อสร้างที่ทำมาจากหินแกรนิต จึงจำเป็นต้องประเมินดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีเพื่อทราบข้อมูลพื้นฐานและใช้เป็นแนวทางในการป้องกันอันตรายที่เกิดจากสารกัมมันตรังสี

ในบทนี้จะพูดถึงประวัติการค้นพบกัมันตรังสี ชนิดและสมบัติของกัมมันตภาพรังสี การเปลี่ยนสภาพนิวเคลียสซึ่งเป็นต้นกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ สมการการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของธาตุขึ้น สุดท้ายจะอธิบายถึงประโยชน์และโทษของกัมนตภาพรังสี

2.1 ธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Material)

2.1.1 ธาตุกัมมันตรังสี

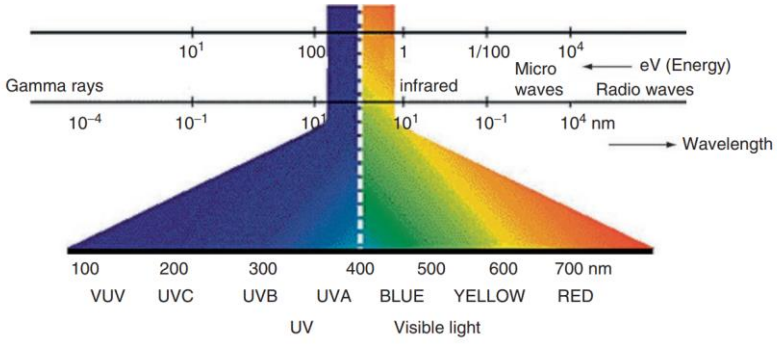
ธาตุกัมมันตรังสี คือ ธาตุที่มีองค์ประกอบภายในนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดการสลายตัวหรือการปล่อยรังสีต่าง ๆ ออกมา เพื่อให้จำนวนองค์ประกอบในนิวเคลียสมีความสมดุลและเสถียรมากขึ้น โดยธาตุที่สลายตัวหรือปล่อยรังสีออกมาแล้วจะกลายสภาพไปเป็นธาตุชนิดอื่นหรือธาตุชนิดเดิมที่มีความเสถียรมากขึ้น โดยรังสีที่ปล่อยออกมาจากธาตุกลุ่มนี้ เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (Pauwels, 2005) โดยรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีนั้นเป็นพลังสามารถเคลื่อนที่ผ่านอากาศหรือสสาร แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือพลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิด ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ แสงสว่าง รังสีเอกซ์ และรังสีคอสมิก เป็นต้น และในลักษณะของอนุภาคที่มีความเร็วสูง ที่มีทั้งมวล และประจุ ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีคอสมิก หรือมีเฉพาะมวลแต่ไม่มีประจุ เช่น รังสีนิวตรอน เป็นต้น สามารถจำแนกรังสีตามคุณสมบัติทางกายภาพได้เป็น 2 กลุ่ม (สัจจพล, 2554) ดังนี้

2.1.1.1 รังสีก่อไอออน (lionizing Radiation)

เป็นรังสีที่มีพลังงานอยู่ในช่วง KeV-MeV เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ (นวลฉวี, 2553) ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ (X-Rays) อนุภาคนิวตรอน รังสีจากวัสดุกัมมันตรังสี และจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูง (เครื่องเอกซเรย์ หรือ เครื่องเร่งอนุภาค) อิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง โปรตอนที่มีความเร็วสูง (Beyzadeoglu et al., 2022)

2.1.1.2 รังสีไม่ก่อไอออน (Non-ionizing Radiation)

เป็นรังสีพลังงานต่ำอยู่ในช่วง 10^{-2}–10^{2} eV เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ ไม่สามารถทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ (นวลฉวี, 2553) ได้แก่ รังสียูวีแสงที่ตามองเห็น รังสีอินฟาเรด คลื่นไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ เป็นต้น รังสีชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำของเรา เช่นอุปกรณ์อำนวยความสะดวกภายในบ้านหรือที่ทำงาน เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ความสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการใช้ไมโครเวฟเพื่อใช้สำหรับการอุ่นอาหาร ซึ่งรังสีแต่ละชนิดนั้นจะแตกต่าง กันที่ความถี่ และความยาวคลื่น



ภาพที่ 2.1 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : Beyzadeoglu et al. (2022)

ธาตุกัมมันตรังสีถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2439 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส มีชื่อว่า เบ็กเกอเรล (Becquerel) จากการนำเอาฟิล์มถ่ายรูปเก็บไว้ในลิ้นชัก ที่มีสารประกอบของธาตุยูเรเนียม เมื่อเขานำแผ่นฟิล์มไปล้าง พบว่าฟิล์มมีรอยดำเกิดขึ้นคล้ายกับฟิล์มนั้นโดนแสง และเขาได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง พบว่าได้ผลเช่นเดิม เขาจึงสรุปว่ารอยดำในฟิล์มถ่ายรูปนั้นเกิดจากรังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุยูเรเนียม ต่อมา ปีแอร์ และ มารี คูรี (Pierre Curie and Marie Curie) ได้ค้นพบว่าสารประกอบของธาตุพอโลเนียม เรเดียม และทอเรียม สามารถแผ่รังสีได้เองเช่นเดียวกัน และได้มีการตั้งชื่อธาตุที่สามารถแผ่รังสีได้เองว่า “ธาตุกัมมันตรังสี” (L’Annunziata, 2012)

2.1.2 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive Decay) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากนิวเคลียสของอะตอมสูญเสียพลังงานจากการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ และแผ่รังสี เราสามารถจำแนกรังสีจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สรุปการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีประเภทต่าง ๆ โดย P คือนิวไคลด์แม่ (Parent Nuclide) D คือนิวไคลด์ลูก (daughter Nuclide)

ประเภทการลายตัว	**สมการทั่วไปของการลายตัว**	**ลักษณะการสลายตัว**
แอลฟา (α)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}D + \alpha$	เกิดจากการสลายตัวของธาตุฮีเลียม (Helium) เนื่องจากมีจำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียสจำนวนมาก จึงปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาที่ประกอบด้วย โปรตอน 2 อนุภาค และนิวตรอน 2 อนุภาค
บีตาลบ (β^-)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z+1}D + \beta^- + \bar{\nu}$	เกิดจากนิวไคลน์กัมมันตรังสีมีนิวตรอนมากเกินไปทำให้เกิดความไม่สมดุลในนิวเคลียส โดยนิวตอนจะสลายตัวเป็นโปรตรอน พร้อมทั้งให้บีตาลบ (β^-) และแอนตินิวตริโนออกมา ($\bar{\nu}$)
บีตาบวก (β^+)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + \beta^+ + \nu$	เกิดจากการปลดปล่อยของนิวไคลน์ที่ไม่เสถียร เนื่องจากมีจำนวนโปรตอนมากเกินไปโดยโปรตอนจะเปลี่ยนเป็นนิวตรอน พร้อมทั้งให้อนุภาคโพสิตรอน(β^+) และนิวตริโนออกมา (ν)
การจับอิเล็กตรอน	${}^{A}_{Z}P + e^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D^* + \nu$	เกิดจากนิวไคลน์กัมมันตรังสีมีจำนวนโปรตรอนมากเกินไป โดยดึงอิเล็กตรอนจากวงโคจรรวมกับนิวเคลียส แล้วเปลี่ยนเป็นนิวตรอน
แกมมา (γ)	${}^{A}_{Z}P^* \rightarrow {}^{A}_{Z}P + \gamma$	เกิดจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในสถานะกระตุ้นปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นรังสีแกมมาหรือโฟตอน (Photon) เพื่อลงมาสู่สถานะพื้น (Ground State)

ที่มา Pauwels (2005)

2.1.3 กฎการสลายตัว

เมื่อธาตุหรือสารประกอบใดมีนิวไคลน์กัมมันตรังสีเป็นองค์ประกอบ จะแสดงสมบัติของกัมมันตภาพรังสี คือ สลายตัวให้รังสีออกมา การสลายของธาตุกัมมันตรังสีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยสุ่ม (Random Process) ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าอะตอมใดจะสลายเมื่อใด ทุก ๆ นิวเคลียสมีโอกาสที่จะสลายตัวได้เท่ากัน ปริมาณนิวเคลียสที่สลายตัวไปในแต่ละช่วงเวลา เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณนิวเคลียสที่เหลืออยู่ในขณะนั้น แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

หรือ

$$\lambda N = -\frac{dN}{dt} \qquad (2.1)$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงตัวการสลายตัว (Decay Constant)

$\frac{dN}{dt}$ คือ จำนวนนิวเคลียสที่สลายในช่วง dt

เครื่องหมาย - แสดงถึงกการลดลงของจำนวนนิวไคลด์

จัดสมการ (2.1) ใหม่ จะได้

$$dN = -\lambda N dt$$

เมื่ออินทิเกรต ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น จนถึงเวลา t ใด ๆ จะได้

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{0}^{t} dt$$

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

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

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (2.2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใด ๆ

N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น (t=0)

t คือ ระยะเวลาของการสลายตัว

λ คือ ค่าคงตัวการสลายตัว

เราเรียกสมกการที่ 2.2 ว่า **สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี**

2.1.3.1 กัมมันตภาพรังสี (Activity)

กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสี หมายถึงอัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น เบ็กเคอเรล (Becquerel, Bq) ซึ่งหมายถึง การสลาย 1 ครั้งต่อวินาที (Disintegration per Sec, dps) หรือใช้หน่วย คูรี (Curie, Ci) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} Bq อัตราการสลายของนิไคลด์กัมมันตรังสี หรือกัมมันตภาพ (Activity) ขึ้นอยู่กับจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A \propto N$$

$$A = \lambda N \tag{2.3}$$

แทนสมการที่ 2.2 ในสมการที่ 2.3

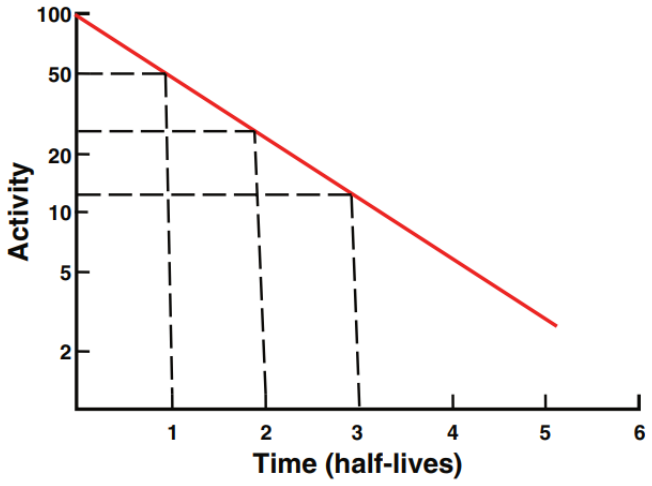
$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \tag{2.4}$$

เมื่อ A คือ กัมมันตภาพที่เวลา t ใด ๆ

A_0 คือ กัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น (t=0)

สมการที่ 2.4 อธิบายว่า การสลายของนิวไคลน์กัมมันตรังสี มีผลให้จำนวนกัมมันตภาพลดลงตามระยะเวลาที่ผ่านไป



ภาพที่ 2.2 แสดงการสลายของนิวไคลน์กัมมันตรังสี

ที่มา : Gopal B. Saha (2013)

2.1.3.2 ครึ่งชีวิต (Half-life, $t_{1/2}$)

ครึ่งชีวิต คือเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีใช้ในการสลายตัวของสารเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น ค่าครึ่งชีวิตจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงชีวิตการสลายตัวของสารที่สลายตามสมการสลายตัวครึ่งชีวิตแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ตามตารางด้านข้างนี้ เมื่อแทนค่า $t=t_{1/2}$ และ $N=N_0 / 2$ ในสมการที่ 2.2 จะได้

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

$$\ln 2 = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (2.5)$$

ครึ่งชีวิต($t_{1/2}$) เป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งอาจจมีค่าตั้งแต่วินาทีจนถึงหลายล้านปี และสามารถนำไปใช้หาอายุสัมบูรณ์ (Absolute Age) ซึ่งเป็นอายุของหินหรือซากดึกดำบรรพ์ ที่สามารถบอกจำนวนปีที่ค่อนข้างแน่นอน สามารถใช้หาอายุของวัตถุโบราณที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 2.2 ค่าคงตัวการสลายและครึ่งชีวิตของบางนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สำคัญ

นิวไคลด์	ค่าคงตัวการสลาย	ครึ่งชีวิต
^{3}H	0.05634/ปี	12.3 ปี
^{14}C	0.00012/ปี	5730 ปี
^{32}P	0.04846/วัน	14.3 วัน
^{35}S	0.007929/วัน	87.4 วัน
^{36}Cl	2.302×10^{-6}/ปี	3.01×10^{5} ปี
^{45}Ca	0.0042/วัน	165 วัน

ที่มา : นวลฉวี (2553)

2.1.4.3 ชีวิตเฉลี่ย (Mean Life , τ)

ชีวิตเฉลี่ย คือ ค่าเฉลี่ยของช่วงชีวิตของธาตุกัมมันตรังสี ที่ใช้บอกอายุของธาตุกัมมันตรังสี เนื่องจากอะตอมในธาตุกัมมันตรังสีมีช่วงชีวิตไม่เท่า โดยหาได้จากผลรวมของเวลาที่ทุก ๆ นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตอยู่ต่อจำนวนนิวไคลด์ทั้งหมด

$$\tau = \int_{N_0}^{0} \frac{t}{N_0}\, dN$$

$$= \frac{1}{N_0} \int_{N_0}^{0} t\, dN$$

$$= \frac{1}{N_0} \int_{N_0}^{0} t \left\{ -N_0 \lambda e^{-\lambda t}\, dt \right\}$$

$$= \int_{0}^{\infty} t e^{-\lambda t}\, d(-\lambda t)$$

$$= t e^{-\lambda t} - \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda t}\, d(t)$$

$$= t e^{-\lambda t} + \frac{1}{\lambda} \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad (2.6)$$

2.1.4 หน่วยวัดรังสี

หน่วยวัดรังสีจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ หน่วยวัดความแรงกัมมันตรังสี (Radioactivity) เป็นหน่วยที่กำหนดจำนวนรังสีที่ปล่อยมาจากต้นกำเนิดรังสี และหน่วยวัดการได้รับรังสี (Exposure) เป็นหน่วยที่กำหนดจำนวนรังสีจากต้นกำเนิดรังสีที่ถูกดูดกลืนในตัวกลาง โดยหน่วยวัดรังสีมีหลายประเภท เพื่อระบุสมบัติและผลจากรังสี ดังนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงหน่วยวัดรังสีประเภทต่าง ๆ

หน่วยวัดรังสี	สมบัติและผลจากรังสี	ระบบเมตริกแบบดั้งเดิม	หน่วย SI	ค่าเทียบเท่า
กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)	แสดงถึงกัมมันตภาพหรือความแรงของสารรังสี	คูรี (Ci)	เบคเคอเรล (Bq)	1 Ci = 3.7×10^{10} Bq
รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)	แสดงถึงปริมาณพลังงานรังสีที่ตัวกลางใด ๆ ดูดกลืนไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางนั้น	แรด (Rad)	เกรย์ (Gy)	1 rad = 10^{-2} Gy
รังสีที่ท าให้อากาศแตกตัว (Exposure)	แสดงถึงปริมาณรังสีทีทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในอากาศ	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)	1 R = 2.58×10^{-4} C/kg
รังสีสมมูล (Equivalent Dose)	แสดงถึงปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะใด ๆ หลังจากได้ถ่วงน้ำหนักตามชนิดของรังสี (W_R) แล้ว ดังสูตรต่อไปนี้ $H = D \times W_R$	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)	100 rem = 1 Sv
ปริมาณรังสียังผล (Effective Dose)	แสดงถึงปริมาณรังสีสมมูล (E) ของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะใด ๆ หลังจากได้ถ่วงน้ำหนักตามชนิดของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (W_T) นั้น แล้ว ดังสูตรต่อไปนี้ $E = H \times W_T$	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)	100 rem = 1 Sv

ที่มา : นวลฉวี (2553)

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (W_R)

ชนิดของรังสี	ช่วงพลังงาน	W_R
รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์	ทุกค่า	1
อิเล็กตรอน	ทุกค่า	1
นิวตรอน	< 10 KeV	5
	10 KeV – 100 KeV	10
	100 KeV – 2 MeV	20
	2 MeV – 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
โปรตรอน	2 MeV	5
รังสีแอลฟา	ทุกค่า	20
ชิ้นส่วนฟิชชัน	ทุกค่า	20
อนุภาคหนัก	ทุกค่า	20

ที่มา : นวลฉวี (2553)

ตารางที่ 2.5 ปัจจัยถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อ (W_T)

อวัยวะ	W_T	อวัยวะ	W_T
อวัยวะสืบพันธ์	0.20	ตับ	0.05
ไขกระดูก	0.12	หลอดอาหาร	0.05
ลำไส้ใหญ่	0.12	ต่อมไทรอยด์	0.05
ปอด	0.12	ผิวหนัง	0.01
กระเพาะอาหาร	0.12	ผิวกระดูก	0.01
กระเพาะปัสสาวะ	0.05	อื่น ๆ	0.02
เต้านม	0.05	ทั่วทั้งร่างกาย	1.0

ที่มา : นวลฉวี (2553)

2.2 แหล่งกำเนิดรังสี (Source of Radiation)

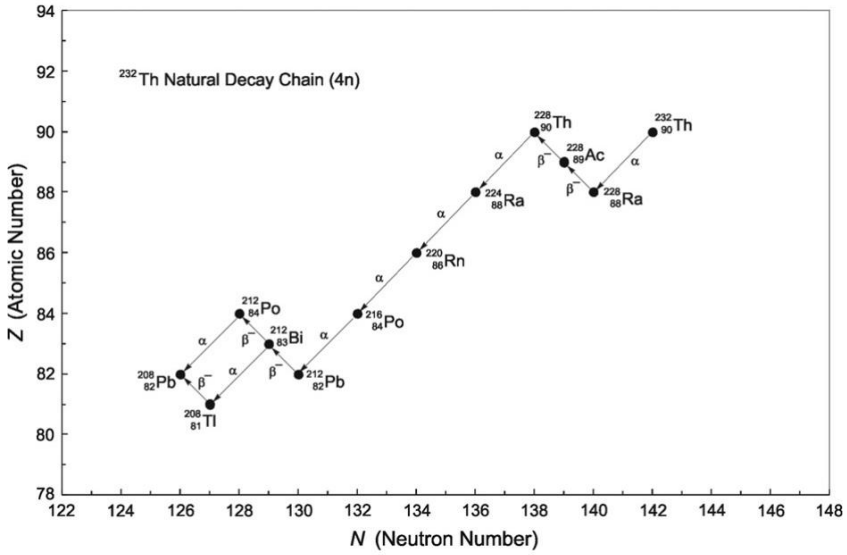
2.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติ (Natural Sources of Radiation)

2.2.1.1 รังสีจากพื้นโลก (Terrestrial Radiation)

เกิดจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ทั่วไปในดิน หิน และของเหลว คือ น้ำ ที่เป็นส่วนประกอบของเปลือกโลก ที่เกิดขึ้นพร้อมการกำเนิดโลก ส่วนใหญ่เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีมวลมาก และครึ่งชีวิตที่ยาว มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง เป็นอนุกรมที่ให้รังสีแอลฟา บีตา แกมมา ได้แก่

1) อนุกรมการสลายตัวของทอเรียม (Thorium Series, 4n series)

นิวไคลด์เริ่มต้นของอนุกรมเริ่มจาก ^{232}Th มีครึ่งชีวิต 1.41x10^{10} ปี มีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา อย่างต่อเนื่อง จนสิ้นสุดที่ ^{208}Pb โดยอนุกรมของทอเรียมมีเลขมวลที่หารด้วย 4 ลงตัว โดยมีรายละเอียดการสลายตัวในภาพที่ 2.5

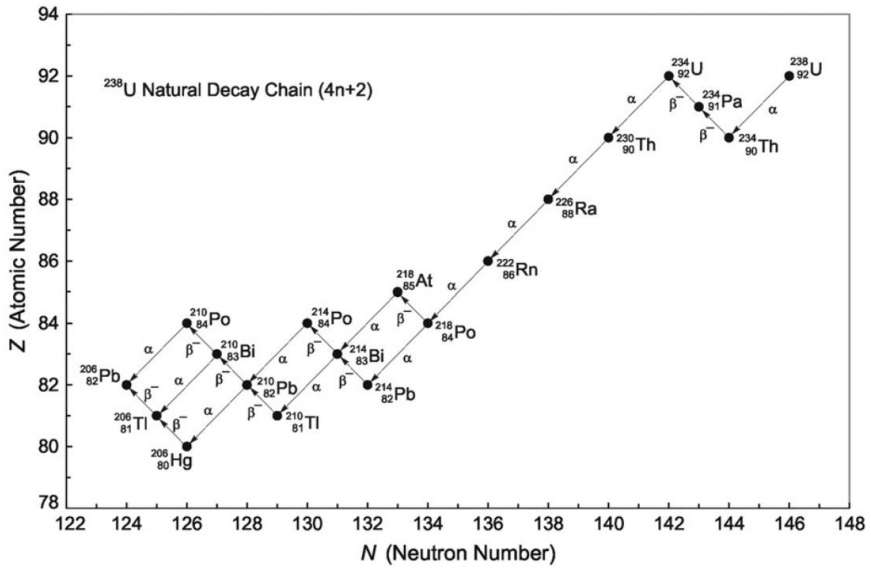


ภาพที่ 2.3 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมทอเรียม

ที่มา : L'Annunziata (2012)

2) อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม (Uranium Series, 4n+2 series)

นิวไคลด์เริ่มต้นของอนุกรมเริ่มจาก ^{238}U มีครึ่งชีวิต 4.47x10^{9} ปี สลายต่อเนื่อง จนได้นิวไคลด์เสถียร คือ ^{206}Pb โดยอนุกรมของยูเรเนียมมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 โดยมีรายละเอียดการสลายตัวในภาพที่ 2.6

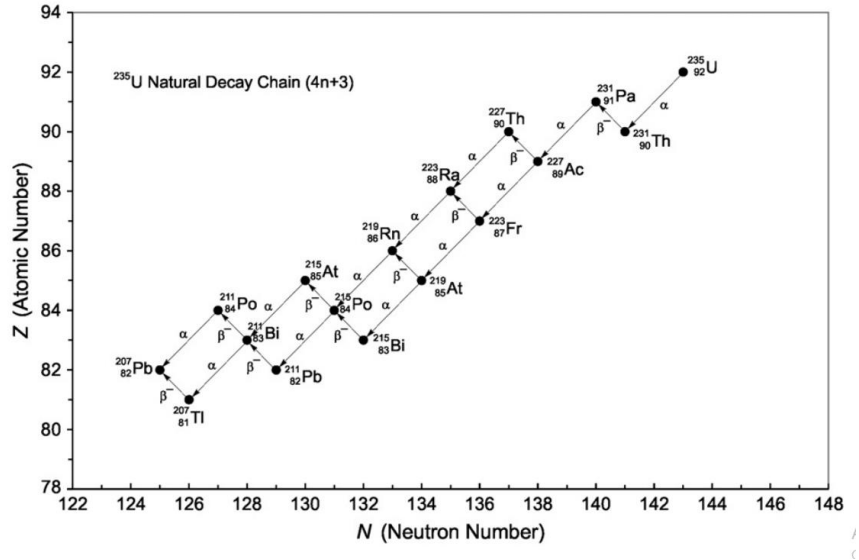


ภาพที่ 2.4 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมยูเรเนียม

ที่มา : L'Annunziata (2012)

3) อนุกรมการสลายตัวของแอกทิเทียม (Actinium Series, 4n+3 series)

นิวไคลด์เริ่มต้นของอนุกรมเริ่มจาก ^{235}U มีครึ่งชีวิต 7.04×10^{8} ปี สลายต่อเนื่อง จนได้นิวไคลด์เสถียร คือ ^{207}Pb โดยอนุกรมของยูเรเนียมมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 โดยมีรายละเอียดการสลายตัวในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของอนุกรมแอกทิเทียม

ที่มา : L'Annunziata (2012)

2.2.1.2 รังสีคลอสมิก

มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และดวงดาวในกาแลคซีประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ เช่น โปรตอน แอลฟา อิเล็กตรอน โพซิตรอน รวมถึงอนุภาคหนักต่าง ๆ ที่เป็นต้นกำเนิดของทั้งจักรวาล กาแล็กซี และดาวเคราะห์ต่าง ๆ เช่น นิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจน ฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน นีออน แมกนีเซียม ซิลิคอน และเหล็ก เป็นต้น เมื่อรังสีคอสมิกที่มีพลังงานพลังสูงเคลื่อนที่สู่บรรยากาศ จะพุ่งชนอะตอมของธาตุต่าง ๆ ทำให้เกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากรังสีคอสมิกต่าง ๆ เช่น ลิเทียม เบริลเลียม และโบรอน ซึ่งรังสีเหล่านี้ส่งผลต่อมนุษย์ได้

2.2.1.3 รังสีจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีภายในร่างกาย

สารกัมมันตภาพรังสีสามารถพบได้ในร่างกาย ส่วนใหญ่เป็น ^{40}P ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบได้ในอาหาร ดิน และน้ำที่เรากินเข้าไป แต่ร่างกายของมนุษย์สามารถเผาผลาญโพแทสเซียมได้ทำให้ลงเหลืออยู่ภายในร่างกายน้อยมาก เมื่อเทียบกับรังอื่น ๆ ส่วนรังสีชนิดอื่นนั้น มนุษย์ได้รับจากการนำทรัพยากรธรรมชาติที่ปะปนรังสีมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

1) การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติเหล่านี้มีปริมาณสารกัมมันตรังสีแตกต่างกันกันไป โดยส่วนใหญ่ถ่านหินมักพบ ^{238}U ส่วนก๊าซธรรมาชาติ พบ ^{222}Rn และ ^{210}Pb

