



ปริมาณนอร์มในทรายเก็บจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา
NORM Content in Sand Collected from Klong Takua Pa, Phang Nga Province

ฮานาฟี เหมตระกูลวงศ์
Hanafee Hemtrakoonwong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ปริมาณนอร์มในทฤษฎีเบบจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา
 ผู้เขียน นายฮานาฟี เหมตระกูลวงศ์
 สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวิษ ชาติตระการ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายฮานาฟี เหมตระกูลวงศ์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายฮานาฟี เหมตระกูลวงศ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ปริมาณนอร์มในทรายเก็บจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา
ผู้เขียน	นายธานี พิเศษกุลวงศ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณนอร์มในทรายเก็บจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา โดยได้ทำการตรวจวัดในตัวอย่างทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา จำนวน 28 จุด และตัวอย่างทรายชายหาดบริเวณชายหาดอำเภอตะกั่วป่า อำเภอคุระบุรี จังหวัดพังงาและอำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง จำนวน 10 จุด แล้วนำมาทำการร่อนแยกขนาดอนุภาค > 0.3 mm, $0.3 - 0.106$ mm และ < 0.106 mm จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัด HPGe และวิเคราะห์หาธาตุประกอบด้วยเทคนิคเครื่องรังสีเอกซ์ของทรายคลอง จำนวน 14 จุดและทรายชายหาดจำนวน 10 จุด

พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างทรายคลองสูงสุดที่ขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่าเท่ากับ 322 ± 17 (อยู่ในช่วง 70 – 3901) และ 428 ± 24 (อยู่ในช่วง 96 – 2615) Bq/kg ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K สูงสุดในตัวอย่างทรายคลองที่ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm มีค่าเท่ากับ 827 ± 58 (อยู่ในช่วง 118 – 1290) Bq/kg ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาดสูงสุดที่ขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่าเท่ากับ 70 ± 9 (อยู่ในช่วง 49 – 91), 115 ± 14 (อยู่ในช่วง 93 – 137) และ 457 ± 41 (อยู่ในช่วง 190 – 724) Bq/kg ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ในตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ปลอดภัย 370 Bq/kg เมื่อประเมินความเสี่ยงการได้รับสัมผัสรังสีของประชาชนด้วยค่าปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือน (AEDE_{in}) ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอก (H_{ex}) และในร่างกาย (H_{in}) จากการใช้วัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือน พบว่าค่าเฉลี่ยในตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm สูงกว่าเกณฑ์ที่ปลอดภัย ดังนั้นไม่ควรเอาทรายคลองมาร่อนทำเป็นทรายขนาดอนุภาค < 0.106 mm สำหรับฉาบปูนผนังเรียบภายในบ้าน เพราะจะได้รับปริมาณรังสีมากกว่าการเอาทรายคลองที่ไม่คัดขนาดไปใช้ในการก่อสร้าง นอกจากนี้ ผลการประเมินมูลค่าทรายเชิงเศรษฐกิจ พบว่า ทรายคลองและทรายชายหาดในพื้นที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วป้อนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

Thesis Title	NORM Content in Sand Collected from Klong Takua Pa, Phang Nga Province
Author	Mr. Hanafee Hemtragoonwong
Major Program	Physics
Academic Year	2012

ABSTRACT

This work aims at studying the naturally occurring radioactive materials (NORM) in river sediment (sand) from Klong Takua Pa, Phang Nga Province. Sediment samples were collected from 28 sites along Klong Takua Pa and streams. Beach sand samples were collected from 10 sites in Amphoe Takua Pa and Amphoe Khura Buri, Phang Nga Province and Amphoe Suk Samran, Ranong Province. The samples are sieved into 3 grain sizes (> 0.3 , $0.3 - 0.106$ and < 0.106 mm). All samples of sediment and beach sand were analyzed using gamma ray spectrometry technique with HPGe detector. The types and concentrations of elements are analyzed using XRF technique for 14 sites of sediments and 10 sites of beach sand samples.

For sediment samples, the mean specific activities of ^{226}Ra and ^{232}Th of grain size < 0.106 mm are the highest values about 322 ± 17 (range 70 – 3901) and 428 ± 24 (range 96 – 2615) Bq/kg, respectively. While the mean specific activities of ^{40}K of grain size $0.3 - 0.106$ mm is the highest with value about 827 ± 58 (range 118 – 1290) Bq/kg. For Beach sand samples, grain size < 0.106 mm are the highest mean values about 70 ± 9 (range 49 – 91), 115 ± 14 (range 93 – 137) and 457 ± 41 (range 190 – 724) Bq/kg, respectively. The mean radium equivalent activity (Ra_{eq}) of grain size < 0.106 mm and $0.3 - 0.106$ mm are higher than recommended values 370 Bq/kg, for sediment samples. Moreover, absorbed dose rate (D), annual effective dose equivalent (AEDE_{in}), external (H_{ex}) and internal (H_{in}) hazard indices of the measured samples used to assess the radiation hazards arising due to these sediments used in dwelling construction are higher than the safety limits recommended in sediment samples of grain size $0.3 - 0.106$ and < 0.106 mm. The result shows that fine sand fraction from Klong Takua Pa is not suitable for use in construction as it contain a high content of NORMs. The sediment and beach sand samples from the study area is not eligible to enter related industries.

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.2.1 การตรวจวัดรังสีในทรายคลองและแม่น้ำ	3
1.2.2 การตรวจวัดรังสีในทรายชายหาด	5
1.3 วัตถุประสงค์	5
2. ทฤษฎี	
2.1 กฎการสลายตัวของนิวไคลด์	7
2.2 ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) และชีวิตเฉลี่ย (τ)	8
2.3 กัมมันตภาพรังสี	9
2.4 หน่วยวัดปริมาณทางรังสี	10
2.4.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี	11
2.4.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน	11
2.4.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว	12
2.4.4 ปริมาณรังสีสมมูล	12

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
2.5 สมดุลกัมมันตรังสี	14
2.5.1 สมดุลแบบถาวร	15
2.5.2 สมดุลแบบชั่วคราว	15
2.6 แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีในธรรมชาติ	16
2.6.1 รังสีคอสมิก	16
2.6.2 รังสีที่มีอยู่บนพื้นโลก	16
2.6.3 รังสีที่มีอยู่ในร่างกาย	17
2.7 อนุกรมกัมมันตรังสีในธรรมชาติ	20
2.8 ธาตุกัมมันตรังสีในหินและแร่	22
2.9 แร่ดีบุกในประเทศไทย	24
2.9.1 การกำเนิดของแร่ดีบุก	24
2.9.2 แร่อื่นที่พบร่วมกับแร่ดีบุก	24
2.9.3 แหล่งแร่ดีบุกในประเทศ	26
2.9.4 ประโยชน์ของดีบุก	26
2.9.5 ผลผลิตจากแร่ดีบุก	26
3. วิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุอุปกรณ์	27
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด	27
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด	28
3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับขั้นตอนการตรวจวัดรังสีแกมมา	28
3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ธาตุประกอบ	29
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.2.1 กำหนดสถานที่เก็บตัวอย่าง	30

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
3.2.2 ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	32
3.2.3 การเก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด	34
3.2.4 การเตรียมตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด	34
3.2.5 การเตรียมสารมาตรฐาน	35
3.2.6 การตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่าง ทรายคลองและทรายชายหาด โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา	35
3.2.7 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของหัววัด HPGe	36
3.2.8 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดของระบบวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา หัววัด HPGe (Minimal Detectable Activity, MDA)	39
3.2.9 การประเมินผลกระทบเชิงรังสี	40
3.2.9.1 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ	40
3.2.9.2 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี	40
3.2.9.3 ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม	41
3.2.9.4 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและภายนอกร่างกาย	42
3.2.9.5 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา	43
3.2.10 สถิติของการนับข้อมูล	43
3.2.11 การวิเคราะห์ปัจจัย	44
3.2.12 การประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของทราย	45
3.2.12.1 การประเมินปริมาณซิลิกาในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่ง ทรายแก้ว	45
3.2.12.2 การประเมินปริมาณซิลิกาในทรายเป็นสินค้าที่ต้องห้ามในการ ส่งออกนอกราชอาณาจักร	46
3.2.12.3 การประเมินมูลค่าทรายในการสกัดเอาแร่เชื้อเพลิงนิวเคลียร์	46

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
4. ผลและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K	47
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่าง ทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา	47
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่าง ทรายชายหาดอำเภอตะกั่วป่า อำเภอคุระบุรีจังหวัดพังงา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง	50
4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราปริมาณรังสีดูดกลืน	53
4.2.1 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลอง	53
4.2.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาด	53
4.3 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี	57
4.3.1 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในและนอก อาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง	57
4.3.2 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคาร บ้านเรือนจากตัวอย่างทรายชายหาด	60
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม	60
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลอง	60
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาด	63
4.5 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกาย	64
4.5.1 ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกายจาก ตัวอย่างทรายคลอง	64
4.5.2 ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกายจาก ตัวอย่างทรายชายหาด	67

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
4.6 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา	69
4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์	72
4.7.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลอง ตะกั่วป่าและคลองสาขา	72
4.7.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายชายหาด อำเภอตะกั่วป่า อำเภอบูรีรัมย์จังหวัดพังงา อำเภอสุขสำราญจังหวัดระนอง	73
4.8 การวิเคราะห์ปฏิกิริยา	78
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	94
ก ทฤษฎีเพิ่มเติม	95
ข ระบบวิเคราะห์สเปกโตรเมตรีรังสีแกมมาหัววัด HPGe	101
ค ตารางแสดงข้อมูลต่างๆ	105
ง การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	124
ประวัติผู้เขียน	130

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี	10
2.2 ค่า Radiation weighting factor (W_R)	13
2.3 ระดับปริมาณรังสีคอสมิก	17
2.4 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกและรังสีบนพื้นโลก	19
2.5 ปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ	20
2.6 ตัวอย่างนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้น ที่ไม่ได้อยู่ในอนุกรมการสลายตัว	22
2.7 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในหินและแร่	23
2.8 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเฉลี่ยในหินแกรนิตจากพื้นที่ต่างๆ ในประเทศ	23
3.1 ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา	31
3.2 ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างทรายชายหาด	31
3.3 ประสิทธิภาพรังสีแกมมาของนิวไคลด์ต่างๆ	38
3.4 เกณฑ์ปริมาณรังสีจากการนำวัสดุต่างๆ มาใช้ในการก่อสร้าง	43
4.1 สรุปผลค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ตัวอย่างทรายคลอง แยกตามขนาด	48
4.2 สรุปผลค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด	51
4.3 สรุปผลปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายคลอง แยกตามขนาด	54
4.4 สรุปผลปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด	54
4.5 สรุปผลดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) ดัชนีความ เสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา (I_γ) จากตัวอย่างทรายคลอง แยกตามขนาด	68

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.6 สรุปผลดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) จากตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด	68
4.7 ปริมาณ Silica (SiO_2) ในตัวอย่างทรายคลอง	73
4.8 ปริมาณ Silica (SiO_2) ในตัวอย่างทรายชายหาด	73
4.9 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลองจุดเก็บตัวอย่างที่ 1-13	75
4.10 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลองจุดเก็บตัวอย่างที่ 15-27	76
4.11 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายชายหาดจุดเก็บตัวอย่างที่ 1-10	77
4.12 ค่าสถิติสำหรับแต่ละ Factor ก่อนหมุนแกน	78
4.13 (ก) เมทริกซ์สหสัมพันธ์	79
4.13 (ข) เมทริกซ์สหสัมพันธ์	80
4.14 คำนวณน้ำหนักปัจจัยก่อนหมุนแกนปัจจัย	82
4.15 คำนวณน้ำหนักปัจจัยหลังหมุนแกนปัจจัย	83

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี	8
2.2 จำนวนอะตอมของการสลายตัวแบบต่อเนื่องของ N_1 , N_2 และ N_3	14
2.3 แผนผังการสลายตัวของอนุกรมกัมมันตรังสีในธรรมชาติ	21
3.1 ชุดระบบวัดรังสีแกมมา ชนิดหัววัดแบบ HPGe	29
3.2 X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2510	29
3.3 การบันทึกตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง	30
3.4 ตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาวิจัย	32
3.5 ลักษณะธรณีวิทยาของอำเภอตะกั่วป่า	33
3.6 เครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อนแยกขนาด	34
3.7 สารมาตรฐาน World wide Proficiency Test IAEA-CU-2010 Sample 06 ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	35
3.8 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่าง SS26 จากหัววัดรังสีชนิด HPGe	37
4.1 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm	49
4.1 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	50
4.2 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm	52
4.2 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	53
4.3 แผนที่ปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.4 แผนที่ปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	56
4.5 แผนที่ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	58
4.6 แผนที่ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	59
4.7 แผนที่ปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	61
4.8 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	62
4.9 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) อนุภาค 0.3 - 0.106 mm	63
4.9 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	64
4.10 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm	65
4.10 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.11 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm	66
4.11 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	67
4.12 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดง ค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm	69
4.12 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดง ค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	70
4.13 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด แสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm	70
4.13 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด แสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	71
4.14 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm	71
4.14 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลอง (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm	72
4.15 คำนวณนักปัจจัย (ก) ปัจจัย 1 และ 2 ก่อนหมุนแกนปัจจัย (ข) ปัจจัย 1 และ 2 หลังหมุนแกนปัจจัย	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในชีวิตประจำวันมนุษย์เราสัมผัสรังสีระดับต่ำจากแหล่งกำเนิดในธรรมชาติจากวัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Material, NORM) มีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น ในอาหาร ดิน น้ำ อากาศ วัสดุก่อสร้าง รวมทั้งในร่างกายของมนุษย์เราเอง เช่น ^{40}K และ ^{14}C ภายในกระดูกเรา (Wilson, 1994) นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมาพร้อมกับโลก (Primordial radionuclides) มีค่าครึ่งชีวิตยาวนานอย่างน้อยเทียบเท่ากับอายุของโลก (4.5×10^9 ปี) (NCRP, 1987) โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สำคัญ ได้แก่ ^{40}K (ครึ่งชีวิต 1.28×10^9 ปี), ^{238}U (ครึ่งชีวิต 4.47×10^9 ปี) และ ^{232}Th (ครึ่งชีวิต 1.41×10^{10} ปี)

นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดมาจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียมและอนุกรมทอเรียม สามารถพบในวัสดุที่เกิดในกิจกรรมเหมืองแร่ดีบุกและมีระดับปริมาณสูง โดยถือว่าเป็นผลมาจากเทคโนโลยีทำให้วัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติมีมากขึ้น (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials, TENORM) ผลกระทบเชิงลบจากกิจกรรมการทำเหมืองดีบุกนั้น ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นหลัก เนื่องจากมีการขุดทรายเป็นจำนวนมากและมีการสะสมของทรายหางแร่ดีบุกปริมาณมาก (Banat et al., 2005) ทำให้ห้องประกอบตามธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของพื้นดินบนโลก มีการพบว่าการทำเหมืองแร่ การสกัดแร่ และการแต่งแร่ยูเรเนียมและทอเรียมจะทำให้ได้รับสัมผัสรังสีเพิ่มขึ้นไม่เฉพาะคนงานในเหมือง แต่รวมไปถึงผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณเหมืองแร่และโรงแต่งแร่เช่นกัน (UNSCEAR, 2000)

ดีบุก นับเป็นแร่เศรษฐกิจที่สำคัญยิ่งของประเทศไทยในอดีตที่ผ่านมา แร่ดีบุกที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ แคลสซิเทอไรต์ (Cassiterite) ซึ่งพบและเป็นแร่เศรษฐกิจชนิดเดียว สูตรทางเคมี คือ SnO_2 โดยมีส่วนประกอบของ Sn และ O ประมาณ 78.6% และ 21.4% ตามลำดับ อีกชนิดหนึ่ง คือ สแตนไนต์ (Stannite) พบน้อยมากและไม่มีการผลิต สายแร่ดีบุก (Tin belt) โดยปกติมักมีแร่ที่มีฟลูออรีนหรือโบรอนอยู่ด้วย เช่น ทัวร์มาลีน โทแพซ และอะพาไทต์ ส่วนแร่อื่นที่พบเกิดร่วมกับแร่ดีบุก เช่น วุลแฟรมไมต์ ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$) ซีไลต์ (CaWO_4) แร่ตระกูลไนโอเบียม-

แทนทาลัม ((Fe, Mn)(NbTa)₂O₆) อิลเมไนต์ (FeTiO₃) โมนาไซต์ ((Ce, La, Nd, Th) PO₄) ซีโนไทม์ (YPO₄) และเซอร์คอน (ZrSiO₄) ส่วนใหญ่แร่ดิบจะพบทางซีกด้านตะวันตกของประเทศติดกับชายแดนประเทศสหภาพพม่า โดยพบในภาคใต้ทุกจังหวัด ภาคกลางมีที่จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี และเพชรบุรี ภาคเหนือพบในจังหวัดกำแพงเพชร ตาก เชียงใหม่ ลำปาง เชียงราย และแม่ฮ่องสอน ส่วนภาคตะวันออก พบที่จังหวัดชลบุรี ระยอง และจันทบุรี (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) เซอร์คอน อิลเมไนต์ โมนาไซต์และแร่รองอื่นๆ จะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมและทอเรียมสูง (Anjos et al., 2006)

อุตสาหกรรมเหมืองแร่ดิบจะก่อให้เกิดมูลแร่หนักหรือแร่คละ (Amang) และหางแร่ดิบหรือซีแร่ (Tin tailing) จำนวนมากซึ่งเป็นผลมาจากการแยกแร่ที่มีค่า แร่ที่ได้ออกมา เช่น อิลเมไนต์ (FeO, TiO₂) เซอร์คอน (ZrSiO₄) โมนาไซต์ ((Ce,La,Y,Th)PO₄) ซีโนไทม์ (YPO₄) โคลัมไบต์ ((Fe, Mn)(NbTa)₂O₆) และ สตรูเวไรต์ (Ta,Nb bearing TiO₂) ซึ่งเป็นแร่ที่ต้องการมากที่สุด ในอุตสาหกรรมด้านการผลิตที่เกี่ยวข้อง แร่มีค่าเหล่านี้จะมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ⁴⁰K, ²³⁸U, ²²⁶Ra และ ²³²Th ในกระบวนการแต่งแร่ แยกแร่ มีการใช้น้ำจำนวนมากในการแยกแร่ที่มีค่าออกมาจากทรายและดินด้วยวิธีการแยกทางกายภาพ (Physical separation) ซึ่งการแยกแร่ด้วยวิธีนี้ทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มาพร้อมกับแร่ไปสะสมตัวในมูลดินทราย ทำให้ NORM บริเวณโรงแต่งแร่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Bahari et al., 2007)

คลองตะกั่วป่าหรือแม่น้ำตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา เกิดจากเทือกเขาในเขตอำเภอกะปง ไหลมาบรรจบกับคลองเหล คลองรมณีย์ และไหลลงสู่ทะเลอันดามัน ที่อำเภอตะกั่วป่า มีความยาวประมาณ 30 กิโลเมตร แม่น้ำสายนี้สมัยก่อนเป็นแม่น้ำที่มีความสำคัญเชิงพาณิชย์ และการคมนาคม เคยมีเรือแล่นไปถึงอำเภอกะปงได้ แต่ปัจจุบันมีสภาพตื้นเขินอันเป็นผลมาจากการทำเหมืองแร่ ก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมในเขตอำเภอตะกั่วป่าเป็นประจำทุกปี (คณะกรรมการอำนวยการจัดงานเฉลิมพระเกียรติ, 2542) ร่องรอยของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ยังคงสามารถเห็นได้ตามแนวคลองตะกั่วป่าซึ่งมีเนินทรายเป็นจำนวนมาก และสันดอนทรายกลางแม่น้ำที่เกิดขึ้นจากการชะล้างเศษวัสดุทรายออกมามีเหมือง

เมื่อวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2552 ได้มีข่าวเรื่องบริษัทจากประเทศสิงคโปร์รับอาสาขุดลอกตะกอนทรายและสันดอนดินบริเวณปากแม่น้ำตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงาโดยไม่คิดค่าแรงแต่ขนทรายที่ขุดได้ออกนอกประเทศ โดยอ้างว่าตะกอนทรายบริเวณดังกล่าวไม่มีคุณสมบัติที่จะไปใช้ในอุตสาหกรรมใดๆ (มติชนออนไลน์, 2552) ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาตัวอย่างทรายจากคลองตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มี

อุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่มาก่อน จึงอาจทำให้มีการสะสมของสินแร่และสารชนิดต่างๆ มากมาย อีกทั้งหากสินแร่และสารเหล่านั้นเป็นสารกัมมันตรังสีอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณนั้น เนื่องจากในหมู่วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ทราบแม่น้ำเป็นหนึ่งในวัสดุที่สำคัญที่สุดสำหรับการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน นอกจากนั้นยังเป็นแหล่งที่มาหลักในการได้รับสัมผัสรังสีอย่างต่อเนื่องของมนุษย์ ตะกอนทรายทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่จะทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีไปสู่ระบบชีวภาพ (Ramasamy et al., 2011)

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจในการศึกษานอร์ม (NORM) ที่มีการสะสมอยู่ในทรายจากคลองตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา โดยจะทำการตรวจวัดด้วยหัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรีและนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของกลุ่มนักวิจัยจากประเทศต่างๆ ที่ได้ทำการตรวจวัดไว้แล้ว ผลการวิจัยที่ได้ทำการศึกษารังสีนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาปริมาณนอร์มที่มีการสะสมอยู่ในทรายจากคลองตะกั่วป่าต่อไป และยังเป็นการสำรวจทางรังสีเพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีแก่ประชาชนต่อไปในอนาคต

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 การตรวจวัดรังสีในทรายคลองและแม่น้ำ

แพร์ นีรนาทรังสรรค์ (2547) ทำการวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ^{40}K , ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่างทรายก่อสร้างที่อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างจากบ่อทรายในพื้นที่และนอกพื้นที่อำเภอนาหม่อม รวมทั้งหมด 24 ตัวอย่างแล้วนำไปนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะหรือความเข้มข้นกัมมันตรังสีธรรมชาติอยู่ในช่วง 166-1,421 Bq/kg, 13-114 Bq/kg และ 12-87 Bq/kg สำหรับนิวไคลด์ ^{40}K , ^{232}Th และ ^{238}U ตามลำดับโดยค่ากัมมันตภาพจำเพาะทั้ง 3 ชนิดในทรายก่อสร้างจากบ่อทรายในพื้นที่อำเภอนาหม่อมสูงกว่านอกพื้นที่ และค่าสมมูลของเรเดียมของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ UNSCEAR กำหนด

Arogunju และ คณะ (2008) ทำการวัดค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติของอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียมในตัวอย่างดิน แร่ทราย น้ำและอาหาร จากพื้นที่ที่มีการทำเหมืองดีบุกใน Jos Plateau ประเทศไนจีเรีย นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe สำหรับตัวอย่างดินและทรายแร่ และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS สำหรับตัวอย่างน้ำและอาหาร พบว่า ตัวอย่างดินและทรายแร่มีปริมาณยูเรเนียมและ

ทอเรียมสูงมาก โดยมีพิสัยระหว่าง 8.7-15 และ 16.8-98 kBq/kg ซึ่งมีค่าสูงกว่าพื้นที่ควบคุมทั้งสองแห่งและพื้นที่ที่มีรังสีภูมิหลังสูงอื่นๆ นอกจากนี้ในตัวอย่างน้ำและอาหารมีปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมสูงกว่าค่าอ้างอิงจาก UNSCEAR เช่นกัน

Bahari และ คณะ (2007) ได้วัดค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในดินตะกอน จำนวน 26 ตัวอย่าง จากบ่อน้ำรีไซเคิลโรงงานอุตสาหกรรมดิบูกในรัฐ Selangor และ Perak ประเทศมาเลเซีย นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตริ่งสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe-Li พบว่า ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพของ ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K มีพิสัยของค่าเฉลี่ยระหว่าง 75.1-405.0 Bq/kg, 40.9-189.6 Bq/kg, 104.9-516.2 Bq/kg และ 74.8-848.0 Bq/kg ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย Ra_{eq} มีพิสัยระหว่าง 244.2-933.5 Bq/kg ค่าเฉลี่ย I_{γ} มีพิสัยระหว่าง 1.8-6.5 Bq/kg และค่า E(Effective Dose Rates) จากโรงที่ 1 และ 2 เท่ากับ 361.3 nSv/h และ 216.7 nSv/h ตามลำดับ และพบว่าค่าเฉลี่ย Ra_{eq} และค่าเฉลี่ย I_{γ} มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

Dim และ คณะ (2000) วัดปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมในตัวอย่างตะกอนแม่น้ำ Kubanni ประเทศไนจีเรีย จำนวน 36 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตริ่งสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด Ge(Li) พบว่า ตะกอนมีปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.06 ± 2.66 และ 21.44 ± 4.12 ppm น่าจะเกิดการใช้น้ำฟอสเฟตจากฟาร์มใกล้เคียงหรือเกิดจากการสะสมของตะกอนซึ่งถูกลม Harmattan พัดมาจากทะเลทรายซาราห์ผ่านที่ราบชานน้ำในประเทศไนจีเรีย สาเหตุหลักอื่นเกิดจากการฟุ้งของหินฐานซึ่งเป็นหินแกรนิต

Mantazul และ คณะ (1999) วัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะและการกระจายของกัมมันตรังสีในธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นในตะกอนดินและดินจากแม่น้ำสายหลัก 2 สายและบริเวณชายฝั่งของ Chittagong ประเทศบังกลาเทศ นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตริ่งสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe จากการศึกษพบว่าในดินตะกอนและในดินจะมีปริมาณ ^{232}Th สูงกว่า ปริมาณ ^{238}U ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{238}U และค่ากัมมันตภาพเรเดียมสมมูลในพื้นที่นี้มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก ส่วนค่าความเข้มข้นของ ^{137}Cs มีค่าเท่ากับ 0.4-3.88 Bq/kg

Neven และ คณะ (2009) ได้ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและปริมาณกัมมันตรังสีของ ^{238}U และ ^{226}Ra จากตัวอย่างตะกอนในแม่น้ำ Krka ประเทศโครเอเชีย โดยเก็บตัวอย่างตะกอนจากบริเวณแม่น้ำ ปากแม่น้ำ และชายฝั่งทะเล จำนวน 26 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตริ่งสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe ผลการวิเคราะห์พบว่า ในตัวอย่างตะกอนที่เก็บจากบริเวณแม่น้ำค่ากัมมันตภาพของ ^{238}U และ ^{226}Ra มีค่าสูงสุดและตัวอย่างตะกอนที่เก็บจากทะเลมีค่า

ต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากัมมันตรังสี ของ ^{238}U และ ^{226}Ra ลดลง 15-20% เมื่อเทียบกับข้อมูลก่อนปี 1990

1.2.2 การตรวจวัดรังสีในทรายชายหาด

Mohanty และ คณะ (2004) ได้วัดค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างทราย จำนวน 24 ตัวอย่าง จากพื้นที่ที่มีรังสีสูงซึ่งเกิดจากแร่หนักบริเวณแหล่งสะสมตะกอนชายหาด Erasama อยู่ชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐ Orissa ประเทศอินเดีย นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K มีค่า 150-500 (เฉลี่ย 350 ± 20), 900-4,700 (เฉลี่ย $2,825 \pm 50$) และ 100-250 (เฉลี่ย 180 ± 25) Bq/kg ตามลำดับ D_{out} มีค่า 650-3,150 (เฉลี่ย $1,925 \pm 718$) nGy/h และ AED_{out} มีค่า 0.78-3.86 (เฉลี่ย 2.36 ± 0.88) mSv ค่า D_{out} ของชายฝั่ง Erasama มีค่าใกล้เคียงกับทรายที่มีแร่โมนาไซต์ในพื้นที่ชายฝั่งทางใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ ของประเทศอินเดีย แร่โมนาไซต์และเซอร์คอนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้พื้นที่นี้มีปริมาณรังสีสูง

Freitas และ คณะ (2004) ได้ทำการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของรังสีแกมมา และการแจกแจงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในทรายบริเวณชายฝั่งทะเล บนเกาะ Ilha Grande ฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ในประเทศบราซิล นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe โดยศึกษากระบวนการแจกแจงและความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมทอเรียม (^{232}Th series), อนุกรมยูเรเนียม (^{238}U series) และธาตุโพแทสเซียม (^{40}K) จากบริเวณชายฝั่งทะเล 2 แห่ง คือ ชายหาด Preta และ Dois Rios พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีจากพื้นที่ศึกษาสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก (> 0.07 mSv)

Örgün และ คณะ (2007) ได้ทำการศึกษานิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นในตัวอย่างหินและทรายชายหาด ณ ภูมิภาค Ezine รัฐ Anatolia ทางตะวันตกประเทศตุรกี นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด HPGe พบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (radium equivalent activity) ในหินและทรายชายหาดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (> 370 Bq/kg)

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและตรวจวัดปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในธรรมชาติในตัวอย่างทรายจากคลองตะกั่วป่า จ.พังงา

2. เพื่อประเมินดัชนีที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายเชิงรังสีในตัวอย่างทรายจากคลองตะกั่วป่า จ.พังงา
3. เพื่อศึกษาและประเมินมูลค่าของธาตุกัมมันตรังสีและธาตุโลหะเชิงเศรษฐกิจของตัวอย่างทรายจากคลองตะกั่วป่า จ.พังงา

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 กฎการสลายตัวของนิวไคลด์

เมื่อนิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีชนิดต่างๆ เช่น แอลฟา บีตาหรือแกมมา ซึ่งอัตราการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม ขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสหรือจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิมในขณะนั้น

กำหนดให้ N คือ จำนวนอะตอมที่มีอยู่ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง อัตราการสลายตัว คือ

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

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

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่การสลายตัว (Decay constant) มีหน่วยเป็น s^{-1}

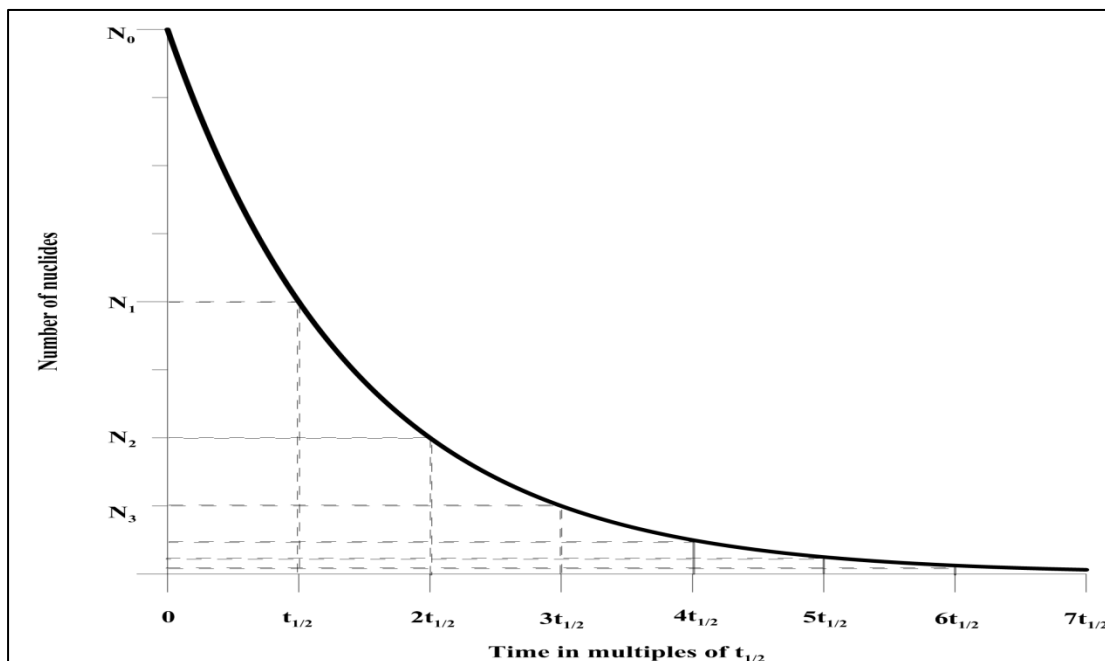
ให้ N_0 เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิมเมื่อเวลาเริ่มต้น $t = 0$ วินาที สมการ (2.1) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

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

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

สมการ (2.2) คือ กฎการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและภาพประกอบ 2.1



ภาพประกอบ 2.1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

2.2 ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) และชีวิตเฉลี่ย (τ)

ครึ่งชีวิต (Half-life) หมายถึง เวลาที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวเหลือครึ่งหนึ่ง จากจำนวนที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป t เท่ากับ $t_{1/2}$ จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี N เหลือเท่ากับ $N_0/2$ และเมื่อแทนค่าเงื่อนไขดังกล่าวลงในสมการ (2.2) จะได้ว่า

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

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) กับค่าคงที่การสลายตัว (λ) แต่เนื่องจากอะตอมแต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตไม่เท่ากัน โดยค่าเฉลี่ยช่วงชีวิตเรียกว่า ชีวิตเฉลี่ย (mean life: τ) ซึ่งหาได้จากการรวมชีวิตของอะตอมทั้งหมดแล้วหารด้วยจำนวนอะตอมที่มีอยู่

กำหนดให้ อะตอม dN_n มีช่วงชีวิต t_n โดย $n = 1, 2, 3, \dots$ จะได้

$$\tau = \frac{dN_1 t_1 + dN_2 t_2 + dN_3 t_3 + \dots}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots}$$

$$= \frac{\int_0^{N_\infty} t dN}{\int_0^{N_\infty} dN} \quad (2.4)$$

เมื่อ $dN = -\lambda N dt = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ สมการ (2.4) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\tau = -\int_0^\infty \lambda t N_0 e^{-\lambda t} \frac{dt}{N_0}$$

$$\tau = -\lambda \left(\frac{-1}{\lambda^2} \right)$$

$$\tau = \lambda^{-1} \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) แสดงให้เห็นว่าค่าชีวิตเฉลี่ย (τ) มีค่าแปรผกผันกับค่าคงที่การสลายตัว (λ)

2.3 กัมมันตภาพรังสี

กัมมันตภาพ หรือความแรงรังสี (Activity; A) เป็นอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะได้ว่า

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

$$A = \lambda N \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.2) สามารถเขียนสมการ (2.3) ได้ใหม่เป็น

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

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

เมื่อ A_0 คือ กัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$ วินาที)

A คือ กัมมันตภาพที่เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นครั้งต่อวินาที (Disintegration per second; dps) หรือคูรี (Curie; Ci)

2.4 หน่วยวัดปริมาณทางรังสี

นอกจากค่ากัมมันตภาพที่บ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์แล้วยังมีหน่วยวัดปริมาณทางรังสีที่บอกสมบัติอื่นๆ ของกัมมันตรังสี เช่น ความสามารถในการก่อไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีของตัวกลาง ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี โดยมีคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการวัดและหน่วยรังสี (International Commission on Radiation Unit and Measurements, ICRU) ได้กำหนดมาตรฐานหน่วยการวัดรังสีไว้ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วยใหม่
กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)	คูรี (Ci)	เบกเคอเรล (Bq)
รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)	แรด (Rad)	เกรย์ (Gy)
รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)
รังสีสมมูล (Dose equivalent)	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)

2.4.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่ากัมมันตภาพรังสี คือ การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ที่ส่งผลให้เกิดการแผ่รังสีหรือมีอนุภาคที่มีพลังงานเกิดขึ้น โดยเรียกแหล่งกำเนิดรังสีว่าไอโซโทปรังสีหรือนิวไคลด์รังสี (Radionuclide) ซึ่งการวัดจำนวนไอโซโทปรังสีหรือนิวไคลด์รังสีไม่อาจทำได้โดยการชั่งน้ำหนักหรือตวงวัดได้ เพราะไอโซโทปรังสีจะปนอยู่กับไอโซโทปอื่นๆ เสมอ แม้ทำการแยกให้บริสุทธิ์แล้วก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็จะทำให้เกิดธาตุใหม่ปะปนขึ้นอีก ดังนั้น ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในขณะใดขณะหนึ่งจึงวัดได้จากรังสีที่เกิดขึ้นในขณะนั้น โดยหน่วยของปริมาณกัมมันตภาพรังสีเดิมจะอาศัยการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของธาตุเรเดียม (Radium) หนัก 1 กรัม ซึ่งเท่ากับ 3.7×10^{10} Disintegration per second (dps) และเรียกว่า 1 คูรี (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