2) น้ำแร่ (Mineral Waters) ในน้ำแร่อาจมีสารกัมมันตรังสีปะปนอยู่ ซึ่งแร่ธาตุที่ปะปนอยู่ในน้ำแร่จะเป็นแร่ธาตุชนิดใดขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่เป็นแหล่งกำเนิด เมื่อดื่มหรือสัมผัสกับน้ำที่ปนเปื้อนสารรังสีนี้จะเกิดการดูดซับเข้าไปสะสมในร่างกาย ถ้ามีการสะสมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เป็นอันตราย ตัวอย่างสารกัมมันตรังสีที่อยู่ในน้ำแร่ ได้แก่ ก๊าซเรดอน

3) ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate Fertilizers) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตก็อาจนำไปสู่การได้รับรังสีจากการแผ่รังสีจากพื้นดิน จากการสะสมในพืช และเมื่อรับประทานพืชทำให้รังสีเข้าสู่ร่างกายได้

2.2.2 แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น

กิจกรรมของมนุษย์ทำให้เกิดรังสีกระจายตัวในสภาพแวดล้อมได้ เริ่มจากการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในการทดสอบอาวุธนิวเคลียร์ และการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เร่งอนุภาคเพื่อผลิตธาตุกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ ออกมา จนถึงปัจจุบันมีการใช้รังสีอย่างหลากหลาย ในด้านอุตสหกรรม การผลิตสินค้าอุปโภค-บริโภค การประกอบอาชีพในสถานประกอบการต่าง ๆ รวมไปถึงการนำรังสีมาใช้ในการรักษา และ ซึ่งแบ่งที่มาของแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นได้ดังนี้

2.2.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในทางการแพทย์

โดยนำสารกัมมันตรังสีมาใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งด้านการตรวจวินิจฉัย (Diagnosis) เพื่อวิเคราะห์โรคต่างๆ ด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์เพื่อการวินิจฉัยและรักษาโรค และด้านการ

รักษา (Therapy) เมื่อมีการประมวลแล้วพบว่ามีปริมาณรังสีเฉลี่ยที่คนได้รับเป็นอันดับสองรองจากปริมาณรังสีตามธรรมชาติ ก็คือปริมาณรังสีจากการแพทย์นั่นเอง

2.2.2.2 แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันนี้ ได้มีการพัฒนาและการนำนิวเคลียร์เทคโนโลยีมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการฉายรังสีวัสดุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทางชีวภาพ และทางกายภาพ เพื่อประโยชน์ในด้านการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุการกำจัดจุลินทรีย์บางชนิดในอาหาร เช่น การฉายรังสีอาหารและผลิตผลการเกษตรที่สำคัญ เช่น คือ เครื่องเทศ สมุนไพร ฝรั่ง ผลไม้กุ้งแช่แข็ง หอมหัวใหญ่ และ กระเทียมด้วย ^{60}Co หรือใช้รังสีแกมมาหรืออิเล็กตรอน เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา ในการผลิตสารพวกโพลิเมอร์ต่าง ๆ เช่น การฉายรังสีไม้ให้มีความแข็งมากขึ้น การฉายรังสีน้ำยางธรรมชาติที่ผสมกับสารเคมีเพื่อให้มีการจับตัวกันของโพลิเมอร์เป็นแผ่นยาง เป็นต้น นอกจากนั้นสามารถใช้รังสีในด้านการตรวจวัดและควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้รังสีแกมมาเพื่อวัดระดับของไหลหรือสารเคมีในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ การวัดระดับเศษไม้ในหม้อนึ่งเพื่อการผลิตไม้อัดแผ่นเรียบ ฯลฯ

2.2.2.3 แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในทางเกษตร

มีการนำประโยชน์ของเทคโนโลยีนิวเคลียร์มาส่งเสริมกิจการเกษตร เพื่อเพิ่มผลผลิต เพิ่มคุณภาพ และการรักษาสิ่งแวดล้อม เช่นการปรุงพันธุ์พืชโดยใช้รังสีแกมมาจาก ^{60}Co ให้ได้พันธุ์ใหม่ การกำจัดแมลงศัตรูพืชโดยการทำหมัน (Sterile Insect Technique) การถนอมอาหาร (Food Preservation) เช่น ยับยั้งการงอกชะลอการสุก เป็นต้น

2.2.2.4 ระเบิดนิวเคลียร์

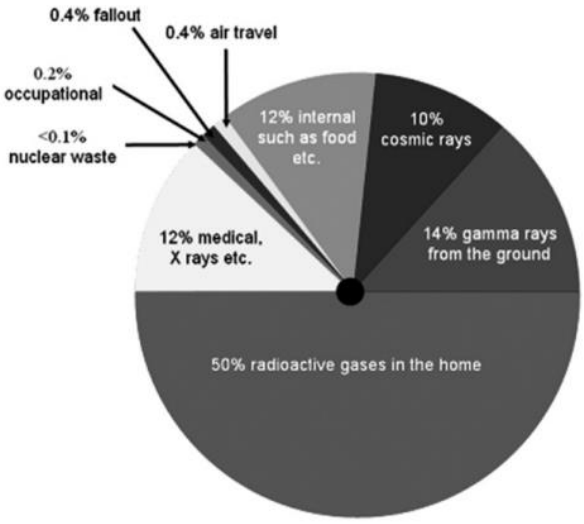
จากการใช้ระเบิดนิวเคลียในสงครามโลกครั้งที่ 2 หลังจากนั้นยังมีการทดลองระเบิดในบรรยากาศอีกหลายครั้ง จนกระทั่งมีการลงนามยุติการทดลองระเบิดในบรรยากาศ แต่สารกัมมันตรังสีที่ตกค้างอยู่และมีครึ่งชีวิตยาวจะคงมีผลอยู่ แม้ว่าจะลดลงไปมากแล้ว

2.2.2.5 การผลิตพลังงานโดยนิวเคลียร์

ในการนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ การสำรวจแหล่งแร่ การทำเหมือง การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง และการจัดการกากที่เหลือ

2.2.2.6 แหล่งกำหนดรังสีจากวัสดุก่อสร้าง

เมื่อดิน หิน และแร่ธาตุ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ถูกรวบรวมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทั่วไป เช่น อิฐแดง อิฐ ซีเมนต์ ถ่านอัดแท่ง เคาน์เตอร์ที่ทำจากหินแกรนิต และกระเบื้อง ก็จะมีสารกัมมันตรังสีปะปนอยู่ในปริมาณสูง เช่น ^{238}U



ภาพที่ 2.6 รายละเอียดของแหล่งที่มาต่างๆ ของรังสีจากธรรมชาติ
ที่มา : Ian W. Donald. (2010)

2.3 ประโยชน์ของรังสี

รังสีสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้า ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร และสามารถใช้ในการประยุกต์ทางธรณีวิทยา เช่น การทำนายแผ่นดินไหวหรือรอยเลื่อน และการสำรวจแร่ยูเรเนียม ได้ดังนี้

2.3.1. ด้านอุตสาหกรรม

โดยที่สามารถนำไปตรวจจับควันไฟ วัดความหนาของกระดาษ พลาสติก ยาง การขุดเจาะน้ำมัน เพื่อควบคุมการไหลของน้ำมันในท่อส่ง โดยการตรวจสอบรอยเชื่อม ตรวจสอบวัตถุระเบิด อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว อัญมณีและเครื่องประดับ

2.3.2 ด้านการแทพย์

โดยการใช้รังสีเอ็กซ์ในการถ่ายภาพบริเวณช่วงอก 3 มิติ ทำให้เห็นอวัยวะภายใน เช่น กระดูก ปอด หัวใจ โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณและสร้างภาพสามมิติ เรียกว่า การเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือ ซีทีสแกน นอกจากนี้รังสีแกรมมานำมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็งบางชนิด เช่น ^{60}CO และ ^{137}Cs

2.3.3 ด้านการเกษตร

ด้วยการใช้รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาในการถนอมอาหาร โดยรังสีจะเข้าไปทำลายสารปนเปื้อนในอาหาร ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในพืชและผัก นำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฉายรังสีแหนมเนื้อหมู เนื้อวัว และสัตว์ปีก การฉายรังสีมะละกอเพื่อชะลอความสุก (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ)

2.4 โทษของรังสี

เมื่อมนุษย์ได้รับรังสีในปริมาณมากเกินไป รังสีจะเข้าไปทำลายระบบต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น ระบบสร้างเม็ดเลือด ระบบทางเดินอาหาร ระบบผิวหนังและเส้นผม ระบบประสาท และระบบสืบพันธุ์ ทำให้เกิดอันตรายได้ดังนี้

2.4.1. เม็ดเลือด

โดยที่เซลล์ที่ไวต่อรังสีมากที่สุด คือ เม็ดเลือดขาว จะลดจะลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากระบบการสร้างเลือดถูกทำลายโดยรังสี ได้แก่ การตกเลือด และภาวะเลือดจาง

2.4.2. ระบบทางเดินอาหาร

โดยที่ทำลายเนื้อเยื่อบุผิวและเยื่อเมือก ซึ่งทำให้เกิดแผลและติดเชื้อจากแบคทีเรีย เกิดอาการอาเจียน เบื่ออาหาร คลื่นไส้และท้องร่วง

2.4.3 ระบบผิวหนังและเส้นผม

ทำให้ผิวหนังเป็นผื่นแดง หากได้รับรังสีปริมาณสูงจะทำให้เกิดรอยไหม้พุพองและผิวหนังลอกหลุด ติดเชื้อได้ง่าย และผมหลุดร่วง

2.4.4 ระบบประสาท

จะทำให้เซลล์ประสาทถูกทำลาย และไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ เนื่องจากระบบสร้างเลือดและระบบทางเดินอาหารร่วมกัน

2.4.5 ระบบสืบพันธุ์

จะมีผลทำให้จำนวนของอสุจิและเซลล์สร้างตัวอสุจิลดลง จึงอาจทำให้เป็นหมันได้ในเวลา

2.5 ก๊าซเรดอน

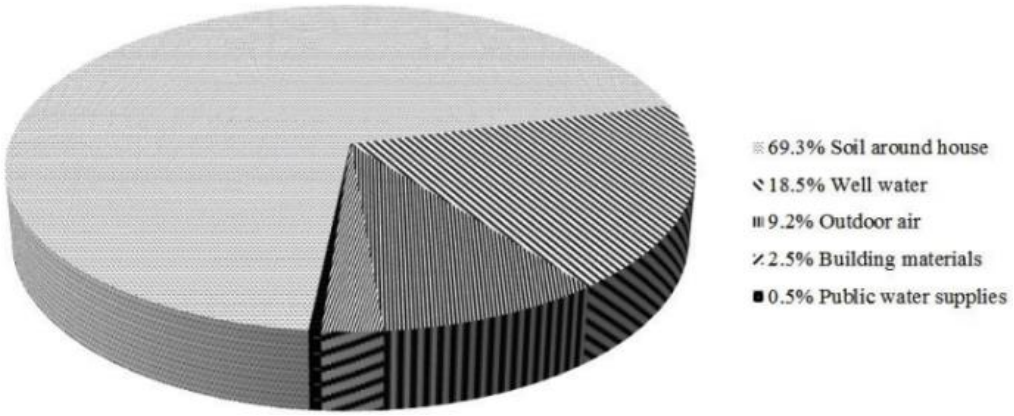
เรดอน (^{222}Rn) เป็นก๊าซธรรมชาติอยู่ในอนุกรมยูเรเนียม เป็นก๊าซที่ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น ที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน ถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2442 โดยมีการค้นพบไอโซโทปของก๊าซเรดอนอีก 2 ไอโซโทป คือ ได้แก่ ก๊าซแอคตินอน (^{220}Rn) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมแอคติเนียม เมื่อสลายตัวให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที และก๊าซโทรอน (^{219}Rn) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมทอเรียม เมื่อสลายตัวจะให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดจะมีปริมาณน้อย เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นมาก แพร่กระจายไปได้ไม่ไกลก็สลายตัวหมด เมื่อเทียบกับก๊าซเรดอน (Gordon et al., 2018) จึงมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์มากกว่า โดยที่ก๊าซเรดอน (^{222}Rn) มีสถานะเป็นก๊าซสามารถแพร่จากพื้นดินสู่บรรยากาศได้ ซึ่งมาจากการสลายตัวของไอโซโทปของยูเรเนียม ได้แก่ ^{238}U, ^{236}U, ^{235}U (Degu Belete & Alemu Anteneh, 2021) พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในดิน หิน ทราย และน้ำบาดาล และวัสดุก่อสร้าง (Soniya et al., 2021)

2.5.1 ก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง

วัสดุก่อสร้างคือการก่อสร้างที่ใช้วัสดุหลากหลายชนิดตั้งแต่ดินจนถึงโลหะ ในปัจจุบันนิยมใช้คอนกรีต เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่จะติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ซึ่งอาคารที่ทำด้วยคอนกรีตที่ปิดทึบส่งผลให้เกิดการสะสมของก๊าซเรดอนในปริมาณสูง (Abbasi, 2017) โดยวัสดุก่อสร้างที่ใช้ทำคอนกรีต ประกอบด้วย หิน นำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้ทำคอนกรีต มีคุณสมบัติ ความแข็งแกร่งสูง ทนต่อแรงอัดได้มาก โดยส่วนใหญ่หินที่ใช้นำมาก่อสร้างคือหินปูน รวมถึงหินที่ใช้นำมาตกแต่งภายในคือหินแกรนิต ซึ่งเป็นหินอัคนีที่เกิดจากการตกผลึกของหินหนืดหรือแมกมา ในประเทศไทยมักพบหินแกรนิตในบริเวณตามแนวทิวเขาขนาดใหญ่ วัสดุที่สองคือดิน เป็นวัสดุที่เกิดจากการผุพังของเปลือกโลกที่เป็นหินและแร่ต่าง ๆ ผสมคลุกเคล้ากับอินทรียวัตถุที่ปกคลุมผิวโลกอยู่ที่ชั้นบาง ๆ โดยจะแบ่งดินออกตามสภาพภูมิประเทศ หากดินที่นำมาใช้ในวัสดุก่อสร้างปะปนธาตุยูเรเนียม ทอเรียม ในปริมาณมากกว่าปกติ จะเกิดการสะสมของก๊าซเรดอนภายในอาคาร ต่อมาวัสดุที่สามคือทราย เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ ประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เกินกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยทรายบริเวณที่ราบลุ่มของแม่น้ำมักจะนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุก่อสร้าง (ทิพวรรณ, 2560)

เมื่อนำ หิน ดิน และทราย มาใช้ในการสร้างอาคาร วัสดุเหล่านี้จะปล่อยก๊าซเรดอนออกมา (Gopalakrishnan และ Jeyanthi, 2022) ซึ่งพบว่าวัสดุก่อสร้างสามารถปลดปล่อยก๊าซเรดอนออกมาในที่พักอาศัย 2.5 % ในขณะที่สภาพทางธรณีวิทยาสามารถปลดปล่อยได้สูงถึง 69.3% ดังภาพที่ 2.7 (Abbasi, 2017) โดยความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดมะเร็งปอด (US National Academy of Sciences, NAS-BEIR VI, 1998) ซึ่งก๊าซเรดอนถูกจัดให้เป็นสาร

กัมมันตรังสีที่สำคัญที่สุด ที่หลายประเทศกำลังให้ความสนใจ เนื่องจากพบว่าก๊าซเรดอนสามารถก่อให้เกิดมะเร็งปอดในมนุษย์มากเป็นอันดับสองรองจากบุหรี่ (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, 2562)

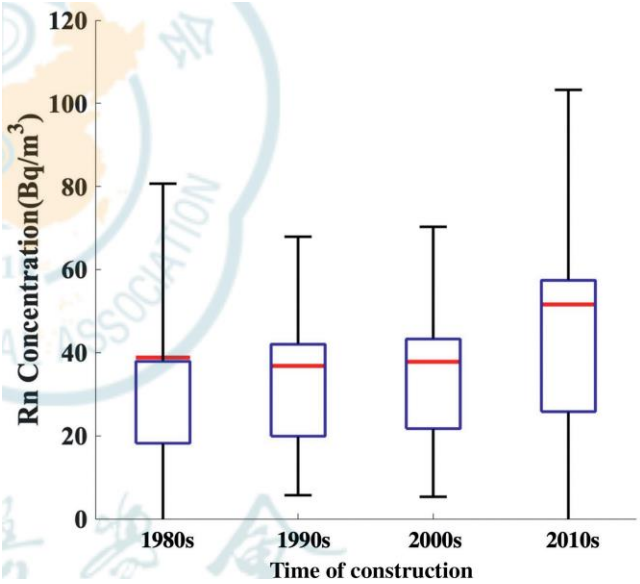


ภาพที่ 2.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซเรดอนในที่พักอาศัย
ที่มา Adrović (2017)

โดยมีงานวิจัยในหลายประเทศที่ได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้างที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น Amin (2015) ได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างในอาคาร บริเวณพื้นที่ตอนใต้ของประเทศซาอุดิอาระเบีย โดยใช้แผ่นฟิล์ม CR-39 ผลการวิจัยพบว่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมีค่าเฉลี่ย 83.4±2.9 Bqm^{-3} โดยค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจะสูงหากมีส่วนผสมของวัสดุก่อสร้างประเภททราย อิฐบล็อก และซีเมนต์ Avramović และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้างที่พบได้ทั่วไปในประเทศเซอร์เบีย โดยวัดค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ได้แก่ ^{226}Ra และ ^{232}Th เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นที่สลายตัวเป็นก๊าซเรดอน และ โทรอน โดยนำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างไปบดให้ละเอียดและทำให้แห้ง โดยอบที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวัดค่าด้วยวิธีแกมมาสเปกโตรเมทรี โดยใช้หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) พบว่าค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{26}Ra และ ^{232}Th ไม่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง และ Ba และคณะ (2021) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในตัวอย่างดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับสร้างบ้านเรือนเพื่ออยู่อาศัย และวัดปริมาณ ^{222}Rn ภายในอาคาร ในเมืองโฮจิมินห์ซ ประเทศเวียดนาม เพื่อประเมินปริมาณรังสีที่มีผลต่อความเสี่ยงที่จะเกิดโรคมะเร็งของประชาชากร พบว่าดินที่นำมาใช้สร้างที่อยู่อาศัยของประชากร ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน

นอกจากนั้นในหลายประเทศมีการศึกษาอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน เช่น Cosma และคณะ (2013) ได้ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในประเทศโรมาเนีย พบว่าก๊าซเรดอนในดินและวัสดุ

ก่อสร้างเป็นแหล่งที่มาของการปลดปล่อยก๊าซเรดอนภายในอาคาร Khalid และคณะ (2014) ใช้เครื่องตรวจจับเรดอนแบบต่อเนื่องแบบกระจายโฟโตไดโอด จำนวน 4 ตัวอย่าง ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาความเข้มข้นของเรดอนจากตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐบล็อก อิฐดินแดง กรวดรวม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 396 Bq/m^3, 192 Bq/m^3, 176 Bq/m^3 และ 28 Bq/m^3 ซึ่งพบว่าอิฐบล็อกมีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงสุด ทำมาจากหินแกรนิต และเป็นที่ทราบกันดีว่าหินแกรนิตมีปริมาณ ^{228}U สูง และสลายตัวให้กับ ^{226}Ra ที่ก่อให้เกิดก๊าซเรดอน และ Wang และคณะ (2022) ได้สำรวจความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน โดยใช้แผ่นฟิล์มชนิด CR-39 ติดตั้งในบ้านเรือนของประชาชนจำนวน 800 หลังคา จากผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากการสำรวจในบ้านเรือน มีค่าเฉลี่ย 42.0±13.7 Bq/m^3 โดยพบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนค่าสูงในอาคารที่มีลักษณะเป็นตึกสูงที่ถูกกสร้างขึ้นในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบระบายอากาศในอาคาร นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงในวัสดุก่อสร้างถือเป็นสาเหตุสำคัญ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม



ภาพที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นขอเรดอนเฉลี่ยต่อปีที่อยู่อาศัยที่สร้างขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ
ที่มา Wang และคณะ (2022)

และในหลายประเทศมีการศึกษาปริมาณความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยของก๊าซเรดอนในหิน ดิน และทราย ที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น Yousef และคณะ (2019) ประเมินความเข้มข้นก๊าซเรดอนในตัวอย่างหินแกรนิต บริเวณทะเลทรายตะวันออกเฉียงใต้ ของประเทศอียิปต์ โดยใช้แผ่นเซลลูโลสไนเตรต (LR-115 type II) เป็นตัวบันทึกอนุภาคแอลฟาที่แผ่ออกมาจากการสลายตัวของก๊าซเรดอน จำนวน 43 ตัวอย่าง พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนของตัวอย่างสูงกว่าขีดจำกัดโลกที่แนะนำโดย ICRP สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำฐานข้อมูลปริมาณกัมมันตรังสีในตัวอย่างหินแกรนิตได้ Le Roux และคณะ (2019) ได้ศึกษาอิทธิพลของหินแกรนิตที่มีผลต่อความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารที่อยู่อาศัยของประชาชนในเมือง Vredenburg และ Saldanha ซึ่งตั้งอยู่บนคาบสมุทรชายฝั่งตะวันตกของแอฟริกาใต้ โดยพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นเนินเขาหินแกรนิต พบว่า เมือง Vredenburg มีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคาร สูงกว่า เมือง Saldanha เนื่องจากบ้านเรือนของประชาชนในเมือง Vredenburg ตั้งอยู่บนเนินเขาหินแกรนิตขนาดใหญ่ และมีลักษณะบ้านเรือนมีระบบระบายอากาศน้อย ทำให้การถ่ายเทอากาศเพื่อลดการสะสมของก๊าซเรดอนในอาคารน้อย ซึ่งแตกต่างจากลักษณะบ้านเรือนในเมือง Saldanha ที่มีช่องระบายอากาศ ทำให้การไหลของอากาศมีความสม่ำเสมอซึ่งช่วยลดการสะสมความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในบ้านเรือน Abd El Rahman et al, (2022) ได้ศึกษาค่ากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติและผลกระทบอันตรายจากรังสีจากหินแกรนิตในประเทศอียิปต์ โดยใช้หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ผลการวิจัยแสดงความเข้มข้นของยูเรเนียม ^{238}U, ^{232}Th และ ^{40}K มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 193 ± 268, 63 ± 29 และ 1,034 ± 382 Bq/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก ในการประเมินความเสี่ยงที่ประชาชนจะได้รับอันตรายจากสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างหินแกรนิตที่เกิดขึ้น พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) มีค่า 362 Bq kg^{-1} ส่วนปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D_{air}) มีค่า 169.2 nGy/h ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กำหนดโดย UNSCEAR, 2008 คือ 59 nGy/h แสดงว่าให้เห็นว่าหินแกรนิตในพื้นที่ของประเทศอียิปต์ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐาน ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปีมีค่า 0.21 ± 0.17 mSv ซึ่งสูงมีค่าสูงกว่าขีดจำกัดที่แนะ ที่กำหนดโดย UNSCEAR, 2008 คือ 0.07 mSv เช่นเดียวกับปริมาณรังสีที่ได้รับจากในบ้านมีค่า 0.83 ± 0.67 mSv ซึ่งการสัมผัสสารกัมมันตรังสีเหล่านี้เป็นระยะเวลานานอาจทำให้เนื้อเยื่อในร่างกายเสื่อม เกิดโรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ และอาจส่งผลกระทบต่อกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) ในยีนได้ ปริมาณรังสีสมมูลประจำปี (AGDE) มีค่า 1.18 ± 0.92 mSv ซึ่งสูงกว่าขีดจำกัดของ UNSCEAR, 2008 ที่กำหนดไว้ที่ 0.3 mSv y^{-1} ถึง 4 เท่า จึงทำให้เห็นว่าหินแกรนิตในบริเวณที่สำรวจไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) มีค่า <1 ส่วนค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รังสีจากภายในร่างกาย (H_{in}) > 1 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีผลกระทบต่อสุขภาพประชาชน ที่เนื่องจากมีดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีที่สูงขึ้น นอกจากนี้ ค่า ELCR ของหินแกรนิตในพื้นที่ที่ศึกษาแสดงช่วง 0.1 ถึง 4.6 โดย

มีค่าเฉลี่ย 0.7 ซึ่งมากกว่าขีดจำกัดสูงสุด 0.29 mSv/y ถึง 2 เท่า แสดงให้เห็นว่าการสัมผัสกับหินแกรนิตทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต แสดงดังตารางที่ 2.6 โดยมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ทำให้เสี่ยงมะเร็งตลอดชีวิต จากการสำรวจทางสถิติพบว่าหินแกรนิตที่ศึกษาไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านการก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน อาจก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพ จนถึงระดับกัมมันตภาพรังสีซึ่งเกินขีดจำกัดที่แนะนำ

ตารางที่ 2.6 สรุปค่าสถิติพื้นฐานของหินแกรนิตของประเทศอียิปต์

Variables	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{in}	H_{ex}	I_γ	D_{air} nGy/h	AED_{out} (mSv)	AED_{in} (mSv)	AGDE (mSv)	ELCR (Sv/y)
N	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
Mean	193	63	1034	362	1.50	0.98	1.30	169.2	0.21	0.83	1.18	0.0007
SD	268	29	382	298.21	1.52	0.81	1.01	137	0.17	0.67	0.92	0.0006
Min	22.23	9.74	125.20	65.09	0.24	0.18	0.25	31.56	0.04	0.15	0.23	0.0001
Max	2099.5	182.7	1658.9	2351.01	12.03	6.35	7.89	1078	1.32	5.29	7.24	0.0046
Skew	4.19	0.77	-0.46	3.41	3.82	3.41	3.25	3.37	3.37	3.37	3.27	3.37
Kurtosis	22.15	2.69	-1.04	16.79	19.57	16.8	15.68	16.45	16.45	16.45	15.81	16.45

ที่มา : Bahaa M. Emad et.al., 2022

2.5.2 ก๊าซเรดอนในอากาศ

ในปี 1990 มีการค้นพบก๊าซเรดอนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ (Marvin Wilkening, 1981) ซึ่งก๊าซเรดอนสามารถพบได้ทุกที่ในบรรยากาศและละอองที่ลอยในอากาศ (Degu Belete & Alemu Anteneh, 2021) ก๊าซเรดอนสามารถแทรกตัวผ่านพื้นดินเข้ามาในตัวบ้านโดยตรงหรือผ่านทางท่อ รูเปิดต่าง ๆ และรอยแตกร้าว ส่วนน้อยมาจากผนังอาคารที่สร้างจากหินหรือทรายที่มีแร่เรเดียมปนเปื้อนอยู่ รวมถึงมาจากน้ำบาดาลได้ด้วย ในสหรัฐอเมริกาพบว่าบ้าน 1 ในทุก 15 หลัง มีความเข้มข้นก๊าซเรดอนสูงกว่าอากาศที่อยู่ภายนอกอาคารหรือบริเวณอากาศด้านนอกเฉลี่ยรายปีประมาณ 10 Bq/m^3 เนื่องจากก๊าซเรดอนถูกย่อยสลายไปอย่างรวดเร็วในบรรยากาศ (Lorenzo-Gonzalez et al., 2021) ดังนั้นการระบายอากาศที่ดี ควรเปิดประตูหน้าต่างให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก และมีการติดพัดลมดูดอากาศเพื่อลดปริมาณก๊าซเรดอนในบ้านและอาคารอย่างง่าย ๆ

2.5.3 ก๊าซเรดอนกับโรคมะเร็ง

โดยในปี 1998 องค์การวิจัยโรคมะเร็งระหว่างประเทศ กำหนดให้ก๊าซเรดอนเป็นสารก่อมะเร็งในปอดของมนุษย์ มีข้อมูลการวิจัยจากการทดลองในสัตว์และการศึกษาทางระบาดวิทยาของคนงานเหมืองใต้ดินและข้อมูลปริมาณก๊าซเรดอนทำให้ประชากรทั่วไปเสี่ยงเป็นมะเร็งปอด (Abo-Elmagd et al., 2018) โดยที่ก๊าซเรดอน (^{222}Rn) อยู่ในตระกูลกัมมันตรังสี เป็นก๊าซที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพอย่างร้ายแรง เนื่องมาจากผลการก่อโรคมะเร็งมีปริมาณก๊าซเรดอน 50% จากรายงานขององค์การอนามัยโลกต่อการได้รับรังสีจากมนุษย์ ที่เกิดจากการแผ่รังสีไอออไนซ์ที่เป็นอันตรายต่อร่างการมนุษย์ ประมาณ 55% (Degu Belete & Alemu Anteneh, 2021)

ก๊าซเรดอนจะปล่อยอนุภาคแอลฟาที่แตกตัวเป็นไอออน ได้แก่ ^{212}Po และ ^{214}PO เมื่อมนุษย์สูดดมหรือหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการสะสมอยู่บริเวณเยื่อบุผิวของหลอดลมและเข้าไปทำลาย DNA ในเซลล์ปอด ส่งผลทำให้เกิดมะเร็งปอดเมื่อได้รับก๊าซเรดอนเป็นเวลานานและสามารถเห็นเซลล์ได้จากการฉายรังสี (Singh et al., 2015) และพบว่าการได้รับหรือสัมผัสเป็นระยะเวลานานมีแนวโน้มเป็นมะเร็งปอดมากกว่าผู้สูบบุหรี่ (Lorenzo-Gonzalez et al., 2021) โดยที่ก๊าซเรดอนเป็นสาเหตุสำคัญอันดับสองของโรคมะเร็งปอดรองจากบุหรี่ (Gaskin et al., 2018)

และเนื่องจากก๊าซเรดอนเป็นสาเหตุหนึ่งของการเป็นโรคมะเร็งปอด สถิติการเป็นโรคมะเร็งปอดของประชากรในจังหวัดยะลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2565 พบผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งปอดทั้งหมด 671 คน และมีผู้เสียชีวิตจำนวน 82 คน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สถิติผู้ป่วยโรคมะเร็งปอดของประชากรจังหวัดยะลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2565

ปี พ.ศ.	พื้นที่จังหวัดยะลา															
	อ.เมือง		อ.เบตง		อ.บันนังสตา		อ.ธารโต		อ.ยะหา		อ.รามัน		อ.กาบัง		อ.กรงปินัง	
	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต	ผู้ป่วย	เสียชีวิต
2557	45	9	1	-	9	2	4	1	2	-	8	1	4	1	1	-
2558	35	9	-	-	4	1	3	1	5	2	5	-	2	1	6	-
2559	31	4	-	-	8	1	-	-	4	-	5	1	1	-	4	1
2560	41	1	-	-	2	-	3	-	5	1	10	1	2	-	2	-
2561	37	4	1	-	2	1	1	-	3	1	11	1	-	-	5	-
2562	31	7	2	-	-	-	11	1	3	-	15	2	2	-	3	-
2563	52	6	7	-	3	-	7	-	4	-	12	2	1	-	-	-
2564	77	7	6	2	4	1	2	-	9	-	11	-	-	-	2	-
2565	55	6	6	1	4	-	7	2	3	-	18	-	1	-	1	-
รวม	404	53	23	3	36	6	38	5	38	4	95	8	13	2	24	1

ที่มา : งานเวชระเบียนแบะสถิติ โรงพยาบาลยะลา

2.5.4 ระดับอ้างอิงก๊าซเรดอน

เนื่องจากก๊าซเรดอนถือเป็นสารรังสีที่อันตรายชนิดหนึ่ง และถูกสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก เนื่องจากส่งผลกระทบด้านสุขภาพของประชาชนจึงทำให้มีการศึกษาและกำหนดค่ามาตรฐานที่อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการป้องกันรังสี โดย UNSCEAR, (2000) ได้กำหนดระดับที่รับได้ไว้ ดังนี้ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) เป็นค่าดัชนีแสดงความเป็นอันตรายทางรังสี มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq/kg ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก และ ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน เป็นปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีที่อยู่ในธรรมชาติหากค่า มีค่าไม่ควรเกิน 1 อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) เป็นค่าความเข้มรังสีแกมมาในอากาศ ซึ่งเป็นรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มาจากพื้นโลก สำหรับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h และ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีซึ่งไม่ควรเกิน 0.48 mSv/y นอกจากนั้นค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) ที่เกิดจากการได้รับรังสีแกมมา ซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลก มีค่าเท่ากับ 0.29 mSv/y และ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ US EPA ได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารโดยเฉลี่ยไว้ที่ 148 Bq/m^3 หากตรวจพบว่าอาคารใดมีค่าเกินจากนี้จะต้องรีบหาวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนลงให้ต่ำกว่าค่าดังกล่าวโดยเร็ว

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสารกัมมันตรังสีและก๊าซเรดอน

2.6.1 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เป็นหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ สร้างจากผลึกของเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง โดยหัววัดจะติดอยู่ที่ถังไนโตรเจนเหลว เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้ามาในหัววัด รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้กับผลึกของเจอร์มาเนียม โดยพลังงานที่เกิดขึ้น คืออิเล็กตรอน และโฮล ในจำนวนเท่า ๆ กัน โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังขั้วศักย์ไฟฟ้าบวก และโฮลวิ่งไปยังศักย์ไฟฟ้าลบ ซึ่งความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อต่อหัววัดเข้ากับระบบขยายสัญญาณ และอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง ปริมาณกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างจะแสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา (ธวัช, 2541)

โดยระบบวัดรังสีประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.6.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Power Supplies : HVS)

ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากกระแสสลับ 222 V ให้เป็นกระแสตรง ที่สามารถปรับค่าได้ และต้องมีความเสถียรภาพในการรักษาไฟฟ้าขาออก (Output) ให้คงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อม

2.6.1.2 ภาคขยายส่วนหน้า (Preamplifier)

ทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดรังสีแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุ

2.6.1.3 ภาคขยายส่วนหลัก (Amplifier)

ทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์ (Pulse) จากภาคขยายส่วนหน้า มาปรับแต่งรูปสัญญาณและขยายขนาดสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์

2.6.1.4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer)

ทำหน้าที่วิเคราะห์ความสูงของสัญญาณหลายช่อง โดยเก็บข้อมูลจำนวนนับรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ที่ตกกระทบหัววัด โดยเลขช่อง (Chanel Number) จะแทนพลังงานของรังสี จำนวนนับที่ได้ในแต่ละช่องจะแทนปริมาณของรังสี เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องจึงแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีแกมมาจากผลึกได้ทั้งหมด เรียกว่าสเปกตรัมของรังสีแกมมา (Gamma Spectrum) โดยสเปกตรัมของรังสีแกมมา จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิด และกัมมันตภาพของสารรังสีที่ตรวจวัด

2.6.2 อุปกรณ์บันทึกรอย (Alpha Track - etch Film**)**

เป็นการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน จากรอยอนุภาคแอลฟาบนแผ่นฟิล์ม (Alpha Track- etch film) โดยแผ่นฟิล์มที่ใช้เป็นแผ่นฟิล์มชนิด CR-39 (Poly Allyl Diglycol Carbonate, PADC) บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็ก นำไปวางไว้ในบริเวณที่ต้องการวัดความเข้มข้นของเรดอน เมื่ออนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซเรดอนในอากาศวิ่งชนแผ่นฟิล์ม ทำให้แผ่นฟิล์มเกิดรอย จากนั้นจึงนำฟิล์มมาเข้ากระบวนการกัดรอย (Etching) เพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนับจำนวนรอยของอนุภาคแอลฟาบนแผ่นฟิล์ม แล้วนำมาปรับเทียบค่ากลับไปเป็นค่าความแรงทางรังสี เพื่อให้ได้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนออกมา

2.7 สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ

2.7.1 การวิเคราะห์ค่ากัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง

2.7.1.1 ค่าของกัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง

สามารถหาค่าของกัมมันตภาพรังสีของตัวอย่างได้โดยใช้สมการที่ (2.1) (Lolila & Mazunga, 2023; ปิยะ และคณะ 2021) โดย ^{226}Ra พลังงาน 609.6 keV, ^{232}Th พลังงาน 911.20 keV และ ^{40}K พลังงาน 1460.75 keV

$$A_x = \frac{N_S}{E_{ff} \times P_\gamma \times T \times M_S} \tag{2.1}$$

เมื่อ A_x คือ ค่ากัมมันตรังสีจำเพาะในตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง (Bq/kg)

N_s คือ อัตรานับสุทธิ (Peak Area/Counting Time)

E_{ff} คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (cps/Bq)

P_γ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีรังสีแกมมาออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (%yield)

T คือ เวลาที่นับวัด (s)

M_S คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทำการที่วัดรังสี (kg)

2.7.1.2 การคำนวณหาค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ

1) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Radium Equivalent Activity : Ra_{eq})

เป็นค่าดัชนีแสดงความเป็นอันตรายทางรังสี (Radiation Hazard Index) ชนิดหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ A_{Ra},A_{Th}, และ A_K ซึ่ง สามารถคำนวณให้เป็นค่าเพียงค่าเดียว และ Ra_{eq} มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq/kg (Agbalagba & Onoja, 2011; Júnior et al., 2021; ประสงค์ และคณะ, 2552)

$$Ra_{eq}\,(Bq/kg) = A_{^{226}Ra} + 1.43A_{^{232}Th} + 0.077A_{^{40}K} \tag{2.2}$$

เมื่อ $A_{^{226}Ra}$, $A_{^{232}Th}$ และ $A_{^{40}K}$ คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ตามลำดับ มีหน่วยเป็น Bq/kg

2) ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก (External Hazard Index: H_{ex}) และค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายใน (Internal Hazard Index: H_{in})

เป็นปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีที่อยู่ในธรรมชาติโดยกัมมันตภาพรังสีที่ร่างกายได้รับ ส่วนใหญ่จะเป็นกัมมันตภาพรังสีแกมมา เพราะรังสีแกมมามีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีอื่น ๆ โดย H_{ex} จะประเมินผลกระทบที่มนุษย์ได้รับรังสีเนื่องจากรังสีแกมมาภายนอก และ H_{in} จะประเมินผลกระทบที่มนุษย์ได้จากการสัมผัสก๊าซเรดอนภายในอาคาร (Lolila & Mazunga, 2023) หากค่า $H_{ex} < 1$ และ $H_{in} < 1$ แสดงว่าปริมาณ ดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอกมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ ถ้า $H_{ex} = H_{in} = 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน เท่ากับ 1.5 mGy/y และถ้า $H_{ex} > 1$ และ $H_{in} > 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับอันตรายจากภายนอก หมายความว่าสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ตัวเราไม่ควรนำมาใช้ในการดำเนินชีวิตหรือควรหลีกเลี่ยง (Agbalagba & Onoja, 2011; Lolila & Mazunga, 2023; ประสงค์ และคณะ, 2552, UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$H_{ex} = \frac{A_{^{226}Ra}}{370} + \frac{A_{^{232}Th}}{259} + \frac{A_{^{40}K}}{4810} \tag{2.3}$$

$$H_{in} = \frac{A_{^{226}Ra}}{185} + \frac{A_{^{232}Th}}{259} + \frac{A_{^{40}K}}{4810} \tag{2.4}$$

3) อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed Dose Rates in air: D)

เป็นค่าความเข้มรังสีแกมมาในอากาศ ซึ่งเป็นรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มาจากพื้นโลก ที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน โดยค่า 0.462, 0.604 และ 0.0417 ในสมการ (2.5) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแปลงค่ากัมมันตภาพจำเพาะซึ่งมีหน่วยเป็น Bq/kg เป็นอัตราปริมาณรังสีที่ดูดกลืนอากาศ ของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ตามลำดับ (Lolila & Mazunga, 2023) สำหรับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$D\ (nGy/h) = 0.462A_{^{226}Ra} + 0.604A_{^{232}Th} + 0.0417A_{^{40}K} \tag{2.5}$$

เมื่อ $A_{^{226}Ra}$, $A_{^{232}Th}$ และ $A_{^{40}K}$ คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ตามลำดับ มีหน่วยเป็น Bq/kg

4) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (Annual External Effective Dose Rate: E)

คือปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปี สามารถคำนวณได้จากการแปลงค่าความสัมพันธ์จากค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) เป็นปริมาณรังสียังผลที่บุคคลทั่วไปได้รับ หรือใช้เวลานอกอาคารบ้านเรือนประมาณ 20% ของเวลาทั้งหมดใน 1 ปี (Tufail et al., 2011 และ ประสงค์, 2552) ซึ่งไม่ควรเกิน 0.48 mSv/y (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$\mathbf{E\ (mSv/y)=D\times 8{,}760\times 0.2\times 0.7\times 10^{-6}} \qquad (2.6)$$

เมื่อ D คือ ค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (nGy)

8,760 คือ ค่าปริมาณที่ได้รับรังสีรายปี ($hy^{-1)}$)

0.2 คือ เวลาที่ประชาชนอยู่นอกอาคารบ้านเรือนใน 1 ปี

0.7 คือ ค่าปริมาณรังสียังผลที่บุคคลทั่วไปได้รับภายนอกอาคาร ($SvGy^{-1}$)

5) ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (Excess Lifetime Cancer Risk : ELCR)

ในการคำนวณความเสี่ยงมะเร็งตลอดอายุขัยที่เกิดจากรังสีแกมมา คำนวณได้จากสมการที่ (2.7) (Mirdoraghi et al., 2018) สำหรับความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต ซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลก มีค่าเท่ากับ 0.29 mSv/y (Taskin et al., 2009)

$$\mathbf{ELCR = E\times LF\times RF} \qquad (2.7)$$

เมื่อ E คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (mSv/y)

LF คือ อายุขัยเฉลี่ยของมนุษย์ (70 ปี)

RF คือ ปัจจัยเสี่ยงเป็นความเสี่ยงมะเร็งร้ายแรงต่อ Sievert กำหนดเป็น 0.05 โดย (ICRP, 2012)

2.7.1.3 การคำนวณหาค่าต่ำสุดของเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ (Low Limit of Detection : LLD) และค่ากัมมันตภาพต่ำสุดของระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา (Minimal Detection Activity : MDA) ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเจอมาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

ค่าต่ำสุดของเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ (Low Limit of Detection : LLD) เป็นค่าที่คำนวณได้ก่อนการวัด เพื่อดูปริมาณสารตัวอย่างที่มีค่าต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถวัดได้ ภายในเวลาที่กำหนด

$$LLD \approx (k_{\alpha}+k_{\beta})S_0 \qquad (2.8)$$

เมื่อ k_{α} คือ ค่าคงที่ Upper Percentile ของ Standardized Normal

k_{β} คือ ค่าคงที่ที่แน่ใจว่ามีปริมาณสารกัมมันตรังสีปราฏอยู่

S_0 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับวัดสุทธิ

กำหนดให้ $k_{\alpha} = k_{\beta}$

ดังนั้น $$LLD = 2k_{\alpha}S_0$$

เมื่อ $$S_0 = \sqrt{S_G^2+S_B^2}$$

เมื่อ S_G คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการนับวัดรวม (cps)

S_B คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการนับวัดรังสีภูมิหลัง (cps)

ในกรณีที่สารตัวอย่างที่ต้องการวัดมีอัตราการนับวัดน้อยมากหรือมีค่าเป็นศูนย์ $S_G = S_B$

จะได้ $$S_0 = \sqrt{2S_B^2} = S_B\sqrt{2}$$

$$LLD = 2\sqrt{2}k_{\alpha}S_B$$

เมื่อ k_{α} คือ 1.64 (95% ระดับความเชื่อมั่นว่ามีปริมาณสารกัมมันตรังสี)

และ $$S_B = \sqrt{\frac{R_B}{t_c}}$$

เมื่อ R_B คือ อัตราการนับในธรรมชาติ (Background Count Rate)

t_c คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัด

ดังนั้น $$LLD = (4.639)\, S_B \qquad (2.9)$$

จากนั้นนำค่าต่ำสุดของเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ (LLD) มาคำนวณหาค่ากัมมันตภาพต่ำสุดในตัวอย่างที่ เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเจอมาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ตรวจวัดได้ (Minimal Detection Activity : MDA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Gordon, 2008)

$$MDA = \frac{LLD}{(\%E_{ff})(\%a)(mass)}\ (Bg/kg) \qquad (2.10)$$

เมื่อ $\%E_{ff}$ คือ ประสิทธิภาพการนับวัด

$\%\, a$ คือ โอกาสการสลายตัวของรังสีแกมมา

$mass$ คือ น้ำหนักขอตัวอย่าง (Kg)

2.7.1.4 ค่าสถิติที่ใช้ในการวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงออกในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\pm 2\sigma$) โดย σ คำนวณได้จากสมการที่ (2.11) (Faisal et al., 2014)

$$\sigma = \left[\frac{N_s}{T_s^2} + \frac{N_b}{T_b^2} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.11)$$

เมื่อ N_s คือค่าที่วัดได้ในเวลา T_s

N_b คือค่าพื้นหลังที่วัดในเวลา T_b

2.7.2 การศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร ใช้สมการต่อไปนี้

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{kt} \quad (2.12)$$

เมื่อ ρ คือ Track Density (T·/cm^2)

k คือ Calibration Factor ((Track·m^{-2}) ·m^{-3}·(kBq·hr)$^{-1}$)

t คือ Exposure Time (hr)

จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนแต่ละตำแหน่งมาคำนวณเพื่อศึกษาปริมาณรังสีสมมูล (Annual Effective Dose; DT) จากการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนในอาคารที่อยู่อาศัยนั้น โดยใช้สมการที่ (2.13) (ปัทมา,2564; Sherafat et al., 2019)

$$DT = C_{Rn} \times D \times H \times F \times T \quad (2.13)$$

เมื่อ C_{Rn} คือ ค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอน (Bq/m^3),

D คือ แฟกเตอร์การเปลี่ยนแปลง = 9x10^{-6} mSv/hr per Bq/m^3

H คือ ค่าแฟกเตอร์ในการอยู่อาศัย (Indoor Occupancy Factor= 0.8),

F คือ ค่าแฟกเตอร์สมดุลสำหรับเรดอนในบ้านเรือน (Equilibrium Factor = 0.4)

T คือ เวลาใน 1 ปี (24hr x 365 days = 8760 hr/y)

นำปริมาณรังสีสมมูล (DT) ไปประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (The Excess Life Time Cancer Risk; ELCR) โดยใช้สมการที่ (2.14) (ปัทมา, 2564; ICRP,1990; Sherafat et al., 2019)

$$ELCR = DT \times DL \times RF_{ELCR} \quad (2.14)$$

เมื่อ DT คือ ปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี (mSv/y)

DL คือ ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาของการมีชีวิต (มีค่าประมาณ 70 ปี)

RF_{ELCR} คือ ปัจจัยความเสี่ยง (Risk Factor = 5.5 x 10^{-2} Sv^{-1})

และหาจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (The Lung Cancer Cases Per Year Per Million Person; LCC) จากสมการที่ (2.15) (ปัทมา, 2564; ICRP, 1987; Sherafat et al., 2019)

$$\mathrm{LLC} = \mathrm{DT} \times \mathrm{RF}_{\mathrm{LCC}} \qquad (2.15)$$

เมื่อ DT คือ ปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี (mSv/y)

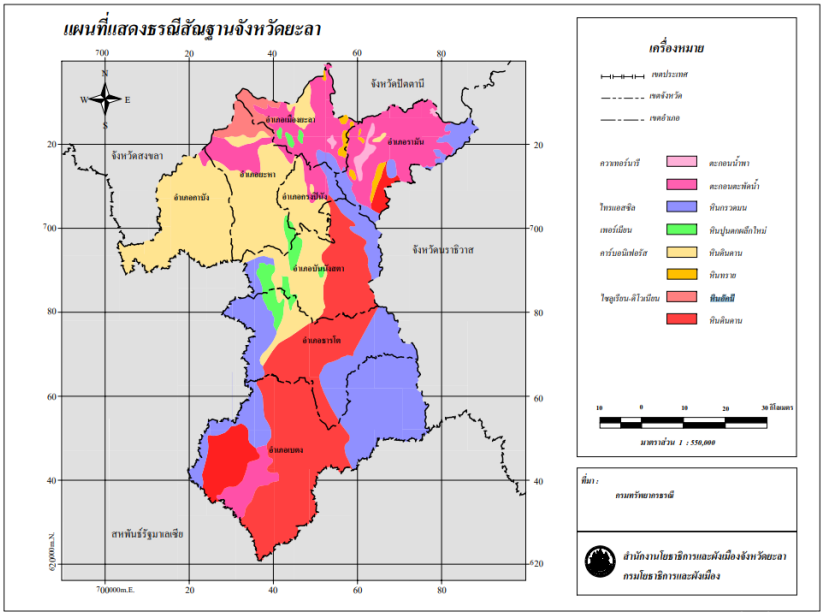
$\mathrm{RF}_{\mathrm{LCC}}$ คือ ปัจจัยความเสี่ยง = $18 \times 10^{-6} \mathrm{mSv}^{-1}$

2.8 พื้นที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย และศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนในอาคารเรียน ในพื้นที่ทางตอนใต้ของจังหวัดยะลา โดยประกอบด้วยอำเภอบันนังสตา (ตำบลบันนังสตา ตำบลตาเนาะปูเต๊ะ ตำบลถ้ำทะลุ ตำบลตลิ่งชัน และตำบลเขื่อนบางลาง) อำเภอธารโต (ตำบลธารโต ตำบลบ้านแหร ตำบลคีรีเขต และตำบลแม่หวาด) และอำเภอเบตง (ตำบลเบตง ตำบลยะรม ตำบลตาเนาะแมเราะ ตำบลอัยเยอร์เวง และตำบลธารน้ำทิพย์) ซึ่งพื้นที่จังหวัดยะลานั้นมีลักษณะทางภูมิประเทศโดยทั่วไปส่วนใหญ่เป็นป่าเขาเนินสูง และภูเขาเตี้ยสลับซับซ้อนจะมีพื้นที่ราบเพียงเล็กน้อย บริเวณตอนเหนือของจังหวัดส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม มีส่วนบริเวณตอนใต้ของจังหวัดเป็นป่าเขาและเนินสูง ปกคลุมไปด้วยป่าไม้ มีเทือกเขาที่สำคัญอยู่ 2 เทือกเขา คือ เทือกเขาสันกาลาคีรี เริ่มจากอำเภอเบตง เป็นแนวยาวกั้นพรมแดนระหว่างประเทศไทย กับประเทศมาเลเซีย และเทือกเขาปิโล ซึ่งเป็นเทือกเขาอยู่ภายในจังหวัด ในเขตตำบลบุดี บันนังสาเรง ของอำเภอเมืองยะลา กิ่งอำเภอกรงปินัง และอำเภอรามัน ส่วนสภาพทางธรณีวิทยานั้น พบว่าธรณีวิทยาจังหวัดยะลา ประกอบด้วยหินตะกอน (Sedimentary Rock) และหินแปร (Metamorphic Rock) แสดงลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาและเนินเขา และมีหินอัคนีแทรกซอนชนิดหินแกรนิต (Intrusive Igneous Rock) ทางด้านทิศเหนือ ตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออก และตะวันตกของพื้นที่ (กรมทรัพยากรธรณ, 2559)

พวงทิพย์ (2545) ได้ศึกษาปริมาณยูเรเนียมในดินพื้นผิว ในพื้นที่จังหวัดยะลา พบว่าพื้นที่จังหวัดยะลามีศักย์ทางเรดอนสูงในบริเวณ อำเภอเบตง อำเภอธารโต พื้นที่บางส่วนของอำเภอบันนังสตา อำเภอเมือง อำเภอยะหา และอำเภอกรงปินัง ประกอบกับไมมูน และคณะ (2555) ได้ศึกษากัมมันตภาพจำเพาะและแผนภาพทางรังสีของ ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน บริเวณจังหวัดยะลา ประเทศไทย โดยใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงและระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี พบว่าในอำเภอบันนังสตา และอำเภอกาบัง จะมีปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะสูงกว่าบริเวณอื่นๆ นอกจากนั้นเดิมในหลายพื้นที่ เช่น ในอำเภอบันนังสตา อำเภอเมืองยะลา อำเภอ