ต่อมาใช้หน่วยตามระบบ SI หน่วยของกัมมันตรังสีจึงเปลี่ยนเป็นเบกเคอเรล (Bq) ซึ่งมีค่าเท่ากับ s^{-1}

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} \text{ และ } 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจะมีผลเมื่อเข้าสู่ร่างกาย เพราะรังสีที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนในอวัยวะ และเนื้อเยื่อของร่างกาย โดยเฉพาะเมื่อการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์นั้นให้อนุภาคแอลฟาหรือบีตา เพราะอนุภาคทั้งสองเป็นอนุภาคที่มีพิสัยต่ำจึงทำให้เกิดการถ่ายพลังงานทั้งหมดให้กับอวัยวะ และเนื้อเยื่อซึ่งถือว่าเป็นอันตรายอย่างมาก

2.4.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)

เนื่องจากรังสีแต่ละชนิดมีความสามารถในการทะลุผ่านวัตถุได้ต่างกัน และถ่ายเทพลังงานให้กับวัตถุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังนั้น ผลของรังสีต่อวัตถุจึงแปรผันตามพลังงานของรังสีที่วัตถุนั้นดูดกลืน ตัวอย่างเช่น รังสีแอลฟา และรังสีบีตา ซึ่งเป็นรังสีที่มีพิสัยต่ำจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับวัตถุ เช่นเดียวกับโฟตอนพลังงานต่ำ โดยจะส่งผลให้เกิดรอยไหม้ที่ผิวหนัง และถ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงหรือนิวตรอน พลังงานส่วนมากจะทะลุผ่านออกไปจากวัตถุ และจะมีเพียง

บางส่วนของพลังงานเท่านั้นที่ถูกดูดกลืนไว้ โดยหน่วยของพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืนเดิมนั้นใช้ Radiation Absorbed Dose (RAD) ซึ่งเท่ากับพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 ergs ในวัตถุมวล 1 g

$$1 \text{ RAD} = 100 \text{ ergs/g}$$

ในปัจจุบันหน่วยเป็นระบบ SI โดยใช้ MKS เป็นมาตรฐาน ทำให้หน่วยปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเปลี่ยนไปเป็นหน่วยเกรย์ (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1} = 100 \text{ RADS}$$

2.4.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)

ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นปริมาณรังสีที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของรังสี เพราะเพียงแต่ว่ามีการแตกตัวของอากาศมากน้อยเพียงใด ซึ่งการวัดรังสีในรูปแบบนี้นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นวิธีที่มีความไวสูง และสามารถวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำ โดยหน่วยเดิมของปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว คือ เรินเกนท์ (R) ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวให้ประจุ 1 e.s.u. ในอากาศแห้ง 1 cm³ ที่ ATP หรืออากาศมวล 1.293×10⁻³ g สำหรับในหน่วย SI ใช้คูโลมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg) โดยประจุ 1 e.s.u มีค่าเท่ากับ 3.335×10⁻¹⁰ C

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

2.4.4 ปริมาณรังสีสมมูล (Dose equivalent)

ปริมาณรังสีสมมูลเป็นหน่วยที่นำเอาผลทางชีววิทยาของรังสีเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยอาศัยค่าปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเฉลี่ยทั่วกลุ่มของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะร่วมกับ Radiation weighting factor (W_R) ตามชนิด และพลังงานของรังสี (ตาราง 2.2) ซึ่งสามารถหาค่าปริมาณรังสีสมมูล (H_T) ของกลุ่มเนื้อเยื่อ และอวัยวะต่างๆ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$H_T = W_R \times D_{T \times R}$$

เมื่อ $D_{T \times R}$ คือ รั้งสีที่ถูกดูดกลืนเฉลี่ยทั่วกลุ่มเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (T) เนื่องจากรั้งสี (R) และค่า W_R จะมีความสัมพันธ์กับค่า Relative Biological Effectiveness (RBE) โดยอาศัยการเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อ เมื่อเนื้อเยื่อดูดกลืนรั้งสีที่ต่างชนิด และต่างพลังงานกัน ในหน่วยเดิมของปริมาณรั้งสีสมมูล เรียกว่า REM มีค่าเท่ากับ

$$\text{REM} = \text{Absorbed dose (rad)} \times W_R$$

ตาราง 2.2 ค่า Radiation weighting factor (W_R)

ที่มา : ICRP, 1991

Type and energy range	Radiation weighting factor : W_R
Photon, all energies	1
Electrons Positrons and muons, all energies	1
Energy neutrons:	
< 10 keV	5
10 keV to 100 keV	10
> 100 keV to 2 MeV	20
> 2 MeV to 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, and energy > 2 MeV	2-5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

สำหรับในปัจจุบันหน่วยของปริมาณรั้งสีสมมูล ซึ่งเป็นหน่วยตามระบบ SI เปลี่ยนเป็นซีเวิร์ต (Sv) และมีค่าเท่ากับ

$$1 \text{ Sv} = \text{Absorbed dose (Gy)} \times W_R$$

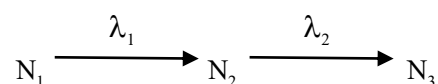
ดังนั้น

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ REM}$$

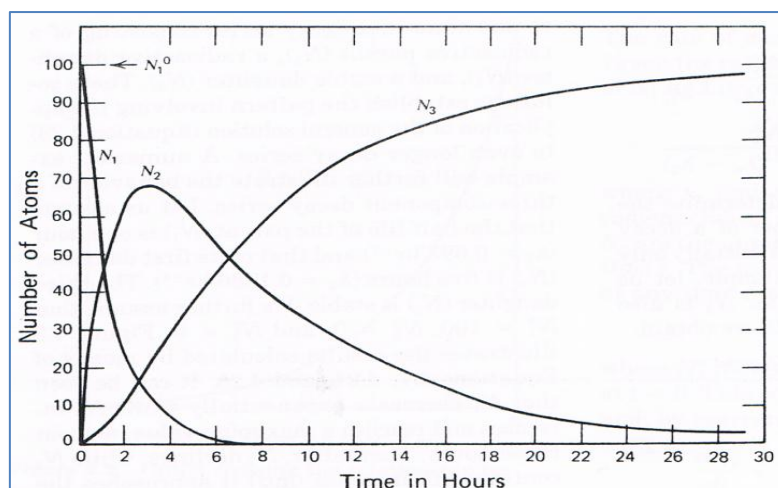
แต่หน่วยซีเวิร์ต (Sv) เป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่ใหญ่มาก ดังนั้นค่าปริมาณรังสีสมมูล ส่วนมากจึงนิยมใช้เป็นมิลลิซีเวิร์ต (mSv) แทน

2.5 สมดุลกัมมันตรังสี (Radioactive equilibrium)

เนื่องจากมีสารกัมมันตรังสีหลายตัวที่เมื่อสลายตัวแล้วจะทำให้ได้นิวเคลียสของตัวลูกที่ยังคงเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งจะสลายตัวต่อไปพร้อมกับก่อให้เกิดลูกของกัมมันตรังสีตัวใหม่ โดยตัวมันเองก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นพ่อแม่ สมการต่างๆ ไปสำหรับอนุกรมการสลายตัวแบบนี้ คือ



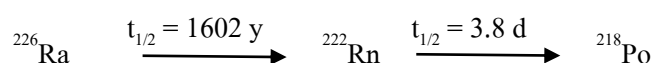
เมื่อ N_1 สลายตัวไปเป็น N_2 และเมื่อ N_2 สลายตัวต่อไปอีกจะก่อให้เกิด N_3
 λ_1 และ λ_2 คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวในการเปลี่ยนแปลงของ N_1 ไปเป็น N_2 และ N_2 ไป N_3 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2.2 จำนวนอะตอมของการสลายตัวแบบต่อเนื่องของ N_1 , N_2 และ N_3
 ที่มา: FAURE, 1986

2.5.1 สมดุลแบบถาวร (Secular equilibrium)

เป็นสมดุลทางรังสีที่มีเงื่อนไขกำกับว่าครึ่งชีวิตของพ่อแม่จะต้องมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของลูกหลายเท่า หรือมองอีกแง่หนึ่งคือ $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ถ้าจะให้เห็นชัดของการสมดุลในแบบนี้แล้ว ความแตกต่างของค่าครึ่งชีวิตระหว่างพ่อแม่กับลูกจะต้องต่างกัน 10^4 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้น ค่าความแรงรังสีของพ่อแม่จะไม่เปลี่ยนแปลงเท่าไร ในขณะที่ค่าความแรงรังสีของลูกเปลี่ยนแปลงไปหลายช่วงครึ่งชีวิต ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของเรเดียม-226 ไปเป็นเรดอน-222



สำหรับสมดุลทางรังสีระหว่างเรเดียมและเรดอนเมื่อพิจารณาค่า λ_1 สามารถตัดค่า λ_1 ทิ้งได้เลย เมื่อเปรียบเทียบกับค่า λ_2 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_{n-1} N_{n-1} = \lambda_n N_n \quad (2.8)$$

2.5.2 สมดุลแบบชั่วคราว (Transient equilibrium)

สมดุลนี้มีความคล้ายคลึงกับสมดุลแบบถาวร ในกรณีที่ค่าครึ่งชีวิตของพ่อแม่มีค่ามากกว่าลูกแต่มากกว่าด้วยสัดส่วนเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 10 เท่า) เมื่อเทียบกับตัวเลข 10^4 เท่าหรือมากกว่านั้น ดังนั้น $\lambda_1 \ll \lambda_2$

เมื่อเวลา t มีค่ามากๆ ค่า $e^{-\lambda_2 t}$ จะตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับ $e^{-\lambda_1 t}$ เมื่อมองว่าเทอม $e^{-\lambda_2 t}$ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นจำนวนของอะตอมนิวไคลด์ลูกจะกลายเป็น

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} e^{-\lambda_1 t} \quad (2.9)$$

ฉะนั้น

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \quad (2.10)$$

2.6 แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีในธรรมชาติ

มนุษย์ได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติอยู่ 3 แหล่งคือ จากรังสีคอสมิกที่มาจากห้วงอวกาศแล้วแผ่มายังพื้นโลก จากวัสดุกัมมันตรังสีที่มีอยู่บนเปลือกโลก และจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มีอยู่แล้วภายในร่างกายเราเอง

2.6.1 รังสีคอสมิก (Cosmic radiation)

รังสีคอสมิกมีกำเนิดมาจากระบบกาแล็กซี่ ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตอนพลังงานสูง อนุภาคแอลฟา อิเล็กตรอน และโฟตอน (รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา) เมื่อรังสีคอสมิกเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดนิวตรอน อิเล็กตรอน โปรตอน รังสีแกมมา และอนุภาคอื่นๆ ดังนั้น เมื่ออยู่สูงจากพื้นดินมากขึ้นก็จะได้รับรังสีคอสมิกเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มมากขึ้นไปทางขั้วโลก แสดงได้ดังตาราง 2.3

2.6.2 รังสีที่มีอยู่บนพื้นโลก (Terrestrial radiation)

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติอาจแบ่งได้เป็น นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmogenic radionuclides) และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดพร้อมโลก (Primordial radionuclides) แสดงดังตาราง 2.4

- นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก เกิดจากรังสีคอสมิกทำอันตรกิริยากับแก๊สที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ เช่น เบริลเลียม-7 (${}^7\text{Be}$), ทริเทียม (${}^3\text{H}$), คาร์บอน-14 (${}^{14}\text{C}$), โซเดียม-22 (${}^{22}\text{Na}$) และ โซเดียม-24 (${}^{24}\text{Na}$)

- นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดพร้อมโลก เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กำเนิดมาพร้อมโลก ประกอบด้วยนิวไคลด์ในอนุกรม ยูเรเนียม ทอเรียม และแอกทีเนียม รวมทั้งนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น โพแทสเซียม-40 (${}^{40}\text{K}$), รูบิเดียม-87 (${}^{87}\text{Rb}$), ยูเรเนียม-238 (${}^{238}\text{U}$), ทอเรียม-232 (${}^{232}\text{Th}$) เป็นต้น มนุษย์ได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีกลุ่มนี้อยู่ตลอดเวลา ทั้งจากร่างกายและภายในร่างกาย

เนื่องจากสิ่งแวดล้อมรอบตัวเราล้วนมีแต่รังสี แม้กระทั่งวัสดุที่ใช้ก่อสร้างบ้านเรือน เช่น ดิน หิน ทราย ซีเมนต์ คอนกรีต ก็มียูเรเนียมหรือทอเรียมเป็นองค์ประกอบ จึงเป็นการอยากที่เราจะหลีกเลี่ยงจากรังสีได้

ตาราง 2.3 ระดับปริมาณรังสีคอสมิก

ที่มา : UNSCEAR, 2000

Latitude (degrees)	Population in Latitude band (%)		Effective dose rate (nSv h-1)	
	Northern hemisphere	Southern hemisphere	Directly ionizing component ^a	Neutron component ^b
80-90	0	0	32	11
70-80	0	0	32	11
60-70	0.4	0	32	10.9
50-60	13.7	0.5	32	10.0
40-50	15.5	0.9	32	7.8
30-40	20.4	13.0	32	5.3
20-30	32.7	14.9	30	4.0
10-20	11.0	16.7	30	3.7
0-10	6.3	54.0	30	3.6
Total	100	100		
Population-weighted average				
Northern hemisphere			31.0	5.6
Southern hemisphere			30.3	4.0
World ^c			30.9	5.5

a Average measurement results.

b From fit to measurements

c Population distribution: northern hemisphere 0.89; southern hemisphere 0.11.

2.6.3 รังสีที่มีอยู่ในร่างกาย (Internal radiation)

นิวไคลด์กัมมันตรังสี ทั้งจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกและนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดพร้อมโลก สามารถเข้าสู่ร่างกายเราจากการกิน (Ingestion exposure) หายใจ (Inhalation exposure) เช่น

- ทริเทียม (^3H) : เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีคอสมิกกับไนโตรเจน-14 (^{14}N) ประมาณ 99% ของทริเทียมจะอยู่ในรูป Tritiated water ($^3\text{H}_2\text{O}$) และจะปะปนในวัฏจักรน้ำปกติ ($^1\text{H}_2\text{O}$) โดยจะพบมากในมหาสมุทร รองลงมาอยู่บนพื้นดิน

- คาร์บอน-14 (^{14}C): เกิดจากรังสีคอสมิก ส่วนใหญ่พบในมหาสมุทร พบบนพื้นดิน บรรยากาศเพียงเล็กน้อย

- โพแทสเซียม-40 (^{40}K): เป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต เข้าสู่ร่างกายจากระบบห่วงโซ่อาหาร ปริมาณโพแทสเซียมในร่างกายขึ้นกับอายุและเพศ ในร่างกายเรามีโพแทสเซียม-40 ประมาณ 1,600 pCi/kg โพแทสเซียม-40 แผ่ให้รังสีบีตาและแกมมา

- ยูเรเนียมและทอเรียม และนิวไคลด์ลูก : นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในอนุกรมยูเรเนียม คือ ยูเรเนียม-238 (^{238}U), เรเดียม-226 (^{226}Ra), เรดอน-222 (^{222}Rn) และนิวไคลด์ลูก ตะกั่ว-210 (^{210}Pb), บิสมัท-210 (^{210}Bi) และ พอลอเนียม-210 (^{210}Po)

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในอนุกรมทอเรียม คือ ทอเรียม-232 (^{232}Th), เรเดียม-228 (^{228}Ra), ทอรอน-220 (^{220}Rn) และนิวไคลด์ลูก ตะกั่ว-212 (^{212}Pb), บิสมัท-212 (^{212}Bi) และ พอลอเนียม-212 (^{212}Po)

ต้นกำเนิดรังสีแอลฟาที่สามารถเข้าสู่ร่างกายได้มากที่สุด คือ แก๊สเรดอน (^{222}Rn) ซึ่งมาจากพื้นดิน ส่วนภายในบ้านเองได้รับแก๊สเรดอนจากวัสดุที่ใช้ในก่อสร้าง เช่น ยิปซัม, ซีเมนต์ การออกแบบบ้านให้มีระบบระบายอากาศดี ๆ หรือการทาสี Epoxy ที่ผนังหรือพื้น สามารถลดการได้รับสัมผัสปริมาณแก๊สเรดอนลงได้ นิวไคลด์ลูกอื่นๆ เข้าสู่ร่างกายโดยอาจปนอยู่ในน้ำ ออกซิเจน และแก๊สอื่นๆ ซึ่งอาจอยู่ในรูปอนุภาคหรือละอองฝอย

ปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับ 87% มาจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (UNSCEAR, 1993) จากการประเมินโดยคณะกรรมการด้านวิทยาศาสตร์ของสหประชาชาติ เกี่ยวกับผลของรังสี (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ; UNSCEAR, 2000) พบว่า มนุษย์ได้รับปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติ 2.4 มิลลิซีเวิร์ต (mSv) แบ่งเป็น การได้รับรังสีจากรังสีคอสมิก 0.39 mSv จากรังสีที่มีอยู่บนพื้นโลก 0.48 mSv จากการหายใจโดยการสูดเอาเรดอนและนิวไคลด์ลูกที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอน 1.26 mSv และจากการบริโภคอาหารและน้ำ 0.29 mSv ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.4 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกและรังสีบนพื้นโลก

ที่มา: UNSCEAR, 2000

<i>Element</i>	<i>Isotope</i>	<i>Half-life</i>	<i>Decay mode</i>
Cosmogenic radionuclides			
Hydrogen	³ H	12.33 a	beta (100%)
Beryllium	⁷ Be	53.29 d	EC ^a (100%)
	¹⁰ Be	1.51 10 ⁶ a	beta (100%)
Carbon	¹⁴ C	5730 a	beta (100%)
Sodium	²² Na	2.602 a	EC (100%)
Aluminium	²⁶ Al	7.4 10 ⁵ a	EC (100%)
Silicon	³² Si	172 a	beta (100%)
Phosphorus	³² P	14.26 d	beta (100%)
	³³ P	25.34 d	beta (100%)
Sulphur	³⁵ S	87.51 d	beta (100%)
Chlorine	³⁶ Cl	3.01 10 ⁵ a	EC(1.9%), beta (98.1%)
Argon	³⁷ Ar	35.04 d	EC (100%)
	³⁹ Ar	269 a	beta (100%)
Krypton	⁸¹ Kr	2.29 10 ³ a	EC (100%)
Terrestrial radionuclides			
Potassium	⁴⁰ K	1.28 10 ⁹ a	beta (89.3%), EC (10.7%)
Rubidium	⁸⁷ Rb	4.75 10 ¹⁰ a	beta (100%)
Lanthanum	¹³⁸ La	1.05 10 ¹¹ a	beta (33.6%), EC (66.4%)
Samarium	¹⁴⁷ Sm	1.06 10 ¹¹ a	alpha (100%)
Lutecium	¹⁷⁶ Lu	3.73 10 ¹⁰ a	beta (100%)
²³⁸ U series:			
Uranium	²³⁸ U	4.47 10 ⁹ a	alpha (100%)
Thorium	²³⁴ Th	24.10 d	beta (100%)
Protactinium	^{234m} Pa	1.17 m	beta (99.8%), IT ^b
Uranium	²³⁴ U	2.45 10 ⁵ a	alpha (100%)
Thorium	²³⁰ Th	7.54 10 ⁴ a	alpha (100%)
Radium	²²⁶ Ra	1600 a	alpha (100%)
Radon	²²² Rn	3.824 d	alpha (100%)
Polonium	²¹⁸ Po	3.05 m	alpha (99.98%), beta (0.02%)
Lead	²¹⁴ Pb	26.8 m	beta (100%)
Bismuth	²¹⁴ Bi	19.9 m	alpha (0.02), beta (99.98%)
Polonium	²¹⁴ Po	164 μs	alpha (100%)
Lead	²¹⁰ Pb	22.3 a	beta (100%)
Bismuth	²¹⁰ Bi	5.013 d	beta (100%)
Polonium	²¹⁰ Po	138.4 d	alpha (100%)
Lead	²⁰⁶ Pb	stable	
²³² Th series:			
Thorium	²³² Th	1.405 10 ¹⁰ a	alpha (100%)
Radium	²²⁸ Ra	5.75 a	beta (100%)
Actinium	²²⁸ Ac	6.15 h	beta (100%)
Thorium	²²⁸ Th	1.912 a	alpha (100%)
Radium	²²⁴ Ra	3.66 d	alpha (100%)
Radon	²²⁰ Rn	55.6 s	alpha (100%)
Polonium	²¹⁶ Po	0.145 s	alpha (100%)
Lead	²¹² Pb	10.64 h	beta (100%)
Bismuth	²¹² Bi	60.55 m	alpha (36%), beta (64%)
Polonium	²¹² Po	0.299 μs	alpha (100%)
Thallium	²⁰⁸ Tl	3.053 m	beta (100%)
Lead	²⁰⁸ Pb	stable	
²³⁵ U series:			
Uranium	²³⁵ U	7.038 10 ⁸ a	alpha (100%)
Thorium	²³¹ Th	25.52 h	beta (100%)
Protactinium	²³¹ Pa	32760 a	alpha (100%)
Actinium	²²⁷ Ac	21.77 a	alpha (1.4%), beta 98.6%)
Thorium	²²⁷ Th	18.72 d	alpha (100%)
Francium	²²³ Fr	21.8 m	beta (100%)
Radium	²²³ Ra	11.44 d	alpha (100%)
Radon	²¹⁹ Rn	3.96 s	alpha (100%)
Polonium	²¹⁵ Po	1.781 ms	alpha (100%)
Lead	²¹¹ Pb	36.1 m	beta (100%)
Bismuth	²¹¹ Bi	2.14 m	alpha (99.7%), beta 0.3%)
Thallium	²⁰⁷ Tl	4.77 m	beta (100%)
Lead	²⁰⁷ Pb	stable	

^a Electron capture.^b Internal transition.

ตาราง 2.5 ปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ

ที่มา : UNSCEAR, 2000

Source of exposure	Annual effective dose (mSv)	
	Average	Typical range
Cosmic radiation		
Directly ionizing and photon component	0.28	
Neutron component	0.10	
Cosmogenic radionuclides	0.01	
Total cosmic and cosmogenic	0.39	0.3-1.0 ^a
External terrestrial radiation		
Outdoors	0.07	
Indoors	0.41	
Total external terrestrial radiation	0.48	0.3-0.6 ^b
Inhalation exposure		
Uranium and thorium series	0.006	
Radon (²²² Rn)	1.15	
Thoron (²²⁰ Rn)	0.10	
Total inhalation exposure	1.26	0.2-10 ^c
Ingestion exposure		
⁴⁰ K	0.17	
Uranium and thorium series	0.12	
Total ingestion exposure	0.29	0.2-0.8 ^d
Total	2.4	1-10

^a Range from sea level to high ground elevation.

^b Depending on radionuclide composition of soil and building materials.

^c Depending on indoor accumulation of radon gas.

^d Depending on radionuclide composition of foods and drinking water.

2.7 อนุกรมกัมมันตรังสีในธรรมชาติ

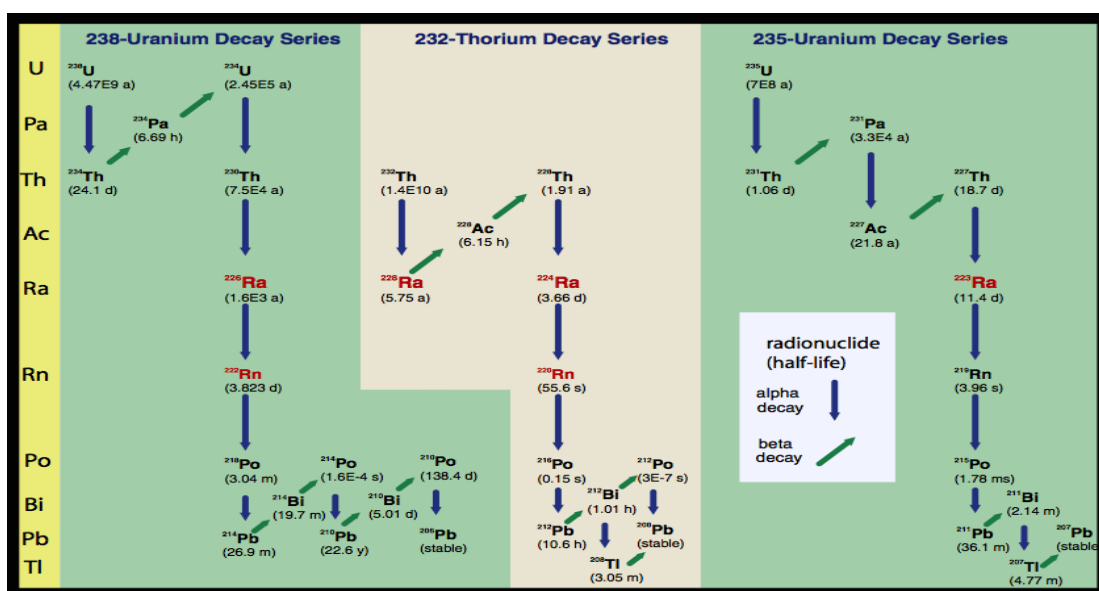
เมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เป็นต้นกำเนิดรังสีมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนได้นิวไคลด์ที่เสถียร การสลายตัวเป็นลำดับนี้เรียกว่า อนุกรมกัมมันตรังสี (Radioactive Series) โดย

อนุกรมกัมมันตรังสีในธรรมชาติมี 3 อนุกรม (ภาพประกอบ 2.3) ซึ่งในแต่ละอนุกรมมีการสลายตัวตามลักษณะเฉพาะของอนุกรมขึ้นอยู่กับเลขมวล อนุกรมทั้ง 3 มีดังนี้ เมื่อ n คือ จำนวนเต็มบวก

1. อนุกรมทอเรียม (Thorium Series, $4n$ Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ คือ ^{232}Th ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 1.41×10^{10} ปี มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{208}Pb นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้ มีเลขเชิงมวลหารด้วย 4 ลงตัว จึงเรียกอนุกรมชุดนี้ว่า $4n$

2. อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series, $4n+2$ Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ คือ ^{238}U ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต ครึ่งชีวิต 4.47×10^9 ปี มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{206}Pb นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้ มีเลขเชิงมวล (A) หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 จึงเรียกอนุกรมชุดนี้ว่า $4n+2$

3. อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series, $4n+3$ Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ คือ ^{235}U ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 7.04×10^8 ปี มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์ที่เสถียร คือ ^{207}Pb นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมนี้ มีเลขเชิงมวล (A) หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 จึงเรียกอนุกรมชุดนี้ว่า $4n+3$



ภาพประกอบ 2.3 แผนผังการสลายตัวของอนุกรมกัมมันตรังสีในธรรมชาติ

ที่มา : http://gulfsci.usgs.gov/tampabay/data/2_biogeochemical_cycles/images/decaychain.gif

(accessed May 1, 2011)

นอกจากนี้ ยังมีอนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium Series, $4n+1$ Series) ซึ่งมี ^{237}Np เป็นธาตุเริ่มต้น แต่เนื่องจาก ^{237}Np มีครึ่งชีวิตเพียง 2.14×10^6 ปี และส่วนใหญ่ของนิวไคลด์ที่เกิดจากการสลายในอนุกรมนี้มีครึ่งชีวิตไม่ยาวนานนัก ปัจจุบัน จึงไม่พบอนุกรมนี้ และยังมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้น ที่ไม่ได้อยู่ในอนุกรมการสลายตัว ดังตาราง 2.6

ตาราง 2.6 ตัวอย่างนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้น ที่ไม่ได้อยู่ในอนุกรมการสลายตัว

ที่มา : นवलวิ รุ่งชนเกียรติ, 2545

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต (ปี)	รังสีที่ปล่อย	กัมมันตภาพจำเพาะจากเปลือกโลก (Bq/kg)
^{40}K	1.26×10^9	บีตา, แกมมา	630
^{50}V	6×10^{15}	แกมมา	2×10^{-5}
^{87}Rb	4.8×10^{10}	บีตา	70
^{115}In	6×10^{14}	บีตา	2×10^{-5}
^{147}Sm	1.05×10^{11}	แอลฟา	0.7
^{209}KBi	1.26×10^{18}	แอลฟา	2×10^{-2}

2.8 ธาตุกัมมันตรังสีในหินและแร่

ธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแร่และปะปนอยู่ในดิน หิน ทราชน้ำ หรือแม้แต่ในน้ำมัน โดยที่แร่เหล่านี้จะแผ่รังสีออกมาพร้อมกับรังสีคอสมิกที่มาจากนอกโลกและรวมเป็นรังสีของสภาพแวดล้อมหรือรังสีภูมิหลัง ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเสมอ ปริมาณรังสีของสภาพแวดล้อมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ถึง 5 เท่า

ปริมาณของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในหินชนิดต่างๆ ตลอดจนปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมในแร่บางชนิด จะสังเกตเห็นว่าหินแกรนิตซึ่งเป็นหินที่พบทั่วไปมีปริมาณธาตุกัมมันตรังสีปะปนอยู่มากดังตาราง 2.7 แม้ว่าค่าในตารางนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยซึ่งในบางบริเวณหินแกรนิตจะมีปริมาณธาตุกัมมันตรังสีปะปนอยู่มากกว่านี้ เช่น ในภาคเหนือ (กิตติชัย วัฒนานิก และคณะ, 2527) และภาคใต้ของประเทศไทย (สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2537) ดังตาราง 2.8 การมีธาตุกัมมันตรังสีปะปนอยู่มากทำให้ปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูง อาจทำให้การแปล

ความหมายข้อมูลจากการสำรวจผิพลาตได้ บางครั้งก็ม่นันตภาพรังสีของโพแทสเซียม (potash feldspar, KAlSi_3O_8) ในผนังหินเพกมาไทต์อาจทำให้เข้าใจผิดคิดว่าเกิดจากการสะสมตัวของยูเรเนียมและทอเรียม

ตาราง 2.7 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในหินและแร่
ที่มา : กิตติชัย วัฒนานิก, 2525

หิน	ยูเรเนียม (ppm)	ทอเรียม (ppm)	โพแทสเซียม (%)
หินแกรนิต (granite)	4-5	15-20	3-4
หินบะซอลต์ (basalt), หินแกบโบร (gabbro)	0.5-0.8	2-3	0.5-0.9
หินทราย (sandstone)	0.5	2	0.6
หินดินดาน (shale)	4	12	2.7
หินปูน (limestone)	1.3	1	0.3
แร่	(%)	(%)	
แร่ยูเรนิไนต์ (uraninite, UO_2)	38-80	0-0.3	
แร่คาร์นอไทต์ (carnotite, $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	50-63*	0-15	
แร่ทอเรียมไนต์ (thorianite, ThO_2)	23-26	53-57	
แร่โมนาไซต์ (monazite, (Ce, La, Y, Th) PO_4)	0.02-0.7	3.5-16.5	

*ปริมาณของยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2)

ตาราง 2.8 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเฉลี่ยในหินแกรนิตจากพื้นที่ต่างๆ ในประเทศ

eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	หินแกรนิตจาก	อ้างอิงจาก
6.5	17.6	2.2	จังหวัดสงขลา และสตูล	สุรศักดิ์ แก้วอ่อน, 2539
8.8	19.9	2.3	จังหวัดสงขลา พัทลุง และตรัง	สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, 2539
18.4	-	-	จังหวัดสงขลา พัทลุง และปัตตานี	สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2537
19.6	32.2	6.4	พลูดอนลิว จังหวัดสงขลา	พวงทิพย์ รุ่งเล็ก, 2538
10	49	3.5	ภาคเหนือ	กิตติชัย วัฒนานิก และ
14.7	74.1	2.8	ภาคใต้	คณะ, 2527

2.9 แร่ดีบุกในประเทศไทย

ดีบุก นับเป็นแร่เศรษฐกิจที่สำคัญยิ่งของประเทศไทยในอดีตที่ผ่านมา จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์ได้มีการกล่าวถึงแร่ดีบุกว่า ใน พ.ศ. 2061 แผ่นดินสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 2 แห่งกรุงศรีอยุธยา ได้มีการทำสัญญาทางพระราชไมตรีกับโปรตุเกส เพื่อให้โปรตุเกสตั้งห้างรับซื้อแร่ทองคำ ดีบุก รัตนชาติ และหินสี ที่ได้จากกรุงศรีอยุธยา ปัตตานี นครศรีธรรมราช และมะริด (จารุอุดม เรื่องสุวรรณ, 2534) นับเป็นการส่งออกแร่ดีบุกครั้งแรกที่มีบันทึกทางประวัติศาสตร์

แร่ดีบุกที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ แคสซิเทอไรต์ (Cassiterite) ซึ่งพบและเป็นแร่เศรษฐกิจชนิดเดียว สูตรทางเคมี คือ SnO_2 โดยมีส่วนประกอบของ Sn และ O ประมาณ 78.6% และ 21.4% ตามลำดับ อีกชนิดหนึ่ง คือ สแตนไนต์ (Stannite) พบน้อยมากและไม่มีการผลิต

คุณสมบัติทางกายภาพของ แคสซิเทอไรต์ มีดังนี้ มีรูปผลึกระบบเททราโกนาล แข็ง 6-7 ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี ความถ่วงจำเพาะ 6.8-7.1 วาวโลหะแบบเพชรหรือกึ่งโลหะ สีของแร่ส่วนมากที่พบมักจะมีสีน้ำตาลดำหรือสีดำ สีน้ำผึ้ง เหลือง แดง และมีวงคล้ายเปลือกมังคุด สีจำปาผงละเอียด สีขาว

2.9.1 การกำเนิดของแร่ดีบุก

การกำเนิดของแร่ดีบุกในประเทศไทยนั้นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับหินอัคนีแทรกซอนชนิดกรด (Acid rock) โดยทั่วไปแล้วจะเกิดอยู่ในสายแร่แบบน้ำร้อนแทรกในหินพวกแกรนิตหรือหินชั้นที่อยู่ข้างเคียง และอาจเกิดเป็นก้อนหรือผลึกเล็กๆ ฝังในหินเพกมาไทต์ หินสการ์น รวมถึงหินแกรนิตที่อยู่ใกล้บริเวณเขตสัมผัสกับหินข้างเคียงด้วย

เนื่องจากดีบุกเป็นแร่ที่มีความทนทานต่อการสึกกร่อนทางกายภาพสูงเมื่อหินต้นกำเนิดพุดัง จึงมักจะนำไปพาไปสะสมตามเชิงเขาหรือแอ่งและที่ราบลุ่มต่างๆ เกิดเป็นแหล่งแร่ดีบุกแบบลานแร่ (Placer)

2.9.2 แร่อื่นที่พบร่วมกับแร่ดีบุก

สายแร่ดีบุกโดยปกติมักมีแร่ที่มีฟลูออรีนหรือโบรอนอยู่ด้วย เช่น ทัวร์มาลีน โทแพซ และอะพาไทต์ ส่วนแร่อื่นที่พบเกิดร่วมกับแร่ดีบุก เช่น วุลแฟรมไมต์ ซีไลต์ โคลัมไบต์-แทนทาลิต์ อิลเมนไนต์ โมนาไซต์ ซีโนไทม์ และเซอร์คอน

- วุลแฟรมไมต์และซีไลต์ แร่วุลแฟรมไมต์ (Wolframite) มีสูตรทางเคมี $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ และซีไลต์ (Scheelite) มีสูตรทางเคมี CaWO_4 เป็นสินแร่ที่สำคัญของโลหะทังสแตน ส่วนใหญ่จะพบร่วมกับแร่ดีบุก ภาคเหนือพบที่จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน แพร่ และตาก ภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี และประจวบคีรีขันธ์ ภาคใต้ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ระนอง พังงา ภูเก็ต สงขลา ปัตตานี และยะลา

- โคลัมไบต์-แทนทาลิต์ แร่โคลัมไบต์ (Columbite) และแทนทาลิต์ (Tantalite) เป็นแร่ที่มีธาตุไนโอเบียม (โคลัมเบียม) และแทนทาลัมเป็นส่วนประกอบหลัก มีสูตรทางเคมี $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ ส่วนประกอบของธาตุไนโอเบียมและแทนทาลัมจะมีผลต่อการเรียกชื่อแร่ โดยจะเรียกแร่โคลัมไบต์เมื่อแร่ไนโอเบียมมากกว่าแทนทาลัม และเรียกแทนทาลิต์เมื่อแร่ไนโอเบียมมีธาตุแทนทาลัมมากกว่าไนโอเบียม ส่วนใหญ่มักพบในลานแร่ดีบุกและเป็นเพียงแร่พลอยได้จากการทำเหมืองแร่ดีบุกเท่านั้น ภาคเหนือพบที่จังหวัดเชียงใหม่ ภาคกลางที่จังหวัดอุทัยธานี กาญจนบุรี ราชบุรี ภาคใต้ที่จังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต สงขลา และตรัง