รามัน อำเภอยะหา และอำเภอเบตง มีการทำเหมืองแร่ดีบุกอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในวัสดุก่อสร้างได้แก่ หิน ดิน ทราย บริเวณอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) และวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร เพื่อดูความสัมพันธ์ห่างความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง และในอาคารเรียน เพราะการได้รับก๊าซเรดอนเข้าไปในร่างกายปริมาณมากและเป็นระยะเวลายาวนาน จะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดได้



ภาพที่ 2.9 แสดงธรณีสัณฐานของจังหวัดยะลา ประเทศไทย

ที่มา : ขอมูลสารสนเทศภูมิศาสตรจังหวัดยะลา, กรมทรัพยากรธรณี

บทที่ 3
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบ คือ เก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้างจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หิน ดิน และทราย ที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารเรียน ของอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จำนวน 41 ตำแหน่ง รวมทั้งหมด 123 ตัวอย่าง แล้วนำมาตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ณ ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และนำอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ไปติดตั้งไว้ในห้องเรียนชั้นล่างของอาคารที่ปิดมิดชิด ในอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับพื้น เป็นระยะเวลา 1 เดือน จำนวน 41 โรงเรียน เพื่อศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 ศึกษาปริมาณกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้างวัสดุ

3.1.1.1 ตัวอย่าง หิน ดิน ทราย จากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตงจังหวัดยะลา

3.1.1.2 ถุงซิปล็อคสำหรับใส่ตัวอย่าง

3.1.1.3 ถาดใส่ตัวอย่าง

3.1.1.4 กระปุกพลาสติกทรงกระบอกสำหรับใส่ตัวอย่างที่บดละเอียด

3.1.1.5 ตะแกรงร่อน

3.1.1.6 ตู้อบ

3.1.1.7 เครื่องบดตัวอย่าง

3.1.1.8 เครื่องวัดรังสีแกมมา ด้วยหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง

3.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

3.1.2.1 แผ่นฟิล์ม CR-39

3.1.2.2 กระปุกพลาสติกทรงกระบอก

3.1.2.3 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า

3.1.2.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2.5 ตู้ดูดควัน

3.1.2.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 6.25 N

3.1.2.7 น้ำกลั่น

3.1.2.8 ช้อนตักสารเคมี

3.1.2.9 แท่งแก้วคนสาร

3.1.2.10 บิกเกอร์

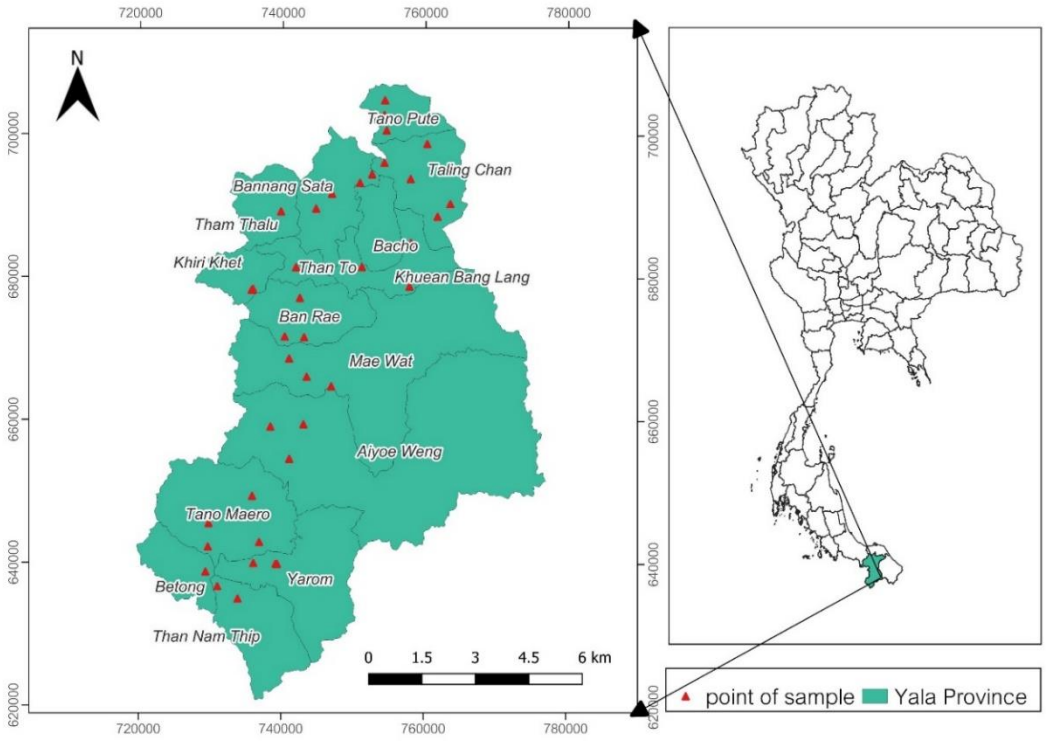
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 ศึกษาสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในวัสดุก่อสร้าง

3.2.1.1 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้างในพื้นที่อำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา

1) วางแผนกำหนดจุดเก็บตัวอย่างในโรงเรียน โดยพิจารณาจากความหนาแน่นของประชากรที่อาศัยอยู่และความกว้างของพื้นที่แต่ละตำบล

2) ลงพื้นที่เก็บตัวอย่างจากวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หิน ดิน ทราย ในโรงเรียน จำนวน 41 โรงเรียน รวมตัวอย่างวัสดุก่อสร้างทั้งหมดจำนวน 123 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.1 แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และบตง จังหวัดยะลา

3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง

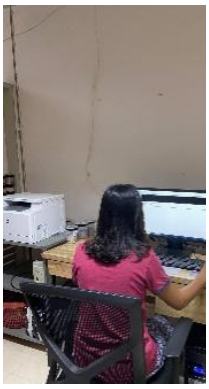
1) นำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างจำนวน 123 ตัวอย่าง มาอบที่อุณหภูมิ 60 ℃ เป็นระยะเวลา 6 hr เพื่อไล่ความชื้น

ภาพที่ 3.2 อบตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง

2) นำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างที่อบแล้ว มาบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 120 μm เพื่อเอาเศษตะกอนต่าง ๆ ออก

3) นำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างที่บดเป็นผงแล้วไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 314.5 g ให้มีขนาดเท่ากับสารมาตรฐานดิน IAEA-375 แล้วบรรจุในกระปุกพลาสติกใส ปิดฝากระปุกให้สนิทโดยใช้เทปพันสายไฟพันรอบรอยต่อระหว่างฝากับตัวกระปุก จากนั้นบันทึกรหัส

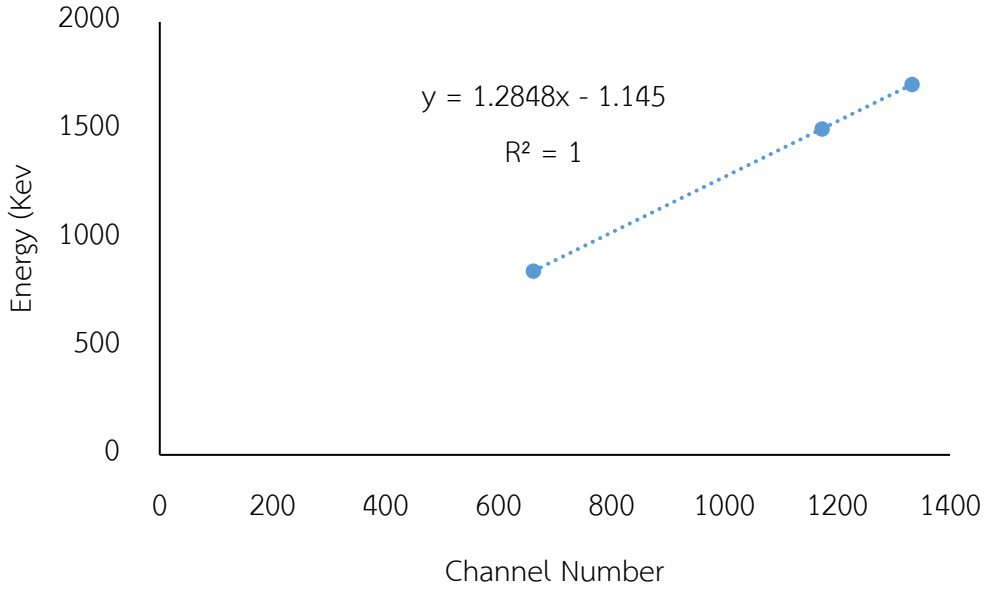
4) วางตัวอย่างไว้ให้ครบ 1 เดือน เพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสีระหว่างก๊าซเรดอนและลูกหลาน



ภาพที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง

3.2.1.3 การวิเคราะห์สารกัมมันตรังสีในวัสดุก่อสร้างโดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

เริ่มต้นปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสี (Energy Calibration) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีมารฐาน (Point Source) ของ ^{137}Cs ที่พลังงาน 661.66 Kev และ ^{60}Co ที่พลังงาน 1173.23 KeV และ 1332.50 KeV ไปวัดรังสีแกมมาบนหัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เป็นระยะเวลา 30 s เพื่อดูว่าพีคสูงสุดของธาตุตรงกับหมายเลขช่อง (Channel) ใด แล้วนำไปเขียนกราฟปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสี



ภาพที่ 3.4 กราฟปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสี (Energy Calibration Curve)

วัดปริมาณสารกัมมันตรังสีภูมิหลัง โดยใช้เวลา 18,000 s เพื่อบันทึกจำนวนนับใต้สเปกตรัมของ ^{226}Ra พลังงาน 609.6 keV, ^{232}Th พลังงาน 911.20 keV และ ^{40}K พลังงาน 1460.75 keV

ตารางที่ 3.1 จำนวนนับใต้สเปกตรัมของสารกัมมันตรังสีภูมิหลัง

Radionuclide	Energy (keV)	Area
^{226}Ra	609.6	68
^{232}Th	911.20	79
^{40}K	1460.75	286

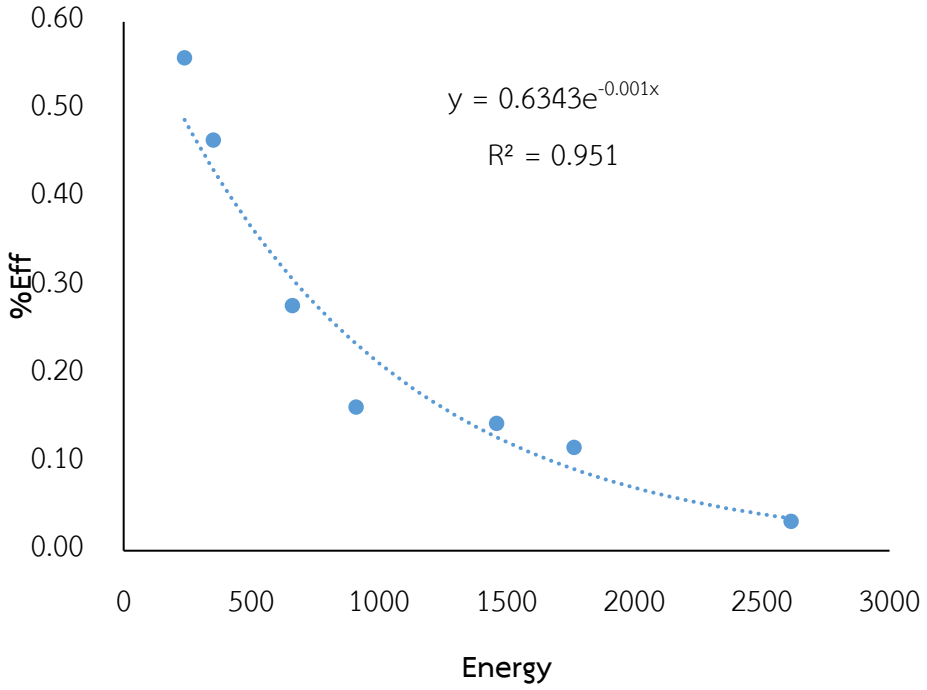
นำสารมาตรฐาน IAEA-375 มาวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เป็นระยะเวลา 18,000 s โดยบันทึกข้อมูลจำนวนนับใต้สเปกตรัมของ ^{40}K ที่พลังงาน 1460.83 keV, ^{137}Cs ที่พลังงาน 661.66 keV, ^{214}Pb ที่พลังงาน 351.87 kev, ^{214}Bi ที่พลังงาน 1764.49 kev, ^{212}Pb ที่พลังงาน 238.63 kev, ^{228}Ac ที่พลังงาน 911.21 kev และ ^{208}Tl ที่พลังงาน 2614.53 kev เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดจากสมการ

$$\%E_{ff} = \frac{cps}{(\%a)\,(A_t)} \tag{3.1}$$

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีจากสารมาตรฐาน IAEA-375 สำหรับตัวอย่างดิน

Radionuclide	Energy (keV)	A_0	A_t	%a	$\%E_{ff}$
^{40}K	1460.83	424.00	424.00	10.67	0.14
^{137}Cs	661.66	5280.00	2962.30	85.21	0.28
^{214}Pb	351.87	20.00	20.00	37.10	0.47
^{214}Bi	1764.49	20.00	20.00	15.90	0.12
^{212}Pb	238.63	20.50	20.50	53.65	0.56
^{228}Ac	911.21	20.50	20.50	26.60	0.16
^{208}Tl	2614.53	20.50	20.50	99.16	0.03

จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกัมมันตภาพรังสี กับระดับพลังงานของรังสีแกมมาของสารมาตรฐานดิน IAEA-375 เพื่อใช้สมการมาคำนวณประสิทธิภาพการนับวัดของพลังงานรังสีในวัสดุก่อสร้าง



ภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกัมมันตภาพรังสีกับระดับพลังงานของรังสีแกมมาของสารมาตรฐาน IAEA-375 สำหรับดิน

นำสมการที่ (3.1) มาคำนวณเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับวัดของพลังงานในวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ ^{226}Ra พลังงาน 609.6 keV, ^{232}Th พลังงาน 911.20 keV และ ^{40}K พลังงาน 1460.75 keV แสดงค่าในตารางที่ 3.3

$$y = 0.6343e^{-0.001x} \quad (3.1)$$

เมื่อ y คือ พลังงานของรังสีแกมมา

ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพการนับวัดของพลังงานรังสีในวัสดุก่อสร้าง

Radionuclide	Energy (keV)	$\%E_{ff}$
^{226}Ra (^{214}Bi)	609.20	0.34
^{232}Th (^{228}Ac)	911.21	0.26
^{40}K	1460.8	0.15

จากนั้นนำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เป็นระยะเวลา 18,000 s ประเมินผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Gamma Version โดยบันทึกจำนวนนับใต้สเปกตรัมรังสีแกมมา ของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K แล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสี โดยใช้สมการที่ (2.1)

3.2.1.4 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดในตัวอย่างที่เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเจอมาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ตรวจวัดได้ (Minimal Detection Activity : MDA)

ตารางที่ 3.4 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดในตัวอย่างที่เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเจอมาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ตรวจวัดได้ ในวัสดุก่อสร้าง

Radionuclide	Energy (keV)	MDA
^{226}Ra (^{214}Bi)	609.20	5.78
^{232}Th (^{228}Ac)	911.21	9.80
^{40}K	1460.8	116.17

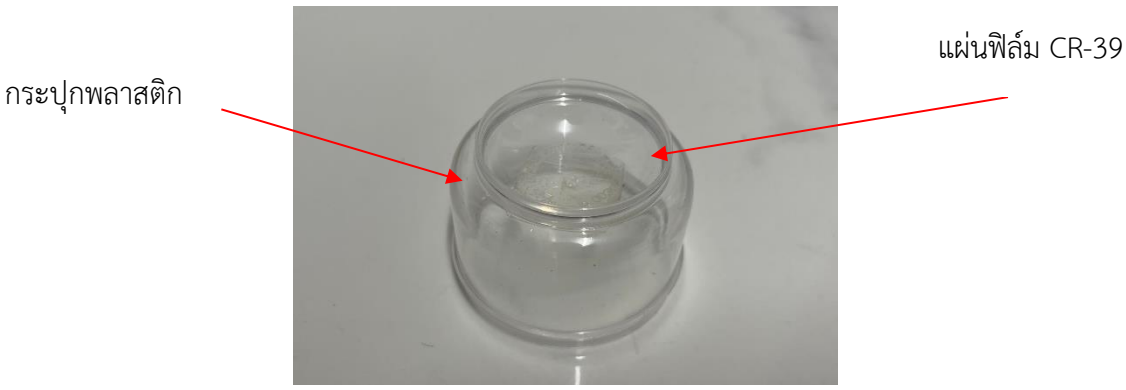
3.2.1.5 วิเคราะห์ค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ

นำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ที่ตรวจวัดได้นี้ไปคำนวณหาค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Radium Equivalent Activity, Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีภายในร่างกาย (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed Dose Rates in Air, D) และ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (Annual External Effective Dose Rate, E) จากสมการที่ (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) และ(2.6) ตามลำดับ

3.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารด้วยถ้วยแทรคแอดดีเทคเตอร์

3.2.2.1 การเก็บตัวอย่างก๊าซเรดอนภายในอาคาร

นำอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ไปติดตั้งไว้ในห้องเรียนชั้นล่างของอาคารที่ปิดมิดชิด ในอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับพื้น เป็นระยะเวลา 1 เดือน จำนวน 41 โรงเรียน ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39

ภาพที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ภายในห้องเรียนของอาคาร

3.2.2.2 กระบวนการกัดรอย (Etching) เพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มที่วางไว้ในอาคารครบกำหนดเวลา 1 เดือน มาเข้ากระบวนการกัดรอย เพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม การกัดรอยทำได้ดังต่อไปนี้

1) นำแผ่นฟิล์มไปเจาะรูที่มุมใดมุมหนึ่งของแผ่นฟิล์ม

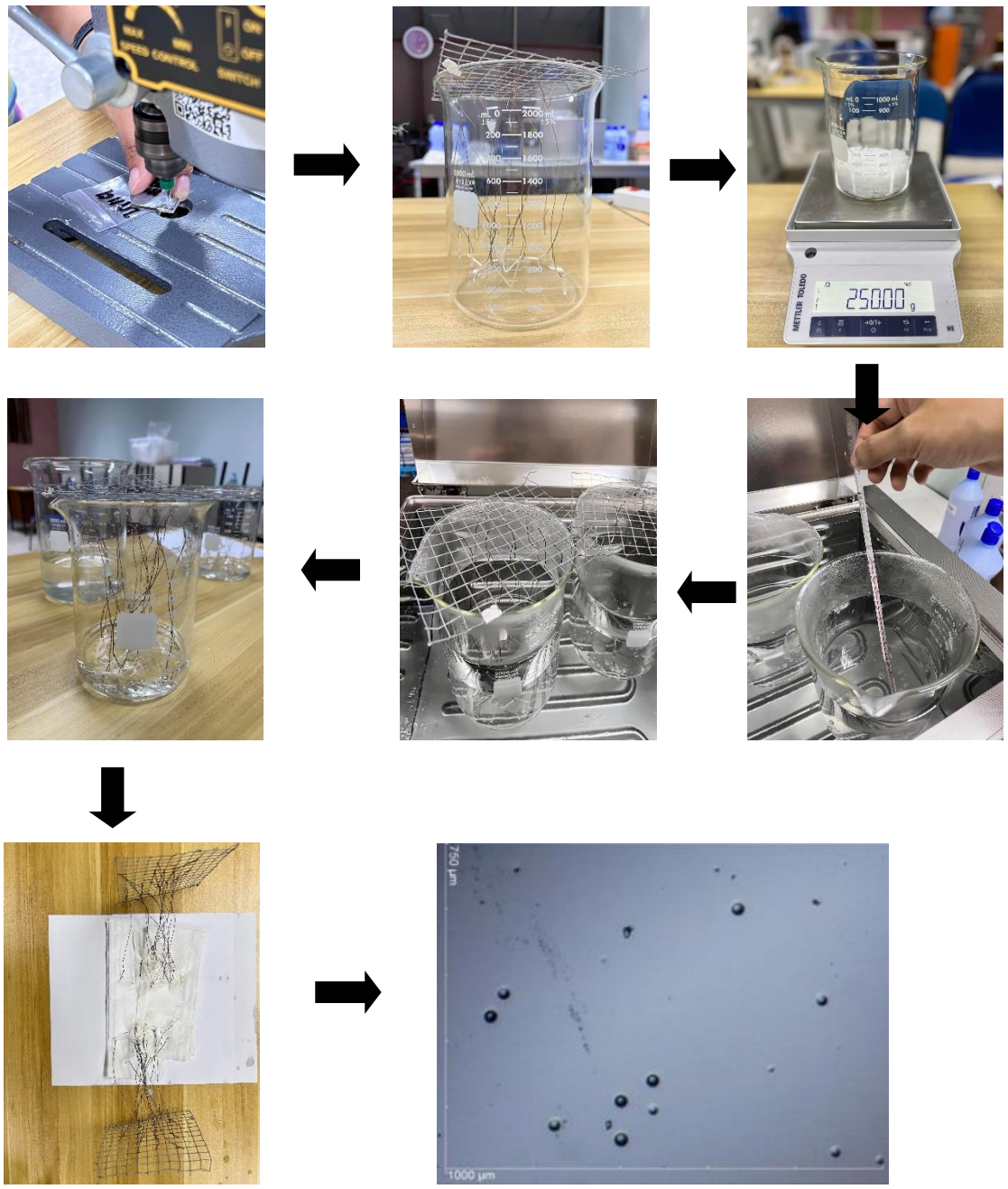
2) ใช้ลวดหรือเชือกผูกแผ่นฟิล์มไว้ตรงรูที่เจาะ

3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 6.25 N ใส่ในบิกเกอร์ แล้วนำบิกเกอร์ดังกล่าวไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเติมน้ำไว้ครึ่งหนึ่ง

4) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 96 ℃ แล้ว จากนั้นนำแผ่นฟิล์มซึ่งปลายด้านหนึ่งผูกเชือกติดกับตะแกรง นำไปแช่ในสารละลายดังกล่าว เป็นระยะเวลา 2 hr

5) เมื่อครบเวลาแล้ว ให้นำแผ่นฟิล์มมาผ่านน้ำประปา เป็นเวลา 1 hr

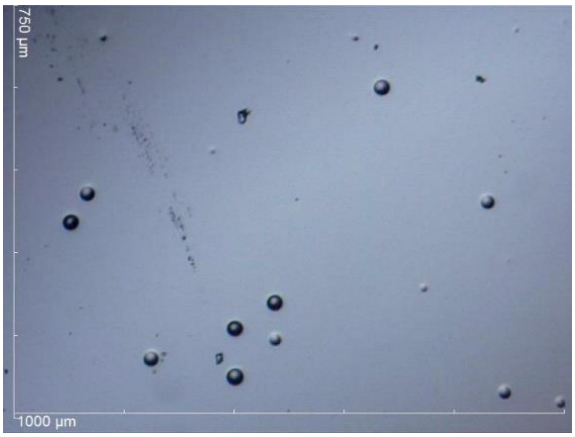
6) จากนั้นทำความสะอาดแผ่นฟิล์มด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปผึ่งให้แห้ง เพื่อนำไปถ่ายภาพรอยอนุภาคแอลฟาในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.8 กระบวนการกัดรอย (Etching) เพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม

3.2.2.3 การนับรอยอนุภาคแอลฟาบนแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มที่ผ่านกระบวนการกัดรอยแล้ว มานับรอยอนุภาคแอลฟาโดยการถ่ายภาพแผ่นฟิล์ม CR-39 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า โดยภาพถ่ายที่ได้ออกมาจะเป็นภาพ 2 มิติ ที่ทราบขนาดของภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.9 จากนั้นนำภาพถ่ายมานับรอย จะได้จำนวนรอยอนุภาค (Track) แล้วนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร จากสมการ (2.12)



ภาพที่ 3.9 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายผ่านฟิล์ม CR-39 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า

3.2.2.4 การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

นับรอยอนุภาคแอลฟา (Track) บนแผ่นฟิล์ม CR-39 ในพื้นที่ 750,000 μm^2 จำนวน 9 จุด แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร โดยใช้สมการที่ (2.12) ซึ่งค่า Exposure Time เท่ากับ 648 hr ค่า Calibration Factor เท่ากับ 1.64×10^{-6} $Track \cdot m^{-2} \cdot m^{-3} \cdot (kBq \cdot hr)^{-1}$ ซึ่งได้มาจากการปรับเทียบแผ่นฟิล์ม CR-39 จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จังหวัดนครนายก จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนแต่ละตำแหน่งมาคำนวณเพื่อศึกษาปริมาณรังสีสมมูล (Annual Effective Dose; DT) จากการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนในอาคารที่อยู่อาศัยนั้น โดยใช้สมการที่ (2.13) เพื่อนำไปประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วง โดยใช้สมการที่ (2.14) และหาจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน จากสมการที่ (2.15)

3.2.2.5 สร้างแผนภาพคอนทัวร์ โดยใช้โปรแกรม QGIS 3.22.1

นำค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารเรียนแต่ละตำแหน่ง และความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต ไปจัดทำเป็นแผนภาพคอนทัวร์ในบริเวณดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม QGIS 3.22.1

บทที่ 4
ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย

การประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ใน หิน ดิน ทราย ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียนบริเวณอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เพื่อประเมินดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องจากวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก (H_{ex}) และค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายใน (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) แสดงผลในหัวข้อ 4.1 และ การศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน เพื่อคำนวณและเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ภายในอาคารเรียนในบริเวณอำเภอบันนังสตา ธารโต และบตง จังหวัดยะลากับระดับอ้างอิงทั่วโลก แสดงผลในหัวข้อ 4.2