- อิลเมนไนต์ แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite) เป็นแร่เศรษฐกิจที่สำคัญของโลหะไทเทเนียม มีสูตรทางเคมี FeTiO_3 พบทั่วไปในแหล่งดีบุก และในแหล่งพลอยบางแหล่ง พวกทำเหมืองดีบุกมักเรียกว่า จีแร่ (อามัง : Amang)

- โมนาไซต์ แร่โมนาไซต์ (Monazite) เป็นแร่ที่มีธาตุทอเรียม และกลุ่มธาตุหายาก ได้แก่ ซีเรียม แลนทานัม เป็นส่วนประกอบ มีสูตรทางเคมี $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$ ส่วนใหญ่พบในแหล่งลานแร่ดีบุกเกือบทุกแหล่ง พบตามหาดทรายและตามท้องน้ำลำธารทั่วไปที่ใกล้ภูเขาหินแกรนิต หรือไนส์ ในอดีตเคยมีการผลิตแร่โมนาไซต์โดยการแต่งแร่ดีบุกจากจังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง ชุมพร สุราษฎร์ธานี ประจวบคีรีขันธ์ กาญจนบุรี ระยอง และเชียงใหม่

- ซีโนไทม์ แร่ซีโนไทม์ (Xenotime) เป็นแร่ที่มีอิตเทียม (Y) ซึ่งเป็นธาตุหายากชนิดหนึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก มีสูตรทางเคมี YPO_4 ในประเทศไทยพบในลานแร่ดีบุกในจังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต ประจวบคีรีขันธ์ กาญจนบุรี ราชบุรี และเชียงใหม่

- เซอร์คอน แร่เซอร์คอน (Zircon) มีสูตรทางเคมี ZrSiO_4 ส่วนใหญ่เป็นแร่พลอยได้จากการทำเหมืองแร่ดีบุก พบในเหมืองลานแร่ดีบุกจากจังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง และกาญจนบุรี และตามชายฝั่งทะเลทั่วไปที่สำคัญ ได้แก่ จังหวัดระยอง ประจวบคีรีขันธ์ และชุมพร

2.9.3 แหล่งแร่ดีบุกในประเทศ

ส่วนใหญ่แร่ดีบุกจะพบทางซีกด้านตะวันตกของประเทศติดกับชายแดนประเทศสหภาพพม่า โดยพบในภาคใต้ทุกจังหวัด ภาคกลางมีที่จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี และเพชรบุรี ภาคเหนือพบในจังหวัดกำแพงเพชร ตาก เชียงใหม่ ลำปาง เชียงราย และแม่ฮ่องสอน ส่วนภาคตะวันออก พบที่จังหวัดชลบุรี ระยอง และจันทบุรี

2.9.4 ประโยชน์ของดีบุก

แคสซิเทอไรต์ เป็นสินแร่ที่สำคัญของโลหะดีบุกเนื่องจากโลหะดีบุกมีคุณสมบัติในการทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและสารละลายต่างๆ ไม่เป็นสนิม ผสมเป็นเนื้อเดียวกับโลหะอื่นได้ดี และไม่เป็นพิษต่อร่างกายจึงถูกนำมาใช้ในการเคลือบโลหะต่างๆ ที่ทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารเป็นส่วนใหญ่ ใช้ผสมตะกั่ว เงิน หรือทองแดงเป็นโลหะบัดกรี ผสมกับโลหะอื่นทำเป็นภาชนะประดับและศิลปวัตถุต่างๆ เช่น พิวเตอร์และบรอนซ์ ผสมกับเงินและปรอททำสารอุดฟันทางทันตกรรม นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมยานยนต์ สารประกอบของดีบุกสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อีกหลายอย่าง ได้แก่ ใช้ในการผลิตแก้วเนื้อทึบ เครื่องปั้นดินเผา เครื่องเคลือบ สิ่งทอ กระจกแผ่นเรียบ พลาสติก สีทาบ้าน ยากำจัดพยาธิในสัตว์ ยาสีฟัน และใช้ในการฟอกน้ำตาล เป็นต้น

2.9.5 ผลผลิตจากแร่ดีบุก

การทำเหมืองแร่ดีบุกนั้นในประเทศไทยคาดว่าได้มีมาช้านานแล้ว โดยเริ่มมีการทำเหมืองผลิตแร่ดีบุกที่ภาคใต้ก่อนแล้วค่อยๆ ขยับขึ้นมาทางภาคกลาง เหนือและตะวันออก ตามลำดับ จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์พบว่าประเทศไทยในกรุงศรีอยุธยาตอนต้น (พ.ศ. 2061) ก็ได้มีการส่งออกแร่ดีบุกแล้ว ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2450 จนถึง พ.ศ. 2541 ประเทศไทยเริ่มผลิตแร่ดีบุกไปแล้วทั้งสิ้น 1,561,255 ตัน สถิติการผลิตแร่ดีบุกในช่วงปี พ.ศ. 2541 – 2549 มีดังนี้ 724, 188 และ 225 ตัน มูลค่า 176.2, 40.1 และ 54.5 ล้านบาท ตามลำดับ (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในการวิจัยนี้เพื่อตรวจวัดปริมาณนอร์มในทรายเก็บจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ได้ใช้วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย ซึ่งได้แบ่งวิธีดำเนินการออกเป็นขั้นตอนดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 กำหนดสถานที่เก็บตัวอย่าง

3.2.2 ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

3.2.3 การเก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

3.2.4 การเตรียมตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

3.2.5 การเตรียมสารมาตรฐาน

3.2.6 การตรวจวัดกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา

3.2.7 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของหัววัด HPGe

3.2.8 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดของระบบวัดสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา

3.2.9 การประเมินผลกระทบเชิงรังสี

3.2.10 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.11 การวิเคราะห์ปัจจัย

3.2.12 การประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของทราย

3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

1. ถูพลาสติกใสแบบซิปล็อค ขนาด 10 x 14 นิ้ว
2. ปากกาเคมี
3. สลากติครหัสตัวอย่าง

4. ฟิล์มสำหรับตัดทรายคลอง
5. เครื่องเก็บตะกอนทรายคลอง
6. ซ้อนปลุกสำหรับตัดทรายชายหาด
7. เครื่องบอกพิกัดภูมิศาสตร์ (Garmin etrex, USA)
8. แผนที่อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ราว 4626 I มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

1. สารมาตรฐาน World Wide Proficiency Test IAEA-CU-2010 Sample 06
2. กระจุกใส่ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 x 7.5 เซนติเมตร
3. ฉลากติดรหัสกระจุกบรรจุตัวอย่าง
4. เทปกาว
5. เครื่องชั่งจุดทศนิยม 1 ตำแหน่ง
6. เครื่องคัดแยกขนาดเม็ดทราย
7. ตะแกรงร่อนแยกขนาด (Analysensieb Test Sieve)
8. กระจุกดวง
9. ซ้อนตักสาร
10. ถาดใส่ตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาดเพื่อนำตัวอย่างเข้าตู้อบ
11. กระจุกฟรอยด์
12. เครื่องอบสาร
13. ครกหิน

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับขั้นตอนการตรวจวัดรังสีแกมมา

1. กระจุกใส่ตัวอย่าง
2. เครื่องคอมพิวเตอร์
3. ชุดระบบวัดรังสีแกมมา (Gamma Ray Spectrometry) ซึ่งประกอบไปด้วยหัววัด

HPGe (Canberra Model GC 1319, USA) อยู่ภายในถ้ำตะกั่วกำบังรังสี (Canberra Model 747, USA) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA 8192 ช่อง Canberra Model Inspector 2000, USA)

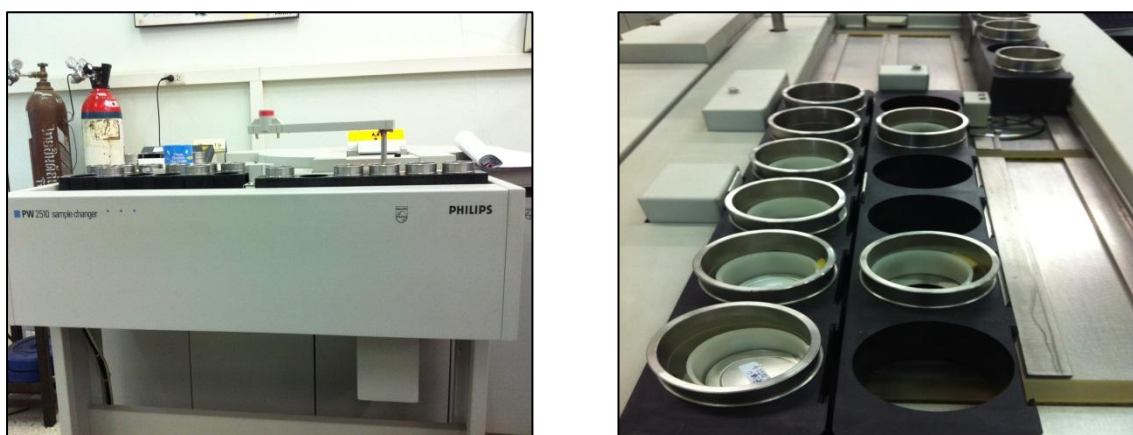
และทำการวิเคราะห์ยอดพลังงานรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Canberra, Genie2k software Version 2.1, USA) ภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ชุดระบบวัดรังสีแกมมา ชนิดหัววัดแบบ HPGe

3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ธาตุประกอบ

1. ตัวอย่างทรายคลอง 14 ตัวอย่างและตัวอย่างทรายชายหาด 10 ตัวอย่าง
2. เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ธาตุประกอบ คือ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2510 ดังภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2510

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 กำหนดสถานที่เก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างทรายโคลงเก็บจากคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา จังหวัดพังงา ซึ่งมีความยาวรวมทั้งหมดประมาณ 30 กิโลเมตร เก็บตัวอย่างทั้งหมด 28 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างประมาณ 1-2 กิโลเมตร หลังจากทำการเก็บตัวอย่างแล้วทำการบันทึกตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม (Garmin etrex, USA) แสดงดังตาราง 3.1 โดยการเก็บตัวอย่างทรายจากขอบทั้งสองฝั่งคลองและจุดกึ่งกลางคลองใส่งั่ง เพื่อนำมาผสมเป็นตัวอย่างทรายจากจุดนั้นแล้วนำมาใส่ไว้ในถุงพลาสติกแบบซิปล็อค (ภาพประกอบ 3.3) แต่ละตัวอย่างมีน้ำหนักประมาณ 4-5 กิโลกรัม

ส่วนตัวอย่างทรายชายหาดเก็บจากทรายชายหาดเก็บจากจังหวัดพังงาที่อำเภอตะกั่วป่า 8 จุด และอำเภอกระบุรี 1 จุด เก็บจากจังหวัดระนองที่อำเภอสุขสำราญ 1 จุด พร้อมทั้งทำการบันทึกตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียมเช่นเดียวกัน แสดงดังตาราง 3.2



ภาพประกอบ 3.3 การบันทึกตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง

ตาราง 3.1 ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา

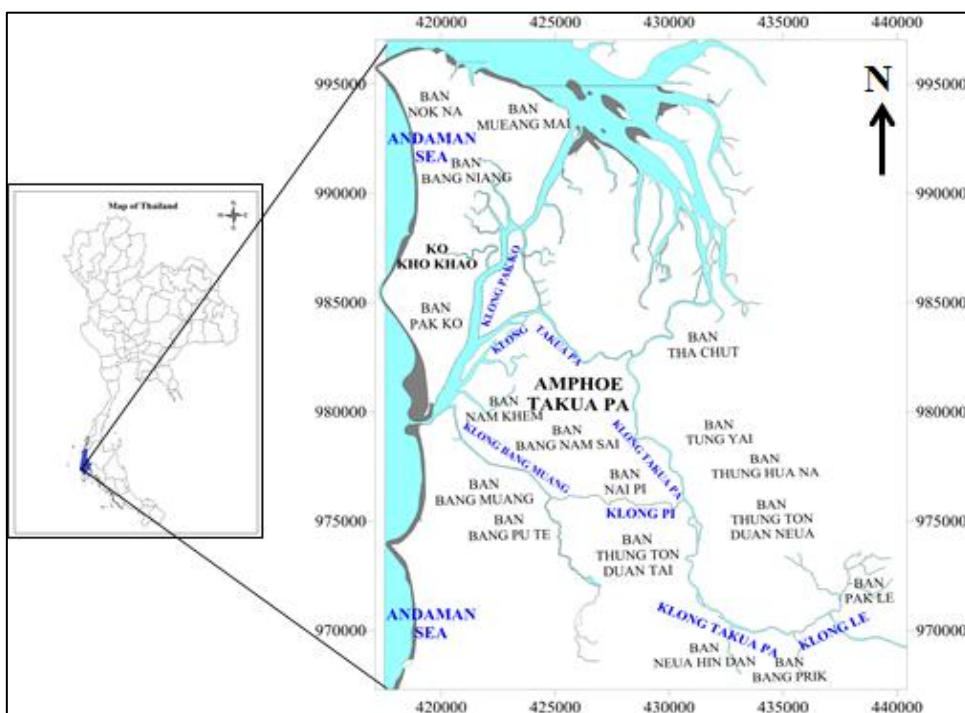
Site	Sample	Site coordinate(UTM)		Site	Sample	Site coordinate(UTM)	
		E	N			E	N
คลองเหล	S1	437031	970796	คลองตะกั่วป่า	S15	428205	982094
คลองตะกั่วป่า	S2	435477	969970		S16	428002	982663
	S3	432984	970218		S17	426940	982674
	S4	430875	972521		S18	425930	982757
	S5	431024	973072		S19	424943	983751
	S6	431318	974004		S20	422768	984112
	S7	431143	975222		S21	421698	983002
	S8	430783	975872	คลองปากเกาะ	S22	420517	980518
	S9	430578	976691	คลองบางม่วง	S23	420676	979428
	S10	430073	977306		S24	421776	977920
	S11	429827	978374		S25	423802	977273
	S12	428556	979033		S26	424586	976380
	S13	428445	980097	คลองปี	S27	425656	976160
	S14	428609	981081		S28	427168	975876

ตาราง 3.2 ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างทรายชายหาด

Site	Sample	Site coordinate(UTM)		Site	Sample	Site coordinate(UTM)	
		E	N			E	N
หาดทับตะวัน	SB1	417816	973881	ก่อนบ้านบางเนียง	SB6	418986	989797
บ้านสนามบิน	SB2	419319	976528	บ้านนอกนา	SB7	417931	995085
ท่าเทียบเรือบ้านน้ำเค็ม	SB3	419225	979422	ท่าเทียบเรือบ้านเมืองใหม่	SB8	424057	994645
สถานีอนามัยเกาะคอเขา	SB4	418855	983045	หาดอ่าวเคย	SB9	431843	1028192
บ้านทุ่งตึก	SB5	417677	984919	หาดประพาส	SB10	433624	1035179

3.2.2 ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

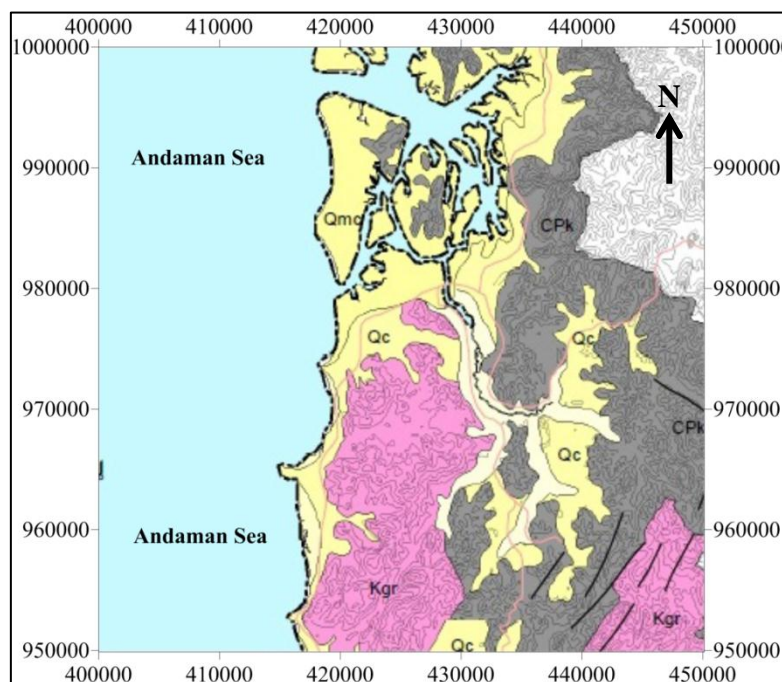
พื้นที่ทำการศึกษาอยู่ในอำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา อยู่ระหว่างเส้นกริด 418000E - 455000E และ 968000N - 995000N บนแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหารมาตราส่วน 1:50,000 ระวัง 4626 I (ภาพประกอบ 3.4) มีเนื้อที่ทั้งหมด 552.02 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 13.24 ของจังหวัด ส่วนใหญ่เป็นภูเขาและเนินเขาเตี้ยๆ สลับซับซ้อนกันทอดตัวเป็นแนวยาวอยู่ทางตะวันออก ตอนกลางเป็นที่ราบลุ่มน้ำตะกั่วป่าและสาขา พื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นเนินมูลทรายที่เหลือจากการทำเหมืองแร่บริเวณปากน้ำ และทางตะวันตกจะเป็นที่ราบลาดลงไปตามชายฝั่งทะเล มีชายฝั่งทะเลเป็นแนวยาวประมาณ 50 กิโลเมตร ตอนกลางมีแม่น้ำตะกั่วป่าไหลมาจากทางเหนือของอำเภอกะปาง ผ่านตำบลคำตั่ว บางไทร โคนเทียน ตะกั่วป่า และบางนายสี มีลำคลองสาขาที่ไหลลงสู่แม่น้ำสายนี้ คือ คลองปี คลองบางอิ คลองปัก คลองบางลาน และคลองบางกรัก นอกจากนี้ เป็นลำน้ำสายสั้นๆ ไหลจากทิศตะวันออกลงสู่ทะเล ทางด้านตะวันตก ได้แก่ คลองบางดั่ง คลองบางใหญ่ คลองบางม่วง คลองคึกคัก และคลองบางเนียง ลำน้ำเกือบทุกสายจะขุ่นข้น เนื่องจากดินตะกอนจากการทำเหมืองแร่ทั้งที่ถูกต้องตามกฎหมายและไม่ถูกต้องในอดีตที่ผ่านมา



ภาพประกอบ 3.4 ตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาวิจัย

ลักษณะทางธรณีวิทยาของอำเภอตะกั่วป่า (ภาพประกอบ 3.5) ประกอบด้วย

- Qmc เป็นตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายละเอียดของที่ลุ่มราบน้ำขึ้นถึง ที่ลุ่มชื้นแฉะ และที่ลุ่มน้ำขังป่าชายเลน และชะวากทะเล ซึ่งอยู่ในยุคควอเทอร์นารี
- Qc เป็นตะกอนเศษหินเชิงเขา และตะกอนผุอยู่กับที่ กรวด ทรายแป้ง สีลาแลง และเศษหิน ซึ่งอยู่ในยุคควอเทอร์นารี
- CPk เป็นหินโคลนปนกรวด หินดินดาน หินทรายแป้ง หินเชิร์ต หินทรายเนื้อภูเขาไฟ หินทรายเนื้อซิลิกา สีเทา เทาเขียว และน้ำตาล มีซากหอยแบรคิโอพอด ไบรโอซัว ปะการัง และไครนอยด์ ซึ่งอยู่ในยุคคาร์บอนิเฟอรัส - เพอร์เมียน
- Kgr หินไบโอไทต์ซอร์นเบลนด์แกรนิต มัสโคไวต์แกรนิต ผลึกขนาดเท่าๆ กัน และผลึกเนื้อดอก หินแกรโนไดโอไรต์ ซึ่งอยู่ในยุคครีเทเชียส



ภาพประกอบ 3.5 ลักษณะธรณีวิทยาของอำเภอตะกั่วป่า

(ดัดแปลงมาจาก กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

3.2.3 การเก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

1. เก็บตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาดจากจุดเก็บตัวอย่างบรรจุใส่ถุงพลาสติกใสแบบซิปล็อก เก็บตัวอย่างแต่ละจุดประมาณ 4-5 กิโลกรัม
2. นำตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาดที่เก็บมาตากแดดเพื่อให้แห้ง และนำไปเตรียมตัวอย่างต่อไป

3.2.4 การเตรียมตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

1. นำตัวอย่างทรายมาแยกขนาดต่างๆ ออกไป จากนั้นนำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการอบมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และนำไปแยกขนาดตัวอย่างด้วยเครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อนแยกขนาดต่างๆ 4 ขนาดต่อตัวอย่าง (ภาพประกอบ 3.6)
3. นำตัวอย่างทรายมาบรรจุใส่กระปุกพลาสติกที่มีขนาดและความสูงเท่ากับขนาดของสารมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล จากนั้นจะชั่งน้ำหนักและปิดผนึกตัวอย่างกระปุกให้สนิทแล้วพันรอบฝาด้วยเทปกาว
4. ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน เพื่อให้กัมมันตภาพรังสีของ U/Th และลูกหลานอยู่ในสภาวะสมดุลทางกัมมันตภาพรังสี
5. นำไปวิเคราะห์รังสีแกมมาของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ด้วยระบบวิเคราะห์สเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา ชนิดหัววัด HPGc

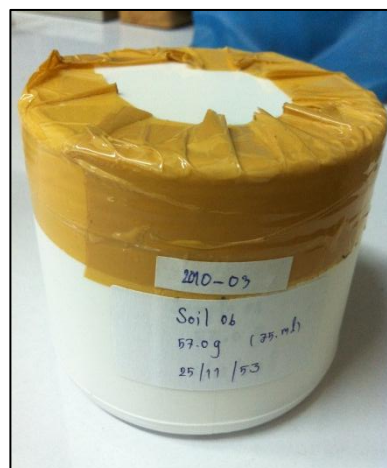
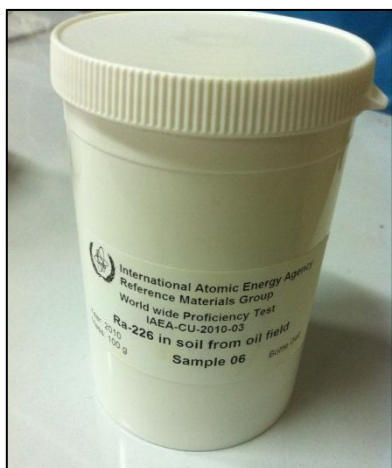


ภาพประกอบ 3.6 เครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อนแยกขนาด

3.2.5 การเตรียมสารมาตรฐาน

1. สารมาตรฐาน นำสารมาตรฐาน World wide Proficiency Test IAEA-CU-2010 Sample 06 (ภาพประกอบ 3.7) ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra เท่ากับ 19050 ± 260 Bq/kg มาใส่กระปุกพลาสติก ปิดฉนวนกระปุกให้สนิทแล้วพันรอบฝาด้วยเทปกาว ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน เพื่อให้กัมมันตภาพรังสีของ U/Th และลูกหลานอยู่ในสภาวะสมดุลทางกัมมันตภาพรังสี

2. รังสีภูมิหลัง นำกระปุกพลาสติกเปล่า ปิดฝากล่องแล้วพันรอบฝาด้วยเทปกาว



ภาพประกอบ 3.7 สารมาตรฐาน World wide Proficiency Test IAEA-CU-2010 Sample 06 ที่ใช้ในการปรับเทียบ

3.2.6 การตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา

1. เข้าโปรแกรม Genie 2k
2. Click file แล้วไป click open data source
3. Click detector แล้วเลือก DET 01
4. Click MCA แล้วไป click adjust แล้วเลือก click HVPS เลือก click on
5. รอคำว่า wait ให้หายก่อน แล้ว click exit

6. Click MCA แล้วไป click acquire setup แล้วตั้งเวลาที่ต้องการวัด คิดเป็นวินาที (second) Click execute และปล่อยทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง

7. เริ่มทำการวัดตัวอย่าง โดยวางตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในกระปุกปิดผนึกให้อยู่กึ่งกลางของหัววัดรังสีแกมมา และ click start เพื่อเริ่มวัดรังสี โดยใช้เวลาในการวัดรังสี 10,800 วินาที

8. เมื่อครบ 10,800 วินาที ทำการบันทึกสเปกตรัมไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์

9. จากนั้นปิดเครื่องโดย click MCA ไป click adjust แล้วเลือก click HVPS เลือก click off

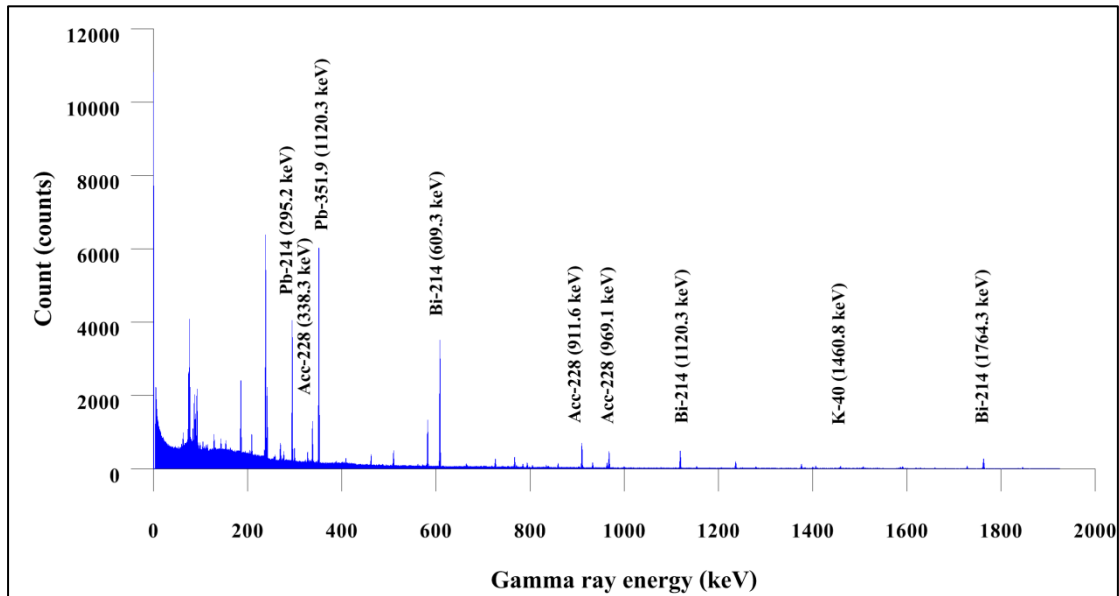
10. รอคำว่า wait ให้หายก่อนแล้ว click exit

11. ปิดโปรแกรม Genie 2k แล้วปิดสวิทช์ที่ MCA

3.2.7 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของหัววัด HPGe

สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาดจะถูกวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา (Gamma-ray Spectrometer) ชนิดหัววัด HPGe (High Purity Germanium; Canberra, Model GC1319 USA) ซึ่งอยู่ภายในตู้กำบังรังสีกัมมันตภาพรังสี (Canberra, Model 747, USA) หัววัดจะเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA 8192 ช่อง Canberra Model Inspector 2000, USA) และวิเคราะห์ยอดพลังงานรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Canberra, Genie2k software Version 2.1, USA) หัววัดรังสีแกมมามีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 13.9% และมีกำลังแยก 1.75 keV ที่พลังงานรังสีแกมมาของ ^{60}Co ที่พลังงาน 1332 keV และมีอัตราส่วนระหว่างยอดพลังงานต่อฐานคอมพัตตันเท่ากับ 44.8:1

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ใช้วิธีการตรวจวัดพลังงานรังสีแกมมาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีรุ่นลูกที่อยู่ในอนุกรมเดียวกันและเกิดสมดุลงัมมันตรังสี โดยที่ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra สามารถคำนวณจากพื้นที่ใต้พีคของพลังงานรังสีแกมมาที่ 295.2, 351.9 keV (^{214}Pb), 609.3, 1120.3 และ 1764.3 keV (^{214}Bi) ขณะที่ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th สามารถคำนวณจากพื้นที่ใต้พีคของพลังงานรังสีแกมมาที่ 338.3, 911.6 และ 969.1 keV (^{228}Ac) และกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K สามารถคำนวณจากพื้นที่ใต้พีคของพลังงานรังสีแกมมาที่พลังงาน 1460.8 keV ดังภาพประกอบที่ 3.8 โดยทุกตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาดใช้เวลาวัดรังสี 10,800 วินาที



ภาพประกอบ 3.8 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่าง SS26 จากหัววัดรังสีชนิด HPGe

การหาค่าประสิทธิภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้ ก่อนอื่นจะต้องคำนวณค่าประสิทธิภาพของหัววัด (Efficiency) จากสารอ้างอิงมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) คือ World wide Proficiency Test IAEA-CU-2010 Sample 06 และคำนวณค่าประสิทธิภาพของหัววัดจากสมการ (3.1) ได้ดังตาราง 3.3

$$Efficiency = \frac{Net Area}{(LiveTime)(Activity)(Yield)} \quad (3.1)$$

เมื่อ	Net Area	เป็นพื้นที่ใต้พีกรังสีแกมมาที่สนใจซึ่งปรับแก้รังสีภูมิหลังแล้ว (counts)
	Live Time	เป็นเวลาวัด (sec)
	Activity	เป็นกัมมันตภาพของสารมาตรฐานที่พลังงานรังสีเฉพาะ (Bq)
	Yield	เป็นสัดส่วนการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานดังกล่าว

ตาราง 3.3 ประสิทธิภาพรังสีแกมมาของนิวไคลด์ต่างๆ

Nuclides	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq)	Net Area (counts)	Efficiency (CPS/Bq)
²¹⁴ Pb	295.2	19.2	1085.05	33565	0.014907054
²¹⁴ Pb	351.9	37.2	1085.05	54505	0.012493951
²¹⁴ Bi	609.3	46.3	1085.05	36275	0.006680867
²¹⁴ Bi	768.4	5.04	1085.05	3253	0.005503766
²¹⁴ Bi	934.1	3.21	1085.05	1613	0.004284851
²¹⁴ Bi	1120.3	15.1	1085.05	6950	0.003924770
²¹⁴ Bi	1238.1	5.94	1085.05	2404	0.003451075
²¹⁴ Bi	1377.7	4.11	1085.05	1646	0.003415029
²¹⁴ Bi	1729.6	3.05	1085.05	958	0.002678379
²¹⁴ Bi	1764.5	15.8	1085.05	4808	0.002594859

ค่ากัมมันตภาพของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2) เมื่อนำค่าน้ำหนักของตัวอย่างไปหารค่ากัมมันตภาพจะได้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Specific activity)

$$Activity (Bq) = \frac{Net Area}{(Live Time)(Efficiency)(Yield)} \quad (3.2)$$

ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในดินเฉลี่ยจากทั่วโลก มีค่าเท่ากับ 33, 45 และ 420 ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000) และค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในทรายชายหาดเฉลี่ยจากทั่วโลก มีค่าเท่ากับ 25, 25 และ 370 ตามลำดับ (UNSCEAR, 1988) การคำนวณเป็นความเข้มข้น eU, eTh และ K สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3), (3.4) และ (3.5)

$$C_U = 0.080947 \times A_{Ra} \quad (3.3)$$

เมื่อ C_U เป็นความเข้มข้น eU (ppm)
 A_{Ra} เป็นกัมมันตภาพจำเพาะ ^{226}Ra (Bq/kg)

$$C_{Th} = 0.246338 \times A_{Th} \quad (3.4)$$

เมื่อ C_{Th} เป็นความเข้มข้น eTh (ppm)
 A_{Th} เป็นกัมมันตภาพจำเพาะ ^{232}Th (Bq/kg)

$$C_K = 0.003224 \times A_K \quad (3.5)$$

เมื่อ C_K เป็นความเข้มข้น K (%)
 A_K เป็นกัมมันตภาพจำเพาะ ^{40}K (Bq/kg)

3.2.8 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดของระบบวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา หัววัด HPGe (Minimal Detectable Activity, MDA)

ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ของนิวไคลด์ใดๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ใช้สมการของ Currie's Derivation (Currie, 1968) หนึ่งในกลุ่มสมการชุดดังกล่าว คือ

$$MDA(Bq) = \frac{2.706 + 4.653\sigma}{(LiveTime)(Efficiency)(Yield)} \quad (3.6)$$

เมื่อ σ เป็น SD ของ BG ที่พลังงานที่สนใจ
 Live Time เป็นเวลาวัด (sec)
 Efficiency เป็นประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงานที่สนใจ ($\text{count}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$)
 Yield เป็นสัดส่วนการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานดังกล่าว

ผลการวัดค่ารังสีกัมมันตภาพรังสีซึ่งเตรียมจากกระปุกเปล่า โดยใช้เวลาวัดรังสี 10,800 วินาที ซึ่งได้ทำการรวมจำนวนนับรังสีเฉพาะยอดพลังงานของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K จากคำนวณค่า MDA จากสมการ (3.6) พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.015, 0.0209 และ 0.061 Bq ตามลำดับ

3.2.9 การประเมินผลกระทบเชิงรังสี

สำหรับการประเมินผลกระทบเชิงรังสีต่อมนุษย์ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียมในที่นี้ คือ ^{238}U จะพิจารณาโดยใช้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่ตรวจวัดและวิเคราะห์ได้ของ ^{226}Ra และลูกหลานของมันเท่านั้น ซึ่งมีค่าคิดเป็นร้อยละ 98.5 ของผลกระทบทั้งหมด โดยไม่พิจารณาผลกระทบที่มาจาก ^{238}U และรุ่นลูกหลานก่อนที่จะสลายตัวให้ ^{226}Ra (ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และ แพร นิรนาทรังสรรค์, 2548) ในงานวิจัยได้นี้ได้เลือกประเมินผลกระทบเชิงรังสีจากการคำนวณค่าบ่งชี้ความอันตรายเชิงรังสีดังต่อไปนี้

3.2.9.1 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed Dose Rate in Air, D) คือ ค่าความเข้มรังสีแกมมาในอากาศ ซึ่งเป็นรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มาจากพื้นโลก อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน ซึ่งคำนวณจากค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K โดยสมมติว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ของ ^{137}Cs , ^{90}Sr และ ^{238}U มีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้ง (Kocher, 1985) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.7)

$$D(\text{nGy/h}) = 0.462A_{\text{Ra}} + 0.604A_{\text{Th}} + 0.0417A_{\text{K}} \quad (3.7)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_{K} คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในหน่วย Bq/kg สำหรับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000)

3.2.9.2 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี

ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (Annual Effective Dose Equivalent, AEDE) ที่ได้รับจากการนำตัวอย่างทรายมาใช้ก่อสร้างเป็นอาคารบ้านเรือน (AEDE_m) สามารถหาได้จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ 0.7 Sv/Gy (Singh et al,

2009) ซึ่งใช้ประเมินการได้รับรังสีในผู้ใหญ่ โดยคิดว่ามนุษย์อาศัยอยู่ภายในบ้านเรือนเท่ากับ 80 % ของเวลาทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.8)

$$AEDE_{in} (\mu\text{Sv/y}) = D (\text{nGy/h}) \times 8760 (\text{h}) \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 0.8 \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีสำหรับภายนอกบ้านเรือน ($AEDE_{out}$) โดยคิดว่ามนุษย์อาศัยอยู่ภายนอกบ้านเรือนเท่ากับ 20 % ของเวลาทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.9)

$$AEDE_{out} (\mu\text{Sv/y}) = D (\text{nGy/h}) \times 8760 (\text{h}) \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 0.2 \times 10^{-3} \quad (3.9)$$

สำหรับปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในและภายนอกอาคารบ้านเรือนซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 450 μSv และ 70 μSv ตามลำดับ (Orgun et al., 2007)

3.2.9.3 ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม

ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Radium equivalent activities, Ra_{eq}) เป็นค่าผลรวมของน้ำหนักถ่วงกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด จากการศึกษพบว่า ^{226}Ra ที่มีกัมมันตภาพ 370 Bq/kg จะให้ค่าอัตราปริมาณรังสีเทียบเท่า ^{232}Th กัมมันตภาพ 259 Bq/kg หรือ ^{40}K กัมมันตภาพ 4810 Bq/kg สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.10) (OECD, 1979)

$$Ra_{eq} = 370 \left(\frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \quad (3.10)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในหน่วย Bq/kg สำหรับเกณฑ์ที่ปลอดภัยสำหรับค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมเท่ากับ 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000)

3.2.9.4 คำนวณความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกและภายในร่างกาย

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายนอกในร่างกาย (External hazard index, H_{ex}) โดยกัมมันตภาพรังสีที่ได้รับจากภายนอกส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมา ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ที่มาจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติ ค่า H_{ex} คำนวณได้จากสมการ (3.11) (Beretka and Mathew, 1985) สมการนี้เป็นรูปแบบจำลอง (Conservative Model) ของการได้รับอันตรายจากรังสีภายนอก เมื่อนำวัสดุที่มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น หิน ทราย มาใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน โดยรูปแบบจำลองนี้จะสมมติว่าบ้านที่ก่อสร้างมีผนังหนามาก โดยไม่มีประตูและหน้าต่าง (Krieger, 1981)

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.11)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในทรายคลองและทรายชายหาดตามลำดับ ในหน่วย Bq/kg เมื่อค่า $H_{ex} \leq 1.0$ แสดงว่า ความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยถ้า $H_{ex} = 1.0$ ผู้ได้รับสัมผัสรังสีภายนอกจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 1.5 mGy/h พอดี และถ้า $H_{ex} > 1.0$ ผู้อาศัยอยู่ในบ้านเรือนดังกล่าว จะมีความเสี่ยงอันตรายจากการได้รับสัมผัสได้รับรังสีจากภายนอกสูงกว่าเกณฑ์ปกติ โดยใช้ค่านี้เป็นเกณฑ์ว่าไม่ควรจะนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายในร่างกาย (Internal hazard index, H_{in}) มาจากก๊าซกัมมันตรังสีเรดอน ทอรอนและผลผลิตจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ คำนวณได้จากสมการ (3.12)

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.12)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในหน่วย Bq/kg

3.2.9.5 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา

ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา (Gamma radiation hazard index, $I_{\gamma r}$) จะเกี่ยวกับการประเมินรังสีแกมมาส่วนเกินที่มาจากต้นกำเนิดรังสีในวัสดุก่อสร้าง (ทรายคลอง) เมื่อมีการนำวัสดุทรายมาใช้ในการก่อสร้าง ค่า $I_{\gamma r}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.13) ตามที่คณะกรรมการยุโรป (European Commission: EC) ได้เสนอไว้ (EC,1999)

ค่า $I_{\gamma r}$ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ปริมาณรังสี รูปแบบ และปริมาณของวัสดุทรายที่ถูกนำไปใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งเกณฑ์ปริมาณรังสีที่คณะกรรมการยุโรปเสนอแนะ แสดงดังตาราง 3.4

$$I_{\gamma r} = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \quad (3.13)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในหน่วย Bq/kg

ตาราง 3.4 เกณฑ์ปริมาณรังสีจากการนำวัสดุต่างๆ มาใช้ในการก่อสร้าง

ที่มา : European Commission, 1999

เกณฑ์ปริมาณรังสี	0.3 mSv/y	1 mSv/y
Materials used in bulk amounts	$I \leq 0.5$	$I \leq 0.1$
Materials used for superficial purpose, boards, tiles, etc	$I \leq 2$	$I \leq 6$

3.2.10 สถิติของการนับข้อมูล

ค่าสถิติที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ตัวกลางเลขคณิตหรือค่าเฉลี่ย (Arithmetic mean หรือ mean, \bar{X}) หาได้จากการเอาผลรวมของข้อมูลทั้งหมดหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

2. ตัวกลางเรขาคณิต (Geometric mean, G.M.) หาได้จากสมการ $G.M. = (\prod_{i=1}^n x_i)^{1/n} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$ เมื่อ x_i เป็นข้อมูลตัวที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด

3. มัชฐาน (median) คือ ข้อมูลที่อยู่ตรงกลางเมื่อเรียงจากค่าน้อยไปมาก

4. พิสัย (Range) จะบอกค่าต่ำสุดและสูงสุดของข้อมูลนั้น
5. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error of the mean, SE) ได้จาก $SE = SD/\sqrt{n}$ เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่าง
6. ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % (95 % confidence interval, 95 % CI) ได้จาก $95\%CI = \bar{X} \pm 1.96SE$

3.2.11 การวิเคราะห์ปัจจัย

Factor analysis หรือการวิเคราะห์ปัจจัยหรือบางครั้งเรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบ เป็นเทคนิคที่จะจับกลุ่มหรือรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ไว้ในกลุ่มหรือ Factor เดียวกัน ตัวแปรที่อยู่ใน Factor เดียวกันจะมีความสัมพันธ์กันมาก โดยความสัมพันธ์นั้นอาจจะเป็นในทิศทางบวก (ไปในทางเดียวกัน) หรือทิศทางลบ (ไปในทางตรงกันข้าม) ก็ได้ ส่วนตัวแปรที่อยู่คนละ Factor จะไม่มีความสัมพันธ์กันหรือมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2544) เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การสร้างเมทริกซ์สหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรทุกคู่ (Correlation matrix) ในขั้นแรกนี้จะเป็นการสร้างเมทริกซ์สหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรทุกคู่ โดยจะมีการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทุกคู่โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ขั้นที่ 2 การสกัดปัจจัย (Factor extraction) คือ การค้นหาจำนวนปัจจัยที่มีความสามารถเพียงพอในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่สังเกตได้ วิธีการสกัดปัจจัยที่นิยมมากที่สุด คือ วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) มีวัตถุประสงค์ที่จะนำรายละเอียดจากตัวแปรที่มีจำนวนตัวแปรหลายตัว มาไว้ในปัจจัยที่มีเพียงไม่กี่ปัจจัย โดยจะพิจารณาจากรายละเอียดทั้งหมดจากแต่ละตัวแปร ทำให้ได้เมทริกซ์น้ำหนักปัจจัย (Factor loading matrix) ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าน้ำหนักปัจจัยเป็นค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ ใช้วัดความสัมพันธ์ของตัวแปร กฎที่ดีที่สุดสำหรับการกำหนดจำนวนปัจจัยคือ ค่าไอเกน (Eigenvalue) มากกว่า 1 โดยที่ค่าไอเกนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของปัจจัยที่จะอธิบายความแปรปรวนของกลุ่มตัวแปรได้มากน้อยเพียงใด โดยปกติถ้าปัจจัยนั้นอธิบายความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างได้น้อยกว่า 1 แล้วก็ไม่มีประโยชน์ที่จะนำปัจจัยนั้นมาใช้ ในขั้นที่ 2 นี้จะใช้ค่าน้ำหนักปัจจัยในการพิจารณาว่ามีตัวแปรใดบ้างที่ควรอยู่ในปัจจัยเดียวกัน ในแต่ละปัจจัยให้พิจารณาค่าน้ำหนักปัจจัยของแต่ละตัวแปร ถ้าค่าน้ำหนักปัจจัยของตัวแปรใดมีค่ามาก (เข้าสู่ +1 หรือ -1)

ขั้นที่ 3 การหมุนปัจจัย (Factor rotation) กรณีที่ค่าน้ำหนักปัจจัยมีค่ากลางๆ ทำให้ไม่สามารถจัดตัวแปรว่าควรอยู่ในปัจจัยใดได้นั้นจะต้องทำการหมุนแกน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการหมุนแกนปัจจัย คือ เพื่อให้ค่าน้ำหนักปัจจัยของตัวแปรมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนกระทั่งทำให้ทราบว่าตัวแปรนั้นควรอยู่ในปัจจัยใดหรือไม่ควรอยู่ในปัจจัยใด วิธีการหมุนแกนปัจจัยที่นิยมใช้มากที่สุด คือ Varimax เป็นเทคนิคที่ทำให้มีจำนวนตัวแปรที่น้อยที่สุด มีค่าน้ำหนักปัจจัยมากในแต่ละปัจจัย

ขั้นที่ 4 การคำนวณค่าคะแนนปัจจัย (Factor score) เมื่อสามารถจัดตัวแปรที่มีอยู่จำนวนมากเหลือเป็นกลุ่มตัวแปรไม่กี่กลุ่ม สามารถคำนวณหาค่าคะแนนปัจจัยของแต่ละกลุ่มได้ เช่น ถ้ามี 2 ปัจจัยก็สามารถคำนวณหาค่าคะแนนปัจจัยของทั้งสองปัจจัยได้ และถือว่า 2 ปัจจัยเป็นตัวแปรใหม่ที่น่าไปวิเคราะห์ต่อไปได้

3.2.12 การประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของทราย

การประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของทรายในงานวิจัย ได้กำหนดเกณฑ์การประเมินดังต่อไปนี้

3.2.12.1 การประเมินปริมาณซิลิกาในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้ว

ตามคำจำกัดความของทรายแก้ว (อัศวิน ไตรญาณ, 2543) ระบุไว้ว่า ทรายแก้วเป็นแร่ควอตซ์มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นสำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนและออกซิเจนจับตัวกันเป็นสารประกอบซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) หรือ ซิลิกา มีลักษณะเป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.0625 – 2 มิลลิเมตร ทรายมีความแข็ง 7 ตาม Mohr's scale ทำให้มีความคงทนต่อการผุกร่อนสูง มีความถ่วงจำเพาะ 2.6 ทรายแก้วเป็นทรายบริสุทธิ์ที่มีซิลิกามากกว่าร้อยละ 95 มีจุดหลอมเหลวที่ 1,710 องศาเซลเซียส สีใส ขาว สะอาด แต่อาจมีสีอื่นปน ไม่มีแนวแตกเรียบ มีรอยแตกแบบฝ่าหอยมดหินที่มักพบ ได้แก่ เหล็ก แร่ดินและสารอินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้แก้วไม่โปร่งใสและสูญเสียความแข็งแรง ส่วนมลทินต้องห้าม ได้แก่ Fe_2O_3 ควรมีน้อยกว่าร้อยละ 1 Cr_2O_3 ควรมีน้อยกว่าร้อยละ 0.00006 และ Al_2O_3 ควรมีน้อยกว่าร้อยละ 4

จากคำจำกัดความข้างต้น เราจะประเมินว่าจุดเก็บตัวอย่างที่มีปริมาณซิลิกาในทรายมากกว่าร้อยละ 95 เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้ว

3.2.12.2 การประเมินปริมาณซิลิกาในทรายเป็นสินค้าที่ต้องห้ามในการส่งออกป
นอกราชอาณาจักร

ตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ ว่าด้วยการส่งสินค้าออกไปนอกราชอาณาจักร (ฉบับที่ 69) พ.ศ. 2537 และ (ฉบับที่ 84) พ.ศ. 2541 กำหนดให้ทรายธรรมชาติทุกชนิดทั้งที่บดแล้ว และยังไม่ได้บด ที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เกินกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก เป็นสินค้าที่ต้องห้ามในการส่งออกปนอกราชอาณาจักร ทั้งนี้ ไม่รวมถึงทรายที่เป็นส่วนประกอบหรือผสมอยู่ในวัตถุสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป และกำหนดให้แร่ที่มีทรายเป็นส่วนประกอบเป็นสินค้าที่ต้องขออนุญาตในการส่งออกปนอกราชอาณาจักร

จากข้อความข้างต้น สรุปได้ว่า ทรายที่มีที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เกินกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ถือเป็นสินค้าที่ต้องห้ามในการส่งออกปนอกราชอาณาจักร

3.2.12.3 การประเมินมูลค่าทรายในการสกัดเออเร็นเชื่อเพลิงนิวเคลียร์

การประเมินมูลค่าทรายในการสกัดเออเร็นเชื่อเพลิงนิวเคลียร์ จะนำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ในหน่วย Bq/kg มาคำนวณเป็นความเข้มข้น eU และ eTh ในหน่วย ppm หรือ g/ton โดยคำนวณจากสมการ (3.3) และ (3.4)

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

การวิจัยเพื่อตรวจวัดปริมาณนอร์มในทรายเก็บคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ได้แบ่งวิธีการอภิปรายผลออกเป็นขั้นตอนดังนี้

- 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K
- 4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ
- 4.3 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี
- 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม
- 4.5 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและภายนอกร่างกาย
- 4.6 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา
- 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์
- 4.8 การวิเคราะห์ปัจจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างทรายเป็นโคลงตะกั่วป่าและโคลงสาขา

จากการเก็บตัวอย่างทรายเป็นจำนวน 28 จุด ครอบคลุมคลองตะกั่วป่าและโคลงสาขาในจังหวัดพังงา ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา ชนิดหัววัด HPGe ได้แสดงการสรุปผลไว้ในตารางที่ 4.1

ผลการหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างทรายเป็นโคลง พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายเป็นโคลงขนาดอนุภาค > 0.3 mm อยู่ในช่วง 65 – 208 (ค่าเฉลี่ย 91 ± 10), 63 – 583 (ค่าเฉลี่ย 145 ± 14) และ 199 – 1407 (ค่าเฉลี่ย 545 ± 41) Bq/kg ตามลำดับ รายละเอียดดังภาพประกอบ 4.1 (ก) สำหรับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายเป็นโคลงขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm อยู่ในช่วง 71 – 1318 (ค่าเฉลี่ย 169 ± 14), 82 – 1079 (ค่าเฉลี่ย 242 ± 19) และ 118 – 1290 (ค่าเฉลี่ย 827 ± 58) Bq/kg ตามลำดับ รายละเอียดดังภาพประกอบ 4.1 (ข) และค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K

ในตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค < 0.106 mm อยู่ในช่วง 70 – 3901 (ค่าเฉลี่ย 322 ± 17), 96 – 2615 (ค่าเฉลี่ย 428 ± 24) และ 205 – 1300 (ค่าเฉลี่ย 749 ± 57) Bq/kg ดังภาพประกอบ 4.1 (ค)

ตารางที่ 4.1 สรุปผลค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ตัวอย่างทรายคลองแยกตามขนาด

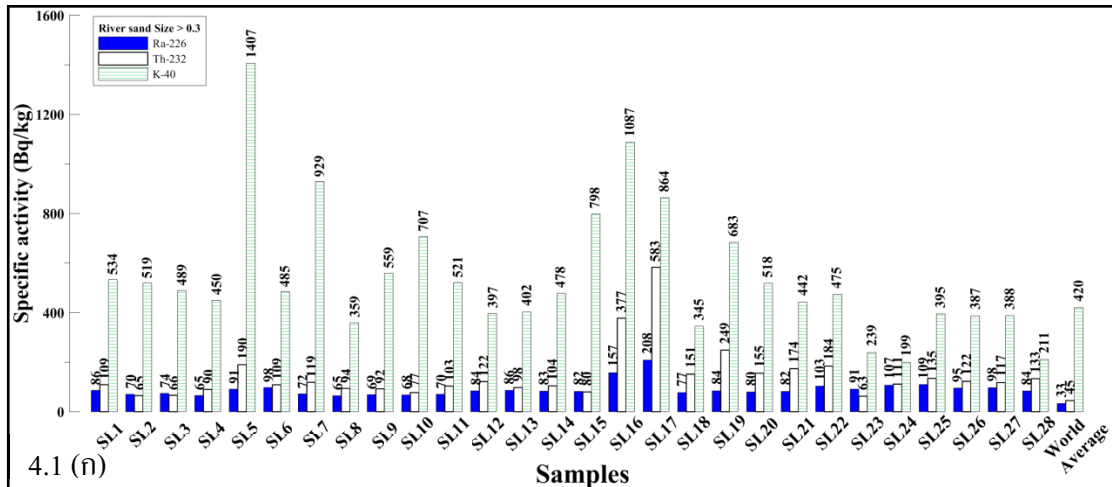
ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg)								
	^{226}Ra			^{232}Th			^{40}K		
	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย
SL (28)	65-208	84	91 ± 10	63-583	114	145 ± 14	199-1407	482	545 ± 41
SM (28)	71-1318	120	169 ± 14	82-1079	198	242 ± 19	118-1290	775	827 ± 58
SS (28)	70-3901	175	322 ± 17	96-2615	298	428 ± 24	205-1300	758	749 ± 57
คิดตามสัดส่วนจริง	68-663	94	123	75-545	140	178	202-1065	559	600
ค่าเฉลี่ยจาก			33			33			420
UNSCEAR 2000									

SL คือ ตัวอย่างทรายคลองที่มีขนาดอนุภาค > 0.3 mm

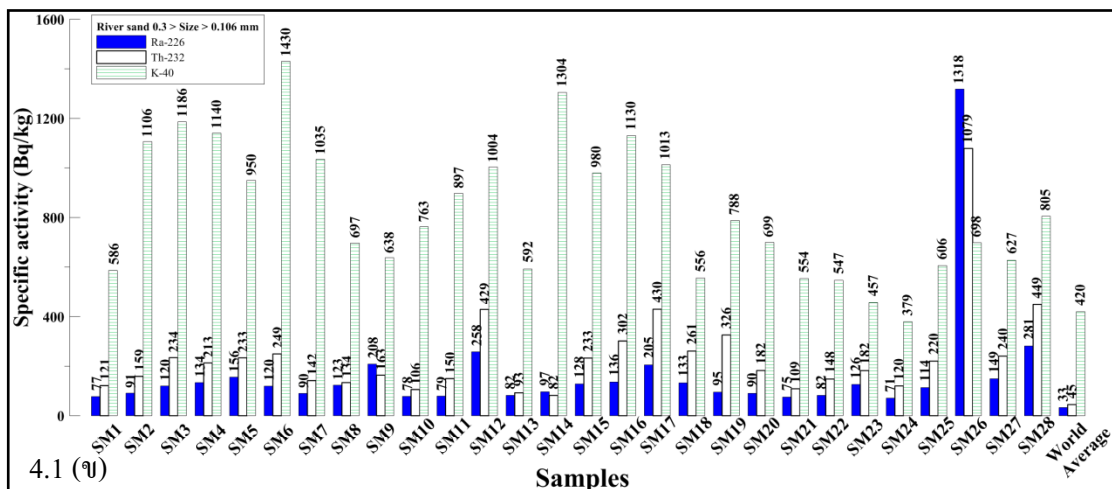
SM คือ ตัวอย่างทรายคลองที่มีขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

SS คือ ตัวอย่างทรายคลองที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm.

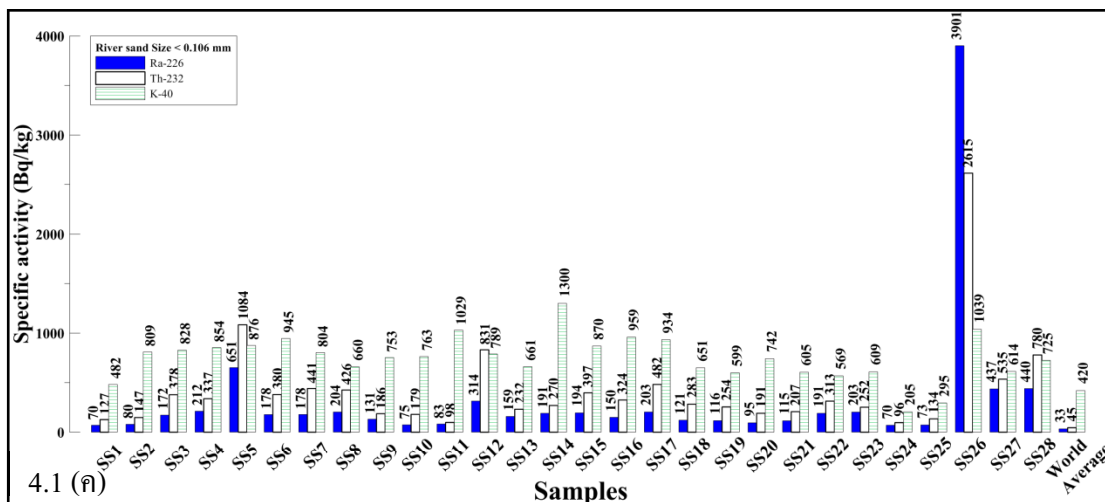
เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 68 – 663 (ค่าเฉลี่ย 123), 75 – 545 (ค่าเฉลี่ย 178) และ 202 – 1065 (ค่าเฉลี่ย 600) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K เฉลี่ยจากทั่วโลก (UNSCEAR, 2000) ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเท่ากับ 33, 45 และ 420 Bq/kg ตามลำดับ พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก



ภาพประกอบ 4.1 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm



ภาพประกอบ 4.1 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง (ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.1 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในตัวอย่างทรายคลอง (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างทรายชายหาดอำเภอตะกั่วป่า อำเภอกระบุรี จังหวัดพังงา และอำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

จากการเก็บตัวอย่างทรายชายหาด จำนวน 10 จุด แบ่งเป็นตัวอย่างทรายชายหาดจากอำเภอตะกั่วป่า 8 จุด อำเภอกระบุรี 1 จุด และอำเภอสุขสำราญ 1 จุด ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมาชนิดหัววัด HPGe ได้แสดงการสรุปผลไว้ในตารางที่ 4.2

ผลการหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm อยู่ในช่วง 9 – 78 (ค่าเฉลี่ย 25 ± 4), 12 – 121 (ค่าเฉลี่ย 36 ± 6) และ 47 – 436 (ค่าเฉลี่ย 132 ± 20) Bq/kg ตามลำดับ รายละเอียดดังภาพประกอบ 4.2 (ก) สำหรับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm อยู่ในช่วง 9 – 79 (ค่าเฉลี่ย 25 ± 4), 9 – 124 (ค่าเฉลี่ย 36 ± 7) และ 44 – 502 (ค่าเฉลี่ย 138 ± 21) Bq/kg ตามลำดับ รายละเอียดดังภาพประกอบ 4.2 (ข) และค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra, ²³²Th และ ⁴⁰K ในตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค < 0.106 mm อยู่ในช่วง 49 – 91 (ค่าเฉลี่ย 70 ± 9), 93 – 137 (ค่าเฉลี่ย 115 ± 14) และ 190 – 724 (ค่าเฉลี่ย 457 ± 41) Bq/kg รายละเอียดดังภาพประกอบ 4.2 (ค)

ตารางที่ 4.2 สรุปผลค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด

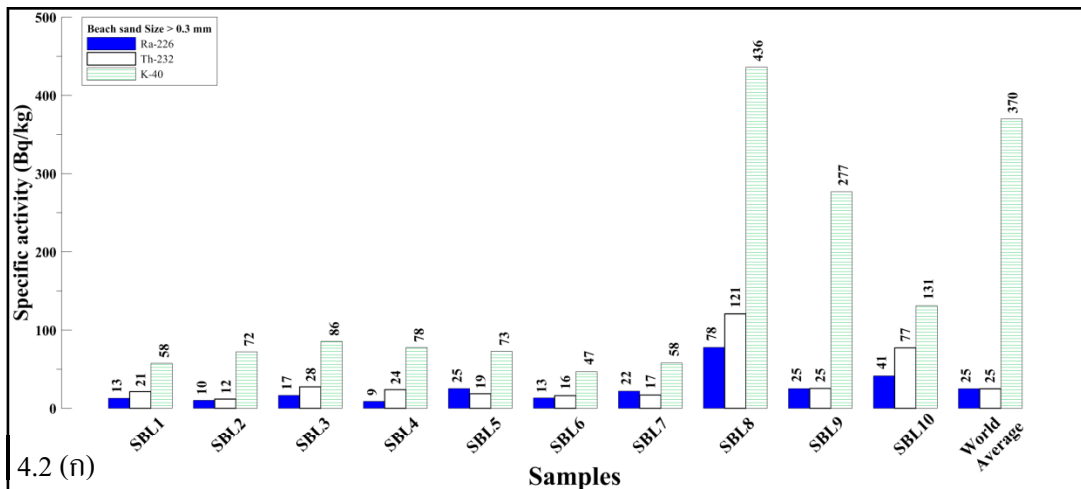
ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg)								
	^{226}Ra			^{232}Th			^{40}K		
	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย
SBL (10)	9-78	19	25±4	12-121	23	36±6	47-436	75	132±20
SBM (10)	9-79	15	25±4	9-124	19	36±7	44-502	83	138±21
SBS (2)	49-91	70	70±9	93-137	115	115±14	190-724	457	457±41
คิดตามสัดส่วนจริง	10-84	16	25	13-130	23	36	51-594	23	146
ค่าเฉลี่ยจาก UNSCEAR 1988			25			25			370

SBL คือ ตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค > 0.3 mm

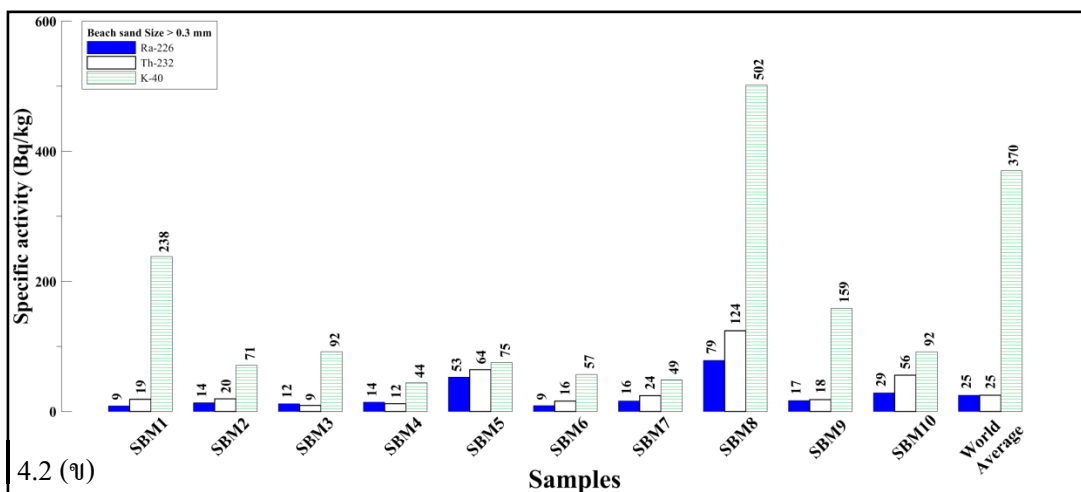
SBM คือ ตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

SBS คือ ตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm

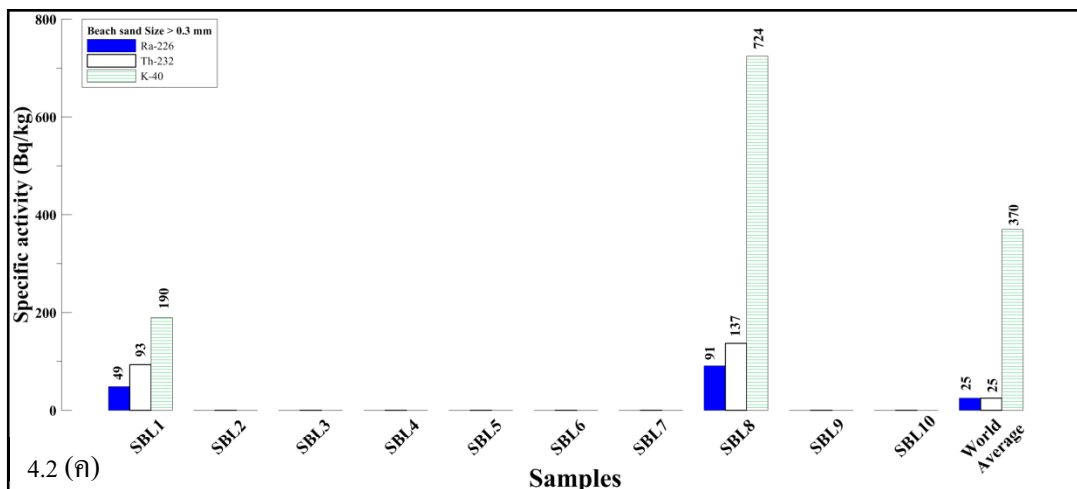
เมื่อกำหนดตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 10 – 84 (ค่าเฉลี่ย 25), 13 – 130 (ค่าเฉลี่ย 36) และ 51 – 594 (ค่าเฉลี่ย 146) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K เฉลี่ยจากทั่วโลก (UNSCEAR, 1988) ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเท่ากับ 25, 25 และ 370 Bq/kg ตามลำดับ พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra ที่มีขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก ขณะที่ตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก ส่วนค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริง มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาดที่ขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก ขณะที่ตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค 0.106 mm มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก



ภาพประกอบ 4.2 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด (ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm



ภาพประกอบ 4.2 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด (ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm



ภาพประกอบ 4.2 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด (ค) ขนาดอนุภาค $< 0.106\text{ mm}$

4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราปริมาณรังสีดูดกลืน

4.2.1 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลอง

จากผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืน (D) จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค $> 0.3\text{ mm}$, $0.3 - 0.106\text{ mm}$ และ $< 0.106\text{ mm}$ อยู่ในช่วง $90 - 484$ (ค่าเฉลี่ย 153 ± 15), $118 - 1290$ (ค่าเฉลี่ย 259 ± 20) และ $99 - 3425$ (ค่าเฉลี่ย 436 ± 25) nGy/h ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.3 และภาพประกอบ 4.3 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง $102 - 657$ (ค่าเฉลี่ย 189) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

4.2.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาด

จากผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืน (D) จากตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค $> 0.3\text{ mm}$, $0.3 - 0.106\text{ mm}$ และ $< 0.106\text{ mm}$ อยู่ในช่วง $15 - 127$ (ค่าเฉลี่ย 39 ± 7), $15 - 132$ (ค่าเฉลี่ย 39 ± 7) และ $87 - 155$

(ค่าเฉลี่ย 121 ± 15) nGy/h ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.4 และภาพประกอบ 4.4 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

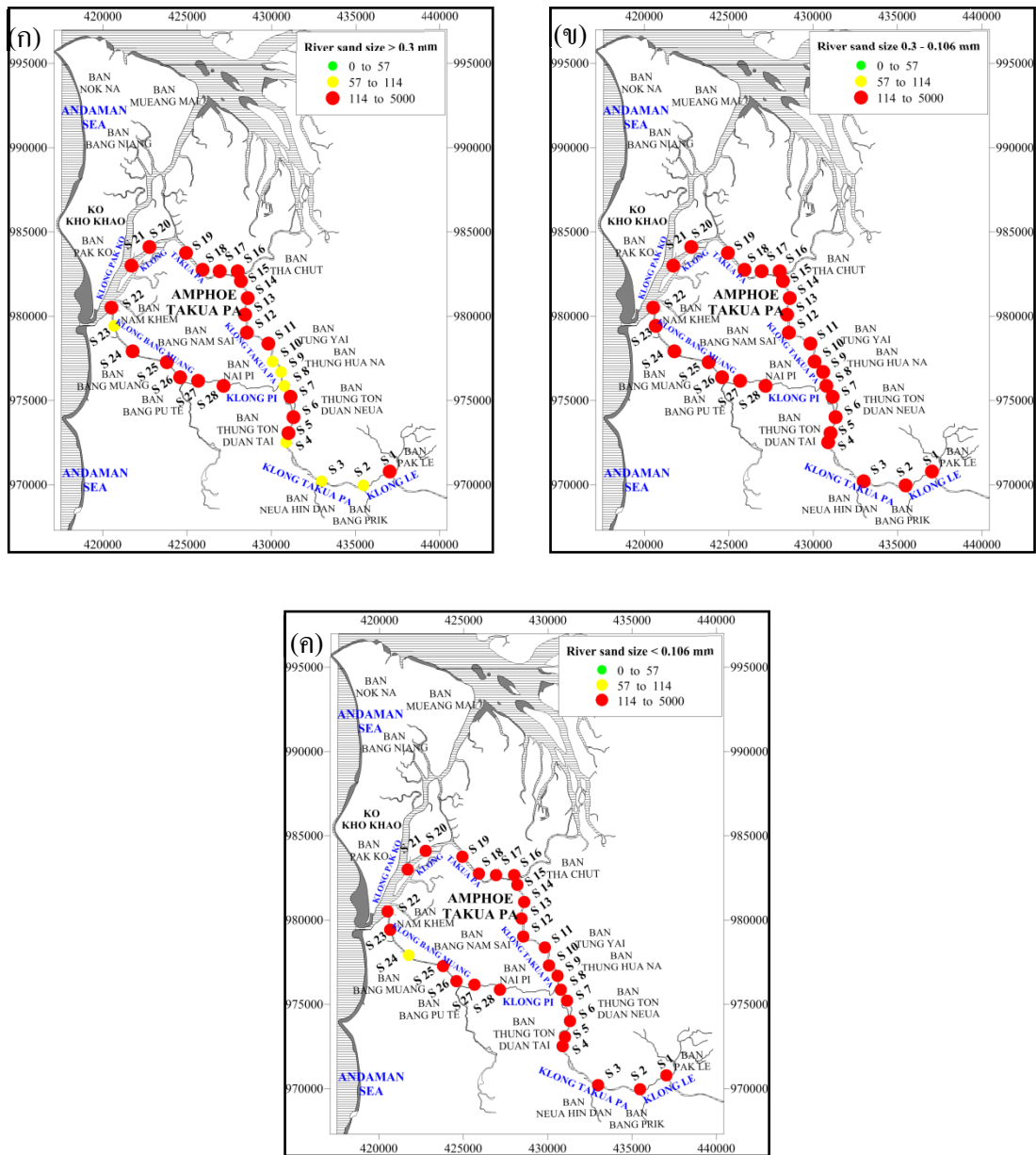
เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 16 – 142 (ค่าเฉลี่ย 39) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค < 0.106 mm สูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

ตาราง 4.3 สรุปผลปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายคลอง แยกตามขนาด

ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	D (nGy/h)		AEDE _{in} (μSv)		AEDE _{out} (μSv)		Ra _{eq} (Bq/kg)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
SL (28)	90-484	153±15	441-2376	748 ± 73	110-594	187±18	199-1108	341±34
SM (28)	118-1290	259± 20	581-6326	1270±98	145-1582	317±45	260-2914	579±45
SS (28)	99-3425	436±25	486-16803	2150±123	122-4201	537±31	224-7721	991±56
ตามสัดส่วนจริง	102-657	189	502-3221	927	125-805	232	223-1480	422
ระดับเกณฑ์ ที่แนะนำ		57		450		70		370

ตาราง 4.4 สรุปผลปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด

ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	D (nGy/h)		AEDE _{out} (μSv)		Ra _{eq} (Bq/kg)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
SBL (10)	15 – 127	39 ± 7	18 – 156	48 ± 8	33 – 284	87 ± 15
SBM (10)	15 – 132	39 ± 7	18-162	48 ± 9	32 - 295	88 ± 16
SBS (2)	87 – 155	121 ± 15	106 – 190	148 ± 18	197 - 343	270 ± 33
ตามสัดส่วนจริง	16 – 142	39	19 – 174	48	35 315	87
ระดับเกณฑ์ที่แนะนำ		57		70		370