4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน, ดิน และ ทราย

4.1.1 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน

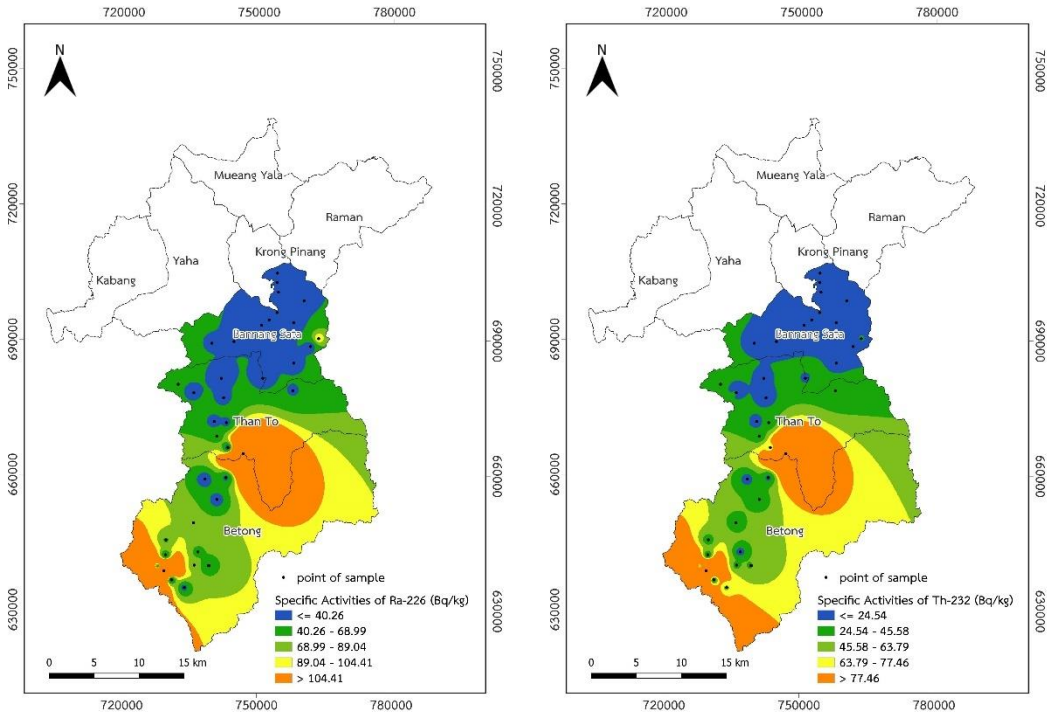
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน

District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
บันนังสตา	บ้านป่าหวัง	37.64±0.32	22.22±0.19	144.58±0.39
	บันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	24.01±0.27	14.13±0.16	147.9±0.39
	บ้านกาโสด	38.32±0.32	15.07±0.17	116.17±0.38
	บ้านเจาะปันดัง	33.13±0.3	16.86±0.17	471.28±0.46
	บ้านรานอ	11.04±0.22	10.47±0.16	116.17±0.37
	บ้านตาเนาะปูเต๊ะ	40.23±0.32	18.13±0.18	125.82±0.38
	บ้านทำนบ	30.09±0.29	17.11±0.17	201.98±0.4
	บ้านตังกาเด็ง	37.87±0.32	20.43±0.18	249.44±0.41
	บ้านตะบิงติงงี	27.05±0.28	16.35±0.17	116.17±0.38
	บ้านทรายแก้ว	17.47±0.25	14.81±0.17	118.1±0.38
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	28.51±0.29	9.8±0.15	164.45±0.39
	นิคมพัฒนาวิทย์	29.3±0.29	9.8±0.15	116.99±0.38

District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	102.67±0.47	25.29±0.19	269.3±0.42
	เขื่อนบางลาง	19.61±0.26	22.99±0.19	116.17±0.37
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	30.43±0.29	20.69±0.18	157.83±0.39
	บ้านฉลองชัย	36.85±0.31	24.52±0.19	162.24±0.39
ธารโต	บ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	35.28±0.31	19.92±0.18	546.33±0.48
	ธารโตวัฒนวิทย์	25.36±0.28	24.26±0.19	175.49±0.39
	บ้านแหร	28.74±0.29	5.36±0.14	155.62±0.39
	บ้านบ่อหิน	28.96±0.29	28.35±0.2	116.17±0.37
	บ้านวังศิลา	23.55±0.27	9.8±0.16	113.68±0.38
	บ้านไทยพัฒนา	38.99±0.32	9.8±0.14	141.27±0.39
	บ้านศรีนคร	33.58±0.3	33.2±0.21	167.76±0.39
	บ้านจุโป	23.78±0.27	61.56±0.26	116.17±0.37
	บ้านปะเด็ง	899.35±1.32	578.27±0.71	7977.55±1.29
	บ้านโต	51.62±0.36	24.01±0.19	221.84±0.41
เบตง	เบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	777.41±1.23	719.26±0.79	7390.38±1.25
	อนุบาลเบตง	72.92±0.41	37.04±0.22	949.18±0.55
	เทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	59.39±0.38	59.77±0.26	1095.97±0.58
	บ้านยะรม	78.89±0.42	39.08±0.22	833.29±0.53
	สังวาลย์วิท 5	82.27±0.43	47.76±0.24	1466.82±0.64
	บ้านธารน้ำใส	27.16±0.28	41.89±0.23	697.54±0.51
	บ้านจาเราะปะไต	34.6±0.31	18.65±0.18	1004.37±0.56
	ไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	66.04±0.39	30.91±0.21	888.48±0.54
	บ้านมาลา	57.82±0.37	12.52±0.16	387.4±0.44
	บ้านด่านสันติราษฎร์	69.54±0.4	30.14±0.2	512.12±0.47
	บ้านอัยเยอร์เวง	23.33±0.27	27.07±0.2	116.17±0.38
	บ้านใหม่	33.81±0.31	19.67±0.18	116.17±0.38
	บ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	17.24±0.25	14.56±0.17	122.51±0.38
	บ้านบาแตตูแง	21.86±0.27	23.75±0.19	116.17±0.36

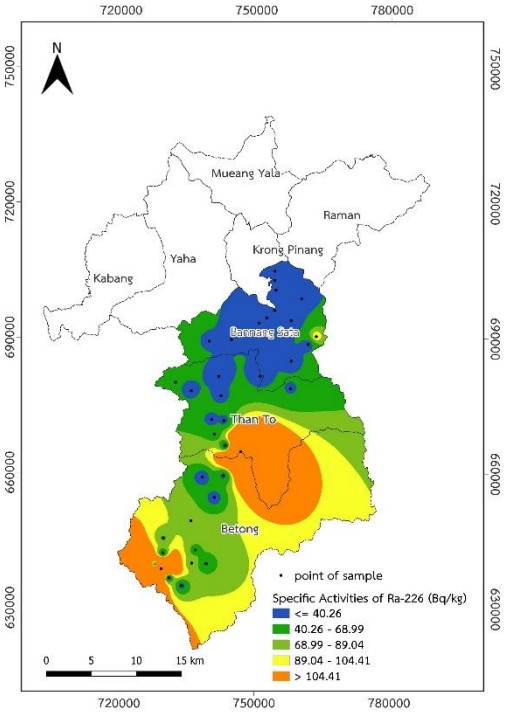
District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
	บ้านจาเราะซูซู	29.64±0.29	60.53±0.26	984.5±0.56
ค่าเฉลี่ย		77.69±0.36	55.02±0.22	712.38±0.47
Southern Thailand Data (Office of Atoms for Peace, 2002)		171.55±3.13	211.19±1.98	511.04±7.04
Thailand data OAP (Office of Atoms for Peace, 2002)		48	40	400
Worldwide Mean for soil (UNSCEAR, 2000)		35	30	400
Worldwide Mean for building materials (UNSCEAR, 1993)		50	50	500

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา พบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra มีค่าอยู่ในช่วง 11.04±0.22 - 899.35±1.32 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.69±0.36 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านปะเด็ง อำเภอธารโต มีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านรานอ อำเภอบันนังสตา มีค่าต่ำสุด ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{232}Th ค่าอยู่ในช่วง 5.36±0.14 - 719.26±0.79 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.02±0.22 Bq/kg โดยโรงเรียนเบตง (วีระราษฎร์ประสาน) อำเภอเบตง มีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านแหร อำเภอธารโต มีค่าต่ำสุด และปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{40}K อยู่ในช่วง 113.68±0.38-7977.55±1.29 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 712.38±0.47 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านปะเด็ง อำเภอธารโต มีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านวังศิลา อำเภอเบตง มีค่าต่ำสุด ซึ่งปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาใช้ในการเขียนแผนภาพทางรังสี ดังแสดงในภาพที่ 4.1



(ก)

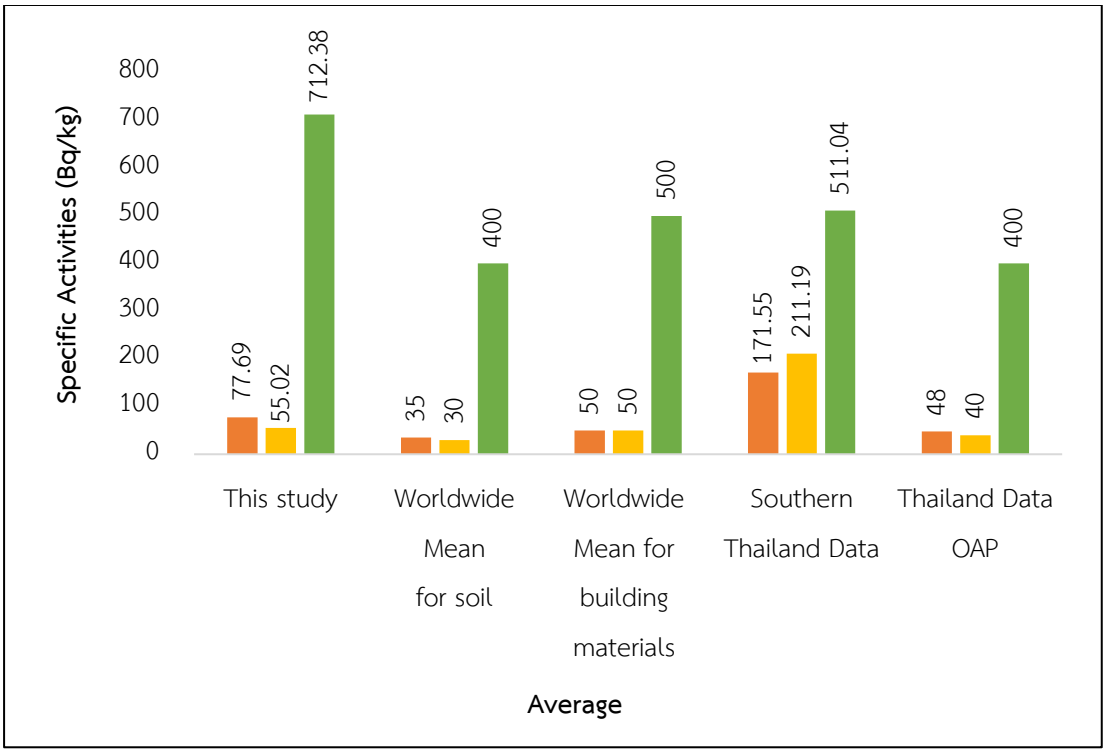
(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.1 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

โดยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง ค่าเฉลี่ยของประเทศไทย และค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ส่วน ^{232}Th ค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง ค่าเฉลี่ยของประเทศไทย แต่ต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.2



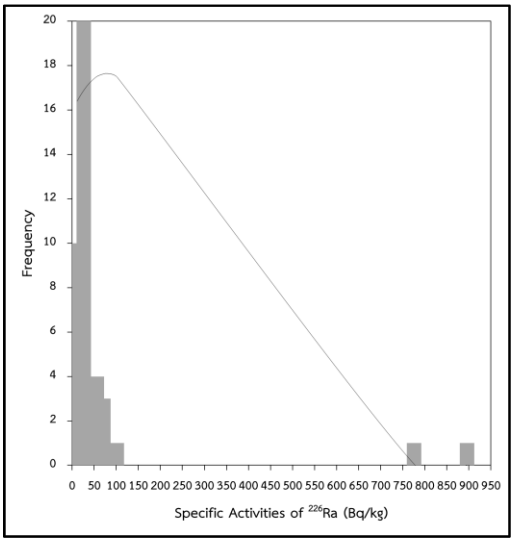
ภาพที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ โดย ■ คือ ^{226}Ra ■ คือ ^{232}Th และ ■ คือ ^{40}K

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินที่เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง กับหินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในต่างประเทศ พบว่า ปริมาณสารกัมมันตรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าหินในประเทศมาเลเซีย (Abdullahi et al., 2019b) ประเทศกรีซ (Papaefthymiou & Gouseti, 2008) ประเทศแอลจีเรีย (Amrani & Tahtat, 2001) ประเทศเซอร์เบียร์ (Ujić et al., 2010) รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.2

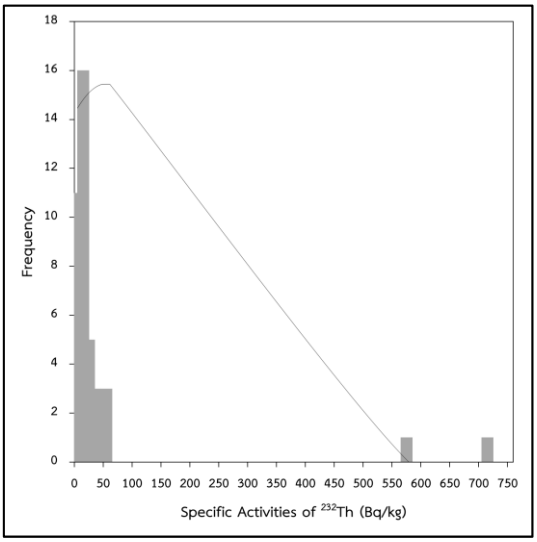
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินกับงานวิจัยอื่น ๆ

งานวิจัย	Specific Activities (Bq/kg)			อ้างอิง
	^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K	
Southern Part of Yala Province	77.69±0.36	55.02±0.22	712.38±0.47	งานวิจัยนี้
มาเลเซีย	10 ± 1	12 ± 3	62 ± 19	Abdullahi, S. et al, 2018
กรีซ	14 ± 6	1.6 ± 0.5	-	Papaefthymiou, H. 2008
เซอร์เบีย	33.2 ± 70.7	43.6 ± 71.9	580 ± 740	Ujić, P. et al, 2010
แอลจีเรีย	16±3	13±2	36±3	Amrani, D. and Tahtat, M. 2001.

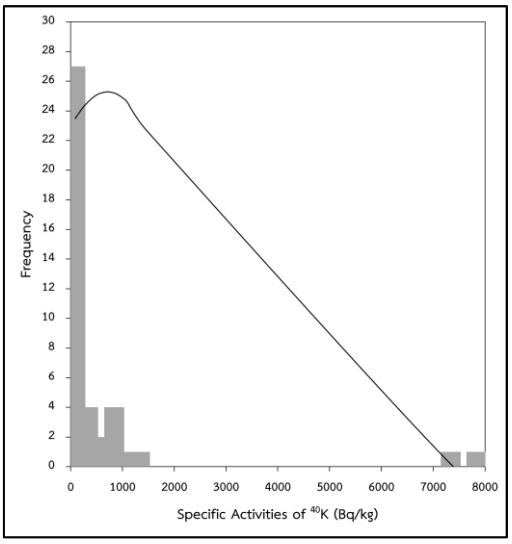
เมื่อนำปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน จำนวน 41 ตัวอย่าง ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา มาสร้างกราฟแท่งของการแจกแจงความถี่และคำนวณหาค่ากลางของข้อมูลที่ตรวจวัดและวิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.3



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.3 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างหิน ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา จำนวน 41 ตัวอย่าง

ข้อมูลเชิงสถิต	ค่าที่วิเคราะห์ได้		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Bq/kg)	77.69	54.92	711.79
ค่ามัธยฐาน (Bq/kg)	33.58	22.22	164.45
ค่าฐานนิยม (Bq/kg)	-	9.80	116.17
ความเบ้ (skewness)	4.37	4.37	4.05
ความโด่ง (kurtosis)	17.79	18.53	16.07
ค่าน้อยที่สุด (Bq/kg)	11.04	5.36	89.40
ค่ามากที่สุด (Bq/kg)	899.35	719.26	7977.55

จะเห็นได้ว่ากราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหิน จำนวน 41 ตัวอย่างที่ มีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตรหรือเบ้ขวา โดยมีค่าความเบ้เท่ากับ 4.37, 4.37 และ 4.05 ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการคำนวณหาค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี จำนวน 5 ค่า จึงใช้ค่ามัธยฐานซึ่งเป็นค่ากลางของข้อมูลไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา แสดงค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างหิน ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

สถานที่	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	H_{in}	D (nGy/h)	E (mSv/y)
บริเวณตอนล่างจังหวัดยะลา	78.02±13.71	0.21±0.04	0.30±0.05	35.79±6.06	0.04±0.01
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (เฉพาะภาคใต้)	512.9	1.39	-	231.81	0.28
UNSCEAR 2000	370	1	1	157	0.48

พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) และปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) จากตัวอย่างหินที่เก็บในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่า 78.02±13.71 Bq/kg, 0.21±0.04, 0.30±0.05, 35.79±6.06 nGy/h และ 0.04±0.01 mSv/y ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี ทั้ง 5 ค่านั้น มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

4.1.2 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน

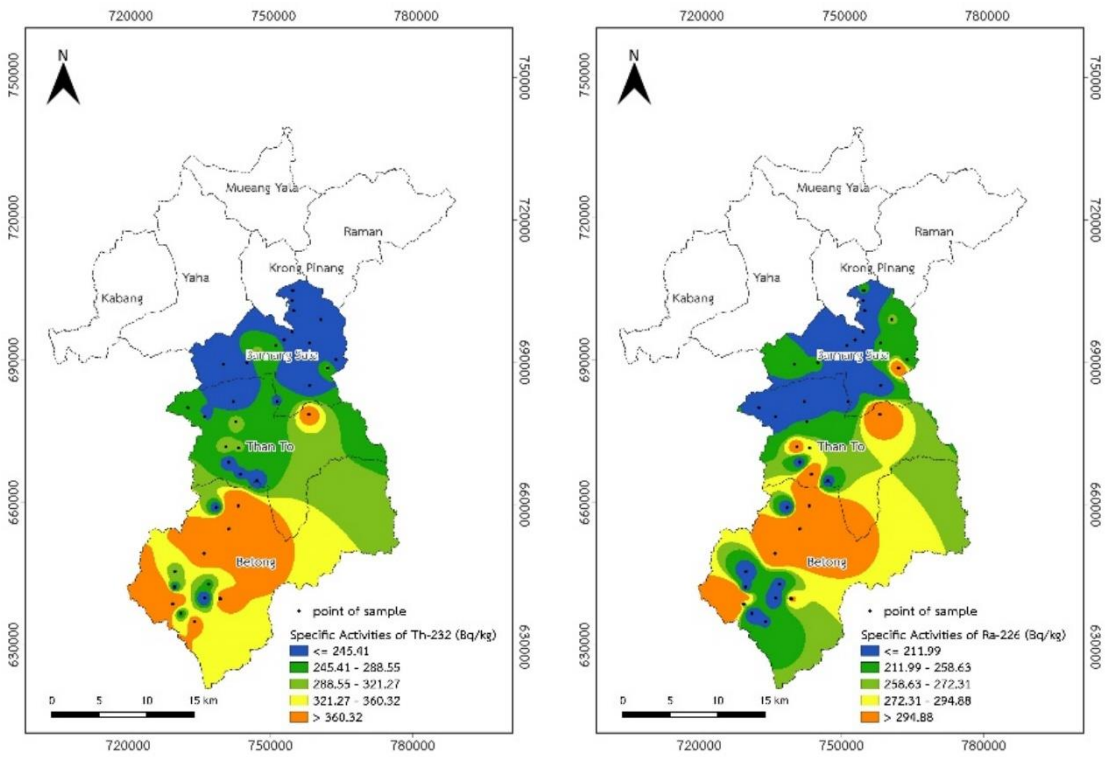
จากการนำตัวอย่างดินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในพื้นที่ทางตอนใต้ของจังหวัดยะลา มาศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ผลการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน

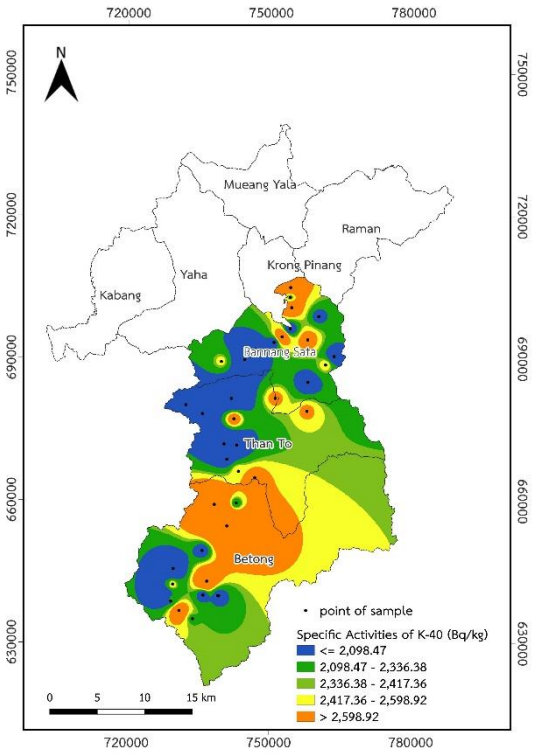
District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
บันนังสตา	บ้านป่าหวัง	214.81±0.66	218.13±0.45	3631.17±0.91
	บันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	186.86±0.62	284.03±0.5	1778.06±0.68
	บ้านกาโสด	232.5±0.69	226.81±0.45	1466.82±0.64
	บ้านเจาะปันตัง	92.19±0.45	312.89±0.53	1409.43±0.63
	บ้านรานอ	228.56±0.68	134.35±0.36	3367.39±0.88
	บ้านตาเนาะปูเต๊ะ	208.16±0.65	236.26±0.46	3285.72±0.87
	บ้านทำนบ	128.7±0.52	135.12±0.36	2299.01±0.75
	บ้านตังกาเด็ง	253.24±0.71	176.24±0.4	2510.92±0.78
	บ้านตะบิงติงงี	123.29±0.51	241.63±0.47	1579.4±0.65
	บ้านทรายแก้ว	221.34±0.67	75.09±0.28	3063.87±0.85
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	359.74±0.84	295.26±0.51	2581.56±0.79
	นิคมพัฒนาวิทย์	270.48±0.74	160.91±0.39	1898.36±0.7
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	232.05±0.68	177.77±0.41	1610.3±0.66
	เขื่อนบางลาง	178.74±0.61	241.88±0.47	2810.02±0.82
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	97.6±0.46	174.71±0.4	1566.15±0.65
	บ้านฉลองชัย	463.2±0.95	427.31±0.61	2736.07±0.81
ธารโต	บ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	242.64±0.7	241.63±0.47	2355.3±0.76
	ธารโตวัฒนวิทย์	158.8±0.57	204.85±0.43	2555.07±0.78
	บ้านแหร	120.36±0.51	287.6±0.51	669.95±0.5
	บ้านบ่อหิน	178.18±0.61	269.98±0.49	4410.39±0.99
	บ้านวังศิลา	390.62±0.88	423.48±0.61	1789.1±0.68
	บ้านไทยพัฒนา	749.23±1.2	835.98±0.85	6377.18±1.16
	บ้านศรีนคร	533.19±1.02	685.54±0.77	2120.21±0.73
	บ้านจุโป	136.03±0.54	196.16±0.42	4687.42±1.01

District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
	บ้านปะเด็ง	117.1±0.5	236.77±0.46	3715.06±0.92
	บ้านโต	203.2±0.64	385.68±0.58	2257.07±0.75
เบตง	เบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	179.42±0.61	243.16±0.47	1460.2±0.64
	อนุบาลเบตง	130.85±0.53	174.45±0.4	1084.94±0.58
	เทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	211.99±0.66	315.44±0.53	3053.94±0.84
	บ้านยะรม	289.08±0.76	295.01±0.51	1494.41±0.64
	สังวาลย์วิท 5	348.25±0.83	315.7±0.53	599.31±0.49
	บ้านธารน้ำใส	130.39±0.53	212.25±0.44	1347.62±0.62
	บ้านจาเราะปะไต	175.14±0.6	274.32±0.5	2184.22±0.74
	ไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	417.33±0.91	227.32±0.45	2602.53±0.79
	บ้านมาลา	171.53±0.59	189.01±0.42	2984.41±0.84
	บ้านด่านสันติราษฎร์	161.61±0.58	197.69±0.43	1856.42±0.69
	บ้านอัยเยอร์เวง	229.91±0.68	321.83±0.53	1927.06±0.7
	บ้านใหม่	294.37±0.77	444.43±0.62	2412.69±0.77
	บ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	781.13±1.23	916.95±0.88	1047.41±0.57
	บ้านบาแตตูแง	125.1±0.52	128.73±0.35	1736.12±0.68
	บ้านจาเราะซูซู	344.53±0.83	549.4±0.69	1438.12±0.63
ค่าเฉลี่ย		251.50±0.69	294.92±0.5	2335.02±0.75
Southern Thailand Data (Office of Atoms for Peace, 2002)		171.55±3.13	211.19±1.98	511.04±7.04
Thailand data OAP (Office of Atoms for Peace, 2002)		48	40	400
Worldwide Mean for soil (UNSCEAR, 2000)		35	30	400
Worldwide Mean for building materials (UNSCEAR, 1993)		50	50	500

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา พบว่า ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra มีค่าอยู่ในช่วง 92.19±0.45-211.99±0.66 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 251.68±0.69 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519) อำเภอเบตง มีค่าสูงสุด และโรงเรียนบ้านเจาะปันตัง อำเภอบันนังสตา มีค่าต่ำสุด ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{232}Th ค่าอยู่ในช่วง 75.09±0.28- 916.95±0.88 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 294.92±0.5 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519) อำเภอเบตงมีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านทรายแก้ว อำเภอบันนังสตามีค่าต่ำสุด และปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{40}K อยู่ในช่วง 599.31±0.49-6377.18±1.16 Bq/kg และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2335.02±0.75 Bq/kg โดยโรงเรียนโรงเรียนบ้านไทยพัฒนา อำเภอธารโตมีค่าสูงสุด และโรงเรียนสังวาลย์วิท 5 อำเภอเบตง มีค่าต่ำสุด ซึ่งปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน จากตารางที่ 4.5 สามารถนำมาใช้ในการเขียนแผนภาพทางรังสี ดังแสดงในภาพที่ 4.4