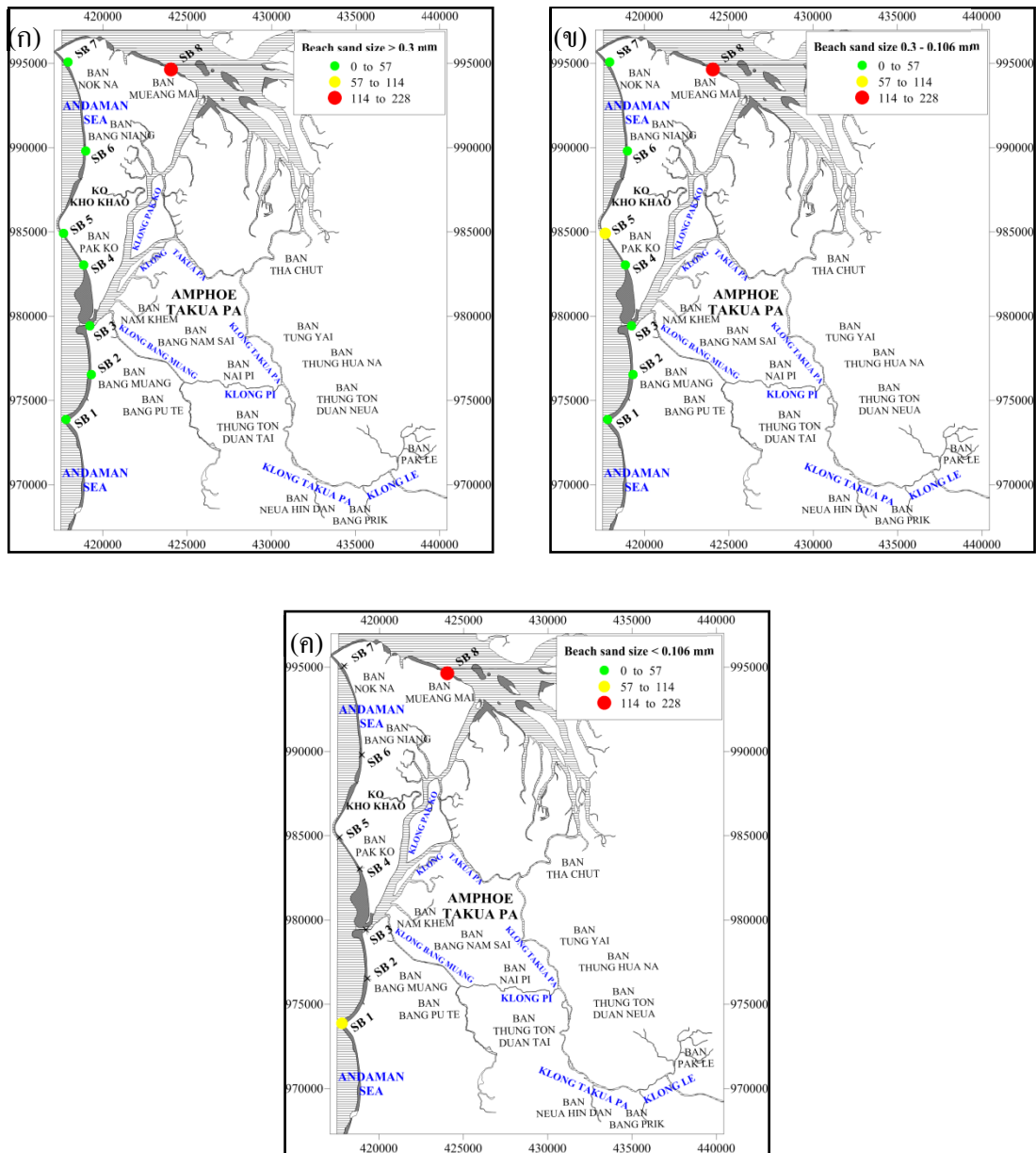


ภาพประกอบ 4.3 แผนที่ปริมาณรังสีดูดกลืนจากตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.4 แผนที่ปริมาณรังสีดูดกดินจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(จ) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

4.3 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี

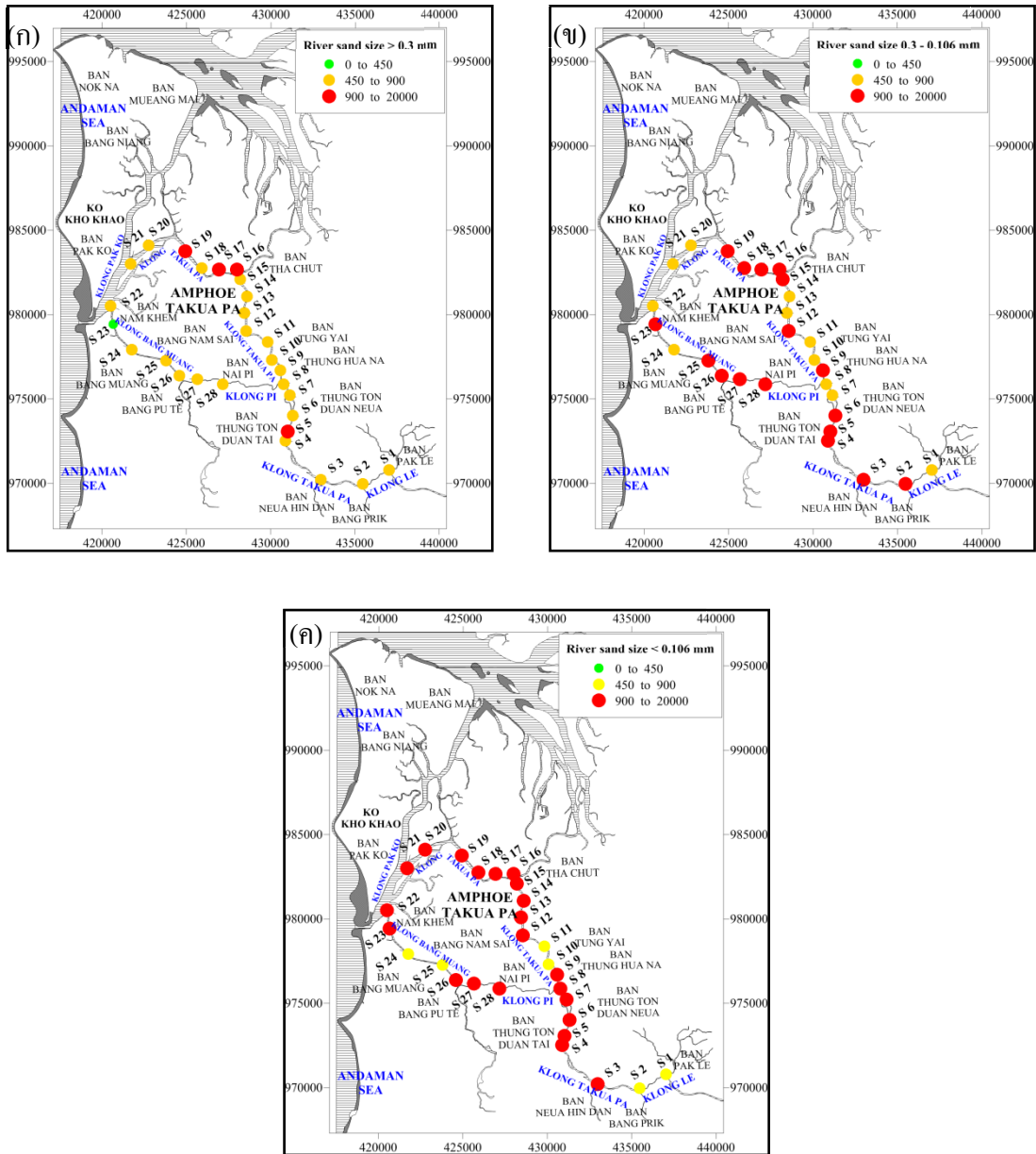
4.3.1 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในและนอกรอบอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง

จากการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปีที่ได้รับจากการนำตัวอย่างทรายมาใช้ก่อสร้างเป็นอาคารบ้านเรือน (AEDE_{in}) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 441-2376 (ค่าเฉลี่ย 748 ± 73), 581 - 6326 (ค่าเฉลี่ย 1270 ± 98) และ 486 - 16803 (ค่าเฉลี่ย 2150 ± 123) μSv ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 3 และภาพประกอบ 4.5 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

เมื่อกำหนดตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 502 – 3221 (ค่าเฉลี่ย 927) μSv เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 450 μSv (Orgun et al., 2007) พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

จากการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน (AEDE_{out}) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 110 - 594 (ค่าเฉลี่ย 187 ± 18), 145 - 1582 (ค่าเฉลี่ย 317 ± 45) และ 122 - 4201 (ค่าเฉลี่ย 537 ± 31) μSv ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.3 และภาพประกอบ 4.6 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

เมื่อกำหนดตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 125 – 805 (ค่าเฉลี่ย 232) μSv เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 70 μSv (Orgun et al., 2007) พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

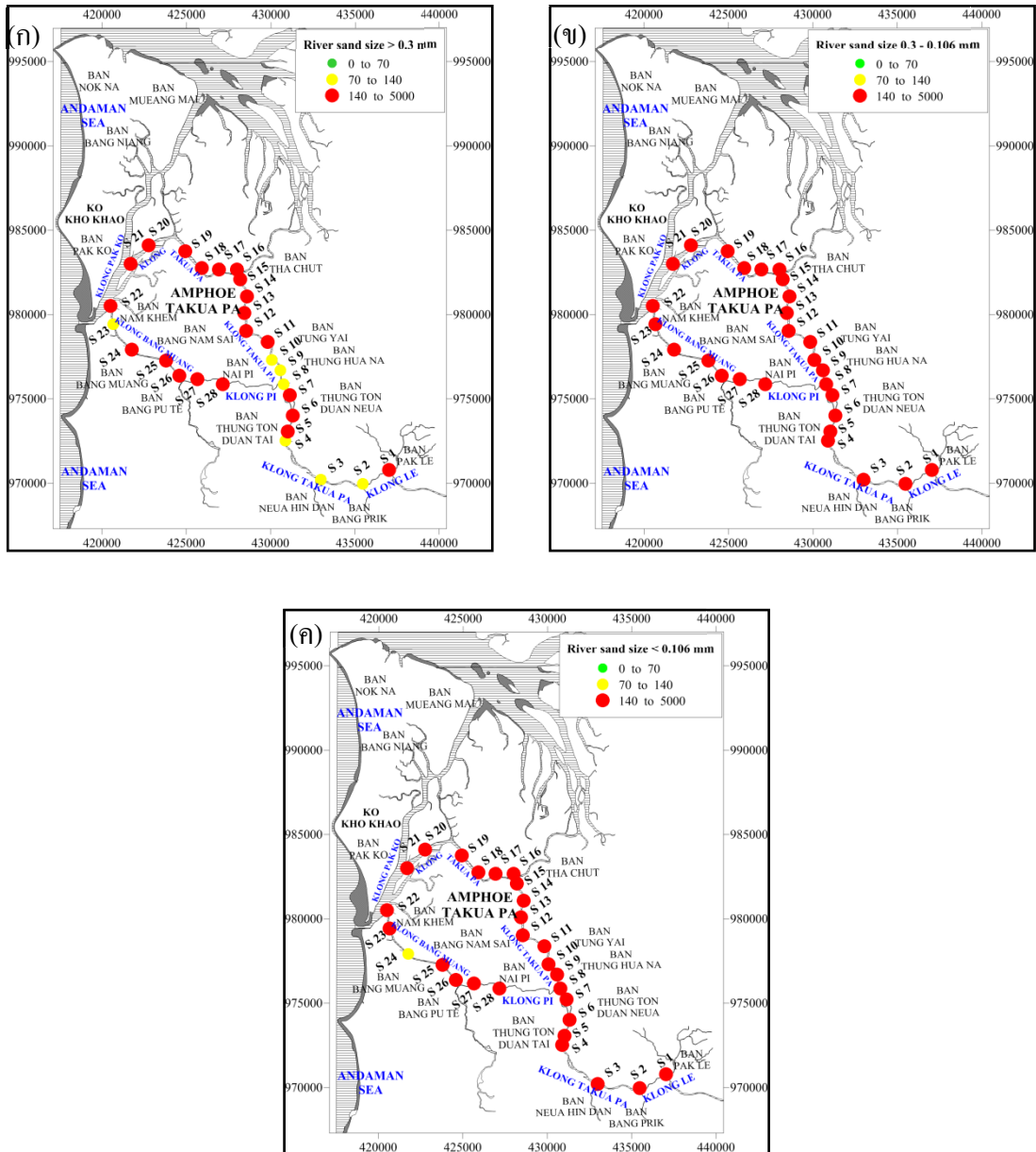


ภาพประกอบ 4.5 แผนที่ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.6 แผนที่ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคาร
บ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

4.3.2 ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายชายหาด

จากการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน (AEDE_{out}) จากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 18 - 156 (ค่าเฉลี่ย 48 ± 8), 18-162 (ค่าเฉลี่ย 48 ± 9) และ 106 - 190 (ค่าเฉลี่ย 148 ± 18) μSv ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.4 และภาพประกอบ 4.7 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทรายคลองชายหาดทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

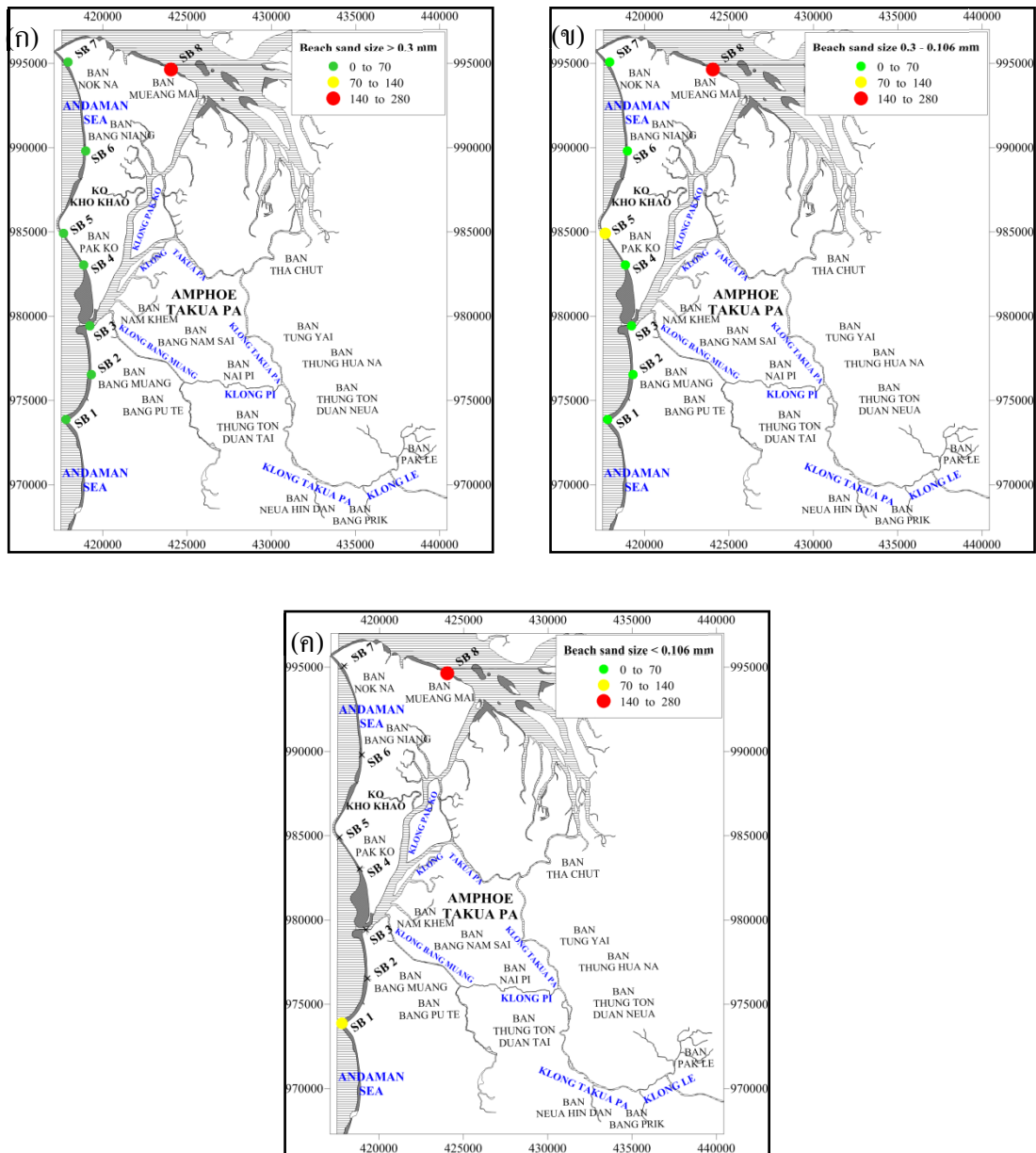
เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 19 - 174 (ค่าเฉลี่ย 48) μSv เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 70 μSv (Orgun et al., 2007) พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค < 0.106 mm สูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

4.4 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลอง

ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (R_{eq}) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 199 - 1,108 (ค่าเฉลี่ย 341 ± 33), 260 - 2,914 (ค่าเฉลี่ย 579 ± 45) และ 224 - 7,721 (991 ± 56) Bq/kg ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.3 และภาพประกอบ 4.8 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 223 - 1480 (ค่าเฉลี่ย 422) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงต่ำกว่า 370 Bq/kg ส่วนค่าเฉลี่ยค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm สูงกว่า 370 Bq/kg

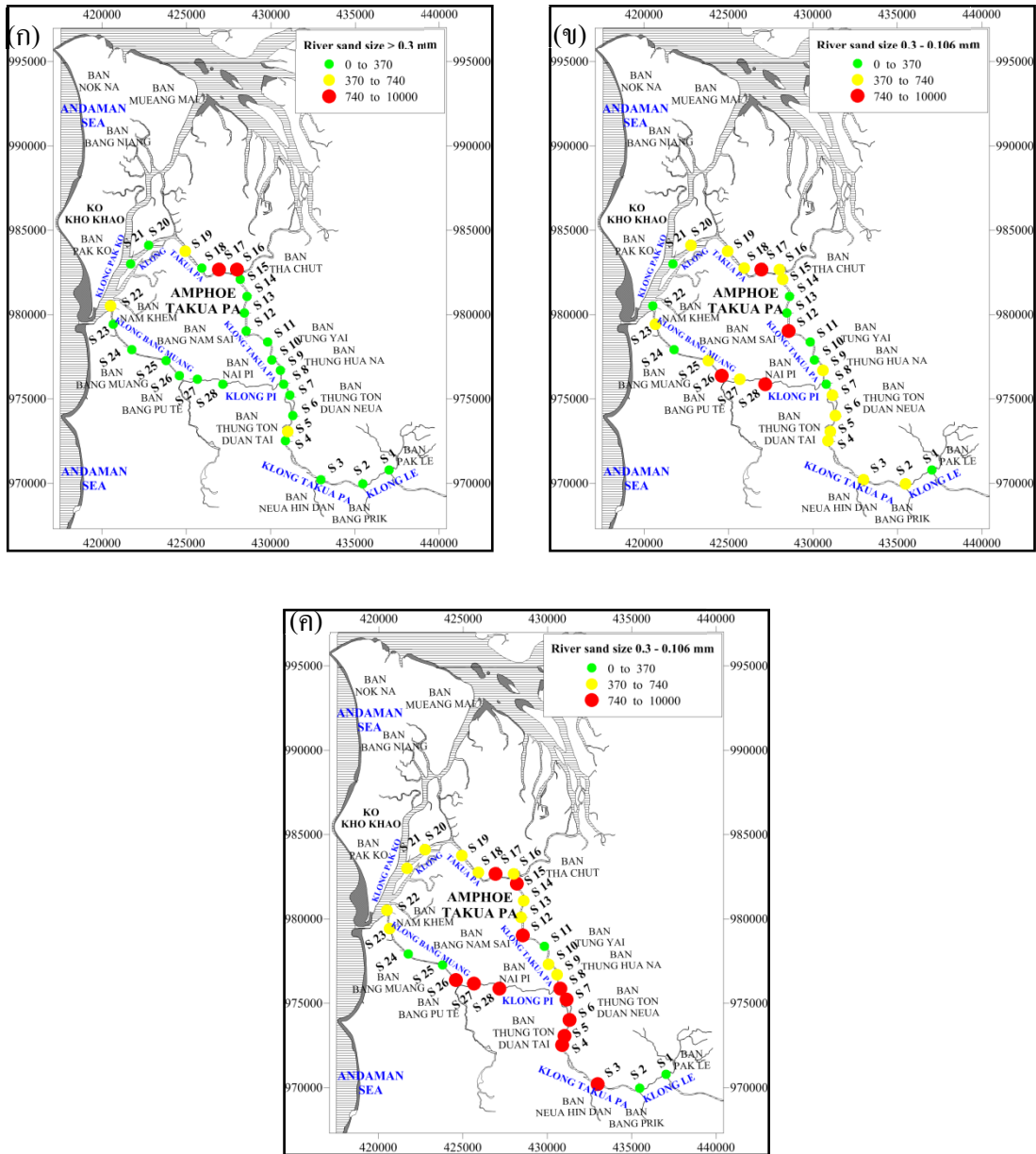


ภาพประกอบ 4.7 แผนที่ปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่าง
 ทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.8 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

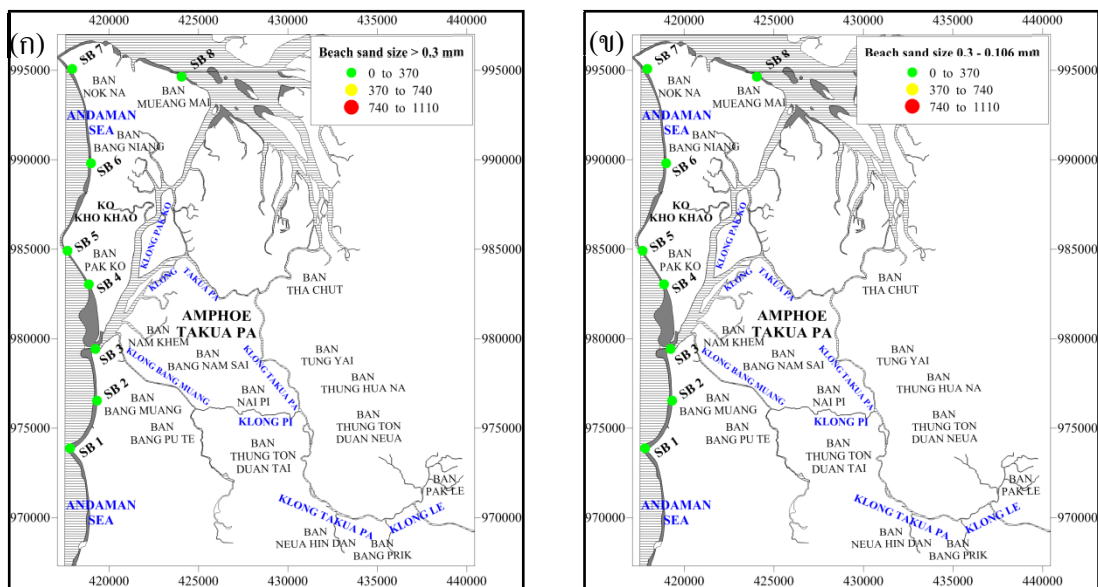
(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm

(ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาด

ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (R_{eq}) จากตัวอย่างทรายชายหาด อนุภาค > 0.3 mm, $0.3 - 0.106$ mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง $33 - 284$ (ค่าเฉลี่ย 87 ± 15), $32 - 295$ (ค่าเฉลี่ย 88 ± 16) และ $197 - 343$ (270 ± 33) Bq/kg ตามลำดับ ดังที่แสดงในตาราง 4.4 และภาพประกอบ 4.9 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

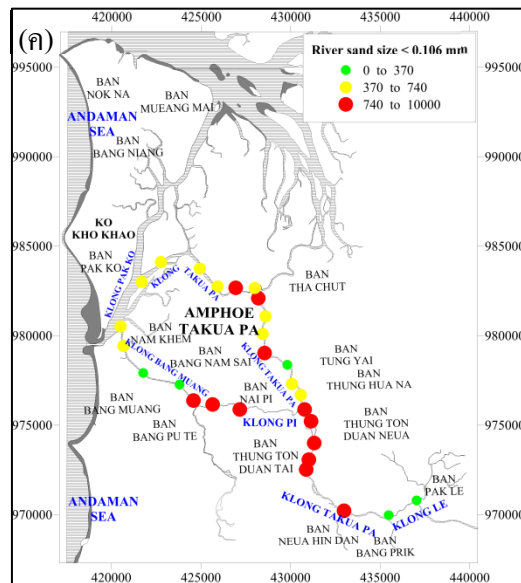
เมื่อกำหนดตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง $35 - 315$ (ค่าเฉลี่ย 87) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้งหมดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงต่ำกว่า 370 Bq/kg



ภาพประกอบ 4.9 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm



ภาพประกอบ 4.9 แผนที่ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

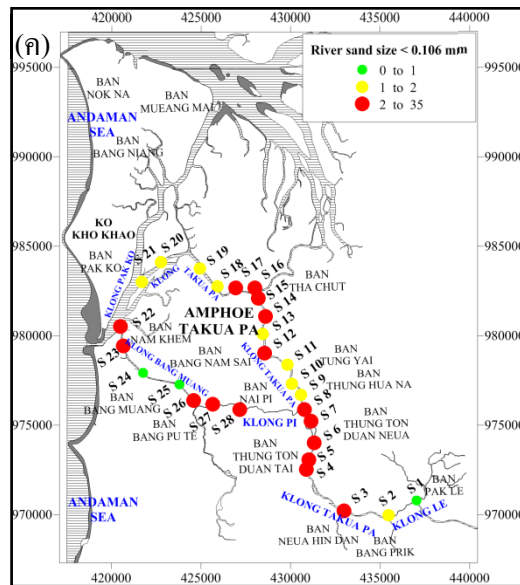
4.5 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกาย

4.5.1 ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง

ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกาย (H_{in}) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 0.74 - 3.56 (ค่าเฉลี่ย 1.17 ± 0.12), 0.92 - 11.43 (ค่าเฉลี่ย 2.02 ± 0.16) และ 0.79 - 31.40 (ค่าเฉลี่ย 3.55 ± 0.20) ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 และภาพประกอบ 4.10 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

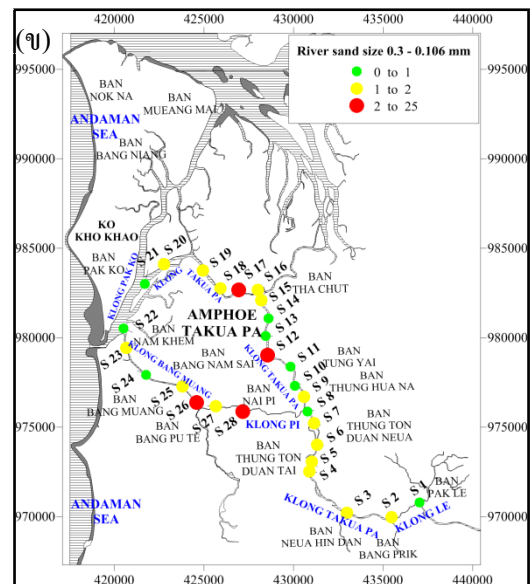
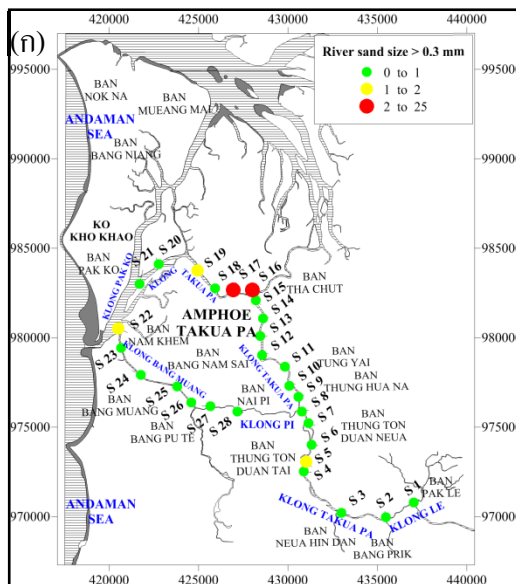
เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.80 - 5.79 (ค่าเฉลี่ย 1.47) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $H_{in} < 1$ (EC, 1999) พบว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $H_{in} > 1$

ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอก (H_{ex}) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 0.54 - 2.99



ภาพประกอบ 4.10 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง

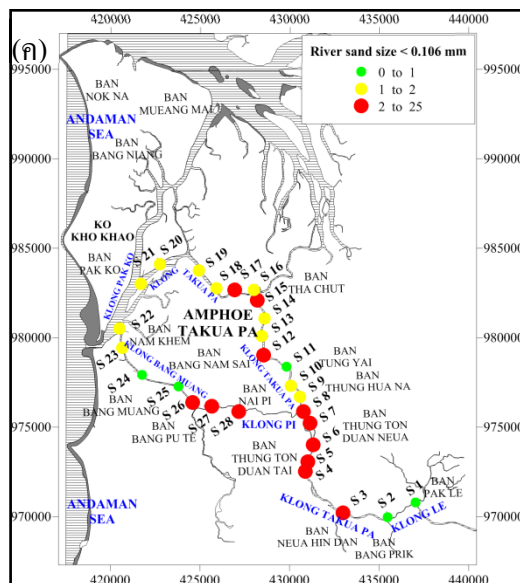
(ก) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.11 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกในร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.11 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายคลอง
(ก) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm

4.5.2 ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในและนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด

ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกาย (H_{in}) จากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 0.12 - 0.98 (ค่าเฉลี่ย 0.30 ± 0.05), 0.12 - 1.01 (ค่าเฉลี่ย 0.30 ± 0.05) และ 0.66 - 1.17 (ค่าเฉลี่ย 0.92 ± 0.11) ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 และภาพประกอบ 4.12 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 0.12 - 1.08 (ค่าเฉลี่ย 0.30) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $H_{in} < 1$ (EC, 1999) พบว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $H_{in} < 1$

ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) จากตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค > 0.3 mm, 0.3 - 0.106 mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 0.09 - 0.77 (ค่าเฉลี่ย 0.23 ± 0.04), 0.09 - 0.80 (ค่าเฉลี่ย 0.24 ± 0.04) และ 0.53 - 0.93 (ค่าเฉลี่ย $0.73 \pm$

0.09) ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 และภาพประกอบ 4.13 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 0.09 – 0.85 (ค่าเฉลี่ย 0.24) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $H_{ex} < 1$ (EC, 1999) พบว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $H_{ex} < 1$

ตาราง 4.5 สรุปผลดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา ($I_{\gamma r}$) จากตัวอย่างทรายคลอง แยกตามขนาด

ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	H_{in}		H_{ex}		$I_{\gamma r}$	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
SL (28)	0.70-3.56	1.17±0.12	0.54-2.99	0.92±0.09	0.70-3.90	1.2 ±0.12
SM (28)	0.92-11.43	2.02±0.16	0.70-7.87	1.56±0.12	0.93-10.02	2.05±0.16
SS (28)	0.79-31.40	3.55±0.20	0.60-20.86	2.68±0.15	0.78-26.43	3.46±0.20
คิดตามสัดส่วนจริง	0.80-5.79	1.47	0.60-4.00	1.14	1.31-6.36	3.58
ระดับเกณฑ์ที่ปลอดภัย		1		1		1

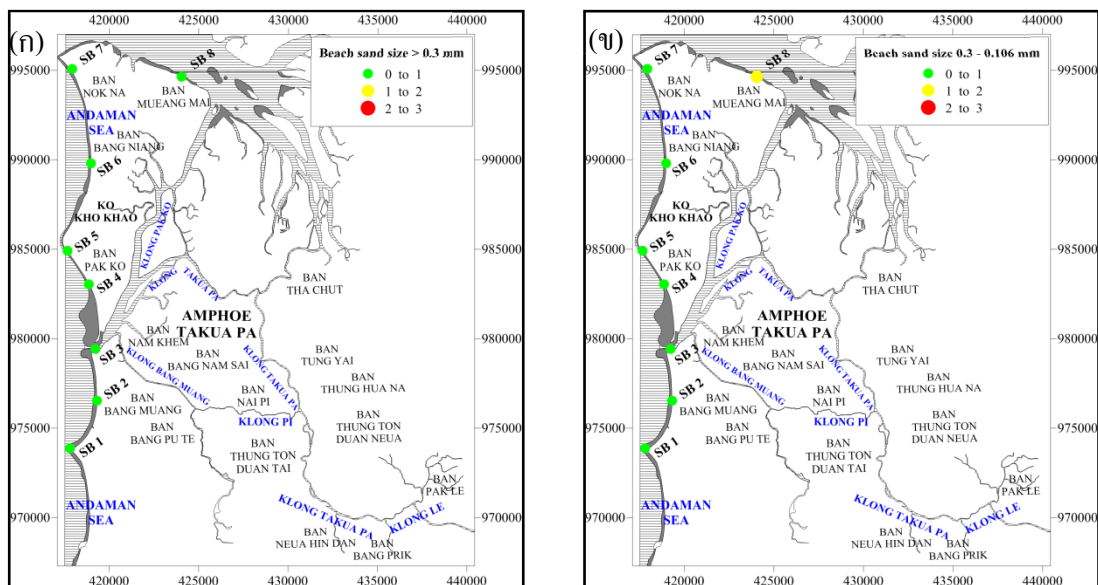
ตาราง 4.6 สรุปผลดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{out}) จากตัวอย่างทรายชายหาด แยกตามขนาด

ตัวอย่าง (จำนวนตัวอย่าง)	H_{in}		H_{ex}	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
SBL (10)	0.12 – 0.98	0.30 ± 0.05	0.09 – 0.77	0.23 ± 0.04
SBM (10)	0.12 – 1.01	0.30 ± 0.05	0.09 – 0.80	0.24 ± 0.04
SBS (2)	0.66 – 1.17	0.92 ± 0.11	0.53 – 0.93	0.73 ± 0.09
คิดตามสัดส่วนจริง	0.12 – 1.08	0.30	0.09 – 0.85	0.24
ระดับเกณฑ์ที่ปลอดภัย		1		1

4.6 ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา

ผลการคำนวณดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา ($I_{\gamma r}$) จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค > 0.3 mm, $0.3 - 0.106$ mm และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง $0.70 - 3.90$ (ค่าเฉลี่ย 1.21 ± 0.12), $0.93 - 10.02$ (ค่าเฉลี่ย 2.05 ± 0.16) และ $0.78 - 26.43$ (ค่าเฉลี่ย 3.46 ± 0.20) ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 และภาพประกอบ 4.14 (ก)-(ค) รายละเอียดของข้อมูลค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

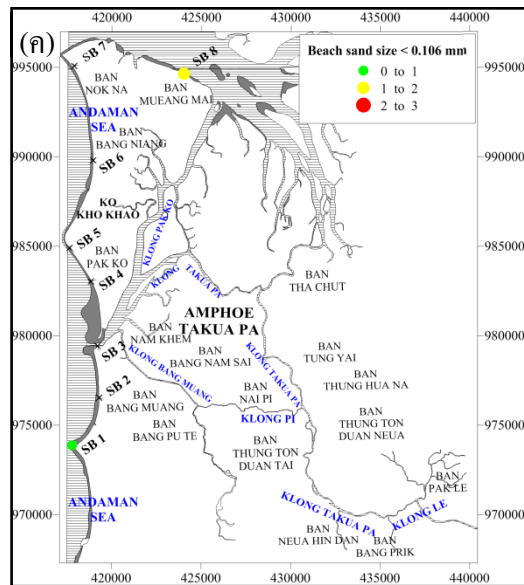
เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง $1.31 - 6.36$ (ค่าเฉลี่ย 3.58) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $I_{\gamma r} < 1$ (EC, 1999) พบว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $I_{\gamma r} > 1$



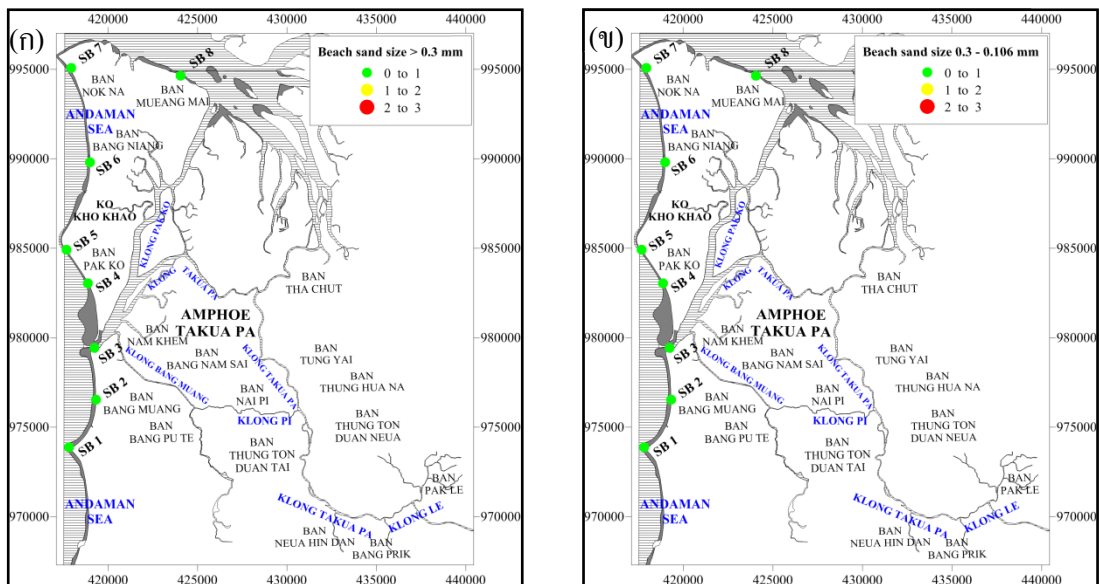
ภาพประกอบ 4.12 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด แสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ mm



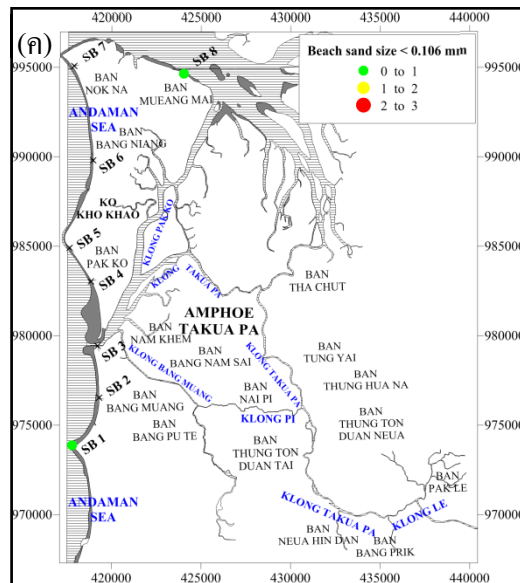
ภาพประกอบ 4.12 แผนที่ดัชนีความเสถียรจากรังสีภายในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาด แสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ก) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



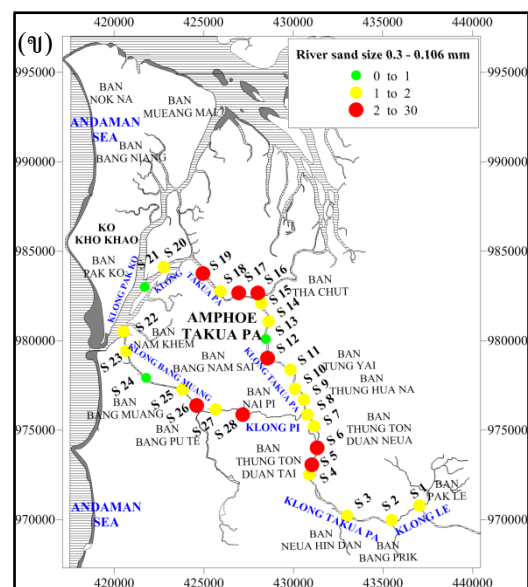
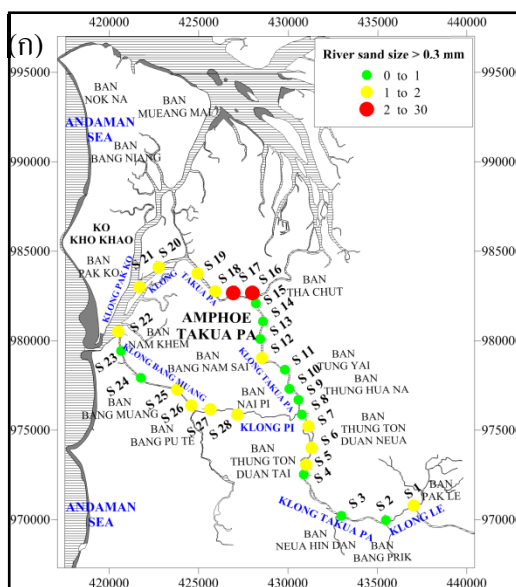
ภาพประกอบ 4.13 แผนที่ดัชนีความเสถียรจากรังสีภายนอกในร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm



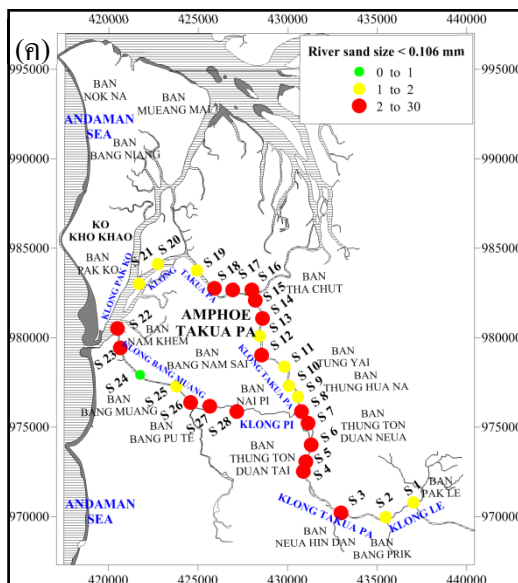
ภาพประกอบ 4.13 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกายจากตัวอย่างทรายชายหาดแสดงค่าเฉพาะจุดเก็บตัวอย่าง SB1-SB8 (ค) ขนาดอนุภาค < 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.14 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีเกมมาจากตัวอย่างทรายคลอง

(ก) ขนาดอนุภาค > 0.3 mm

(ข) ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm



ภาพประกอบ 4.14 แผนที่ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมาจากตัวอย่างทรายคลองขนาด

(ก) อนุภาค $< 0.106 \text{ mm}$

4.7. ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์

4.7.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทรายคลองแบบจุดเว้นจุดจำนวน 14 จุดเก็บตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างขนาด $< 0.106 \text{ mm}$ ในการนำไปวิเคราะห์หาธาตุประกอบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.9 และตาราง 4.10 ซึ่งธาตุที่พบได้แก่ ธาตุ Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Cu, Zn, As, Ba, Cl และ Br ธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์จะนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ร่วมกับธาตุทางรังสีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมาต่อไป ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณ Silica (SiO_2) ดังตาราง 4.7

จากตาราง 4.9 พบว่า จุดเก็บตัวอย่างที่ 9 มีปริมาณ Silica เทียบเท่ากับร้อยละ 78.121 ซึ่งตามประกาศของกระทรวงพาณิชย์หากทรายที่มีปริมาณ Silica เกินร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถส่งออกนอกราชอาณาจักรได้

นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณ silica ในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วสำหรับป้อนอุตสาหกรรม ควรมีปริมาณ silica สูงเกินกว่า 95 % ดังนั้นทรายคลองในพื้นที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายป้อนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ตาราง 4.7 ปริมาณ Silica (SiO₂) ในตัวอย่างทรายคลอง

จุดเก็บตัวอย่าง	Silica (%)	จุดเก็บตัวอย่าง	Silica (%)
1	68.466	15	55.610
3	59.139	17	53.002
5	68.784	19	40.516
7	66.245	21	33.096
9	78.121	23	67.705
11	60.916	25	63.424
13	73.954	27	56.470

4.7.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายอำเภอตะกั่วป่า อำเภอกระบุรี จังหวัดพังงา และอำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทรายชายหาดจำนวน 10 จุดเก็บตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างขนาด < 0.106 mm ในการนำไปวิเคราะห์หาธาตุประกอบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.11 ซึ่งธาตุที่พบได้แก่ ธาตุ H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Br, Rb, Sr, Y, Zr และ Nb ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณ Silica (SiO₂) ดังตาราง 4.8

ตาราง 4.8 ปริมาณ Silica (SiO₂) ในตัวอย่างทรายชายหาด

จุดเก็บตัวอย่าง	Silica (%)	จุดเก็บตัวอย่าง	Silica (%)
1	17.459	6	83.687
2	35.818	7	87.936
3	45.913	8	43.410
4	72.937	9	84.494
5	30.188	10	87.467

จากตาราง 4.11 พบว่า ปริมาณ Silica จุดเก็บตัวอย่างที่ 6, 7, 9, 10 มีปริมาณ Silica เทียบเท่าร้อยละ 83.687, 87.936, 84.494 และ 87.467 ตามลำดับ ซึ่งตามประกาศของกระทรวง

พาณิชย์หากทรายที่มีปริมาณ Silica เกินร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถส่งออกนอกราชอาณาจักรได้

นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณ silica ในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วสำหรับป้อนอุตสาหกรรม ควรมีปริมาณ silica สูงเกินกว่า 95 % ดังนั้นทรายชายหาดในพื้นที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายป้อนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ตาราง 4.9 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลองจุกเก็บตัวอย่างที่ 1-13

Site	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cu	Zn	As	Ba	Cl	Br
1	0.126	0.232	6.764	32.003	0.092	0.179	2.986	0.209	0.361	0.041	0.126	3.931	0.147	0.013	0.012	0.205	0.030	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.105	0.352	8.816	27.644	0.086	0.076	2.954	0.105	0.544	0.030	0.131	6.463	0.156	0.011	0.039	0.411	0.029	0.046	0.013	0.043	0.011	0.000	0.000	0.000
5	0.182	0.228	6.495	31.152	0.048	0.038	3.608	0.124	0.859	0.047	0.139	3.519	0.207	0.018	0.105	2.395	0.110	0.421	0.000	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000
7	0.187	0.282	8.292	30.965	0.068	0.062	3.441	0.114	0.525	0.032	0.184	4.288	0.222	0.018	0.052	0.580	0.037	0.075	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.235	0.090	5.121	36.516	0.000	0.000	4.418	0.08	0.284	0.066	0.139	2.236	0.264	0.000	0.211	0.105	0.013	0.053	0.000	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.216	0.099	5.684	28.474	0.028	0.000	4.147	0.061	0.244	0.061	0.113	2.258	0.279	0.000	0.000	0.033	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.453	0.175	5.903	34.569	0.053	0.039	3.077	0.588	0.240	0.041	0.151	3.394	0.213	0.017	0.026	0.142	0.023	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตาราง 4.10 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายคลองจุดเก็บตัวอย่างที่ 15-27

Site	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cu	Zn	As	Ba	Cl	Br
15	0.135	0.361	9.554	25.994	0.090	0.099	3.745	0.127	0.663	0.031	0.152	7.425	0.258	0.020	0.057	0.610	0.041	0.061	0.000	0.000	0.037	0.000	0.000	0.000
17	0.207	0.298	13.99	24.775	0.066	0.144	0.735	0.091	0.575	0.028	0.077	5.626	0.403	0.020	0.061	0.148	0.035	0.000	0.000	0.039	0.000	0.000	0.186	0.000
19	1.043	0.410	12.022	18.939	0.072	0.698	2.877	0.220	0.574	0.000	0.039	6.134	0.147	0.023	0.033	0.130	0.025	0.000	0.013	0.035	0.000	0.000	2.174	0.036
21	1.121	0.506	4.548	15.470	0.073	0.593	1.839	19.395	0.413	0.036	0.039	3.508	0.086	0.759	0.031	0.240	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.257	0.000
23	0.219	0.202	7.358	31.648	0.065	0.274	3.164	1.298	0.368	0.053	0.080	3.328	0.168	0.059	0.033	0.504	0.019	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.438	0.000
25	0.209	0.067	9.989	29.646	0.000	0.050	4.446	0.325	0.371	0.072	0.040	4.234	0.148	0.021	0.017	0.257	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
27	0.089	0.076	10.203	26.396	0.032	0.036	2.876	0.062	0.474	0.024	0.053	7.352	0.122	0.014	0.033	1.320	0.029	0.030	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000

ตาราง 4.11 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบ (%) ด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ของทรายชายหาดจุดเก็บตัวอย่างที่ 1-10

Site	H	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
1	0.000	0.000	0.000	32.794	0.612	0.720	0.587	8.161	0.070	0.384	0.981	0.647	51.454	0.073	0.054	0.000	0.996	0.000	0.023	2.444	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	37.447	0.409	0.493	0.612	16.742	0.049	0.266	0.578	0.318	39.809	0.068	0.060	0.000	1.191	0.000	0.000	1.959	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	39.745	0.628	0.334	0.474	21.461	0.053	0.244	1.176	0.359	32.371	0.113	0.110	0.048	1.305	0.000	0.000	1.566	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	46.686	0.232	0.241	0.616	34.093	0.033	0.138	0.612	0.343	14.822	0.049	0.129	0.000	1.457	0.000	0.000	0.548	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	44.621	0.292	0.214	0.530	30.188	0.050	0.198	0.700	0.408	19.504	0.374	0.109	0.064	1.735	0.000	0.021	0.793	0.000	0.179	0.022
6	0.000	0.000	0.000	49.300	0.281	0.159	0.467	39.118	0.040	0.087	0.531	0.352	7.756	0.047	0.121	0.000	1.499	0.000	0.000	0.292	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	50.373	0.165	0.130	0.487	41.104	0.000	0.084	0.394	0.396	5.346	0.101	0.060	0.000	1.078	0.000	0.017	0.173	0.000	0.094	0.000
8	0.329	3.917	4.567	43.373	1.397	0.634	8.163	20.291	0.092	1.516	3.905	2.057	3.406	0.484	0.024	0.061	5.249	0.065	0.114	0.097	0.017	0.116	0.016
9	0.000	0.000	0.000	49.829	0.265	0.204	1.424	39.495	0.044	0.115	0.555	0.797	5.208	0.075	0.098	0.034	1.666	0.000	0.021	0.099	0.000	0.070	0.000
10	0.000	0.000	0.000	50.332	0.241	0.208	0.747	40.885	0.000	0.120	0.573	0.587	4.149	0.200	0.079	0.000	1.485	0.000	0.103	0.073	0.000	0.210	0.007

4.8 การวิเคราะห์ปัจจัย

การวิเคราะห์ปัจจัยในตัวอย่างทรายคลอง โดยการวิเคราะห์ตัวแปรถ้ามันตรงสี่ จากการวิเคราะห์ค่าถ้ามันสภาพจำเพาะที่คำนวณเป็นความเข้มข้น จำนวนตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ eU (ppm), eTh (ppm) และ K (%) และจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุประกอบจำนวนตัวแปร 24 ตัวแปร ได้แก่ Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Cu, Zn, As, Ba, Cl, และ Br พบว่า

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 27 ตัวแปร ดังตาราง 4.13 (ก)-(จ) โดยที่ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันมาก ได้แก่ Ca กับ Sr (0.999), Sn กับ Ba (0.973), S กับ Cl (0.965), eU กับ Zr (0.964), Na กับ Cl (0.957), Nb กับ Sn (0.945), eU กับ eTh (0.940), Nb กับ Ba (0.928), eTh กับ Zr (0.913), Zr กับ Sn (0.879), Zr กับ Nb (0.862), eTh กับ Ti (0.843), eU กับ Nb (0.836), eU กับ Sn (0.829) และ Si กับ Cl (0.811)

จากค่าน้ำหนักปัจจัยที่ยังไม่หมุนแกนปัจจัย มี 7 ปัจจัย ที่มีค่าไอเกินมากกว่า 1 สามารถอธิบายข้อมูลได้ 92.006 % ดังตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ค่าสถิติสำหรับแต่ละ Factor ก่อนหมุนแกน

Factor	Initial Eigenvalues			Factor	Initial Eigenvalues		
	Total	% of Variance	Cumulative %		Total	% of Variance	Cumulative %
1	8.012	29.674	29.674	15	2.495E-16	9.241E-16	100.000
2	6.108	22.623	52.296	16	2.211E-16	8.189E-16	100.000
3	3.771	13.968	66.264	17	1.864E-16	6.904E-16	100.000
4	2.321	8.596	74.860	18	1.290E-16	4.777E-16	100.000
5	1.941	7.189	82.049	19	4.387E-17	1.625E-16	100.000
6	1.568	5.807	87.856	20	-2.851E-17	-1.056E-16	100.000
7	1.121	4.150	92.006	21	-1.142E-16	-4.231E-16	100.000
8	.867	3.211	95.217	22	-1.383E-16	-5.124E-16	100.000
9	.548	2.031	97.248	23	-1.953E-16	-7.232E-16	100.000
10	.395	1.465	98.712	24	-2.503E-16	-9.272E-16	100.000
11	.172	.638	99.350	25	-3.280E-16	-1.215E-15	100.000
12	.119	.443	99.793	26	-3.964E-16	-1.468E-15	100.000
13	.056	.207	100.000	27	-8.186E-16	-3.032E-15	100.000
14	5.219E-16	1.933E-15	100.000				

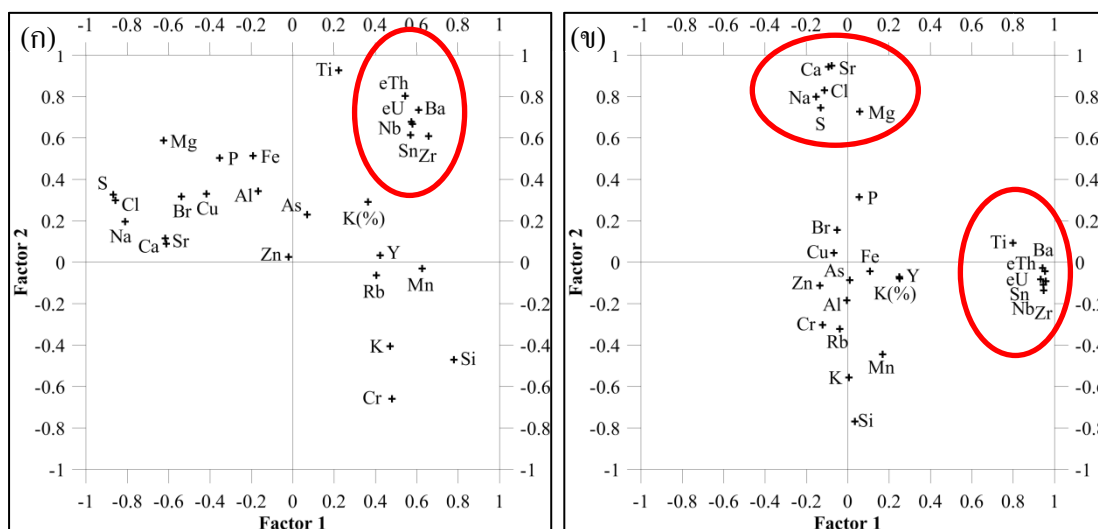
ตาราง 4.13 (ก) เมทริกซ์สหสัมพันธ์

	eU	eTh	K(%)	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cu	Zn	As	Ba	Cl	Br
Correlation eU	1.000	.940	.268	-.268	-.120	.043	.101	-.058	-.255	-.039	-.159	.678	-.126	.115	.190	-.006	-.145	.265	.964	.836	.829	-.146	-.016	-.023	.819	-.223	-.150
eTh	.940	1.000	.382	-.243	.084	.171	.028	.103	-.212	-.142	-.168	.843	-.232	.224	.257	.137	-.149	.285	.913	.914	.865	-.046	.033	.071	.838	-.196	-.101
eK	.268	.382	1.000	-.237	.133	-.011	.029	.165	-.303	-.118	-.179	.304	-.116	.507	.004	.687	-.178	.248	.160	.405	.290	.005	.201	.278	.242	-.241	-.165
Na	-.268	-.243	-.237	1.000	.616	-.089	-.707	.168	.885	-.331	.693	-.059	-.398	-.504	-.088	-.376	.693	-.134	-.283	-.263	-.232	.319	-.051	-.214	-.122	.957	.622
Mg	-.120	.084	.133	.616	1.000	.134	-.722	.780	.719	-.567	.559	.439	-.651	-.088	.330	-.160	.575	-.155	-.099	.067	-.029	.438	-.029	.319	-.028	.686	.360
Al	.043	.171	-.011	-.089	.134	1.000	-.331	.165	.135	-.413	-.393	.421	-.538	-.347	.730	.296	-.368	-.193	-.035	.018	-.209	.344	.343	.159	-.179	.028	.402
Si	.101	.028	.029	-.707	-.722	-.331	1.000	-.376	-.773	.554	-.626	-.292	.600	.640	-.430	.268	-.644	.377	.105	.133	.252	-.362	.027	-.114	.151	-.811	-.465
P	-.058	.103	.165	.168	.780	.165	-.376	1.000	.416	-.532	.174	.381	-.658	.194	.427	-.098	.189	-.376	-.029	.163	-.019	.333	-.186	.409	-.069	.265	.160
S	-.255	-.212	-.303	.885	.719	.135	-.773	.416	1.000	-.444	.578	.100	-.550	-.589	.124	-.424	.590	-.239	-.246	-.233	-.261	.434	-.037	-.117	-.165	.965	.705
K	-.039	-.142	-.118	-.331	-.567	-.413	.554	-.532	-.444	1.000	-.386	-.210	.587	.330	-.317	-.146	-.400	.235	.102	.022	.203	-.107	-.144	.147	.129	-.399	-.084
Ca	-.159	-.168	-.179	.693	.559	-.393	-.626	.174	.578	-.386	1.000	-.104	-.050	-.395	-.189	-.422	.999	-.122	-.127	-.242	-.154	-.121	-.246	-.108	-.085	.691	-.079
Ti	.678	.843	.304	-.059	.439	.421	-.292	.381	.100	-.210	-.104	1.000	-.466	.093	.525	.084	-.075	.156	.707	.797	.685	.232	.043	.362	.655	.057	.182
Cr	-.126	-.232	-.116	-.398	-.651	-.538	.600	-.658	-.550	.587	-.050	-.466	1.000	.143	-.709	.119	-.070	.241	-.058	-.113	.093	-.565	-.267	-.182	.105	-.478	-.613
Mn	.115	.224	.507	-.504	-.088	-.347	.640	.194	-.589	.330	-.395	.093	.143	1.000	-.175	.376	-.403	.322	.144	.366	.376	-.169	-.008	.319	.203	-.605	-.385

ตารางที่ 4.13 (ข) เมทริกซ์สหสัมพันธ์

	eU	eTh	K(%)	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cu	Zn	As	Ba	Cl	Br
Correlation Fe	.190	.257	.004	-.088	.330	.730	-.430	.427	.124	-.317	-.189	.525	-.709	-.175	1.000	-.082	-.165	-.231	.168	.075	-.121	.425	.251	.556	-.170	.042	.261
Rb	-.006	.137	.687	-.376	-.160	.296	.268	-.098	-.424	-.146	-.422	.084	.119	.376	-.082	1.000	-.421	.328	-.148	.168	.034	-.260	.249	.149	.020	-.424	-.193
Sr	-.145	-.149	-.178	.693	.575	-.368	-.644	.189	.590	-.400	.999	-.075	-.070	-.403	-.165	-.421	1.000	-.126	-.113	-.227	-.145	-.115	-.244	-.098	-.077	.699	-.069
Y	.265	.285	.248	-.134	-.155	-.193	.377	-.376	-.239	.235	-.122	.156	.241	.322	-.231	.328	-.126	1.000	.200	.212	.386	-.118	.584	.015	.297	-.163	-.097
Zr	.964	.913	.160	-.283	-.099	-.035	.105	-.029	-.246	.102	-.127	.707	-.058	.144	.168	-.148	-.113	.200	1.000	.862	.879	-.157	-.154	.034	.854	-.226	-.170
Nb	.836	.914	.405	-.263	.067	.018	.133	.163	-.233	.022	-.242	.797	-.113	.366	.075	.168	-.227	.212	.862	1.000	.945	-.074	-.184	.104	.928	-.245	-.074
Sn	.829	.865	.290	-.232	-.029	-.209	.252	-.019	-.261	.203	-.154	.685	.093	.376	-.121	.034	-.145	.386	.879	.945	1.000	-.122	-.157	.011	.973	-.236	-.144
Cu	-.146	-.046	.005	.319	.438	.344	-.362	.333	.434	-.107	-.121	.232	-.565	-.169	.425	-.260	-.115	-.118	-.157	-.074	-.122	1.000	.438	.087	-.113	.387	.679
Zn	-.016	.033	.201	-.051	-.029	.343	.027	-.186	-.037	-.144	-.246	.043	-.267	-.008	.251	.249	-.244	.584	-.154	-.184	-.157	.438	1.000	-.115	-.221	-.004	.244
As	-.023	.071	.278	-.214	.319	.159	-.114	.409	-.117	.147	-.108	.362	-.182	.319	.556	.149	-.098	.015	.034	.104	.011	.087	-.115	1.000	-.098	-.166	-.098
Ba	.819	.838	.242	-.122	-.028	-.179	.151	-.069	-.165	.129	-.085	.655	.105	.203	-.170	.020	-.077	.297	.854	.928	.973	-.113	-.221	-.098	1.000	-.131	-.077
Cl	-.223	-.196	-.241	.957	.686	.028	-.811	.265	.965	-.399	.691	.057	-.478	-.605	.042	-.424	.699	-.163	-.226	-.245	-.236	.387	-.004	-.166	-.131	1.000	.656
Br	-.150	-.101	-.165	.622	.360	.402	-.465	.160	.705	-.084	-.079	.182	-.613	-.385	.261	-.193	-.069	-.097	-.170	-.074	-.144	.679	.244	-.098	-.077	.656	1.000

นำค่าน้ำหนักปัจจัย (ตาราง 4.14) มาทำการหมุนแกนปัจจัยด้วยวิธี Varimax ซึ่งลดปัจจัยจาก 27 ปัจจัย เหลือ 7 ปัจจัย ที่มีค่าไอเกนมากกว่า 1 ทั้ง 7 ปัจจัยที่หมุนแกนปัจจัยแล้วสามารถอธิบายข้อมูลได้ 92.006 % เช่นเดียวกัน (ตาราง 4.15) และได้นำค่าน้ำหนักปัจจัยมาลงจุดบนกราฟให้เห็นชัดเจนขึ้นดังภาพประกอบ 4.15 (ก)-(ข)



ภาพประกอบ 4.15 ค่าน้ำหนักปัจจัย

(ก) ปัจจัย 1 และ 2 ก่อนหมุนแกนปัจจัย

(ข) ปัจจัย 1 และ 2 หลังหมุนแกนปัจจัย

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ค่าน้ำหนักปัจจัย 1 และ 2 หลังหมุนแกนปัจจัยแล้วสามารถจัดเรียงตัวแปรว่าควรอยู่ในปัจจัยใดได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงควรใช้ค่าน้ำหนักปัจจัยที่หมุนแกนปัจจัยมาวิเคราะห์ โดยค่าไอเกนของแต่ละปัจจัยที่แสดงถึงความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยที่ 1 มีค่าไอเกนเท่ากับ 6.293 ขณะที่ปัจจัยที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มีค่าไอเกนเท่ากับ 5.747, 3.343, 3.139, 2.252, 2.249 และ 1.818 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ 1 มีความสำคัญที่สุด

ตาราง 4.14 ค่าน้ำหนักปัจจัยก่อนหมุนแกนปัจจัย

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
eU	0.574	0.678	0.228	-0.194	-0.083	-0.201	0.082
eTh	0.544	0.803	0.113	-0.074	0.023	-0.161	0.023
K(%)	0.364	0.291	-0.232	0.432	0.530	-0.042	-0.168
Na	-0.811	0.196	0.353	-0.149	0.248	0.129	-0.088
Mg	-0.625	0.588	0.013	0.400	0.179	0.184	0.025
Al	-0.167	0.343	-0.729	-0.237	-0.168	-0.387	-0.061
Si	0.779	-0.471	-0.052	-0.057	0.024	0.201	-0.090
P	-0.353	0.504	-0.222	0.577	-0.144	0.234	-0.186
S	-0.868	0.327	0.171	-0.143	0.082	0.125	-0.106
K	0.471	-0.405	0.117	-0.250	-0.148	0.582	0.219
Ca	-0.612	0.089	0.659	0.285	0.128	-0.163	0.225
Ti	0.222	0.926	-0.101	0.008	-0.036	0.008	0.102
Cr	0.480	-0.659	0.428	0.001	0.005	-0.033	0.077
Mn	0.625	-0.030	-0.146	0.478	0.226	0.443	-0.074
Fe	-0.192	0.514	-0.635	0.027	-0.364	-0.121	0.364
Rb	0.404	-0.063	-0.435	0.277	0.507	-0.323	-0.285
Sr	-0.617	0.115	0.649	0.284	0.120	-0.173	0.228
Y	0.422	0.034	0.060	-0.207	0.711	.0070	0.422
Zr	0.579	0.668	0.313	-0.169	-0.219	-0.064	0.123
Nb	0.609	0.735	0.181	0.010	-0.016	0.071	-0.187
Sn	0.657	0.609	0.380	-0.094	0.058	0.167	-0.044
Cu	-0.417	0.330	-0.437	-0.314	0.087	0.443	0.007
Zn	-0.020	0.025	-0.513	-0.384	0.603	-0.117	0.338
As	0.069	0.230	-0.383	0.546	-0.174	0.299	0.460
Ba	0.569	0.614	0.453	-0.170	0.038	0.078	-0.147
Cl	-0.858	0.299	0.289	-0.165	0.188	0.081	-0.027
Br	-0.539	0.317	-0.266	-0.534	0.113	0.349	-0.235
Eigen value	8.012	6.108	3.771	2.321	1.941	1.568	1.121
% of variance	29.674	22.623	13.968	8.596	7.189	5.807	4.150
Cumulative %	29.674	52.296	66.264	74.860	82.049	87.856	92.006

ตาราง 4.15 ค่าน้ำหนักปัจจัยหลังหมุนแกนปัจจัย

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
eU	.933	-.082	-.144	.151	-.031	-.043	.097
eTh	.953	-.043	-.047	.190	.159	.064	.087
eK	.249	-.071	-.043	-.036	.796	.201	.151
Na	-.153	.799	.460	-.084	-.115	-.187	-.015
Mg	.058	.727	.385	.107	.235	.441	-.143
Al	-.005	-.184	.284	.890	.084	.026	.022
Si	.034	-.769	-.262	-.439	.088	-.110	.102
P	.055	.314	.300	.162	.314	.567	-.482
S	-.131	.746	.560	.118	-.148	-.072	-.127
K	.006	-.557	.009	-.600	-.410	.089	.159
Ca	-.093	.943	-.220	-.156	-.138	.008	-.041
Ti	.799	.093	.220	.323	.120	.337	.034
Cr	-.122	-.303	-.583	-.544	-.149	-.285	.097
Mn	.169	-.445	-.086	-.490	.493	.421	.001
Fe	.107	-.043	.207	.766	-.152	.564	.021
Rb	-.038	-.322	-.176	.157	.820	-.087	.189
Sr	-.077	.949	-.214	-.132	-.138	.016	-.044
Y	.250	-.078	-.057	-.289	.196	-.011	.848
Zr	.957	-.091	-.140	.043	-.168	.045	.006
Nb	.947	-.136	.040	-.054	.221	.065	-.115
Sn	.946	-.108	-.016	-.276	.071	.008	.042
Cu	-.067	.045	.817	.184	-.081	.213	.127
Zn	-.135	-.113	.272	.302	.191	-.030	.818
As	.010	-.086	-.044	.080	.055	.903	.003
Ba	.942	-.028	.003	-.229	.047	-.146	-.024
Cl	-.113	.830	.483	.049	-.158	-.126	-.009
Br	-.051	.156	.917	.180	-.119	-.146	.041
Eigen value	6.293	5.747	3.343	3.139	2.252	2.249	1.818
% of variance	23.306	21.286	12.380	11.628	8.342	8.329	6.735
Cumulative %	23.306	44.592	56.972	68.600	76.942	85.271	92.006

ปัจจัยที่ 1 สามารถอธิบายได้ดีที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวน 23.306 น้ำหนักปัจจัยมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.957, 0.953, 0.947, 0.946, 0.942, 0.933 และ 0.799 สำหรับตัวแปร Zr, eTh, Nb, Sn, Ba, eU และ Ti ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกลุ่มเพื่อนแร่ดีบุก (Tin associates) แล้ว จะพบว่า ธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) จะสามารถพบในรูปของแร่เซอร์คอน ($ZrSiO_4$) ตามแหล่งแร่ดีบุก (SnO_2) บริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ธาตุไนโอเบียม (Nb) จะสามารถพบในสินแร่โคลัมไบต์/แทนทาลิต์ $(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ ซึ่งพบในตะกอนจากการถลุงแร่ดีบุก (SnO_2) ซึ่งตะกอนดีบุกจะมีสารกำมะถันสูง เช่น ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) ปนเปื้อนอยู่ด้วย และธาตุไทเทเนียม (Ti) จะสามารถพบรูปของแร่อิเลไมต์ ($FeTiO_3$) พบตามแหล่งดีบุกบริเวณภาคใต้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ทอเรียม (Th) จะสามารถพบได้ในรูปของแร่โมนาไซต์ (Ce, La, Nd, Th) PO_4 ซึ่งเป็นแร่พลอยได้จากการทำเหมืองแร่ดีบุก ซึ่งกลุ่มแร่เหล่านี้จะมีความเข้มข้นยูเรเนียมและทอเรียมสูง (Anjos et al., 2006)

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเพื่อตรวจวัดปริมาณนอร์มในทรายเก็บจากคลองตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ได้แบ่งวิธีการสรุปออกเป็นขั้นตอนดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ตรวจวัดกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด โดยใช้เทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา ชนิดหัววัด HPGe ได้ผลคือ

- ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3 mm อยู่ในช่วง 65 – 208 (ค่าเฉลี่ย 91 ± 10), 63 – 583 (ค่าเฉลี่ย 145 ± 14) และ 199 – 1407 (ค่าเฉลี่ย 545 ± 41) Bq/kg ตามลำดับ ขณะที่ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm อยู่ในช่วง 71 – 1318 (ค่าเฉลี่ย 169 ± 14), 82 – 1079 (ค่าเฉลี่ย 242 ± 19) และ 118 – 1290 (ค่าเฉลี่ย 827 ± 58) Bq/kg ตามลำดับ และที่ขนาดอนุภาค < 0.106 mm อยู่ในช่วง 70 – 3901 (ค่าเฉลี่ย 322 ± 17), 96 – 2615 (ค่าเฉลี่ย 428 ± 24) และ 205 – 1300 (ค่าเฉลี่ย 749 ± 57) Bq/kg ตามลำดับ ตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับขนาดอื่นๆ น่าจะเกิดจากมีลักษณะเป็นดินเคลย์สามารถจับเรเดียมได้ดีกว่า ทำให้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูง และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 68 – 663 (ค่าเฉลี่ย 123), 75 – 545 (ค่าเฉลี่ย 178) และ 202 – 1065 (ค่าเฉลี่ย 600) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เฉลี่ยจากทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ของตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

- ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3 mm อยู่ในช่วง 9 – 78 (ค่าเฉลี่ย 25 ± 4), 12 – 121 (ค่าเฉลี่ย 36 ± 6) และ 47 – 436 (ค่าเฉลี่ย 132 ± 20) Bq/kg ตามลำดับ ขณะที่ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 mm อยู่ในช่วง 9 – 79 (ค่าเฉลี่ย 25 ± 4), 9 – 124 (ค่าเฉลี่ย 36 ± 7) และ 44 – 502 (ค่าเฉลี่ย 138 ± 21) Bq/kg ตามลำดับ และที่ขนาดอนุภาค < 0.106 mm อยู่ในช่วง 49 – 91 (ค่าเฉลี่ย 70 ± 9), 93 – 137 (ค่าเฉลี่ย 115 ± 14) และ 190 – 724 (ค่าเฉลี่ย 457 ± 41) Bq/kg ตามลำดับ ตัวอย่างทรายชายหาดจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 8 มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับจุดเก็บตัวอย่างทราย

ชายหาดอื่นๆ น่าจะเกิดจากมีลักษณะเป็นดินเคลย์สามารถจับเรเดียมได้ดีกว่า ทำให้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูง และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 10 – 84 (ค่าเฉลี่ย 25), 13 – 130 (ค่าเฉลี่ย 36) และ 51 – 594 (ค่าเฉลี่ย 146) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ที่เฉลี่ยจากทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra ที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก ส่วนค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างทรายชายหาดทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างทรายชายหาดที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

5.1.2 ประเมินปริมาณรังสีแกมมา จากการตรวจวัดกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด ได้ผลคือ

- ปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ในตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3 , $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 90 – 484 (ค่าเฉลี่ย 153 ± 15), 118 – 1290 (ค่าเฉลี่ย 259 ± 20) และ 99 – 3425 (ค่าเฉลี่ย 436 ± 25) nGy/h ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่า D จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 102 – 657 (ค่าเฉลี่ย 189) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เฉลี่ยจากทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยของ D จากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายคลองจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต มีค่า D สูงสุดในตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm เท่ากับ 1290 และ 3425 nGy/h ตามลำดับ

- ปริมาณรังสีดูดกลืน (D) จากตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3 , $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 15 – 127 (ค่าเฉลี่ย 39 ± 7), 15 – 132 (ค่าเฉลี่ย 39 ± 7) และ 87 – 155 (ค่าเฉลี่ย 121 ± 15) nGy/h ตามลำดับ เมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่า D จากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 16 – 142 (ค่าเฉลี่ย 39) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เฉลี่ยจากทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยของ D ในตัวอย่างทรายชายหาดขนาดอนุภาค < 0.106 mm สูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก

- ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลต่อปีที่ได้รับจากการนำตัวอย่างทรายมาใช้ก่อสร้างเป็นอาคารบ้านเรือน (AEDE_{in}) จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3 , $0.3 - 0.106$ และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 441 - 2,376 (ค่าเฉลี่ย 748 ± 73), 581 – 6326 (ค่าเฉลี่ย 1270 ± 98) และ 486 - 16803 (ค่าเฉลี่ย 2150 ± 123) μSv ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่า AEDE_{in} จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 502 – 3221 (ค่าเฉลี่ย 927) μSv เมื่อเปรียบเทียบกับ