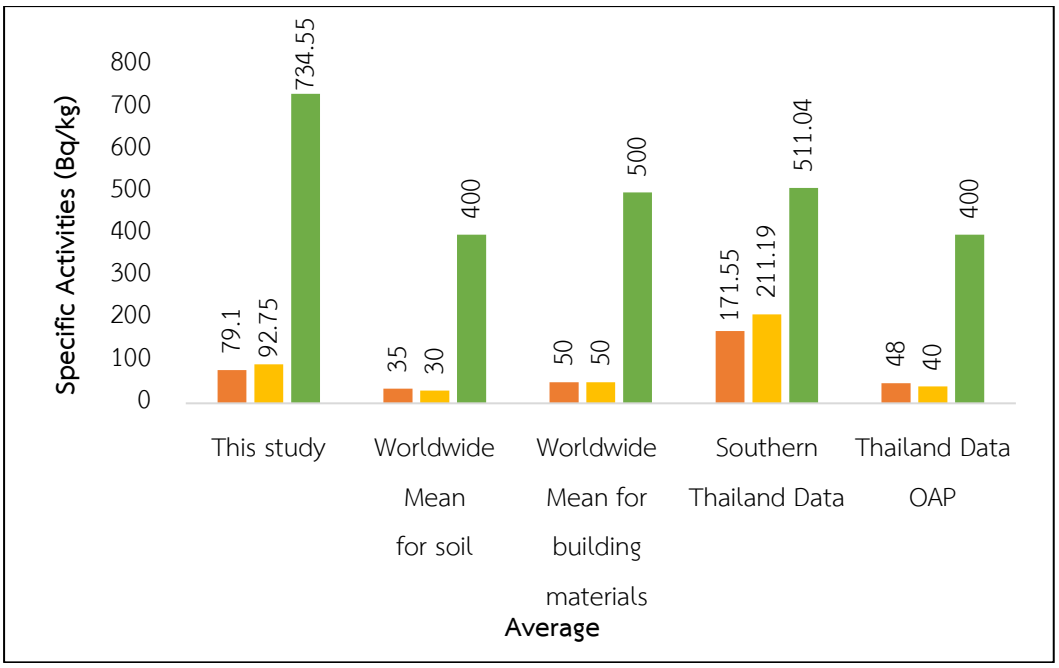
(ก) (ข)



(ค)

ภาพที่ 4.4 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

โดยปริมาณสารกัมมันตรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดินมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง ค่าเฉลี่ยของประเทศไทย และค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.5



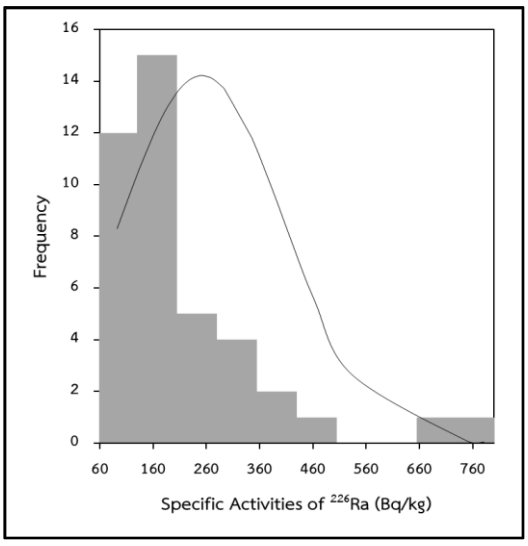
ภาพที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ โดย ■ คือ ^{226}Ra, ■ คือ ^{232}Th และ ■ คือ ^{40}K

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกัมมันตรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในดินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง กับดินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในต่างประเทศ พบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าประเทศจีน (Yang & Sun, 2022) ประเทศตุรกี (Durusoy & Yildirim, 2017) ประเทศบังกลาเทศ (Habib, A. et al 2022) และประเทศปากีสถาน (Ghias et al., 2021) ตามลำดับ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.6

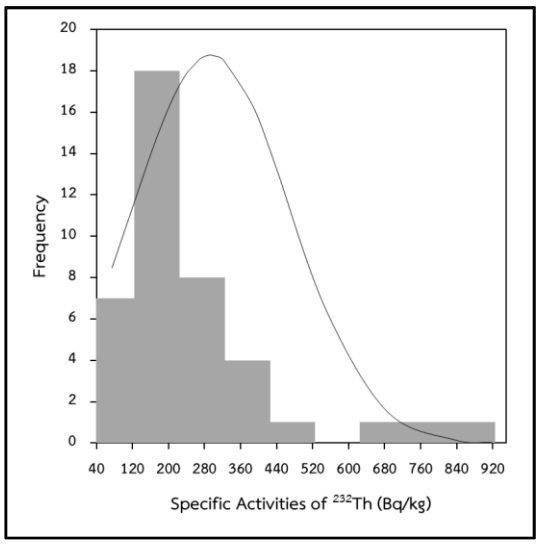
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน ของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K กับงานวิจัยอื่น ๆ ทั่วโลก

ประเทศ	Specific Activities (Bq/kg)			อ้างอิง
	^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K	
Southern Part of Yala Province	251.50±0.69	294.92±0.5	2335.02±0.75	งานวิจัยนี้
จีน	75.1	101.0	535.8	Yang, J. and Sun, Y., 2022
ตุรกี	94.9	51.8	344.9	Durusoy, A. and Yildirim, M., 2017
บังกลาเทศ	80.6	104.4	508.1	Habib, A. et al 2022
ปากีสถาน	37	43.07	737	Ghias, S. et al 2021

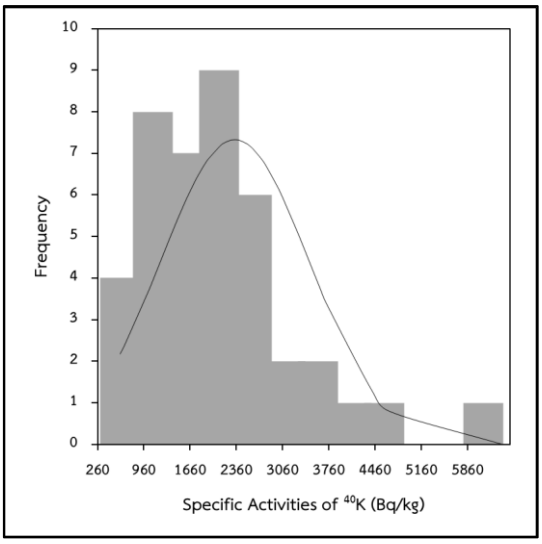
เมื่อนำปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่าดินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน จำนวน 41 ตัวอย่าง ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา มาสร้างกราฟแท่งของการแจกแจงความถี่และคำนวณหาค่ากลางของข้อมูลที่ตรวจวัดและวิเคราะห์ได้ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.6



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.6 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดินในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดินของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา จำนวน 41 ตัวอย่าง

ข้อมูลเชิงสถิต	ค่าที่วิเคราะห์ได้		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Bq/kg)	251.50	294.92	2335.62
ค่ามัธยฐาน (Bq/kg)	211.99	241.63	2184.22
ค่าฐานนิยม (Bq/kg)	-	241.63	-
ความเบ้ (skewness)	2.13	2.13	1.38
ความโด่ง (kurtosis)	4.40	4.86	3.06
ค่าน้อยที่สุด (Bq/kg)	92.19	75.09	599.31
ค่ามากที่สุด (Bq/kg)	781.13	916.95	6377.18

จะเห็นได้ว่ากราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน จำนวน 41 ตัวอย่างที่ มีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตรหรือเบ้ขวา โดยมีค่าความเบ้เท่ากับ 2.13, 2.13 และ 1.38 ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการคำนวณหาค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี จำนวน 5 ค่า จึงใช้ค่ามัธยฐานซึ่งเป็นค่ากลางของข้อมูลไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา แสดงค่าดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างดิน ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

สถานที่	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	H_{in}	D (nGy/h)	E (mSv/y)
บริเวณตอนล่างจังหวัดยะลา	725.71±41.01	1.96±0.11	2.53±0.15	334.97±18.06	0.41±0.02
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (เฉพาะภาคใต้)	512.9	1.39	-	231.81	0.28
UNSCEAR 2000	370	1	1	157	0.48

พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) และปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) จากตัวอย่างทรายที่เก็บในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่า 725.71±41.01 Bq/kg, 1.96±0.11, 2.53±0.15, 334.97±18.06 nGy/h และ 0.41±0.02 mSv/y ตามลำดับ

โดยค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน และอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR ส่วนปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี นั้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แต่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR

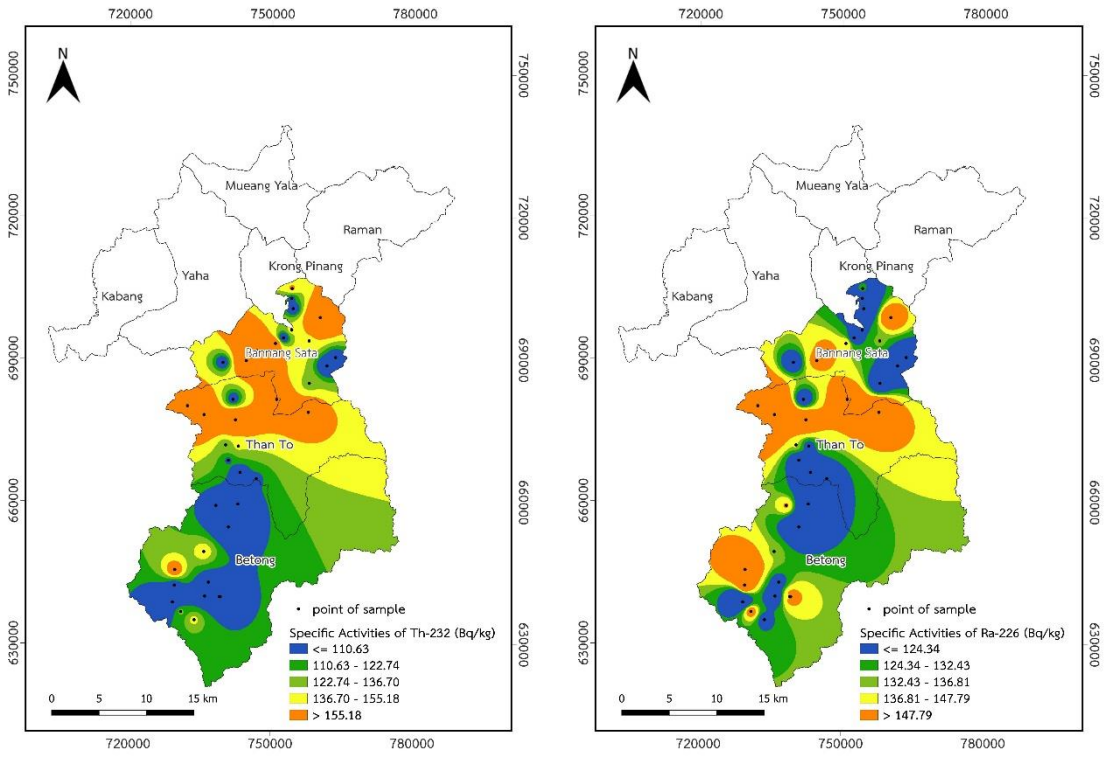
4.1.3 ผลการศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย

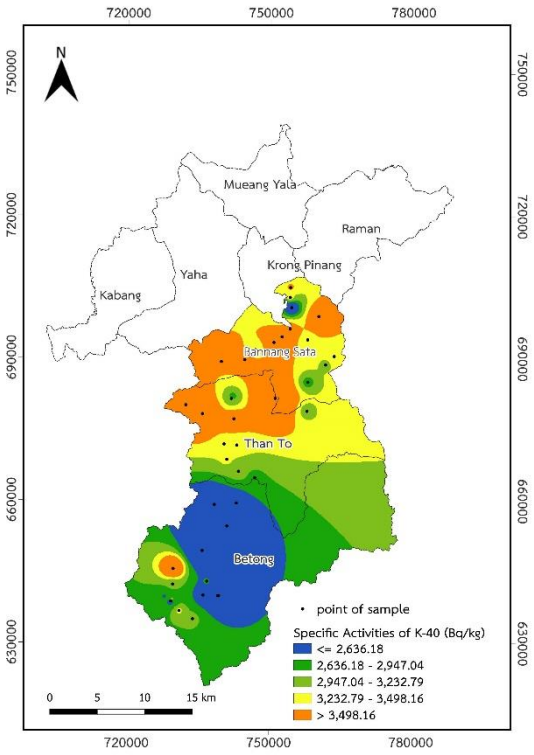
District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
บันนังสตา	บ้านป่าหวัง	107.85±0.48	78.41±0.29	3557.23±0.9
	บันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	147.64±0.56	189.52±0.42	3903.79±0.94
	บ้านกาโสด	156.2±0.57	219.92±0.45	3781.28±0.92
	บ้านเจาะปันตัง	164.32±0.58	263.34±0.49	3240.46±0.87
	บ้านรานอ	128.7±0.52	159.13±0.39	3542.88±0.9
	บ้านตาเนาะปูเต๊ะ	61.65±0.38	86.08±0.3	1794.62±0.68
	บ้านทำนบ	96.7±0.46	104.47±0.32	3328.76±0.88
	บ้านตังกาเด็ง	97.15±0.46	91.44±0.3	3572.68±0.9
	บ้านตะบิงติงงี	122.28±0.51	141.5±0.37	3748.17±0.92
	บ้านทรายแก้ว	135.69±0.53	152.48±0.38	3413.75±0.88
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	89.15±0.44	72.54±0.28	3146.65±0.85
	นิคมพัฒนาวิทย์	196.1±0.63	329.23±0.54	4270.22±0.97
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	89.6±0.45	92.46±0.31	3456.79±0.89
	เขื่อนบางลาง	199.82±0.64	196.93±0.43	6500.79±1.17
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	92.41±0.45	127.2±0.35	2812.23±0.82
	บ้านฉลองชัย	233.97±0.69	209.44±0.44	3085.95±0.85
ธารโต	บ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	105.94±0.48	102.42±0.32	3131.2±0.85
	ธารโตวัฒนวิทย์	106.84±0.48	96.29±0.31	2716.21±0.8
	บ้านแหร	191.03±0.63	290.67±0.51	3938±0.94
	บ้านบ่อหิน	116.98±0.5	138.44±0.36	3374.01±0.88
	บ้านวังศิลา	137.49±0.54	123.62±0.35	3330.97±0.88
	บ้านไทยพัฒนา	223.71±0.67	125.15±0.35	3699.6±0.92
	บ้านศรีนคร	397.72±0.88	344.56±0.55	5624.46±1.1
	บ้านจุโป	95.68±0.46	91.95±0.31	3109.12±0.85
	บ้านปะเด็ง	100.42±0.47	107.28±0.33	2855.27±0.82
	บ้านโต	98.05±0.46	107.53±0.33	3286.82±0.87

District	School	Specific Activities (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K
เบตง	เบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	95.68±0.46	82.24±0.29	2118±0.73
	อนุบาลเบตง	81.93±0.43	89.4±0.3	3289.03±0.87
	เทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	83.85±0.43	90.93±0.3	2611.35±0.79
	บ้านยะรม	194.75±0.63	99.1±0.31	2306.73±0.75
	สังวาลย์วิท 5	121.27±0.51	99.61±0.32	3154.38±0.86
	บ้านธารน้ำใส	195.99±0.63	97.57±0.31	1423.77±0.63
	บ้านจาเราะปะไต	244±0.7	189.26±0.42	3015.31±0.84
	ไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	110.11±0.49	92.46±0.31	4919.19±1.04
	บ้านมาลา	136.26±0.54	151.21±0.38	2663.23±0.8
	บ้านด่านสันติราษฎร์	71.45±0.41	61.81±0.26	664.43±0.5
	บ้านอัยเยอร์เวง	84.19±0.43	71.26±0.28	789.15±0.52
	บ้านใหม่	149.67±0.56	90.67±0.3	2248.24±0.75
	บ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	165.44±0.59	126.43±0.35	842.12±0.53
	บ้านบาแตตูแง	114.28±0.5	143.03±0.37	3318.83±0.87
	บ้านจาเราะซูซู	35.94±0.5	44.98±0.37	3068.29±0.85
ค่าเฉลี่ย		137.84±0.53	136.8±0.35	3055.62±0.84
Southern Thailand Data (Office of Atoms for Peace, 2002)		171.55±3.13	211.19±1.98	511.04±7.04
Thailand data OAP (Office of Atoms for Peace, 2002)		48	40	400
Worldwide Mean for soil (UNSCEAR, 2000)		35	30	400
Worldwide Mean for building materials (UNSCEAR, 1993)		50	50	500

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา พบว่า ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra มีค่าอยู่ในช่วง 61.65±0.38 - 397.72±0.88 Bq/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 137.84±0.53 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านศรีนคร อำเภอธารโตมีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านตาเนาะปูเต๊ะ อำเภอบันนังสตามีค่าต่ำสุด ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{232}Th ค่าอยู่ในช่วง 71.26±0.28 - 344.56±0.55 Bq/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 136.8±0.35 Bq/kg โดยโรงเรียนบ้านศรีนคร อำเภอธารโตมีค่าสูงสุด และ โรงเรียนบ้านอัยเยอร์เวง อำเภอเบตงมีค่าต่ำสุด และปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{40}K อยู่ในช่วง 664.43±0.5 - 6500.79±1.17 Bq/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3055.62±0.84 Bq/kg โดยโรงเรียนเขื่อนบางลาง อำเภอบันนังสตา มีค่าสูงสุด และโรงเรียนบ้านด่านสันติราษฎร์ อำเภอเบตง มีค่าต่ำสุด ซึ่งปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย จากตารางที่ 4.9 สามารถนำมาใช้ในการเขียนแผนภาพทางรังสี ดังแสดงในภาพที่ 4.7



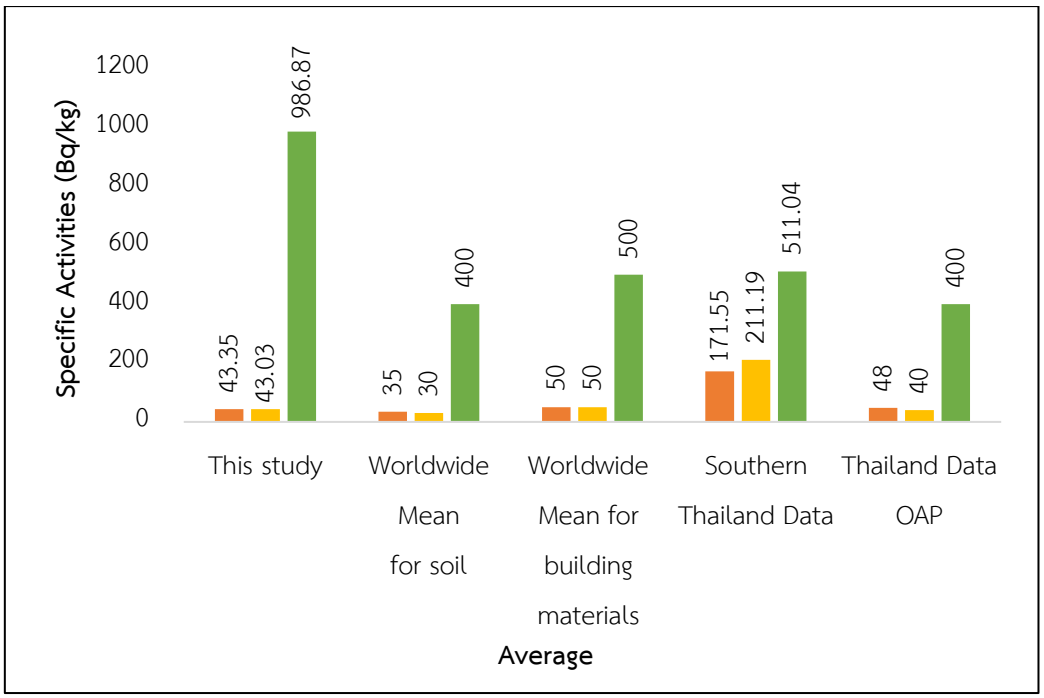
(ก) (ข)



(ค)

ภาพที่ 4.7 แผนภาพทางรังสีของปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

โดยปริมาณสารกัมมันตรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายมีค่าสูงกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) ค่าเฉลี่ยของประเทศไทย (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2550) และค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ส่วนค่ากัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{232}Th ค่าสูงกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) และ ค่าเฉลี่ยของประเทศไทย (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2550) แต่ต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.8



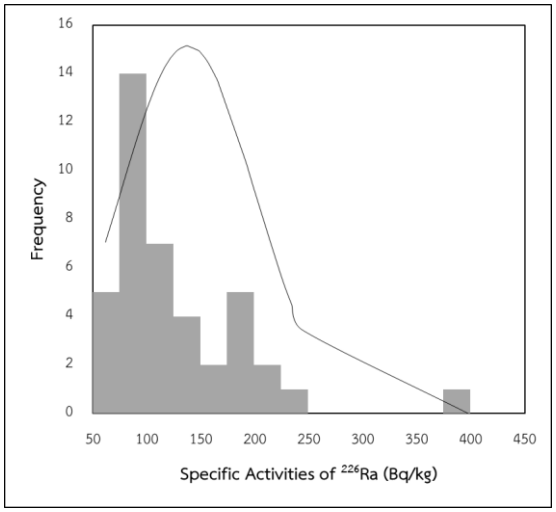
ภาพที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย เทียบกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ โดย ■ คือ ^{226}Ra, ■ คือ ^{232}Th และ ■ คือ ^{40}K

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกัมมันตรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในทรายที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง กับทรายที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในต่างประเทศ พบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าประเทศอินเดีย (Raghu et al., 2020) ประเทศตุรกี (Baykara et al., 2011) ประเทศมาเลเซีย (Abdullahi et al., 2019) และประเทศไนจีเรีย (Arabi et al., 2015) และประเทศบังคลาเทศ (Asaduzzaman et al., 2015) รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.10

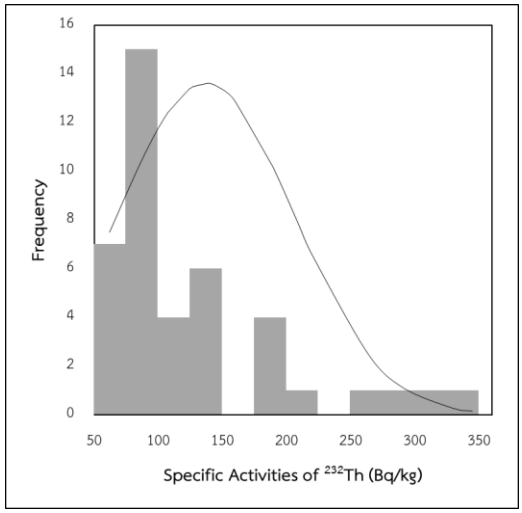
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในทรายกับงานวิจัยอื่น ๆ ทั่วโลก

ประเทศ	Specific Activities (Bq/kg)			อ้างอิง
	^{226}Ra	^{232}Th	^{232}K	
Southern Part of Yala Province	137.84±0.53	136.8±0.35	3055.62±0.84	งานวิจัยนี้
อินเดีย	4.57	119.42	388.78	Raghu, Y. et al., 2020
ตุรกี	6.7	6.7	882.9	Baykara, O. et al., 2011
มาเลเซีย	43 ± 20	45 ± 20	451 ± 355	Abdullahi, S. et al, 2018
ไนจีเรีย	30	133	390	Arabi, A.S. et al., 2015
บังคลาเทศ	49.4±3.0	71.6±3.5	927.2±13.8	Asaduzzaman, K. et al., 2015

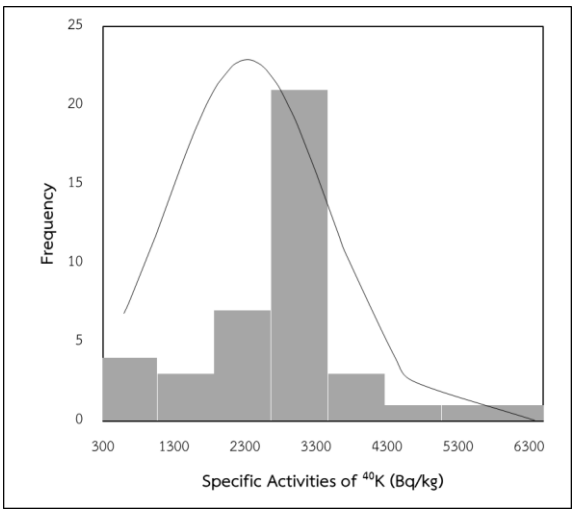
เมื่อนำปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียน จำนวน 41 ตัวอย่าง ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา มาสร้างกราฟแท่งของการแจกแจงความถี่และคำนวณหาค่ากลางของข้อมูลที่ตรวจวัดและวิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.9



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.9 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทรายในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง โดย (ก) ^{226}Ra (ข) ^{232}Th และ (ค) ^{40}K

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทรายของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ที่เก็บจากอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา จำนวน 41 ตัวอย่าง

ข้อมูลเชิงสถิต	ค่าที่วิเคราะห์ได้		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Bq/kg)	137.84	136.80	3137.90
ค่ามัธยฐาน (Bq/kg)	116.98	107.28	3240.46
ค่าฐานนิยม (Bq/kg)	95.68	92.46	-
ความเบ้ (skewness)	1.61	1.61	0.23
ความโด่ง (kurtosis)	6.32	2.12	2.08
ค่าน้อยที่สุด (Bq/kg)	61.65	61.81	664.43
ค่ามากที่สุด (Bq/kg)	397.72	344.56	6500.79

จะเห็นได้ว่ากราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ของค่ากัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในทราย จำนวน 41 ตัวอย่างที่ มีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตรหรือเบ้ขวา โดยมีค่าความเบ้เท่ากับ 1.61, 1.61 และ 0.23 ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการคำนวณหาค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี จำนวน 5 ค่า จึงใช้ค่ามัธยฐานซึ่งค่ากลางของข้อมูลไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา แสดงค่าดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องในตัวอย่างทราย ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

สถานที่	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	H_{in}	D (nGy/h)	E (mSv/y)
บริเวณตอนล่างจังหวัดยะลา	519.91±30.42	1.40±0.08	1.72±0.11	253.97±13.63	0.31±0.02
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (เฉพาะภาคใต้)	512.9	1.39	-	231.81	0.28
UNSCEAR 2000	370	1	1	157	0.48

พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) และปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) จากตัวอย่างทรายที่เก็บในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่า 519.91±30.42 Bq/kg, 1.40±0.08, 1.72±0.11, 253.97±13.63 nGy/h และ 0.31±0.02 mSv/y ตามลำดับ โดยค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แต่มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก และค่าเฉลี่ยของอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR ส่วนปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปีนั้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ในเฉพาะบริเวณภาคใต้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และแต่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย UNSCEAR แสดงให้เห็นประชาชนอาจจะได้รับอันตรายได้หากนำทรายมาใช้ในการก่อสร้างอาคาร เนื่องจากปริมาณรังสีแกมมาในอากาศมีค่าสูง

4.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารด้วยถ้วยแทรคแอดดีเทคเตอร์

จากการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน บริเวณในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา โดยการติดตั้งอุปกรณ์พร้อมแผ่นฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ชนิด CR-39 ไว้ในห้องเรียนที่ปิดมิดชิด ส่วนใหญ่เป็นห้องเรียน สำนักงาน และห้องสมุด เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่นักเรียน ครู และเจ้าหน้าที่ใช้เวลาอยู่นานที่สุด โดยติดตั้งที่ระดับพื้น และนำแผ่นฟิล์มมากัดรอยเพื่อขยายรอยที่รังสีแอลฟาชนแผ่นฟิล์ม แล้วนับรอยอนุภาคแอลฟา (Track) บนแผ่นฟิล์ม จำนวน 9 ตำแหน่ง แล้วนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร แสดงผลการศึกษาไว้ในตารางที่ 4.13

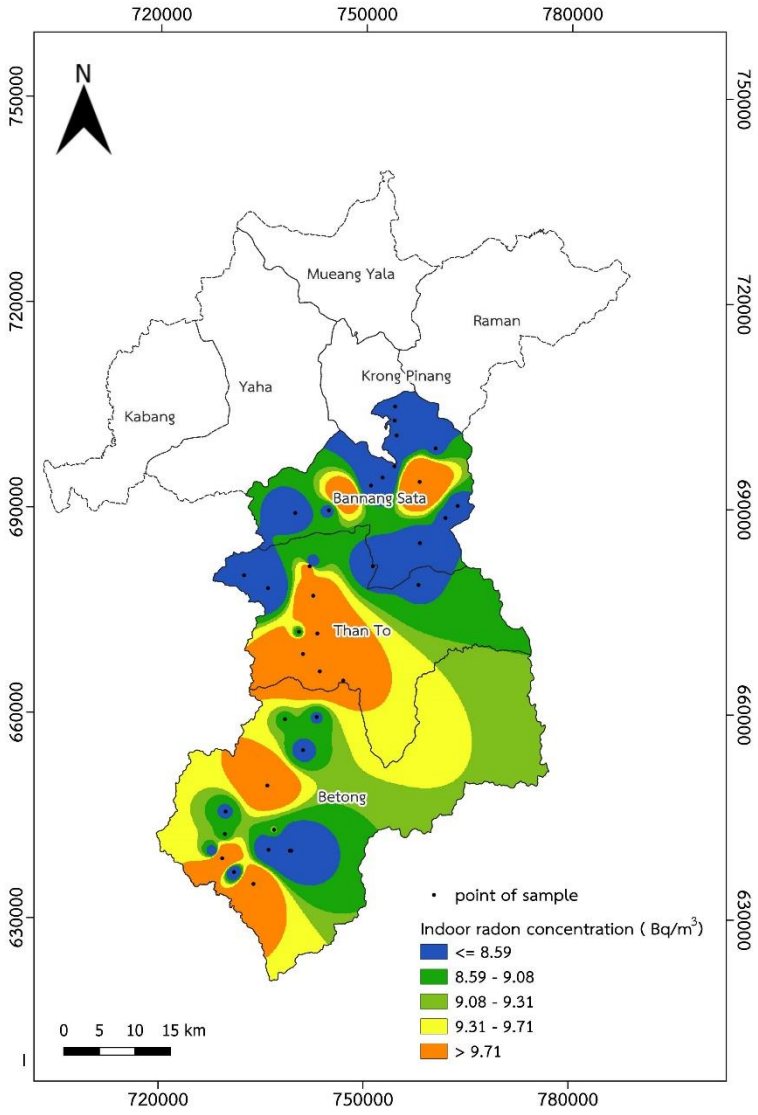
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน (Bq/m^3)
บริเวณอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา

District	School	C_{Rn} (Bq/m^3)
บันนังสตา	บ้านป่าหวัง	4.52±2.4
	บันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	7.65±3.12
	บ้านกาโสด	8.28±3.25
	บ้านเจาะปันตัง	13.17±4.1
	บ้านรานอ	4.27±2.33
	บ้านตาเนาะปูเต๊ะ	4.02±2.26
	บ้านทำนบ	8.53±3.3
	บ้านตังกาเด็ง	7.78±3.15
	บ้านตะบิงติงงี	8.41±3.27
	บ้านทรายแก้ว	19.95±5.04
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	8.28±3.25
	นิคมพัฒนาวิทย์	8.28±3.25
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	7.65±3.12
	เขื่อนบางลาง	6.65±2.91
	นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	7.4±3.07
	บ้านฉลองชัย	8.28±3.25
ธารโต	บ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	12.17±3.94
	ธารโตวัฒฒนวิทย์	6.15±2.8
	บ้านแหร	12.42±3.98
	บ้านบ่อหิน	11.17±3.77

	บ้านวังศิลา	8.66±3.32
	บ้านไทยพัฒนา	8.53±3.3
	บ้านศรีนคร	4.14±2.3
	บ้านจุโป	12.05±3.92
	บ้านปะเด็ง	9.79±3.53
	บ้านโต	16.06±4.53
เบตง	เบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	16.31±4.56
	อนุบาลเบตง	9.29±3.44
	เทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	7.4±3.07
	บ้านยะรม	6.78±2.94
	สังวาลย์วิท 5	8.03±3.2
	บ้านธารน้ำใส	4.77±2.47
	บ้านจาเราะปะไต	8.66±3.32
	ไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	8.28±3.25
	บ้านมาลา	9.16±3.42
	บ้านด่านสันติราษฎร์	13.93±4.21
	บ้านอัยเยอร์เวง	8.03±3.2
	บ้านใหม่	8.41±3.27
	บ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	8.91±3.37
	บ้านบาแตตูแง	6.78±2.94
	บ้านจาเราะซูซู	14.81±4.35
ค่าเฉลี่ย		9.12±3.35
US EPA		148
WHO		100
ICRP		200-600

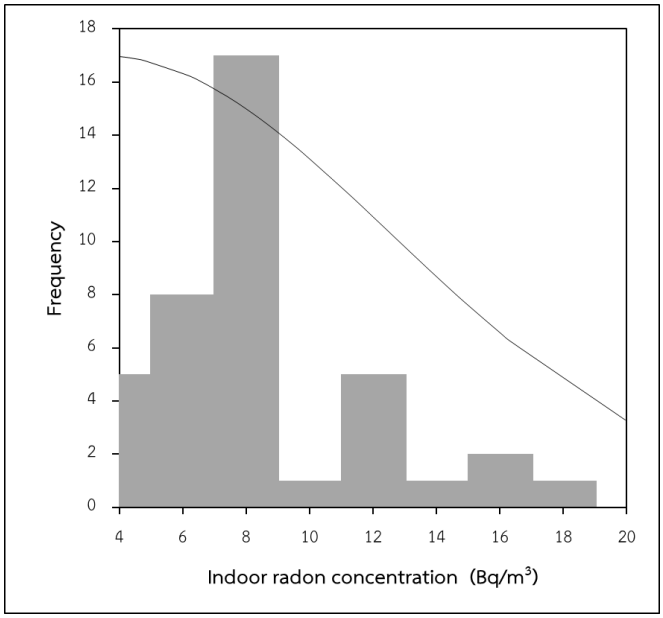
พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียนมีค่าอยู่ระหว่าง 4.02±2.26 ถึง 19.95±5.04 Bq/m^3 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.12±3.42 Bq/m^3 ซึ่งเมื่อนำผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของก๊าซเรดอนภายในอาคาร พบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่หน่วยงานต่าง ๆ กำหนดไว้ ได้แก่ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้กำหนดไว้ที่ 148 Bq/m^3 เมื่อนำผลการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร จำนวน 41 โรงเรียน บริเวณในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา เทียบกับ การศึกษาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารด้วยชุดตรวจวัดก๊าซเรดอนชนิดแผ่นพลาสติก CR-39 ในพื้นที่ 5 ตำบล ของอำเภอเมือง จังหวัดยะลา พบว่ามีต่ำกว่า ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.63 ± 1.74 Bq/m^3 (ปัทมา, 2565) นอกจากนี้ยังมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เท่ากับ 225 Bq/m^3 ตามลำดับ (ไตรภพ และคณะ, 2544) ซึ่งทั้งสองพื้นที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิต นอกจากนี้ยังมีค่าต่ำว่าเมื่อเทียบกับการประเมินก๊าซเรดอนในอาคารในโรงเรียนอนุบาลและโรงเรียนประถมศึกษาในประเทศอิตาลี เนื่องจากมีการระเบิดของภูเขาไฟใต้ผิวดินอยู่บ่อย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77 Bq/m^3 (Loffredo et al., 2022) ซึ่งจะเห็นว่าพื้นที่การศึกษาความเข้มข้นก๊าซเรดอนในอาคารในงานวิจัยอื่น ๆ ส่วนใหญ่นั้นจะมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เป็นหินแกรนิตหรือเป็นพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดการระเบิดของภูเขาไฟ เช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ แต่ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารมีค่าแตกต่างกันนั้น อาจเป็นเพราะปัจจัยและกระบวนการทางกายภาพหลายอย่าง เช่นระบบระบายอากาศ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ หรือวัสดุก่อสร้างที่นำมาใช้ในการสร้างอาคารนั้นมาจากพื้นที่อื่น (Quarto et al., 2015) ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างในบริเวณตอนเหนือของจังหวัดยะลาซึ่งมีสภาพธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตแต่มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนไม่สูงมากนัก (พวงทิพย์, 2562) และยังพบว่าอาคารเรียนส่วนใหญ่จะมีการเปิดประตูหน้าต่างอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการลดระดับ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารอีกทางนึงเช่นกัน

สามารถนำค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน บริเวณอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา จำนวน 41 โรงเรียน มาสร้างแผนภาพการกระจายตัวความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แผนภาพการกระจายตัวความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร บริเวณอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา

เมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน ทั้ง 41 โรงเรียน ในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จังหวัดยะลา มาสร้างกราฟแท่งของการแจกแจงความถี่และคำนวณหาค่ากลางของข้อมูลที่ตรวจวัดและวิเคราะห์ได้ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.14



ภาพที่ 4.11 กราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ของค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียนในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลเชิงสถิติของการแจกแจงความถี่ ของค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียนในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จำนวน 41 โรงเรียน

ข้อมูลเชิงสถิต	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Bq/kg)	9.12
ค่ามัธยฐาน (Bq/kg)	8.28
ค่าฐานนิยม (Bq/kg)	8.28
ความเบ้ (skewness)	1.13
ความโด่ง (kurtosis)	1.50
ค่าน้อยที่สุด (Bq/kg)	4.02
ค่ามากที่สุด (Bq/kg)	19.95

จะเห็นได้ว่ากราฟแท่งของการแจกแจงความถี่ของค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียนในอำเภอบันนังสตา ธารโต และเบตง จำนวน 41 โรงเรียน มีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตรหรือเบ้ขวา โดยมีค่าความเบ้เท่ากับ 1.13 ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการคำนวณหาค่าความเสี่ยงการเกิดมะเร็งปอดจากการได้รับก๊าซเรดอน จึงใช้ค่ามัธยฐานซึ่งค่ากลางของข้อมูลไปใช้คำนวณหาค่าปริมาณรังสีสมมูล (DT) ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (ELCR) และหาจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (LCC) ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา แสดงค่าดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าปริมาณรังสีสมมูล (DT) ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (ELCR) และจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (LCC) ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา

สถานที่	**DT (mSv/y)**	**ELCR ($x10^{-3}$)**	**LLC ($x10^{-6}$)**
บริเวณตอนล่างจังหวัดยะลา	0.21±0.01	0.80±0.46	3.76±0.90
ICRP, 2010	3-10	-	170 - 230
UNSCEAR, 2000	-	0.29	-

สำหรับค่าปริมาณรังสีสมมูล (DT) ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (ELCR) และจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (LCC) ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่า 0.21±0.01 mSv/y , 0.80±0.46, 3.76±0.90 ตามลำดับ

โดยปริมาณรังสีสมมูล (DT) ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลามีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานขององค์การสากลในการป้องกันอันตรายจากรังสี (ICRP) กำหนดที่ระดับ 3-10 mSv/y (ICRP, 2010) และยังมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารในพื้นที่ 5 ตำบลของอำเภอเมือง จังหวัดยะลา ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.57 ± 0.04 mSv/y (ปัจมา, 2565) ส่วนค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (ELCR) มีค่าสูงกกว่าเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่คณะกรรมการวิทยาศาสตร์แห่งสหประชาชาติว่าด้วยผลกระทบจากรังสีกำหนดไว้คือ $0.29x10^{-3}$ (UNSCEAR, 2000) แต่มีค่าต่ำกว่าเมื่อนำไปเทียบกับในพื้นที่ 5 ตำบลของอำเภอเมืองจังหวัดยะลา ซึ่งมีค่าเฉลี่ย $2.20\ x10^{-3} \pm 0.17$ (ปัจมา, 2565)

สำหรับค่าเฉลี่ยของการเกิดจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (LCC) มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานขององค์การสากลในการป้องกันอันตรายจากรังสี (ICRP) ที่กำหนดไว้ในช่วง 170-230 ต่อปีต่อล้านคน (ICRP, 2010) และต่ำกว่าเมื่อนำไปเทียบกับในพื้นที่ 5 ตำบลของอำเภอเมือง จังหวัดยะลา ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 10.27 ± 0.79 (ปัจมา, 2565)

และเมื่อนำข้อมูลค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารที่ได้จากการศึกษาไปสร้างแผนที่คอนทัวร์การกระจายตัวความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร จำนวน 41 โรงเรียน ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าพื้นที่ตำบลตลิ่งชัน ตำบลบันนังสตา ตำบลบ้านแหร ตำบลตาเนาะแมเราะ และตำบลเบตง มีค่าสูงสุด ทั้งนี้ เมื่อเทียบกับแผนที่ทางธรณีวิทยาของจังหวัดยะลา (กรมทรัพยากรธรณี, 2500) จะเห็นว่าพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตสลับกับหินทราย จึงมีความเป็นได้ที่พบว่ามีค่าสูง ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีของชั้นหินในพื้นที่ดังกล่าวอีกด้วย (López-Pérez et al., 2022)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ใน หิน ดิน ทราย ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโรงเรียนบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีที่เกี่ยวข้องจากวัสดุก่อสร้าง และดูความสัมพันธ์ระหว่างค่ากัมมันตภาพรังสี ใน หิน ดิน ทราย ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมีผลต่อความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารเรียน

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินมีค่าเฉลี่ยเป็น 77.69±0.36, 55.02±0.22 และ 712.38±0.47 Bq/kg ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) พบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra และ ^{40}K มีค่าสูงสุดในโรงเรียนบ้านปะเด็ง ส่วน ^{232}Th มีค่าสูงสุดในโรงเรียนเบตง (วีระราษฎร์ประสาน) สำหรับค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีทั้ง 5 ค่านั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน มีค่าเฉลี่ยเป็น 251.50±0.69, 294.92±0.5 และ 2335.02±0.75Bq/kg ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) พบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra และ ^{232}Th มีค่าสูงสุดในโรงเรียนบ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519) ส่วน ^{40}K มีค่าสูงสุดในโรงเรียนบ้านไทยพัฒนา สำหรับค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีทั้ง 5 ค่านั้นพบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายใน (H_{in}) และอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ มีเพียงปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) เท่านั้นที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้อาเป็นเพราะจังหวัดมีลักษณะเป็นเทือกเขาหินแกรนิต และยังพบว่าดินบริเวณทางตอนใต้ของจังหวัดยะลามีศักย์ทางเรดอนสูง จึงทำให้ปริมาณรังสีอยู่ในระดับสูง

ปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทราย มีค่าเฉลี่ยเป็น 137.84±0.53, 43.03±0.35 และ 3055.62±0.84 Bq/kg ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับดิน (UNSCEAR, 2000) ค่าเฉลี่ยของโลกสำหรับวัสดุก่อสร้าง (UNSCEAR, 1993) พบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra และ ^{232}Th มีค่าสูงสุดใน โรงเรียนบ้านศรีนครส่วน ^{40}K มีค่าสูงสุดในโรงเรียนเขื่อนบางลาง สำหรับค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีทั้ง 5 ค่านั้นพบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับ

รังสีจากภายใน (H_{in}) และอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ มีเพียงปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) เท่านั้นที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

ผลการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารเรียน บริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 4.02±2.26 ถึง 19.95±5.04 Bq/m^3 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.12±3.42 Bq/m^3 มีค่าสูงสุดที่โรงเรียนบ้านทรายแก้ว และต่ำสุดที่โรงเรียนบ้านตาเนาะปูเต๊ะ โดยทุกโรงเรียนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารไว้ที่ 148 Bq/m^3 ถึงแม้พื้นที่ที่ศึกษามีสภาพธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตแต่มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนไม่สูงมากนักนั้น เนื่องจากอาคารเรียนส่วนใหญ่จะมีการเปิดประตูหน้าต่างอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการลดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารอีกทางหนึ่งเช่นกัน สำหรับค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสี พบว่าปริมาณรังสีสมมูล (DT) มีค่า 0.21±0.01 mSv/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานขององค์การสากลในการป้องกันอันตรายจากรังสี (ICRP) ส่วนค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (ELCR) มีค่า 0.80±0.46 พบว่ามีค่าสูงกกว่าเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่คณะกรรมการวิทยาศาสตร์แห่งสหประชาชาติว่าด้วยผลกระทบจากรังสีกำหนดไว้ (UNSCEAR, 2000) และจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดต่อปีต่อล้านคน (LCC) ในบริเวณตอนล่างของจังหวัดยะลา มีค่า 3.76±0.90 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานขององค์การสากลในการป้องกันอันตรายจากรังสี (ICRP)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการประเมินปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ใน หิน ดิน ทราย ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารเรียน และการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในอากาศภายในอาคารเรียนในพื้นที่ทางตอนใต้ของจังหวัดยะลา พบว่าในหลายโรงเรียนมีค่ากัมมันตภาพรังสี (^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K) ใน หิน ดิน ทราย สูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของโลก แต่เมื่อนำมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รังสีจากภายในร่างกาย (H_{in}) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) และ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) พบว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัย หากนำมาใช้ก่อสร้างอาคารจึงถือว่าปลอดภัยสำหรับผู้อยู่อาศัย ประกอบกับผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอากาศภายในอาคารเรียน ที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารไว้ แต่เพื่อความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากการสูดดมก๊าซเรดอนภายในอาคาร ควรมีช่องลมระบายอากาศ เพื่อลดการสะสมก๊าซเรดอนภายในอาคาร

บทที่ 6
บรรณานุกรม

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2559. การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดยะลา ค้นจาก http://www.dmr.go.th/more_news.php?cid=916

ฉันท์ทิพ คำนวณทิพย์. 2552. ก๊าซเรดอนในอาคารและวัสดุก่อสร้าง. วารสารวิศวกรรมศาสตรราชมงคลธัญบุรี. 7(1), 1-11.

ทิพวรรณ คงภักดี. 2560. วิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยก๊าวเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง และศึกษาระดับก๊าซเรดอนในอาคารทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2560), 35-37.

ธัชพงศ์ ศรีสุวรรณ. 2549. เรดอน : มหันตภัยเงียบในอาคาร. วารสารวิจัยและสาระปัตยกรรม/การผังเมือง. 4(2), 23-47.

ธวัช ชิตตระการ. 2541. การตรวจและการวัดรังสี. พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ด่านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 35-75.

นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2553. นิวเคลียร์เทคโนโลยี : พื้นฐานและการประยุกต์ใช้ด้านกินและพืช (น. 25), กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัทมา พิศภักดิ์. 2564. การประเมินการได้รับปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารที่มีผลต่อการเกิดโรคมะเร็งปอด ในบริเวณพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดยะลา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย. 7(2), 43-52.

ปิยะ ผานศึก, สุนารี บดีพงศ์ และมูบารัค เล็กเกลี้ยง. 2564. การประเมินนิวไคลด์กัมมันตรังสี (^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K) ในดินบริเวณเทือกเขาหินแกรนิตอำเภอเกาะพะงัน จังหวัดสุราษฎร์ธานี. 24(1), 14-22.

ประสงค์ เกษราธิคุณ, สุพรรษา ธานีรัตน์ และ อุดร ยังช่วย. 2552. การตรวจวัดและวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226, Th-232 และ K-40 ในทรายชายหาดบริเวณชายหาดเฉวงอำเภอเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ครั้งที่ 11. หอประชุมมหิศร ไทยพาณิชย์ปาร์ค พาลาซ่า, กรุงเทพฯ, 2-3 กรากฎาคม 2552, หน้า 1-14.

พงศ์เทพ วิวรรธนะเดช. 2550. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับก๊าซเรดอนในที่อยู่อาศัยและมะเร็งปอดในอำเภอสารภีจังหวัดเชียงใหม่. สืบค้นจาก https://cmudc.library.cmu.ac.th/frontend/Info/item/dc:31928

พวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2545. รายงานวิจัยเรื่องการตรวจปริมาณยูเรเนียมในดินพื้นผิวพื้นที่จังหวัดยะลาด้วยแกมมาสเปกโตรมิเตอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี

พวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2546. การตรวจปริมาณยูเรเนียมในตะกอนพื้นที่จังหวัดยะลาด้วยแกมมาสเปกโตรมิเตอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี

พวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2562. ความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างบริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 13(2). 187-197.

ไมมูน เจ๊ะลี, สุทธินี ช่วยมณี และ ประสงค์ เกษราธิคุณ. 2555. กัมมันตภาพจำเพาะและแผนภาพทางรังสีของ ^{40}K, ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินบริเวณจังหวัดยะลา, ประเทศไทย. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม, 6-7 ธันวาคม 2555, 1892-1899.

สัจจพล พงษภมร. 2554. รังสี (RADIATION). วารสารสมาคมเวชศาสตรปองกันแหงประเทศไทย. 1(2), 208-214.

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2535-2536. รายงานวิชาการประจำปี 2533-2534. กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2540, 2542, 2543. รายงานวิชาการประจำปี 2535, 2537, 2538. กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2544-2546. รายงานวิชาการประจำปี 2541-2543. กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

Abbasi, A. 2017. Levels of Radon and Granite Building Materials. Radon, November.

Abdullahi, S., Ismail, A. F, and Samat, S. 2019. Determination of indoor doses and excess lifetime cancer risks caused by building materials containing natural radionuclides in Malaysia. Nuclear Engineering and Technology, 51(1), 325–336.

Abdullahi, S., Ismail, A. F, and Samat, S. 2019. Radiological characterization of building materials used in Malaysia and assessment of external and internal doses. Nuclear Science and Techniques, 30(3), 1–15.

Abo-Elmagd, M., Saleh, A, and Afifi, G. 2018. Evaluation of radon related parameters in environmental samples from Jazan city, Saudi Arabia. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 11(1), 104–110.

Agbalagba, E. O and Onoja, R. A. 2011. Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria. Journal of Environmental Radioactivity, 102(7), 667–671.

Adrović, F. 2017. Introductory Chapter: Radon Phenomenon. Radon.

Amin, R. M. 2015. A study of radon emitted from building materials using solid state nuclear track detectors. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8(4), 516–522.

Amrani, D. and Tahtat, M. 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials. Applied Radiation and Isotopes, 54(4), 687–689.

Arabi, A. S., Funtua, I. I., Dewu, B. B. M, and Muhammad, A. M. 2015. Background radiation and radiological hazard associated with local building materials around Zaria, Nigeria. Radiochemistry, 57(2), 207–212.

Asaduzzaman, K., Mannan, F., Khandaker, M. U., Farook, M. S., Elkezza, A., Amin, Y. B. M., Sharma, S, and Kassim, H. B. A. 2015. Assessment of natural radioactivity levels and potential radiological risks of common building materials used in bangladeshi dwellings. PLoS ONE, 10(10), 1–16.

Avramović, D., Čeliković, I., Ujić, P., Vukanac, I., Kandić, A., Jevremović, A., Antonijević, D, and Lončar, B. 2019. Radon exhalation rate of some building materials common in Serbia. RAD Conference Proceedings, 3, 119–122.

Ba, V. N., Nguyen, V. T., Thien, B. N., Thu, H. N. P, and Loan, T. T. H. 2021. Activity concentrations of ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, and ^{222}Rn in the indoor air and surface soil in Ho Chi Minh City, Vietnam: Methods for estimating indoor ^{222}Rn and health risks to the population. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 327(2), 897–904.

Baykara, O., Karatepe, Ş, and Doğru, M. 2011. Assessments of natural radioactivity and

radiological hazards in construction materials used in Elazig, Turkey. Radiation Measurements, 46(1), 153–158.

Beyzadeoglu, M., Ozyigit, G, and Ebruli, C. 2022. Basic Radiation Oncology Second Edition.

Casal-Mouriño, A., Ruano-Ravina, A., Torres-Durán, M., Parente-Lamelas, I., Provencio-Pulla, M., Castro-Añón, O., Vidal-García, I., Pena-Álvarez, C., Abal-Arca, J., Piñeiro-Lamas, M., Fuente-Merino, I., Fernández-Villar, A., Abdulkader, I., Valdés-Cuadrado, L., Barros-Dios, J. M, and Pérez-Ríos, M. 2020. Corrigendum to "Lung cancer survival in never-smokers and exposure to residential radon: Results of the LCRINS study".

Corrêa, J. N., Silva, A. C. M., Paschuk, S. A., Barreto, R. C., Denyak, V., Schelin, H. R., Narloch, D. C., Hashimoto, Y, and Martin, A. C. 2020. Thickness of radon emitting layer in building materials. Radiation Physics and Chemistry, 172(July 2019), 108786.

Cosma, C., Cucoş-Dinu, A., Papp, B., Begy, R, and Sainz, C. 2013. Soil and building material as main sources of indoor radon in Bâiţa-ştei radon prone area (Romania). Journal of Environmental Radioactivity, 116, 174–179.

Degu Belete, G. and Alemu Anteneh, Y. 2021. General Overview of Radon Studies in Health Hazard Perspectives. Journal of Oncology, 2021.

Dentoni, V., Da Pelo, S., Mousavi Aghdam, M., Randaccio, P., Loi, A., Careddu, N. and Bernardini, A. 2020. Natural radioactivity and radon exhalation rate of Sardinian dimension stones. Construction and Building Materials, 247, 118377.

Durusoy, A. and Yildirim, M. 2017. Determination of radioactivity concentrations in soil samples and dose assessment for Rize Province, Turkey. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 10(4), 348–352.

Faisal, B. M. R., Haydar, M. A., Ali, M. I., Paul, D., Majumder, R. K. and Uddin, M. J. 2014. Assessment of Natural Radioactivity and Associated Radiation Hazards in Topsoil of Savar Industrial Area, Dhaka, Bangladesh. Journal of Nuclear and Particle Physics, 2014(4), 129–136.

Gaskin, J., Coyle, D., Whyte, J, and Krewksi, D. 2018. Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. Environmental Health Perspectives, 126(5), 1–8.

Ghias, S., Satti, K. H., Khan, M., Dilband, M., Naseem, A., Jabbar, A., Kali, S., Ur-Rehman, T., Nawab, J., Aqeel, M., Khan, M. A, and Zafar, M. I. 2021. Health risk assessment of radioactive footprints of the urban soils in the residents of Dera Ghazi Khan, Pakistan. Chemosphere, 267, 129171.

Gopalakrishnan, P. and Jeyanthi, J. 2022. Importance of radon assessment in indoor Environment-a review. Materials Today: Proceedings, 56(January), 1495–1500.

Gopal B. Saha. 2013. Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine. Springer New York, NY.

Kang, J. K., Seo, S. and Jin, Y. W. 2019. Health effects of radon exposure. Yonsei Medical Journal, 60(7), 597–603.

International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1987. Lung cancer risk from exposure to radon daughters. ICRP 50. Ann, 17, 1–57.

International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press.

Khalid, N., Majid, A. A., Yahaya, R. and Yasir, M. S. 2014. Radiological risk of building materials using homemade airtight radon chamber. AIP Conference Proceedings, 1584(February 2015), 207–210.

L'Annunziata, M. F. 2012. Radiation Physics and Radionuclide Decay. In Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edit). Elsevier.

Le Roux, R. R., Bezuidenhout, J, and Smit, H. A. P. 2019. The influence of different types of granite on indoor radon concentrations of dwellings in the South African West Coast Peninsula. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 12(1), 375–382.

Ian W. Donald. 2010. Waste Immobilization in Glass and Ceramic Based Hosts : Radioactive, Toxic and Hazardous Wastes.

Loffredo, F., Opoku-Ntim, I., Meo, G, and Quarto, M. 2022. Indoor Radon Monitoring in Kindergarten and Primary Schoolsin South Italy. Atmosphere, 13(3), 1–7.

Lolila, F. and Mazunga, M. S. 2023. Journal of Radiation Research and Applied Sciences Measurements of natural radioactivity and evaluation of radiation hazard indices in soils around the Manyoni uranium deposit in Tanzania. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 16(1), 100524.

López-Pérez, M., Hernández, F., Díaz, J. P, and Salazar-Carballo, P. A. 2022. Determination of the indoor radon concentration in schools of Tenerife (Canary Islands): a comparative study. Air Quality, Atmosphere and Health, 15(5), 825–835.

Lorenzo-Gonzalez, M., Ruano-Ravina, A., Torres-Duran, M., Kelsey, K. T., Provencio, M., Parente-Lamelas, I., Piñeiro-Lamas, M., Varela-Lema, L., Perez-Rios, M., Fernandez-Villar, A., Barros-Dios, J. M., Singh, P. P., Singh, P. P., Singh, S., Sahoo, B. K., Sapra, B. K., Bajwa, B. S., Soniya, S. R., Abraham, S., ... Abate, T. 2021. Levels of Radon and Granite Building Materials. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8(2), 226–233.

Marvin Wilkening. 1981. Radon in Atmospheric Studies: A Review. Second special symposium Bhabiia atomic research center bombay, india. January 19-23, 565-574.

Mirdoraghi, M., Masoumi, S, and Einor, D. 2018. Data on assessment excess lifetime cancer risk and risk of lung cancer from inhalation of Radon 222 in radiotherapy centers in Tehran, Iran. Data in Brief, 20, 1367–1370.

Murphy, P., Dowdall, A., Long, S., Curtin, B, and Fenton, D. 2021. Estimating population lung cancer risk from radon using a resource efficient stratified population weighted sample survey protocol – Lessons and results from Ireland. Journal of Environmental Radioactivity, 233(March), 106582.

Nguyễn-Văn, H., Nguyễn-Thùy, D., Nguyễn, N. T. Á., Streil, T., Schimmelmann, J. P., Doiron, K. E., Nguyễn-Đình, T., Nguyễn-Thị, H, and Schimmelmann, A. 2020. Excessive radon-based radiation in indoor air caused by soil building materials in traditional homes on Đồng Văn karst plateau, northern Vietnam. Chemosphere, 257.

Noh, J., Jang, H., Cho, J., Kang, D. R., Kim, T. H., Shin, D. C, and Kim, C. 2020. Estimating the disease burden of lung cancer attributable to residential radon exposure in Korea during 2006–2015: A socio-economic approach. Science of the Total Environment, 749, 141573.

Papaefthymiou, H. and Gouseti, O. 2008. Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece. Radiation Measurements, 43(8), 1453–1457.

Pauwels, E. K. J. (2005). Radioactivity Radionuclides Radiation. In European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (Vol. 32, Issue 5).

Quarto, M., Pugliese, M., La Verde, G., Loffredo, F, and Roca, V. 2015. Radon exposure assessment and relative effective dose estimation to inhabitants of Puglia region, South Italy. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(11), 14948–14957.

Raghu, Y., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Vijayagopal, P, and Venkatraman, B. 2017. Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in building materials used in the Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India, using a statistical approach. Journal of Taibah University for Science, 11(4), 523–533.

Raghu, Y., Venkatamuthukumar, J., Nagaraju, P, and Allenmoses, S. E. 2020. Assessment of excess lifetime cancer risk of sand samples used as building materials in Tiruvannamalai district, Tamil Nadu, India by gamma ray spectrometry. Materials Today: Proceedings, 33(xxxx), 3654–3657.

Sherafat, S., Nemati Mansour, S., Mosaferi, M., Aminisani, N., Yousefi, Z, and Maleki, S. 2019. First indoor radon mapping and assessment excess lifetime cancer risk in Iran. MethodsX, 6, 2205–2216.

Shoeib, M. Y. and Thabayneh, K. M. 2014. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation rate in various samples of Egyptian building materials. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 7(2), 174–181.

Singh, P., Singh, P., Singh, S., Sahoo, B. K., Sapra, B. K, and Bajwa, B. S. 2015. A study of indoor radon, thoron and their progeny measurement in Tosham region Haryana, India. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8(2), 226–233.

Soniya, S. R., Abraham, S., Khandaker, M. U, and Jojo, P. J. 2021. Investigation of diffusive transport of radon through bricks. Radiation Physics and Chemistry, 178(May), 108955.

Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S, and Karahan, G. 2009. Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey. Journal of Environmental Radioactivity, 100(1), 49–53.

Tirmarche, M., Harrison, J. D., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E, and Marsh, J. W. 2010. Part 1: Lung Cancer Risk from Radon and Progeny. Annals of the ICRP, 40(1), 11.

Tufail, M.M., Hussain, M.Y. and Akram, M. 2011. Short communication primordial radionuclides contamination level in fertilized farms soils of Faisalabad-Pakistan. Journal of soil environ. 30(1), 88-94.

Ujić, P., Čeliković, I., Kandić, A., Vukanac, I., Durašević, M., Dragosavac, D., and Žunić, Z. S. 2010. Internal exposure from building materials exhaling 222Rn and 220Rn as compared to external exposure due to their natural radioactivity content. Applied Radiation and Isotopes, 68(1), 201–206.

UNSCEAR. 1993. Exposure from natural sources of radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.

UNSCEAR. 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation Volume I: source. In United Nations Scientific Committe on the Effects of Atomic Radiation: Vol. I.

Yang, J. and Sun, Y. 2022. Natural radioactivity and dose assessment in surface soil

from Guangdong, a high background radiation province in China. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 15(1), 145–151.

Yousef, H. A., Korany, K. A., Mira, H. I., Hassan, S. F, and Saleh, G. M. 2019. The annual effective dose of granite rock samples using alpha track detector. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 12(1), 112–117.

Wang, H., Zhang, L., Gao, P, and Guo, Q. 2022. Original article. 3 (November 2021), 22–25.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตำแหน่งเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้างและตำแหน่งอาคารที่วัดก๊าซเรดอน ในอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา

District	School	Code	Position	
			Latitude	Longitude
บันนังสตา	โรงเรียนบ้านป่าหวัง	B01	6.27788	101.28238
	โรงเรียนบันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	B02	6.26723	101.26704
	โรงเรียนบ้านกาโสด	B03	6.23451	101.2115
	โรงเรียนบ้านเจาะปันตัง	B04	6.25334	101.2317
	โรงเรียนบ้านรานอ	B05	6.37165	101.29889
	โรงเรียนบ้านตาเนาะปูเต๊ะ	B06	6.33349	101.3009
	โรงเรียนบ้านทำนบ	B07	6.353	101.29821
	โรงเรียนบ้านตังกาเด็ง	B08	6.23109	101.16703
	โรงเรียนบ้านตะบิงติงงี	B16	6.29263	101.29805
	โรงเรียนบ้านทรายแก้ว	B09	6.27206	101.33128
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	B10	6.22433	101.36527
	โรงเรียนนิคมพัฒนาวิทย์	B11	6.31634	101.35237
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	B12	6.24028	101.38154
	โรงเรียนเขื่อนบางลาง	B13	6.16062	101.26942
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	B14	6.19117	101.33162
	โรงเรียนบ้านฉลองชัย	B15	6.13585	101.32971
ธารโต	โรงเรียนบ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	Th01	6.16028	101.18597
	โรงเรียนธารโตวัฒฒนวิทย์	Th02	6.16328	101.18801
	โรงเรียนบ้านแหร	Th03	6.12147	101.19081
	โรงเรียนบ้านบ่อหิน	Th04	6.07173	101.19618
	โรงเรียนบ้านวังศิลา	Th05	6.07268	101.17164
	โรงเรียนบ้านไทยพัฒนา	Th06	6.13305	101.13148

District	School	Code	Position	
			Latitude	Longitude
	โรงเรียนบ้านศรีนคร	Th07	6.1317	101.12966
	โรงเรียนบ้านจุโป	Th08	6.02172	101.19936
	โรงเรียนบ้านปะเด็ง	Th09	6.00952	101.23037
	โรงเรียนบ้านโต	Th10	6.04472	101.17716
เบตง	โรงเรียนเบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	BA01	5.77514	101.07108
	โรงเรียนอนุบาลเบตง	BA02	5.77761	101.07219
	โรงเรียนเทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	BA03	5.78444	101.05865
	โรงเรียนบ้านยะรม	BA04	5.78599	101.13174
	โรงเรียนสังวาลย์วิท 5	BA05	5.78473	101.16172
	โรงเรียนบ้านธารน้ำใส	BA06	5.7849	101.15985
	โรงเรียนบ้านจาเราะปะไต	BA07	5.80683	101.07409
	โรงเรียนไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	BA08	5.83659	101.07506
	โรงเรียนบ้านมาลา	BA09	5.8125	101.13912
	โรงเรียนบ้านด่านสันติราษฎร์	BA10	5.87093	101.13019
	โรงเรียนบ้านอัยเยอร์เวง	BA11	5.91773	101.17726
	โรงเรียนบ้านใหม่	BA12	5.96149	101.19532
	โรงเรียนบ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	BA13	5.95864	101.1534
	โรงเรียนบ้านบาแตตูแง	BA14	5.75664	101.08608
	โรงเรียนบ้านจาเราะซูซู	BA15	5.74098	101.11181

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข 1 ปริมาณค่าใต้พีคของสเปกตรัมรังสีแกมมา ของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในหิน

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Ro-B01	334	87	131
Ro-B02	213	39	134
Ro-B03	340	59	96
Ro-B04	294	66	427
Ro-B05	98	41	69
Ro-B06	357	71	114
Ro-B07	267	67	183
Ro-B08	336	80	226
Ro-B16	240	64	100
Ro-B09	155	58	107
Ro-B10	253	32	149
Ro-B11	260	29	106
Ro-B12	911	99	244
Ro-B13	174	90	59
Ro-B14	270	81	143
Ro-B15	327	96	147
Ro-Th01	313	78	495
Ro-Th02	225	95	159
Ro-Th03	255	21	141
Ro-Th04	257	111	77
Ro-Th05	209	38	103
Ro-Th06	346	12	128
Ro-Th07	298	130	152
Ro-Th08	211	241	81
Ro-Th09	7980	2264	7228
Ro-Th10	458	94	201

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Ro-BA01	6898	2816	6696
Ro-BA02	647	145	860
Ro-BA03	527	234	993
Ro-BA04	700	153	755
Ro-BA05	730	187	1329
Ro-BA06	241	164	632
Ro-BA07	307	73	910
Ro-BA08	586	121	805
Ro-BA09	513	49	351
Ro-BA10	617	118	464
Ro-BA11	207	106	98
Ro-BA12	300	77	102
Ro-BA14	153	57	111
Ro-BA15	194	93	51
Ro-BA16	263	237	892

ภาคผนวก ข 2 ปริมาณค่าใต้พีคของสเปกตรัมรังสีแกมมา ของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในดิน

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
SO-B01	1906	854	3290
SO-B02	1658	1112	1611
SO-B03	2063	888	1329
SO-B04	818	1225	1277
SO-B05	2028	526	3051
SO-B06	1847	925	2977
SO-B07	1142	529	2083
SO-B16	2247	690	2275
SO-B08	1094	946	1431
SO-B09	1964	294	2776
SO-B10	3192	1156	2339
SO-B11	2400	630	1720
SO-B12	2059	696	1459
SO-B13	1586	947	2546
SO-B14	866	684	1419
SO-B15	4110	1673	2479
SO-BA01	1592	952	1323
SO-BA02	1161	683	983
SO-BA03	1881	1235	2767
SO-BA04	2565	1155	1354
SO-BA05	3090	1236	543
SO-BA06	1157	831	1221
SO-BA07	1554	1074	1979
SO-BA08	3703	890	2358
SO-BA09	1522	740	2704
SO-BA10	1434	774	1682
SO-BA11	2040	1260	1746

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
SO-BA12	2612	1740	2186
SO-BA14	6931	3590	949
SO-BA15	1110	504	1573
SO-BA16	3057	2151	1303
SO-Th01	2153	946	2134
SO-Th02	1409	802	2315
SO-Th03	1068	1126	607
SO-Th04	1581	1057	3996
SO-Th05	3466	1658	1621
SO-Th06	6648	3273	5778
SO-Th07	4731	2684	1921
SO-Th08	1207	768	4247
SO-Th09	1039	927	3366
SO-Th10	1803	1510	2045

ภาคผนวก ข 3 ปริมาณค่าใต้พีคของสเปกตรัมรังสีแกมมา ของ ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ในทราย

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
SA-B01	957	307	3223
SA-B02	1310	742	3537
SA-B03	1386	861	3426
SA-B04	1458	1031	2936
SA-B05	1142	623	3210
SA-B06	547	337	1626
SA-B07	858	409	3016
SA-B08	862	358	3237
SA-B16	1085	554	3396
SA-B09	1204	597	3093
SA-B10	791	284	2851
SA-B11	1740	1289	3869
SA-B12	795	362	3132
SA-B13	1773	771	5890
SA-B14	820	498	2548
SA-B15	2076	820	2796
SA-Th01	940	401	2837
SA-Th02	948	377	2461
SA-Th03	1695	1138	3568
SA-Th04	1038	542	3057
SA-Th05	1220	484	3018
SA-Th06	1985	490	3352
SA-Th07	3529	1349	5096
SA-Th08	849	360	2817
SA-Th09	891	420	2587
SA-Th10	870	421	2978
SA-BA01	971	321	1919

Samples	Area		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
SA-BA02	849	322	2980
SA-BA03	727	350	2366
SA-BA04	744	356	2090
SA-BA05	1728	388	2858
SA-BA06	1076	390	1290
SA-BA07	1739	382	2732
SA-BA08	2165	741	4457
SA-BA09	977	362	2413
SA-BA10	1209	592	602
SA-BA11	634	242	715
SA-BA12	747	279	2037
SA-BA14	1328	355	763
SA-BA15	1468	495	3007
SA-BA16	1014	560	2780

ภาคผนวก ค

ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

District	School	Track										t(h)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	
บันนังสตา	โรงเรียนบ้านป่าหวัง	2	3	16	3	2	3	3	2	2	4±4.53	720
	โรงเรียนบันนังสตาอินทรฉัตรมิตรภาพ	6	6	9	8	14	4	5	4	5	6.78±3.19	720
	โรงเรียนบ้านกาโสด	4	4	4	11	14	11	9	2	7	7.33±4.12	720
	โรงเรียนบ้านเจาะปันตัง	9	11	9	12	17	13	11	13	10	11.67±2.5	720
	โรงเรียนบ้านรานอ	3	3	5	3	4	3	5	4	4	3.78±0.83	720
	โรงเรียนบ้านตาเนาะปูเต๊ะ	12	3	2	2	3	4	2	2	2	3.56±3.24	720
	โรงเรียนบ้านทำนบ	7	9	5	9	5	11	6	5	11	7.56±2.51	720
	โรงเรียนบ้านตังกาเด็ง	3	3	3	10	14	11	9	2	7	6.89±4.34	720
	โรงเรียนบ้านตะบิงติงงี	8	9	6	8	8	10	7	5	6	7.44±1.59	720
	โรงเรียนบ้านทรายแก้ว	15	16	24	22	12	15	22	16	17	17.67±4.03	720
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 11	6	7	5	6	10	6	6	13	7	7.33±2.55	720
	โรงเรียนนิคมพัฒนาวิทย์	10	2	6	6	8	10	10	7	7	7.33±2.6	720
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 6	5	3	8	7	9	8	11	4	6	6.78±2.54	720
	โรงเรียนเขื่อนบางลาง	8	6	4	5	10	6	4	7	3	5.89±2.2	720
	โรงเรียนนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ 9	4	12	6	5	8	6	5	7	5	6.44±2.4	720

District	School	Track										t(h)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	
	โรงเรียนบ้านฉลองชัย	5	11	13	5	5	5	9	5	8	7.33±3.08	720
ธารโต	โรงเรียนบ้านนิคมสร้างตนเองธารโต	12	10	8	6	13	9	8	15	16	10.78±3.42	720
	โรงเรียนธารโตวัฒนวิทย์	5	3	7	6	4	5	5	8	6	5.44±1.51	720
	โรงเรียนบ้านแหร	12	12	12	10	12	3	16	10	12	11±3.46	720
	โรงเรียนบ้านบ่อหิน	9	10	7	12	9	8	9	12	13	9.89±2.03	720
	โรงเรียนบ้านวังศิลา	10	9	7	12	6	7	7	5	6	7.67±2.24	720
	โรงเรียนบ้านไทยพัฒนา	7	7	5	7	6	8	5	7	16	7.56±3.32	720
	โรงเรียนบ้านศรีนคร	5	4	3	3	2	5	4	3	4	3.67±1	720
	โรงเรียนบ้านจุโป	15	12	8	13	8	16	9	8	7	10.67±3.39	720
	โรงเรียนบ้านปะเด็ง	8	8	9	8	7	14	9	8	7	8.67±2.12	720
	โรงเรียนบ้านโต	13	17	18	11	13	17	16	12	11	14.22±2.77	720
เบตง	โรงเรียนเบตง(วีระราษฎร์ประสาน)	15	12	14	18	16	13	9	14	19	14.44±3.05	720
	โรงเรียนอนุบาลเบตง	8	8	8	12	7	7	12	5	7	8.22±2.33	720
	โรงเรียนเทศบาล 3 (บ้านกุนุงจนอง)	8	9	4	10	6	6	6	6	4	6.56±2.07	720
	โรงเรียนบ้านยะรม	6	8	4	5	6	5	8	6	6	6±1.32	720
	โรงเรียนสังวาลย์วิท 5	9	12	4	10	7	6	6	6	4	7.11±2.71	720
	โรงเรียนบ้านธารน้ำใส	5	5	5	3	3	3	4	4	6	4.22±1.09	720

District	School	Track										t(h)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	
	โรงเรียนบ้านจาเราะปะไต	8	6	9	9	7	6	8	8	8	7.67±1.12	720
	โรงเรียนไทยรัฐวิทยา 94 (บ้านบ่อน้ำร้อน)	5	4	8	5	11	7	6	10	10	7.33±2.55	720
	โรงเรียนบ้านมาลา	9	6	7	10	11	6	14	6	4	8.11±3.14	720
	โรงเรียนบ้านด่านสันติราษฎร์	12	11	13	14	16	12	9	16	8	12.33±2.78	720
	โรงเรียนบ้านอัยเยอร์เวง	5	7	8	11	8	5	9	6	5	7.11±2.09	720
	โรงเรียนบ้านใหม่	5	8	7	6	5	11	7	11	7	7.44±2.24	720
	โรงเรียนบ้านวังใหม่ (ประชาอุทิศ 2519)	6	5	8	7	6	10	8	12	9	7.89±2.2	720
	โรงเรียนบ้านบาแตตูแง	6	6	5	5	7	7	7	6	5	6±0.87	720
	โรงเรียนบ้านจาเราะซูซู	6	16	13	16	10	10	15	13	19	13.11±3.95	720

ภาคผนวก ง

ข้อมูลสารมาตรฐาน IAEA-375

International Atomic Energy Agency
Analytical Quality Control Services
Wagramer Strasse 5, P.O.Box 100, A-1400 Vienna, Austria

REFERENCE SHEET

REFERENCE MATERIAL

IAEA-375

RADIONUCLIDES AND TRACE ELEMENTS IN SOIL

Date of issue: January 2000[•]

Recommended Values
(Based on dry weight)

Reference Date for decay correction: 31st December 1991

Radionuclide	Recommended Value Bq/kg	95% Confidence Interval Bq/kg	N*
^{40}K	424	417 – 432	84
^{90}Sr	108	101 – 114	43
^{106}Ru	56	53 – 58	26
^{125}Sb	77	74 – 79	38
^{129}I	0.0017	0.0013 – 0.0021	10
^{134}Cs	463	454 – 472	87
^{137}Cs	5280	5200 – 5360	91
^{226}Ra	20	18 – 22	37
^{232}Th	20.5	19.2 – 21.9	11

Recommended Values
(Based on dry weight)

Element	Recommended Value mg/kg	95% Confidence Interval mg/kg	N*
Th	5.2	5.0 – 5.4	20
U	1.86	1.66 – 2.05	30

* *Number of accepted laboratory means which were used to calculate the recommended values and confidence intervals.*

• *Revision of the reference sheet dated December 1997; original report date: August 1994.*

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการปรับเทียบแผ่นฟิล์ม CR-39

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

วันที่ออกรายงาน : 24 กันยายน 2555

เลขที่รายงาน : 2/55 หน้า 1 / 1

ปรับเทียบการวัดก๊าซเรดอน

Calibration date : 20-22 กันยายน 2555

Analysis date : 24 กันยายน 2555

Instrument : SSNTDs ชนิดพลาสติก CR-39

Calibration Method : วางอุปกรณ์ที่นำมาปรับเทียบลงในถังวัดเรดอนที่รู้ค่าเรดอน และวัดเรดอนในถังด้วย Ionization chamber Atmos 12 dpx Radon Gas Monitor ซึ่งปรับเทียบจาก Swedish Radiation Protection Authority ประเทศสวีเดน

Traceability : วิธีการปรับเทียบนี้ผ่านการเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการวัดเรดอนของ National Institute of Radiological Science (NIRS) ประเทศญี่ปุ่น

Calibration of data

Flow rate	**2**	**L/min**
Radon concentration in camber	**1183 ± 8**	**Bq/m^3**
Background level in radon chamber	**14 ±4**	**Bq/m^3**
Total Radon concentration	**28**	**kBq.h/m^3**
Exposure time	**24**	**h**

Analyzed by

(Pachirarat Sola)

Scientific officer

Approved by

(Kanitha Srisuksawad)

Supervisor

ผลการปรับเทียบนี้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ในชุดเดียวกับอุปกรณ์ที่นำมาปรับเทียบเท่านั้น

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุวนันท์ แดงวิไล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6320320805

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ) สาขาฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2559

ทุนการศึกษา ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา

1. ทุกยกเว้นค่าธรรมเนียมคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2564
3. ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2565

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

นักวิชาการอุดมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สุวนันท์ แดงวิไล, พวงทิพย์ แก้วทับทิม และอุดร ยังช่วย. 2565. ประเมินกัมมันตภาพรังสี (^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K) และค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสีในตัวอย่างทรายที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ในอำเภอบันนังสตา อำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา. การประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, วันที่ 8-9 ธันวาคม 2565, 2054-2062.