ค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ย $AEDE_m$ จากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายคลองจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต จะมีค่า $AEDE_m$ สูงสุดในตัวอย่างทรายขนาดอนุภาค 0.3 – 0.106 และ < 0.106 mm เท่ากับ 6326 และ 16803 μSv ตามลำดับ ดังนั้นไม่ควรเอาทรายคลองร้อนทำเป็นทรายขนาดอนุภาค < 0.106 mm สำหรับฉาบปูนผนังเรียบภายในบ้าน เพราะจะได้รับปริมาณรังสีมากกว่าเอาทรายคลองที่ไม่คัดขนาดไปใช้ก่อสร้าง

- ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3, 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 199 - 1,108 (ค่าเฉลี่ย 341 ± 33), 260 - 2914 (ค่าเฉลี่ย 579 ± 45) และ 224 - 7721 (991 ± 56) Bq/kg ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า Ra_{eq} จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 223 - 1480 (ค่าเฉลี่ย 422) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย 370 Bq/kg พบว่า ค่าเฉลี่ย Ra_{eq} จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm สูงกว่า 370 Bq/kg โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายคลองจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต จะมีค่า Ra_{eq} สูงสุดในตัวอย่างทรายขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm เท่ากับ 2914 และ 7721 Bq/kg ตามลำดับ

- ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3, 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 33 - 284 (ค่าเฉลี่ย 87 ± 15), 32 - 295 (ค่าเฉลี่ย 88 ± 16) และ 197 - 343 (270 ± 33) Bq/kg ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า ค่า Ra_{eq} จากตัวอย่างทรายชายหาด อยู่ในช่วง 35 - 315 (ค่าเฉลี่ย 87) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย 370 Bq/kg พบว่า ค่า Ra_{eq} จากตัวอย่างทรายชายหาดทั้งหมดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงต่ำกว่า 370 Bq/kg

5.1.3 ประเมินดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสี จากการตรวจวัดตรวจวัดกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างทรายคลอง ได้ผลคือ

- ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกาย (H_{in}) จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3, 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 0.74 - 3.56 (ค่าเฉลี่ย 1.17 ± 0.12), 0.92 - 11.43 (ค่าเฉลี่ย 2.02 ± 0.16) และ 0.79 - 31.40 (ค่าเฉลี่ย 3.55 ± 0.20) ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า H_{in} จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 0.80 - 5.79 (ค่าเฉลี่ย 1.47) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $H_{in} < 1$ พบว่า ค่าเฉลี่ย H_{in} จากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $H_{in} > 1$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายคลองจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 ที่เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต มีค่า H_{in} สูงสุดในตัวอย่างทรายขนาดอนุภาค 0.3 -

0.106 และ < 0.106 mm เท่ากับ 11.43 และ 31.40 ตามลำดับ

- ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) จากตัวอย่างทรายคลอง ที่ขนาดอนุภาค > 0.3, 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm พบว่า อยู่ในช่วง 0.54 - 2.99 (ค่าเฉลี่ย 0.92 ± 0.09), 0.70 - 7.87 (ค่าเฉลี่ย 1.56 ± 0.12) และ 0.60 - 20.86 (ค่าเฉลี่ย 2.68 ± 0.15) ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า H_{ex} จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 0.60 - 4.00 (ค่าเฉลี่ย 1.14) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $H_{ex} < 1$ พบว่า ค่าเฉลี่ย H_{ex} จากตัวอย่างทรายคลองขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106, < 0.106 mm และค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $H_{ex} > 1$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายคลองจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 ที่เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต มีค่า H_{ex} สูงสุดในตัวอย่างทรายขนาดอนุภาค 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm เท่ากับ 7.87 และ 20.86 ตามลำดับ

- ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา (I_{γ}) จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า ที่ขนาดอนุภาค > 0.3, 0.3 - 0.106 และ < 0.106 mm อยู่ในช่วง 0.70 - 3.90 (ค่าเฉลี่ย 1.21 ± 0.12), 0.93 - 10.02 (ค่าเฉลี่ย 2.05 ± 0.16) และ 0.78 - 26.43 (ค่าเฉลี่ย 3.46 ± 0.20) ตามลำดับ และเมื่อคำนวณตามสัดส่วนจริง พบว่า I_{γ} จากตัวอย่างทรายคลอง อยู่ในช่วง 1.31 - 6.36 (ค่าเฉลี่ย 3.58) เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ปลอดภัย $I_{\gamma} < 1$ พบว่า ค่าเฉลี่ย I_{γ} จากตัวอย่างทรายคลองทั้ง 3 ขนาดและค่าที่คำนวณตามสัดส่วนจริงมีค่า $I_{\gamma} > 1$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรายจากจุดที่ 26 เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเตมีค่า I_{γ} สูงสุดในตัวอย่างทรายขนาดอนุภาค < 0.106 mm เท่ากับ 26.43

5.1.4 ประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของทรายจากการวิเคราะห์ธาตุประกอบ โดยใช้เทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ในตัวอย่างทรายคลองและทรายชายหาด

- ปริมาณ Silica จากตัวอย่างทรายคลอง พบว่า อยู่ในช่วงร้อยละ 33.096 - 78.121 โดยที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 9 มีปริมาณ Silica เกินร้อยละ 75 ไม่สามารถส่งออกนอกราชอาณาจักรได้ และเนื่องจากว่าปริมาณ silica ในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วสำหรับป้อนอุตสาหกรรมควรมีปริมาณ silica สูงเกินกว่า 95 % จึงสรุปได้ว่าทรายคลองในพื้นที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วป้อนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และพบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะทรายคลองตะกั่วป่าจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 เก็บจากสะพานข้ามคลองบางม่วง บ้านบางปูเต ในส่วนที่มีขนาดอนุภาค < 0.106 mm มีปริมาณเรเดียม และทอเรียมสูงสุด เท่ากับ 3901 และ 2615 Bq/kg หรือคิดเป็นความเข้มข้น 313 และ 644 g/ton ตามลำดับ แม้ว่าจะมีปริมาณน้อย แต่ก็อาจสามารถนำทรายดังกล่าวไปสกัดเอาแร่เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทอเรียมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป

- ปริมาณ Silica จากตัวอย่างทรายชายหาด พบว่า อยู่ในช่วงร้อยละ 17.459 - 87.936 โดยจุดเก็บตัวอย่างที่ 6, 7, 9 และ 10 มีปริมาณ Silica เกินร้อยละ 75 ไม่สามารถส่งออก

ราชอาณาจักรได้ และเนื่องจากว่าปริมาณ Silica ในทรายที่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วสำหรับป้อนอุตสาหกรรม ควรมีปริมาณ Silica สูงเกินกว่า 95 % จึงสรุปได้ว่าทรายชายหาดในพื้นที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะเป็นแหล่งทรายแก้วป้อนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และพบว่าทรายชายหาดจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 8 (หาดท่าเทียบเรือบ้านเมืองใหม่) มีปริมาณทอเรียมสูงสุด โดยมีกัมมันตภาพจำเพาะเท่ากับ 124 Bq/kg หรือคิดเป็น 30 mg/kg หรือ 30 g/ton โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณน้อย การนำทรายดังกล่าวไปสกัดเอาแร่เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทอเรียมจึงไม่น่าจะคุ้มทุน

- การวิเคราะห์ปัจจัยในตัวอย่งทรายคลอง โดยการวิเคราะห์ตัวแปรกัมมันตรังสีจากการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่คำนวณเป็นความเข้มข้น พบว่า น้ำหนักปัจจัยมีค่าสูงสุดคือ ตัวแปร Zr, eTh, Nb, Sn, Ba, eU และ Ti ตามลำดับ ซึ่งธาตุประกอบเหล่านี้มักพบอยู่ในกลุ่มเฟอโรแมกนีเซียมและมีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียมและทอเรียมสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

แม้จะพบว่าทรายคลองตะกั่วป่า จ.พังงา และทรายชายหาด จะมีปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติสูงกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากทั่วโลก ซึ่งมีความหมายว่าประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวจะได้รับปริมาณรังสีธรรมชาติสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลก แต่ปริมาณรังสีดังกล่าวก็ยังคงอยู่ในระดับต่ำไม่ได้เป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ดังกล่าวแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม มีพื้นที่ที่ควรตรวจสอบเพิ่มเติมได้แก่ บ้านบางปูเต ที่มีคลองบางม่วงไหลผ่าน ตรงบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่ 26 ซึ่งตัวอย่างที่เก็บจากจุดนี้พบว่ามีปริมาณรังสีสูงกว่าจุดอื่นมาก และเป็นบริเวณที่ใกล้แหล่งชุมชน ข้อมูลที่ควรตรวจสอบเพิ่มเติม เช่น

1. ปริมาณรังสีในอากาศ (Exposure rate) ที่ระดับ 1 เมตรเหนือพื้นดิน ปริมาณสารกัมมันตรังสีในดิน และในน้ำบริเวณของชุมชน ปริมาณเรดอนในอากาศ

2. จำนวนผู้ป่วยมะเร็งในพื้นที่ หากไม่พบว่ามีปริมาณผู้ป่วยมะเร็งผิดปกติ ก็สรุปได้ว่าปริมาณรังสีส่วนเกินที่ประชาชนละแวกนี้ได้รับนั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มจำนวนผู้ป่วยมะเร็ง คือปริมาณรังสีส่วนเกินที่ได้รับยังไม่สูงจนถึงระดับที่จะมีผลกระทบต่อสุขภาพ แต่หากพบว่ามีจำนวนผู้ป่วยมะเร็งมากผิดปกติ ยังต้องตรวจสอบก่อนว่าปัจจัยหลักที่ทำให้เป็นมะเร็งนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องมากน้อยเพียงใด ปัจจัยหลักดังกล่าวได้แก่ บุหรี่ เหล้า มลพิษทางเคมีในอากาศและในน้ำ เป็นต้น หลังจากนั้นจึงจะมาพิจารณาว่าปริมาณรังสีส่วนเกินที่ได้รับซึ่งเป็นปัจจัยเสริมก่อมะเร็งจะมีผลมากน้อยเพียงใด

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. 2550. *ธรณีวิทยาประเทศไทย*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กัลยา วาณิชย์บัญชา. 2544. *การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กิตติชัย วัฒนานิก. 2525. *การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร*. เชียงใหม่:คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กิตติชัย วัฒนานิก วิวัฒน์ ตียาสุนทรานนท์ ธิรพัฒน์ วิลัยทอง และ สุรพงษ์ เลิศทัศนีย์. 2527. การศึกษา สารกัมมันตรังสีอย่างเป็นระบบในหินชนิดต่างๆ ในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย. เชียงใหม่:คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- คณะกรรมการอำนวยการจัดงานเฉลิมพระเกียรติ. 2542. *วัฒนธรรม พัฒนาการทางประวัติศาสตร์ เอกลักษณ์และภูมิปัญญา จังหวัดพังงา*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- ไทรภพ ผ่องสุวรรณ และ แพร นีรนาทรังสรรค์. 2548. กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ในทรายจากบ่อทรายในอำเภอหาดใหญ่และอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา. *วารสารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย*. 6 (สิงหาคม 2548):26-39.
- พวงทิพย์ รุ่งเล็ก. 2538. การศึกษาพลูตอนลิวง จังหวัดสงขลา ด้วยธรณีฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- แพร นีรนาทรังสรรค์. 2547. กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ^{40}K , ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่างทรายก่อสร้างที่อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา ด้วยสเปกโตรังสีแกมมา. โครงการฟิสิกส์, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มติชนออนไลน์. 2552. แง่ขุดตะกอนดิน-ทรายปากแม่น้ำตะกั่วป่า บ.ไทยอาสาขุดถมที่สิงคโปร์ให้
ฟรีอ่างกันไหลย้อนกลับ. http://www.matichon.co.th/news_detail.php?newsid=1253198539&catid=no (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2552)

สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล. 2537. การวัดปริมาณยูเรเนียม-238 ในหินชนิดต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดสงขลา
พัทลุง ปัตตานี. โครงการฟิสิกส์, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุวิทย์ เพชรห้วยลึก. 2539. การศึกษาโครงสร้างธรณีวิทยาเชิงภูมิภาคในจังหวัดสงขลา พัทลุง และ
ตรัง ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุรศักดิ์ แก้วอ่อน. 2539. การศึกษาโครงสร้างทางธรณีวิทยาเชิงภูมิภาคในจังหวัดสตูลและจังหวัด
สงขลา ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Anjos, R.M., Veiga, R., Macario, K., Carvalho, C., Sanches, N., Bastos, J. and P.R.S. Gomes.
2006. Radiometric analysis of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast.
Marine Geology 229:29–43.

Arogunjo, A.M., Hollriegl, V., Giussani, A., Leopold, K., Gerstmann, U., Veronese, I. and U.
Oeh. 2008. Uranium and thorium in soils, mineral sands, water and food samples in a tin
mining area in Nigeria with elevated activity. *Environmental Radioactivity* 100:232–240.

Bahari, I., Mohsen, N. and P. Abdullah. 2007. Radioactivity and radiological risk associated with
effluent sediment containing technologically enhanced naturally occurring radioactive
materials in amang (tin tailings) processing industry. *Environmental Radioactivity*
95:161-170.

- Banat, K.M., Howari, F.M. and A.A Al-Hamad, 2005. Heavy metals in urban soils of central Jordan: should we worry about their environmental risks. *Environmental Research Section A* 97: 258–273.
- Dim, L.A., Ewa, J.O.B. and A.E. Ikpokpnte. 2000. Uranium-thorium level in the sediments of the Kubanni River in River in Nigeria. *Applied Radiation and Isotopes* 52:1009-1015.
- ICRP 60. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon, Press, Oxford.
- Mantazul I.C., Alam, M.N. and S.K.S. Hazari. 1999. Distribution of radionuclides in river sediments and coastal soils of Chittagong, Bangladesh and evaluation of the radiation hazard. *Applied Radiation and Isotopes* 51:747-755.
- NCRP. 1987. Report of National Council on Radiation Protection and Measurements to exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, NCRP Report no. 94. Maryland.
- Neven, C., Marina, M., Vlado, C. and B. Delko. 2009. Origin and transport of ^{238}U and ^{226}Ra in riverine, estuarine and marine sediments of the Krka River, Croatia. *Environmental Radioactivity* 100:497-504.
- Ramasamy, V., Suresh, G., Meenakshisundaram, V. and V. Ponnusamy. 2011. Horizontal and vertical characterization of radionuclides and minerals in river sediments. *Applied Radiation and Isotopes* 69:184–195.
- Singh, J., Singh, H., Singh, S., Bajwa, B.S. and R.G., Sonkawade. 2009. Comparative study of natural radioactivity levels in soil samples from the Upper Siwaliks and Punjab, India using gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity* 100:94–98.

UNSCEAR 1988. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York

UNSCEAR 1993. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York

UNSCEAR 2000. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.

Wilson, W.F. 1994. A Guide to Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), USA : Penn Well Publishing Company.

http://gulfsci.usgs.gov/tampabay/data/2_biogeochemical_cycles/images/decaychain.gif (accessed May 1, 2011)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีเพิ่มเติม

ก.1 นิยามศัพท์เฉพาะ

นิวไคลด์ (Nuclide) คือ อะตอมที่ระบุสมบัติของนิวเคลียส โดยแสดงจำนวนโปรตอน นิวตรอนอย่างชัดเจน

นิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclide) คือ นิวไคลด์ที่มีสภาพไม่เสถียร เกิดการสลายตัวเป็นนิวไคลด์ชนิดอื่นแล้วแผ่รังสีออกมา

ธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive element) คือ ธาตุที่มีสมบัติในการแผ่รังสีได้เอง เช่น ยูเรเนียม ทอเรียม โปแทสเซียม และเรเดียม เป็นต้น

กัมมันตภาพ (Activity) คือ การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลา หน่วยที่มักใช้คือ เบ็กเคอเรล (Bq)

สารกัมมันตรังสี (Radioactive materials) เป็นคำคุณศัพท์ หมายถึง เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสี ตัวอย่างเช่น สารกัมมันตรังสี หมายถึง วัสดุที่สามารถแผ่รังสีออกมาได้ด้วยตนเอง หรือกากกัมมันตรังสี หมายถึง ขยะหรือของเสียที่เจือปนด้วยสารกัมมันตรังสี

กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) คือ ปรากฏการณ์ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวและมีการปล่อยรังสีออกมาด้วย เช่น รังสีแกมมา รังสีแอลฟา และรังสีบีตา โดยทั่วไปการสลายตัวจะให้นิวไคลด์ใหม่

การได้รับรังสี (Exposure) คือ การที่มนุษย์ได้รับรังสีที่แผ่มาจากภายนอกร่างกาย หรือจากการได้รับสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย

สมมูล (Equivalent, e) คือ มีค่าเทียบเท่าหรือเท่ากัน เช่น ความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล คือ ความเข้มข้นที่เทียบเท่ายูเรเนียม เพราะค่ากัมมันตภาพที่วัดเป็นของไอโซโทปลูกซึ่งสมมูลให้เข้าสู่สภาวะสมดุลกัมมันตภาพของการสลายตัวแบบสมดุลถาวรกับไอโซโทปแม่

ก.2 นิวเคลียสของอะตอม

อะตอมของธาตุใดๆ ประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุบวกล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ ในนิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาคหลักสองชนิดคือ โปรตอนและนิวตรอน (รวมเรียกนิวคลีออน) โปรตอนมีประจุเท่ากับ $+e$ (e คือ ขนาดประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว) และมีมวลประมาณหนึ่งเอเอ็มยู (atomic mass unit, amu) จำนวนของโปรตอนในนิวเคลียสเรียกว่าเลขอะตอม (atomic number) เขียนแทนด้วย Z ค่า Z นี้จะเป็นตัวกำหนดชนิดของธาตุ สำหรับนิวตรอนไม่มีประจุไฟฟ้าและมีมวลใกล้เคียงกับโปรตอน จำนวนของโปรตอนและนิวตรอนหรือนิวคลีออนในนิวเคลียสเรียกว่าเลขมวล (mass number) เขียนแทนด้วย A สัญลักษณ์ของนิวเคลียสของธาตุ X ใดๆ เขียนได้เป็น ${}^A_Z X$ ธาตุที่มีค่า Z เท่ากันแต่ค่า A ต่างกันจะถูกเรียกเป็นไอโซโทปของกันและกัน

นิวเคลียสของธาตุบางชนิดไม่เสถียรและพยายามจะปรับตัวเองให้อยู่ในสภาพเสถียร โดยการสลายตัว (disintegrate หรือ decay) ปล่อนอนุภาคบางอย่างออกมา ซึ่งเรียกว่าการแผ่กัมมันตภาพรังสี รังสีที่แผ่ออกมาที่สำคัญมีสามชนิด คือ รังสีแอลฟาหรืออนุภาคแอลฟา (α -particles) รังสีบีตาหรืออนุภาคบีตา (β -particles) และรังสีแกมมา (γ -rays)

รังสีแอลฟา คือ นิวเคลียสของฮีเลียมแทนด้วยสัญลักษณ์ ${}^4_2 He$ รังสีแอลฟามีประจุไฟฟ้าเท่ากับ $+2$ และมีมวลประมาณ 4 amu ตามปกติรังสีแอลฟาถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสขนาดใหญ่และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ รังสีชนิดนี้มีอำนาจทะลุผ่านน้อย เช่น สามารถวิ่งผ่านอากาศได้เพียงไม่กี่เซนติเมตร

รังสีบีตา มีสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโพสิตรอน ทั้งคู่มีมวลหนึ่งเท่ากัน แต่ประจุของโพสิตรอนเป็นบวกเท่ากับโปรตอน ตามปกติพลังงานจลน์ของรังสีบีตาน้อยกว่ารังสีแอลฟา แต่เนื่องจากมวลน้อยมากจึงมีความเร็วสูงใกล้เคียงแสงและมีอำนาจทะลุผ่านมากกว่ารังสีแอลฟามาก อย่างไรก็ตามรังสีนี้สามารถเคลื่อนผ่านทรายไปได้เพียงสองสามเซนติเมตรเท่านั้น

รังสีแกมมา คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก ไม่มีประจุไฟฟ้า และมีความเร็วเท่าแสง รังสีนี้เกิดขึ้นหลังจากนิวเคลียสสลายตัวให้นิวเคลียสตัวใหม่ซึ่งอาจอยู่ในสถานะกระตุ้น เมื่อนิวเคลียสที่อยู่ในสถานะกระตุ้นกลับคืนสู่สถานะปกติจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา ด้วยเหตุนี้รังสีแกมมามักจะติดตามการสลายตัวให้รังสีแอลฟาและบีตาเสมอ

รังสีแกมมามีอำนาจทะลุผ่านสูง โดยที่ความเข้มของรังสีแกมมาในตัวกลางที่พุ่งผ่านไปมีค่าลดลงแบบชี้กำลัง (exponential) กับระยะทาง เพื่อใช้อ้างอิงในการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อาจกล่าวได้ว่ารังสีแกมมาอาจถูกดูดกลืนด้วยหินหนา 1-2 เมตร

ก.3 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

รังสีแกมมาซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกระทบสสารจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นมากมาย แต่อันตรกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปฏิกิริยาคอมป์ตัน (Compton effect) และแพร์โปรดักชัน (Pair production)

ก.3.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก

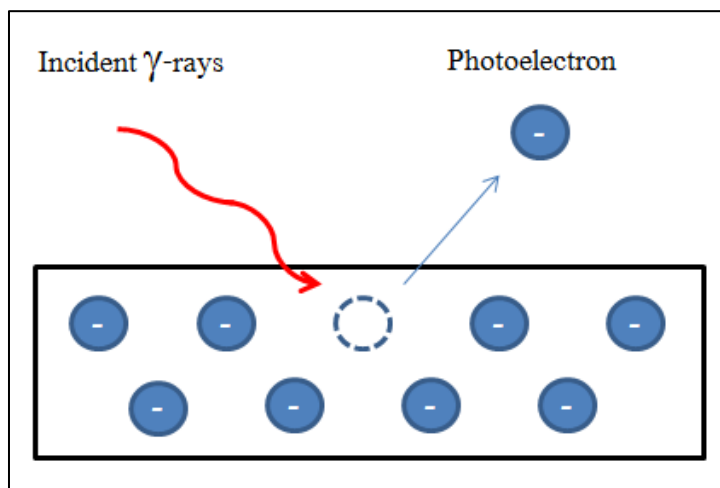
ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้น เมื่อรังสีแกมมาหรือโฟตอนกระทบสสารแล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนของสสาร ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) (ภาพประกอบ ก.1) โดยมีพลังงานจลน์ (T_e) เท่ากับผลต่างของพลังงานของแกมมาโฟตอน ($h\nu_\gamma$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม (BE_e)

ดังสมการ ก.1

$$T_e = h\nu_\gamma - BE_e \quad (\text{ก.1})$$

การที่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมนี้ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นมา ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นพลังงานถัดไปตกลงมาแทนที่ที่ว่างนั้น ทำให้เกิดการคายรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristics x-ray) ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาแทน รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นสามารถที่จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นที่สูงกว่าในอะตอม แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาอีก เรียกว่า ออร์เจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งทั้งอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ที่เป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาดังกล่าวสามารถถูกดูดกลืนได้โดยผลึกที่ใช้เป็นหัววัดรังสี เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกในอะตอมสามารถดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาได้หมด จึงนิยมใช้ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกใน

การอธิบายการดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาในการทำการทดลอง ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก จะมีบทบาทขึ้นอีกในกรณีที่รังสีแกมมาที่เข้ามา มีพลังงานต่ำๆ (น้อยกว่า 250 keV) และความน่าจะเป็นในการเกิดอันตรกิริยาจะขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวดูดกลืน



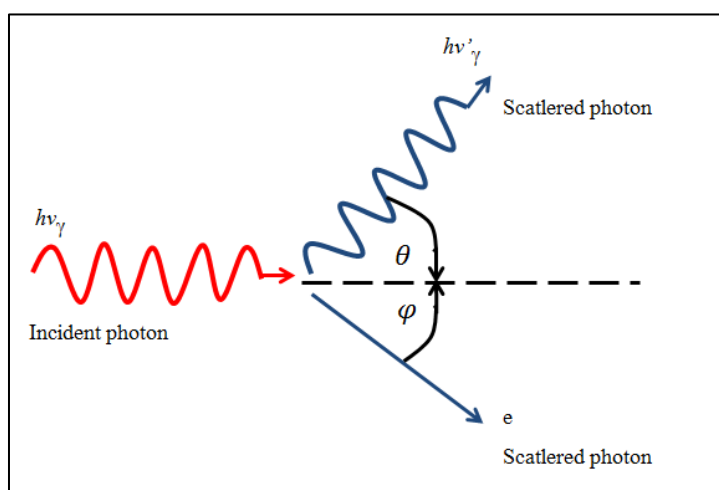
ภาพประกอบ ก.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ก.3.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ในปรากฏการณ์คอมป์ตัน แกมมาโฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารแบบยืดหยุ่น ในการชนแบบนี้ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย แกมมาโฟตอนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนที่ถูกชน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาในทิศทางมุม φ กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของแกมมาโฟตอน เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนแกมมาโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไป โดยทำมุม θ กับทิศทางเดิม (ภาพประกอบ ก.2) โดยพลังงานของแกมมาโฟตอนที่เข้าชน ($h\nu_\gamma$) ที่พลังงานของแกมมาโฟตอนที่สะท้อนออกไป ($h\nu'_\gamma$) มีความสัมพันธ์ดังสมการ ก.2

$$h\nu'_\gamma = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/mc^2)(1 - \cos\theta)} \quad (\text{ก.2})$$

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปรากฏการณ์คอมป์ตัน ก็คือ โฟโตอิเล็กทริกเป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่มาตกกระทบ ส่วนปรากฏการณ์คอมป์ตัน เป็นเพียงแต่ลดขนาดของพลังงานเดิมของโฟตอน โฟตอนที่มีพลังงานลดต่ำลงนี้ อาจจะทำอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกได้อีกเนื่องจากอันตรกิริยานี้เกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ



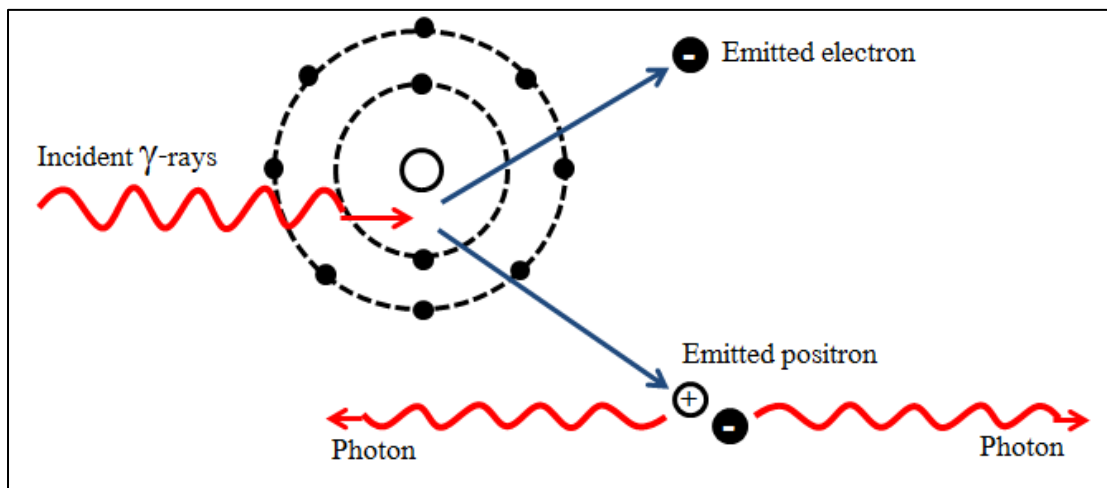
ภาพประกอบ ก.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาโฟตอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ก.3.3 แพร่โปรดักชัน

อันตรกิริยาแพร่โปรดักชันหรือการผลิตสารคู่เป็นส่วนหนึ่งของการดูดกลืนรังสีแกมมาโฟตอน เกิดขึ้นได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่าง 1.02 MeV วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม โฟตอนจะหาย โดยใช้พลังงานไปในการสร้างอิเล็กตรอนกับโพสิตรอน (Positron) ขึ้นมาคู่หนึ่ง เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนมีค่าเทียบเท่ากับพลังงาน 1.02 MeV ดังนั้นแกมมาโฟตอนต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า 1.02 MeV จึงสามารถทำให้เกิดแพร่โปรดักชันได้ ถ้าแกมมาโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV พลังงานส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน มีบางส่วนเท่านั้นที่ถ่ายเทให้กับนิวเคลียสของอะตอม

หลังจากการเกิดแพร่โปรดักชัน โพสิตรอนอาจจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนอื่น แล้วให้โฟตอน 2 ตัว ซึ่งมีพลังงานแต่ละ 0.51 MeV เรียกว่า การประลัย (Annihilation) (ภาพประกอบ

ก.3) จะเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งกันและกัน (180 องศา) และอาจจะเกิดหรือไม่เกิด อันตรกิริยากับผลึกของตัวดูดกลืนก็ได้



ภาพประกอบ ก.3 การเกิดเพอร์โปรดักชันและการประลัย

ภาคผนวก ข

ระบบวิเคราะห์สเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัด HPGe

ข.1 ระบบวิเคราะห์สเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา หัววัด HPGe

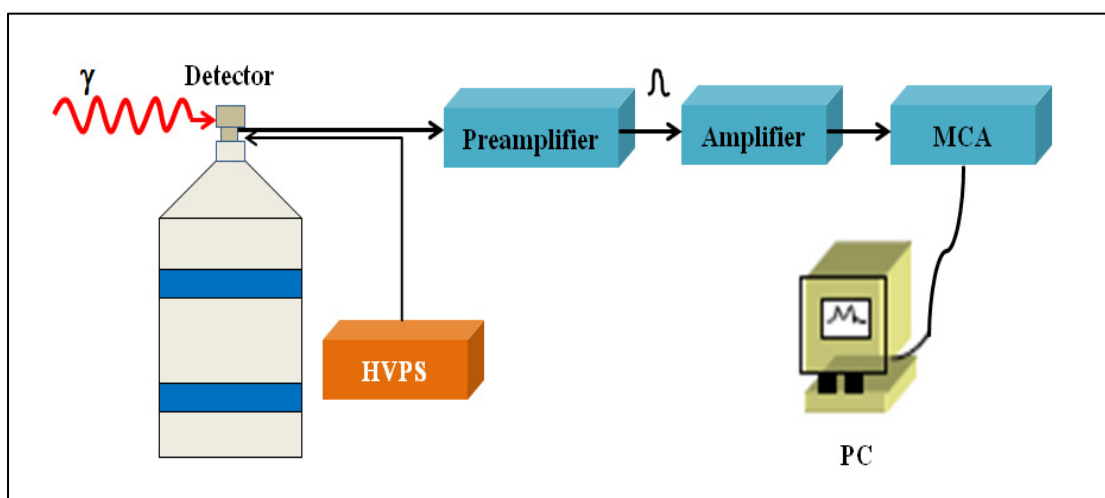
ในการตรวจวัดรังสีแกมมาในธรรมชาติ วิธีการที่ใช้จะอาศัยคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างรังสีกับวัตถุ ผลที่เกิดขึ้นก็คือ อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรือถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้น (Excitation) หัววัดรังสีที่อาศัยหลักการแตกตัวเป็นไอออน ได้แก่ หัววัดแบบก๊าซทุกชนิดและหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ ส่วนหัววัดที่ใช้หลักการกระตุ้น ได้แก่ หัววัดแบบเปล่งแสงวาบ สัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสีจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์วัดของระบบวัดรังสีเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา หัววัดรังสีแกมมาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิดคือ หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector) และหัววัดแบบเปล่งแสงวาบ (Scintillation detector) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะขอกกล่าวเพียงหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ

ข.1.1 หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ

หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ เป็นหัววัดที่ได้รับความนิยมสูงมาก ซึ่งข้อได้เปรียบสำคัญของหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ ก็คือการจำแนกพลังงาน โดยสามารถจำแนกพลังงานของอนุภาคออกจากสเปกตรัมที่มีหลายพลังงานได้ดี หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด สามารถวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำ เช่น หัววัดแบบ lithium-drifted silicon หรือ Si(Li) ส่วนหัววัดที่เหมาะสมแก่การใช้วัดรังสีแกมมาพลังงานสูง เช่น หัววัดแบบ lithium-drifted germanium หรือ Ge(Li) และหัววัดแบบ High purity germanium หรือ HPGe

หลักการโดยย่อของหัววัดชนิดนี้ จะใช้ผลึกของสารกึ่งตัวนำซึ่งต้องแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน แล้วใช้ตรวจวัดรังสี เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในผลึกจะทำให้เกิดไอออนที่มีประจุบวกและลบ ได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮล (Holes) จำนวนเท่าๆ กัน และเมื่อนำ

ขั้วไฟฟ้าสองขั้วมาต่อเข้ากับผลึกคนละด้านแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ผลึกนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้นจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะปฏิกิริยากับพลังงานของรังสีที่สูญเสียไปในผลึกนั้น ด้วยเหตุนี้ เมื่อต่อหัววัดชนิดนี้เข้ากับระบบขยายสัญญาณและ MCA (ภาพประกอบ ข.1) เราจะสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีได้จากข้อมูลที่ตรวจวัดออกมาในรูปของกราฟที่เขียนขึ้นระหว่าง จำนวนช่องของ MCA (Channel number) หรือพลังงานรังสีแกมมา (Gamma ray energy) และ จำนวนนับที่นับได้จากหัววัดในแต่ละช่องของ MCA (Counts rate) เรียกว่า สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา (Gamma ray energy spectrum) ดังภาพประกอบ ข.2



ภาพประกอบ ข.1 ระบบวัดรังสีแกมมาโดยใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ

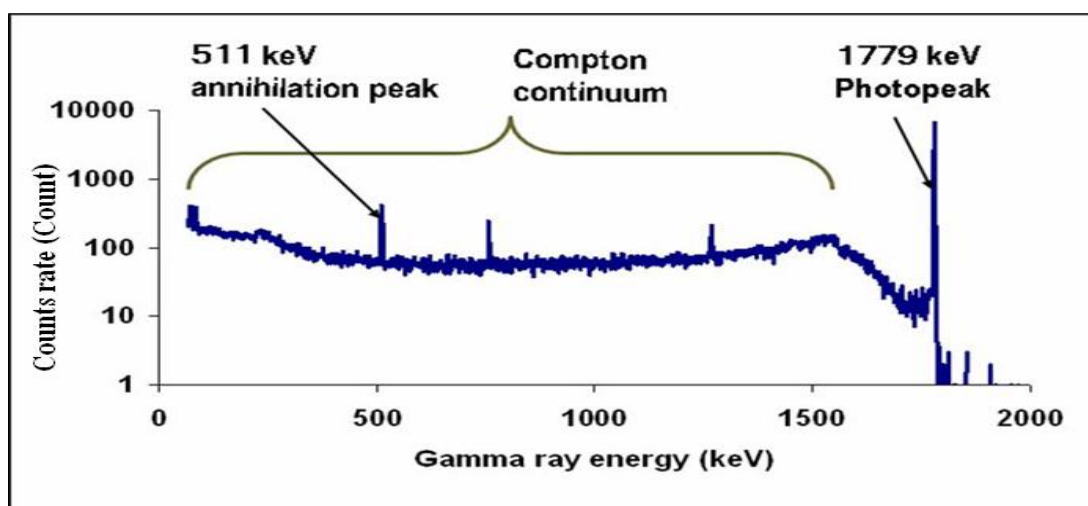
ข.1.2 อุปกรณ์ของระบบวัดรังสี

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Power Supply : HVPS) จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถปรับค่าได้ และจะต้องมีเสถียรภาพในการรักษาศักย์ไฟฟ้าทางเอาต์พุตให้คงที่ ณ จุดที่ตั้งไว้ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อม หรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าในสาย 220 โวลต์ สำหรับหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ แหล่งจ่ายกำลังศักย์สูงควรปรับค่าได้จาก 0 ถึง 5,000 โวลต์ และให้กระแสได้จาก 0 ถึง 100 แอมแปร์

2. ภาคขยายส่วนหน้า (Preamplifier) จะทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัด แล้วเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งมีขนาดที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนประจุ

3. ภาคขยายหลัก (Amplifier) เป็นส่วนที่รับสัญญาณพัลส์จากภาคขยายส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งรูปของสัญญาณ พร้อมกับขยายขนาดของสัญญาณให้เหมาะกับการนำไปวิเคราะห์ค่าความสูง อัตราการขยายแรงดัน (Voltage gain) มี 2 แบบ คือ อัตราขยายหยาบ (Coarse gain) และอัตราขยายละเอียด (Fine gain)

4. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel Analyzer : MCA) จะบันทึกและเก็บพัลส์ที่ขึ้นอยู่กับความสูง หน่วยเก็บแต่ละหน่วยจะเรียกว่าช่อง ความสูงของพัลส์ จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ในรูปของปฏิภาคกับพลังงานของอนุภาคที่เข้าสู่หัววัด แต่ละพัลส์จะถูกเก็บในช่องเฉพาะที่ตรงกับกับพลังงานนั้นๆ การแจกแจงของพัลส์ในช่องก็คือ ภาพของการแจกแจงพลังงานของอนุภาค เมื่อสิ้นสุดเวลาการวัดสเปกตรัมที่ถูกบันทึกจะแสดงผลที่จอภาพของ MCA และแกนนอนคือหมายเลขช่องหรือพลังงานของรังสีแกมมา ส่วนแกนตั้งจะเป็นจำนวนอนุภาคที่ถูกบันทึกต่อช่อง



ภาพประกอบ ข.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดด้วยหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะของสเปกตรัมของรังสีแกมมานั้น จะเริ่มต้นจากรังสีที่มีพลังงานต่ำๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตรวจวัด ได้แก่ รังสีเอ็กซ์ โฟตอนที่สะท้อนกลับ (Backscattered photon)

ขอบของคอมพ์ตัน (Compton edge; CE) หรือเรียกรวมๆ ว่าบริเวณต่อเนื่องแบบคอมพ์ตัน (Compton continuum) ซึ่งส่วนที่สำคัญที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ พีคพลังงานของรังสีแกมมา (Photo peak หรือ Full Energy Peak ; FEP) พลังงานที่พีคดังกล่าวนี้เป็นพลังงานของ รังสีแกมมาจริง เราจะทำการวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา โดยใช้พีคที่เรียกว่า โฟโตพีค (Photo peak)

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงข้อมูลต่างๆ

ตาราง ค.1 ผลการแยกขนาดทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา ด้วยเครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อน จุดเก็บตัวอย่างที่ 1-13

Site	Sample	Site coordinate(UTM)		ขนาด > 0.3 mm		ขนาด 0.150-0.3 mm		ขนาด 0.106-0.150 mm		ขนาด 0.075-0.106 mm		ขนาด < 0.075 mm	
		E	N	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%
คลองเหล	S1	437031	970796	2368.0	96.9	31.4	1.3	11.1	0.5	9.5	0.4	24.9	1.0
คลองตะกั่วป่า	S2	435477	969970	2396.6	88.7	105.2	3.9	56.7	2.1	26.1	1.0	115.9	4.3
	S3	432984	970218	1552.1	74.6	274.1	13.2	130.3	6.3	47.7	2.3	76.9	3.7
	S4	430875	972521	1547.2	76.7	239.0	11.9	120.6	6.0	41.8	2.1	68.2	3.4
	S5	431024	973072	524.7	25.7	1273.7	62.3	177.5	8.7	42.5	2.1	25.3	1.2
	S6	431318	974004	743.9	37.4	415.5	20.9	354.7	17.9	177.4	8.9	295.5	14.9
	S7	431143	975222	590.7	32.9	1033.1	57.5	107.5	6.0	32.0	1.8	32.6	1.8
	S8	430783	975872	1911.8	94.8	67.5	3.3	10.7	0.5	7.8	0.4	18.2	0.9
	S9	430578	976691	1784.2	93.6	109.5	5.7	5.5	0.3	2.6	0.1	3.5	0.2
	S10	430073	977306	1916.6	95.6	65.7	3.3	8.1	0.4	4.6	0.2	10.8	0.5
	S11	429827	978374	1900.9	95.9	72.7	3.7	4.7	0.2	2.3	0.1	2.5	0.1
	S12	428556	979033	1462.1	81.8	203.9	11.4	63.5	3.5	21.6	1.2	37.0	2.1
	S13	428445	980097	1916.8	99.4	3.9	0.2	2.0	0.1	2.0	0.1	3.7	0.2

ตาราง ค.2 ผลการแยกขนาดทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขา ด้วยเครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อน จุดเก็บตัวอย่างที่ 14-28

Site	Sample	Site coordinate(UTM)		ขนาด > 0.3 mm		ขนาด 0.150-0.3 mm		ขนาด 0.106-0.150 mm		ขนาด 0.075-0.106 mm		ขนาด < 0.075 mm	
		E	N	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%
	S14	428609	981081	1977.4	99.7	2.9	0.1	0.4	0.0	0.3	0.0	1.6	0.1
	S15	428205	982094	1266.0	71.5	259.4	14.6	129.9	7.3	40.2	2.3	76.0	4.3
	S16	428002	982663	32.8	2.9	272.4	23.9	246.6	21.6	151.0	13.2	437.4	38.4
	S17	426940	982674	190.9	14.0	189.1	13.9	342.8	25.1	177.9	13.0	464.6	34.0
	S18	425930	982757	1087.0	73.6	189.1	12.8	67.7	4.6	24.5	1.7	107.7	7.3
	S19	424943	983751	202.8	27.8	145.4	19.9	116.2	15.9	70.6	9.7	194.9	26.7
	S20	422768	984112	288.1	39.8	123.5	17.1	86.0	11.9	52.3	7.2	173.2	24.0
	S21	421698	983002	58.9	3.3	257.0	14.3	830.0	46.3	306.0	17.1	340.2	19.0
คลองปากเกาะ	S22	420517	980518	24.5	1.9	142.1	11.1	645.2	50.3	234.2	18.3	237.3	18.5
คลองบางม่วง	S23	420676	979428	1448.7	85.4	174.5	10.3	41.1	2.4	11.7	0.7	20.9	1.2
	S24	421776	977920	1927.5	98.1	30.5	1.6	1.8	0.1	0.9	0.0	3.9	0.2
	S25	423802	977273	1679.9	98.4	20.6	1.2	2.8	0.2	1.3	0.1	2.0	0.1
	S26	424586	976380	1261.1	62.9	536.0	26.7	118.6	5.9	42.5	2.1	45.9	2.3
คลองปี	S27	425656	976160	1372.9	68.2	482.8	24.0	79.8	4.0	32.5	1.6	45.6	2.3
	S28	427168	975876	1705.5	84.5	199.0	9.9	53.9	2.7	20.1	1.0	39.4	2.0

ตาราง ค.3 ผลการแยกขนาดทรายชายหาด ด้วยเครื่องแยกขนาดเม็ดทรายและตะแกรงร่อน จุดเก็บตัวอย่างที่ 1-10

Site	Sample	Site coordinate(UTM)		ขนาด > 0.3 mm		ขนาด 0.150-0.3 mm		ขนาด 0.106-0.150 mm		ขนาด 0.075-0.106 mm		ขนาด < 0.075 mm	
		E	N	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%	Mass(g)	%
หาดทับตะวัน	SB1	417816	973881	373.6	74.8	36.9	7.4	73.3	14.7	14.7	2.9	1.0	0.2
บ้านสนามบิน	SB2	419319	976528	414.7	83.0	82.5	16.5	2.1	0.4	0.2	0.0	0.2	0.0
ท่าเทียบเรือบ้านน้ำเค็ม	SB3	419225	979422	213.4	42.7	252.1	50.4	31.0	6.2	3.0	0.6	0.3	0.1
สถานีอนามัยเกาะคอเขา	SB4	418855	983045	386.4	77.4	108.5	21.7	3.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.0
บ้านทุ่งตึก	SB5	417677	984919	370.1	74.1	118.2	23.7	9.3	1.9	1.6	0.3	0.3	0.1
ก่อนถึงบ้านบางเนียง	SB6	418986	989797	227.0	45.5	251.0	50.3	19.4	3.9	1.4	0.3	0.3	0.1
บ้านนอกนา	SB7	417931	995085	133.8	26.8	341.5	68.4	21.7	4.4	2.0	0.4	0.4	0.1
ท่าเทียบเรือบ้านเมืองใหม่	SB8	424057	994645	77.0	17.2	90.1	20.1	72.2	16.1	28.6	6.4	179.7	40.1
หาดอ่าวเคย	SB9	431843	1028192	405.8	81.3	74.6	15.0	15.0	3.0	3.1	0.6	0.3	0.1
หาดประพาส	SB10	433624	1035179	165.6	33.3	288.6	58.1	37.4	7.5	4.6	0.9	0.5	0.1

ตาราง ค.4 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขาที่ 1-14

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			กิตตามัดส่วนจริง		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
S1	86 ± 9	109 ± 12	534 ± 38	77 ± 9	121 ± 12	586 ± 41	70 ± 9	127 ± 12	482 ± 37	86	110	534
S2	70 ± 8	65 ± 9	519 ± 36	91 ± 13	159 ± 16	1106 ± 65	80 ± 11	147 ± 16	809 ± 57	72	75	570
S3	74 ± 9	66 ± 9	489 ± 37	120 ± 13	234 ± 17	1186 ± 61	172 ± 14	378 ± 23	828 ± 53	89	118	645
S4	65 ± 9	90 ± 11	450 ± 37	134 ± 9	213 ± 11	1140 ± 63	212 ± 16	337 ± 24	854 ± 56	86	125	595
S5	91 ± 12	190 ± 17	1407 ± 65	156 ± 13	233 ± 18	950 ± 55	651 ± 289	1084 ± 37	876 ± 63	156	250	1065
S6	98 ± 9	109 ± 13	485 ± 37	120 ± 14	249 ± 19	1430 ± 75	178 ± 17	380 ± 25	945 ± 60	125	228	961
S7	72 ± 10	119 ± 13	929 ± 49	90 ± 10	142 ± 13	1035 ± 56	178 ± 15	441 ± 23	804 ± 58	87	145	992
S8	65 ± 8	94 ± 12	359 ± 9	123 ± 8	134 ± 14	697 ± 45	204 ± 15	426 ± 21	660 ± 47	69	100	376
S9	69 ± 8	92 ± 10	559 ± 38	208 ± 13	163 ± 15	638 ± 46	131 ± 11	186 ± 18	753 ± 46	77	97	564
S10	68 ± 8	77 ± 9	707 ± 42	78 ± 9	106 ± 13	763 ± 46	75 ± 10	179 ± 14	763 ± 45	68	79	709
S11	70 ± 8	103 ± 11	521 ± 37	79 ± 9	150 ± 14	897 ± 51	83 ± 10	98 ± 13	1029 ± 56	71	105	537
S12	84 ± 8	122 ± 12	397 ± 32	258 ± 18	429 ± 27	1004 ± 63	314 ± 22	831 ± 34	789 ± 55	118	191	500
S13	86 ± 9	98 ± 10	402 ± 33	82 ± 10	93 ± 21	592 ± 69	159 ± 21	232 ± 26	661 ± 78	86	98	404
S14	83 ± 9	104 ± 11	478 ± 35	97 ± 22	82 ± 22	1304 ± 124	191 ± 23	270 ± 36	1300 ± 129	83	104	480

ตาราง ค.5 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองตะกั่วป่าและคลองสาขาที่ 15-28

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			คิดตามสัดส่วนจริง		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
S15	82 ± 8	80 ± 11	798 ± 46	128 ± 13	233 ± 19	980 ± 57	194 ± 16	397 ± 23	870 ± 54	99	134	843
S16	157 ± 18	377 ± 28	1087 ± 77	136 ± 16	302 ± 23	1130 ± 71	150 ± 16	324 ± 25	959 ± 67	144	315	1041
S17	208 ± 19	583 ± 36	864 ± 72	205 ± 19	430 ± 29	1013 ± 70	203 ± 19	482 ± 29	934 ± 66	205	476	955
S18	77 ± 9	151 ± 13	345 ± 35	133 ± 15	261 ± 20	556 ± 49	121 ± 14	283 ± 24	651 ± 52	91	182	409
S19	84 ± 14	249 ± 24	683 ± 59	95 ± 15	326 ± 19	788 ± 63	116 ± 15	254 ± 21	599 ± 55	100	278	690
S20	80 ± 11	155 ± 15	518 ± 46	90 ± 13	182 ± 20	699 ± 58	95 ± 13	191 ± 21	742 ± 58	87	174	640
S21	82 ± 11	174 ± 16	442 ± 45	75 ± 9	109 ± 14	554 ± 46	115 ± 13	207 ± 20	605 ± 49	90	146	568
S22	103 ± 13	184 ± 19	475 ± 49	82 ± 12	148 ± 16	547 ± 47	191 ± 18	313 ± 25	569 ± 52	122	210	554
S23	91 ± 9	63 ± 9	239 ± 26	126 ± 12	182 ± 16	457 ± 43	203 ± 15	252 ± 19	609 ± 48	98	81	274
S24	107 ± 10	111 ± 12	199 ± 24	71 ± 9	120 ± 13	379 ± 35	70 ± 9	96 ± 11	205 ± 24	107	112	202
S25	109 ± 11	135 ± 12	395 ± 35	114 ± 12	220 ± 15	606 ± 43	73 ± 9	134 ± 13	295 ± 30	109	136	398
S26	95 ± 10	122 ± 13	387 ± 37	1318 ± 36	1079 ± 40	698 ± 72	3901 ± 62	2615 ± 64	1039 ± 84	663	545	517
S27	98 ± 10	117 ± 12	388 ± 36	149 ± 13	240 ± 18	627 ± 47	437 ± 21	535 ± 28	614 ± 49	125	168	463
S28	84 ± 9	133 ± 13	211 ± 27	281 ± 19	449 ± 26	805 ± 56	440 ± 24	780 ± 33	725 ± 55	119	192	301

ตาราง ค.6 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K จากจุดเก็บตัวอย่างทรายชายหาดที่ 1-10

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			คิดตามสัดส่วนจริง		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
SB1	13 ± 3	13 ± 3	13 ± 3	9 ± 2	19 ± 7	238 ± 27	49 ± 7	93 ± 11	190 ± 24	13	23	102
SB2	10 ± 2	10 ± 2	10 ± 2	14 ± 3	20 ± 5	71 ± 16				11	13	72
SB3	17 ± 4	17 ± 4	17 ± 4	12 ± 2	9 ± 3	92 ± 18				14	17	89
SB4	9 ± 2	9 ± 2	9 ± 2	14 ± 3	12 ± 4	44 ± 13				10	21	70
SB5	25 ± 5	25 ± 5	25 ± 5	53 ± 7	64 ± 9	75 ± 18				32	30	73
SB6	13 ± 2	13 ± 2	13 ± 2	9 ± 2	16 ± 5	57 ± 16				11	16	52
SB7	22 ± 4	22 ± 4	22 ± 4	16 ± 4	24 ± 6	49 ± 14				18	22	51
SB8	78 ± 11	78 ± 11	78 ± 11	79 ± 12	124 ± 16	502 ± 48	91 ± 12	137 ± 18	724 ± 59	84	130	594
SB9	25 ± 4	25 ± 4	25 ± 4	17 ± 4	18 ± 5	159 ± 22				23	24	254
SB10	41 ± 7	41 ± 7	41 ± 7	29 ± 3	56 ± 8	92 ± 16				33	62	104

ตาราง ก.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 1-14

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			คิดตามสัดส่วนจริง		
	D	AEDE _{in}	AEDE _{out}	D	AEDE _{in}	AEDE _{out}	D	AEDE _{in}	AEDE _{out}	D	AEDE _{in}	AEDE _{out}
	(nGy/h)	(μ Sv)	(μ Sv)	(nGy/h)	(μ Sv)	(μ Sv)	(nGy/h)	(μ Sv)	(μ Sv)	(nGy/h)	(μ Sv)	(μ Sv)
S1	128 ± 13	628 ± 64	157 ± 16	133 ± 13	655 ± 65	164 ± 16	129 ± 13	632 ± 64	158 ± 16	128	629	157
S2	93 ± 11	458 ± 54	114 ± 13	184 ± 18	903 ± 91	226 ± 23	160 ± 17	783 ± 83	196 ± 21	102	502	125
S3	95 ± 11	464 ± 54	116 ± 14	246 ± 19	1209 ± 92	302 ± 23	342 ± 23	1679 ± 110	420 ± 28	139	682	170
S4	103 ± 13	507 ± 62	127 ± 15	238 ± 14	1168 ± 67	292 ± 17	337 ± 25	1654 ± 121	414 ± 30	140	687	172
S5	215 ± 18	1056 ± 89	264 ± 22	252 ± 19	1239 ± 94	310 ± 23	992 ± 37	4866 ± 180	1216 ± 45	267	1312	328
S6	131 ± 13	642 ± 66	161 ± 16	266 ± 21	1303 ± 104	326 ± 26	351 ± 25	1721 ± 123	430 ± 31	235	1155	289
S7	144 ± 14	705 ± 71	176 ± 18	170 ± 15	835 ± 72	209 ± 18	382 ± 23	1875 ± 115	469 ± 29	169	830	207
S8	102 ± 13	499 ± 62	125 ± 16	167 ± 14	818 ± 67	205 ± 17	379 ± 22	1858 ± 106	465 ± 27	108	529	132
S9	111 ± 12	544 ± 57	136 ± 14	222 ± 17	1087 ± 83	272 ± 21	204 ± 18	1003 ± 88	251 ± 22	118	579	145
S10	108 ± 11	528 ± 54	132 ± 14	132 ± 14	647 ± 69	162 ± 17	175 ± 15	856 ± 75	214 ± 19	109	535	134
S11	117 ± 12	572 ± 58	143 ± 14	165 ± 15	807 ± 74	202 ± 19	140 ± 15	688 ± 73	172 ± 18	119	582	145
S12	129 ± 13	632 ± 61	158 ± 15	420 ± 27	2061 ± 133	515 ± 33	680 ± 33	3336 ± 162	834 ± 41	190	934	234
S13	116 ± 12	568 ± 57	142 ± 14	118 ± 20	581 ± 100	145 ± 25	241 ± 29	1183 ± 142	296 ± 36	116	570	142
S14	121 ± 12	595 ± 60	149 ± 15	148 ± 29	728 ± 140	182 ± 35	305 ± 38	1498 ± 185	374 ± 46	121	596	149

ตาราง ก.8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 15-28

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			คิดตามสัดส่วนจริง		
	D (nGy/h)	AEDE _{in} (μ Sv)	AEDE _{out} (μ Sv)	D (nGy/h)	AEDE _{in} (μ Sv)	AEDE _{out} (μ Sv)	D (nGy/h)	AEDE _{in} (μ Sv)	AEDE _{out} (μ Sv)	D (nGy/h)	AEDE _{in} (μ Sv)	AEDE _{out} (μ Sv)
S15	119 ± 12	585 ± 60	146 ± 15	241 ± 20	1181 ± 97	295 ± 24	366 ± 24	1795 ± 117	449 ± 29	162	795	199
S16	346 ± 28	1697 ± 140	424 ± 35	292 ± 24	1433 ± 118	358 ± 30	305 ± 25	1496 ± 123	374 ± 31	300	1473	368
S17	484 ± 34	2376 ± 165	594 ± 41	397 ± 29	1946 ± 143	486 ± 36	424 ± 29	2081 ± 142	520 ± 35	422	2069	517
S18	142 ± 13	694 ± 66	174 ± 16	242 ± 21	1188 ± 103	297 ± 26	254 ± 23	1245 ± 113	311 ± 28	169	830	207
S19	218 ± 23	1067 ± 115	267 ± 29	274 ± 21	1343 ± 105	336 ± 26	232 ± 22	1138 ± 106	285 ± 26	243	1192	298
S20	152 ± 16	746 ± 78	187 ± 20	181 ± 20	888 ± 101	222 ± 25	190 ± 21	932 ± 105	233 ± 26	172	845	211
S21	161 ± 17	791 ± 82	198 ± 21	124 ± 14	606 ± 71	152 ± 18	203 ± 20	997 ± 99	249 ± 25	154	753	188
S22	179 ± 19	876 ± 95	219 ± 24	150 ± 17	737 ± 83	184 ± 21	301 ± 25	1477 ± 124	369 ± 31	206	1012	253
S23	90 ± 11	441 ± 55	110 ± 14	187 ± 17	919 ± 84	230 ± 21	271 ± 20	1331 ± 100	333 ± 25	106	519	130
S24	125 ± 13	614 ± 63	154 ± 16	121 ± 13	595 ± 66	149 ± 16	99 ± 11	486 ± 56	122 ± 14	125	614	153
S25	148 ± 14	728 ± 67	182 ± 17	211 ± 16	1035 ± 80	259 ± 20	127 ± 14	624 ± 67	156 ± 17	149	732	183
S26	134 ± 14	658 ± 68	165 ± 17	1290 ± 44	6326 ± 214	1582 ± 53	3425 ± 71	16803 ± 348	4201 ± 87	657	3221	805
S27	132 ± 14	648 ± 67	162 ± 17	240 ± 19	1179 ± 93	295 ± 23	551 ± 29	2702 ± 140	675 ± 35	179	876	219
S28	128 ± 13	628 ± 64	157 ± 16	435 ± 27	2134 ± 130	533 ± 33	705 ± 33	3456 ± 163	864 ± 41	183	900	225

ตาราง ก.9 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) และดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา (I_{γ_r}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 1-14

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm		คิดตามสัดส่วนจริง	
	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}
S1	284 ± 29	1.01 ± 0.10	296 ± 30	1.06 ± 0.10	288 ± 29	1.03 ± 0.10	284	2.33
S2	203 ± 24	0.73 ± 0.09	403 ± 41	1.47 ± 0.15	353 ± 38	1.27 ± 0.13	223	3.26
S3	207 ± 25	0.74 ± 0.09	546 ± 42	1.97 ± 0.15	776 ± 51	2.74 ± 0.18	306	3.56
S4	229 ± 28	0.82 ± 0.10	526 ± 30	1.89 ± 0.11	760 ± 55	2.68 ± 0.19	310	3.67
S5	470 ± 41	1.72 ± 0.14	563 ± 43	2.00 ± 0.15	2268 ± 83	7.88 ± 0.29	595	4.53
S6	290 ± 30	1.03 ± 0.11	586 ± 47	2.12 ± 0.17	794 ± 56	2.81 ± 0.20	524	4.61
S7	313 ± 32	1.14 ± 0.11	372 ± 33	1.35 ± 0.12	871 ± 53	3.07 ± 0.19	370	3.73
S8	227 ± 29	0.81 ± 0.10	368 ± 31	1.31 ± 0.11	863 ± 49	3.03 ± 0.17	241	2.82
S9	244 ± 26	0.88 ± 0.09	491 ± 38	1.72 ± 0.13	455 ± 40	1.62 ± 0.14	260	3.18
S10	233 ± 25	0.85 ± 0.09	288 ± 31	1.04 ± 0.11	390 ± 34	1.40 ± 0.12	236	3.17
S11	258 ± 26	0.92 ± 0.09	363 ± 34	1.31 ± 0.12	302 ± 33	1.11 ± 0.12	262	4.14
S12	289 ± 28	1.02 ± 0.10	949 ± 61	3.34 ± 0.22	1564 ± 75	5.47 ± 0.26	429	3.75
S13	257 ± 26	0.91 ± 0.09	260 ± 46	0.93 ± 0.16	541 ± 65	1.91 ± 0.23	258	2.83
S14	269 ± 27	0.96 ± 0.10	314 ± 63	1.16 ± 0.22	677 ± 84	2.42 ± 0.30	269	5.02

ตาราง ก.10 ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) และดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีแกมมา (I_{γ_r}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 15-28

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm		คิดตามสัดส่วนจริง	
	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}	Ra_{eq} (Bq/kg)	I_{γ_r}
S15	257 ± 27	0.94 ± 0.10	537 ± 44	1.92 ± 0.16	829 ± 54	2.92 ± 0.19	356	3.85
S16	781 ± 64	2.77 ± 0.23	654 ± 54	2.34 ± 0.19	687 ± 57	2.44 ± 0.20	674	5.12
S17	1108 ± 76	3.90 ± 0.27	898 ± 66	3.17 ± 0.23	965 ± 65	3.40 ± 0.23	958	5.81
S18	320 ± 30	1.13 ± 0.11	549 ± 47	1.93 ± 0.17	576 ± 52	2.03 ± 0.18	383	3.22
S19	492 ± 53	1.75 ± 0.19	622 ± 48	2.21 ± 0.17	526 ± 48	1.86 ± 0.17	550	3.62
S20	341 ± 36	1.21 ± 0.13	405 ± 46	1.45 ± 0.16	425 ± 48	1.52 ± 0.17	386	3.56
S21	364 ± 38	1.29 ± 0.13	274 ± 32	0.98 ± 0.11	457 ± 46	1.62 ± 0.16	343	2.94
S22	403 ± 44	1.42 ± 0.15	336 ± 38	1.20 ± 0.13	683 ± 57	2.39 ± 0.20	464	3.13
S23	199 ± 25	0.70 ± 0.09	422 ± 39	1.48 ± 0.14	610 ± 46	2.14 ± 0.16	235	2.53
S24	282 ± 29	0.98 ± 0.10	272 ± 30	0.96 ± 0.11	224 ± 26	0.78 ± 0.09	282	1.31
S25	332 ± 31	1.17 ± 0.11	476 ± 36	1.68 ± 0.13	288 ± 31	1.01 ± 0.11	334	1.80
S26	300 ± 31	1.06 ± 0.11	2914 ± 98	10.02 ± 0.34	7721 ± 160	26.43 ± 0.56	1480	6.36
S27	295 ± 31	1.04 ± 0.11	541 ± 42	1.91 ± 0.15	1250 ± 64	4.34 ± 0.23	401	3.04
S28	291 ± 29	1.02 ± 0.10	986 ± 60	3.45 ± 0.21	1611 ± 75	5.61 ± 0.26	416	3.48

ตาราง ค.11 ผลการวิเคราะห์ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 1-14

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm		คิดตามสัดส่วนจริง	
	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}
S1	1.00 ± 0.10	0.77 ± 0.08	1.01 ± 0.10	0.80 ± 0.08	0.97 ± 0.10	0.78 ± 0.08	1.00	0.77
S2	0.74 ± 0.09	0.55 ± 0.07	1.34 ± 0.15	1.09 ± 0.11	1.17 ± 0.13	0.95 ± 0.10	0.80	0.60
S3	0.76 ± 0.09	0.56 ± 0.07	1.80 ± 0.15	1.48 ± 0.11	2.56 ± 0.18	2.10 ± 0.14	1.07	0.83
S4	0.79 ± 0.10	0.62 ± 0.08	1.78 ± 0.11	1.42 ± 0.08	2.62 ± 0.19	2.05 ± 0.15	1.07	0.84
S5	1.52 ± 0.14	1.27 ± 0.11	1.94 ± 0.15	1.52 ± 0.12	7.89 ± 0.29	6.13 ± 0.22	2.03	1.61
S6	1.05 ± 0.11	0.78 ± 0.08	1.91 ± 0.17	1.58 ± 0.13	2.62 ± 0.20	2.14 ± 0.15	1.76	1.42
S7	1.04 ± 0.11	0.85 ± 0.09	1.25 ± 0.12	1.01 ± 0.09	2.83 ± 0.18	2.35 ± 0.14	1.24	1.00
S8	0.79 ± 0.10	0.61 ± 0.08	1.33 ± 0.10	0.99 ± 0.08	2.88 ± 0.17	2.33 ± 0.13	0.84	0.65
S9	0.85 ± 0.09	0.66 ± 0.07	1.89 ± 0.14	1.33 ± 0.10	1.58 ± 0.14	1.23 ± 0.11	0.91	0.70
S10	0.81 ± 0.09	0.63 ± 0.07	0.99 ± 0.11	0.78 ± 0.08	1.25 ± 0.12	1.05 ± 0.09	0.82	0.64
S11	0.89 ± 0.09	0.70 ± 0.07	1.19 ± 0.12	0.98 ± 0.09	1.04 ± 0.12	0.82 ± 0.09	0.90	0.71
S12	1.01 ± 0.10	0.78 ± 0.08	3.26 ± 0.21	2.56 ± 0.17	5.07 ± 0.26	4.22 ± 0.20	1.48	1.16
S13	0.93 ± 0.09	0.69 ± 0.07	0.92 ± 0.15	0.70 ± 0.12	1.89 ± 0.23	1.46 ± 0.18	0.93	0.70
S14	0.95 ± 0.10	0.73 ± 0.07	1.11 ± 0.23	0.85 ± 0.17	2.34 ± 0.29	1.83 ± 0.23	0.95	0.73

ตาราง ค.12 ผลการวิเคราะห์ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายคลองที่ 15-28

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm		คิดตามสัดส่วนจริง	
	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}
S15	0.92 ± 0.10	0.69 ± 0.07	1.80 ± 0.16	1.45 ± 0.12	2.76 ± 0.19	2.24 ± 0.15	1.23	0.96
S16	2.53 ± 0.22	2.11 ± 0.17	2.13 ± 0.19	1.77 ± 0.15	2.26 ± 0.20	1.86 ± 0.15	2.21	1.82
S17	3.56 ± 0.26	2.99 ± 0.21	2.98 ± 0.23	2.42 ± 0.18	3.16 ± 0.23	2.61 ± 0.18	3.14	2.59
S18	1.07 ± 0.11	0.87 ± 0.08	1.84 ± 0.17	1.48 ± 0.13	1.88 ± 0.18	1.55 ± 0.14	1.28	1.03
S19	1.56 ± 0.18	1.33 ± 0.14	1.94 ± 0.17	1.68 ± 0.13	1.73 ± 0.17	1.42 ± 0.13	1.76	1.49
S20	1.14 ± 0.13	0.92 ± 0.10	1.34 ± 0.16	1.09 ± 0.12	1.40 ± 0.17	1.15 ± 0.13	1.28	1.04
S21	1.21 ± 0.13	0.98 ± 0.10	0.94 ± 0.11	0.74 ± 0.09	1.54 ± 0.16	1.23 ± 0.12	1.17	0.93
S22	1.37 ± 0.15	1.09 ± 0.12	1.13 ± 0.13	0.91 ± 0.10	2.36 ± 0.20	1.84 ± 0.15	1.59	1.26
S23	0.78 ± 0.09	0.54 ± 0.07	1.48 ± 0.14	1.14 ± 0.10	2.20 ± 0.17	1.65 ± 0.12	0.90	0.64
S24	1.05 ± 0.10	0.76 ± 0.08	0.93 ± 0.11	0.73 ± 0.08	0.79 ± 0.09	0.60 ± 0.07	1.05	0.76
S25	1.19 ± 0.11	0.90 ± 0.08	1.59 ± 0.13	1.28 ± 0.10	0.97 ± 0.11	0.78 ± 0.08	1.20	0.90
S26	1.07 ± 0.11	0.81 ± 0.08	11.43 ± 0.36	7.87 ± 0.27	31.40 ± 0.60	20.86 ± 0.43	5.79	4.00
S27	1.06 ± 0.11	0.80 ± 0.08	1.86 ± 0.15	1.46 ± 0.11	4.56 ± 0.23	3.37 ± 0.17	1.42	1.08
S28	1.01 ± 0.10	0.78 ± 0.08	3.42 ± 0.21	2.66 ± 0.16	5.54 ± 0.27	4.35 ± 0.20	1.45	1.13

ตาราง ค.13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืน (D) ปริมาณรังสีสมมูลประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (AEDE) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายชายหาดที่ 1-10

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm			ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm			คิดตามสัดส่วนจริง		
	D (nGy/h)	AEDE _{out} (μ Sv)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	AEDE _{out} (μ Sv)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	AEDE _{out} (μ Sv)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	AEDE _{out} (μ Sv)	Ra_{eq} (Bq/kg)
SB1	21 ± 5	26 ± 7	48 ± 12	25 ± 6	31 ± 8	54 ± 14	87 ± 11	106 ± 13	197 ± 24	24	30	54
SB2	15 ± 4	18 ± 5	33 ± 9	21 ± 5	26 ± 6	47 ± 11				16	19	35
SB3	28 ± 6	34 ± 7	63 ± 13	15 ± 4	18 ± 5	32 ± 8				20	25	45
SB4	22 ± 4	27 ± 5	49 ± 9	16 ± 4	19 ± 5	35 ± 10				20	25	46
SB5	26 ± 6	32 ± 7	58 ± 13	66 ± 10	81 ± 12	151 ± 22				36	44	81
SB6	18 ± 4	22 ± 5	40 ± 9	16 ± 4	20 ± 5	36 ± 10				17	21	38
SB7	23 ± 6	28 ± 7	51 ± 13	24 ± 6	30 ± 7	55 ± 13				24	29	54
SB8	127 ± 16	156 ± 20	284 ± 37	132 ± 18	162 ± 22	295 ± 39	155 ± 19	190 ± 23	343 ± 42	142	174	315
SB9	39 ± 7	47 ± 8	83 ± 15	25 ± 6	31 ± 7	55 ± 12				36	44	77
SB10	71 ± 9	87 ± 11	162 ± 20	51 ± 7	62 ± 9	116 ± 16				57	70	130

ตาราง ค.14 ผลดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายใน (H_{in}) และนอกร่างกาย (H_{ex}) จากจุดเก็บตัวอย่างทรายชายหาดที่ 1-10

Sample	ขนาดตัวอย่าง > 0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง 0.106-0.3 mm		ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm		ตามสัดส่วนจริง	
	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}	H_{in}	H_{ex}
SB1	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.53 ± 0.06	0.66 ± 0.08	0.18	0.15
SB2	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.03			0.12	0.09
SB3	0.21 ± 0.05	0.17 ± 0.04	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.02			0.16	0.12
SB4	0.16 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.09 ± 0.03			0.15	0.12
SB5	0.22 ± 0.05	0.16 ± 0.04	0.55 ± 0.08	0.41 ± 0.06			0.31	0.22
SB6	0.14 ± 0.03	0.11 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.10 ± 0.03			0.13	0.10
SB7	0.20 ± 0.05	0.14 ± 0.04	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.03			0.19	0.14
SB8	0.98 ± 0.13	0.77 ± 0.10	1.01 ± 0.14	0.80 ± 0.11	0.93 ± 0.11	1.17 ± 0.15	1.08	0.85
SB9	0.29 ± 0.05	0.22 ± 0.04	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.03			0.27	0.21
SB10	0.55 ± 0.07	0.44 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.31 ± 0.04			0.44	0.35

ตาราง ค.15 ค่าความเข้มข้น eU, eTh และ K ในตัวอย่างทรายคลอง ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm

Sample	ความเข้มข้น (ppm)		
	eU	eTh	K (%)
SS1	5.67	31.29	1.55
SS3	13.92	93.12	2.67
SS5	52.70	267.03	2.82
SS7	14.41	108.64	2.59
SS9	10.60	45.82	2.42
SS11	6.72	24.14	3.32
SS13	12.87	57.15	2.13
SS15	15.70	97.80	2.81
SS17	16.43	118.73	3.01
SS19	9.39	62.57	1.93
SS21	9.31	50.99	1.95
SS23	16.43	62.08	1.96
SS25	5.91	33.01	0.95
SS27	35.37	131.79	1.98

ตาราง ก.16 ค่าปริมาณความเข้มข้น (%) ของธาตุต่างๆ ในตัวอย่างทรายกลอง ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm

Sample	ความเข้มข้น (%)											
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
SS1	0.13	0.23	6.76	32.00	0.09	0.18	2.99	0.21	0.36	0.04	0.13	3.93
SS3	0.11	0.35	8.82	27.64	0.09	0.08	2.95	0.11	0.54	0.03	0.13	6.46
SS5	0.18	0.23	6.50	31.15	0.05	0.04	3.61	0.12	0.86	0.05	0.14	3.52
SS7	0.188	0.28	8.29	30.97	0.07	0.06	3.44	0.11	0.52	0.03	0.18	4.29
SS9	0.24	0.10	5.12	36.52	0.00	0.00	4.42	0.08	0.28	0.07	0.14	2.24
SS11	0.22	0.10	5.68	28.47	0.03	0.00	4.15	0.06	0.24	0.06	0.11	2.26
SS13	0.45	0.18	5.90	34.57	0.05	0.04	3.08	0.59	0.24	0.04	0.15	3.39
SS15	0.14	0.36	9.55	25.99	0.09	0.10	3.75	0.13	0.66	0.03	0.15	7.43
SS17	0.21	0.30	13.99	24.78	0.07	0.14	0.74	0.09	0.58	0.03	0.08	5.63
SS19	1.04	0.41	12.02	18.94	0.07	0.70	2.88	0.22	0.57	0.00	0.04	6.13
SS21	1.12	0.51	4.55	15.47	0.07	0.59	1.84	19.40	0.41	0.04	0.04	3.51
SS23	0.22	0.20	7.36	31.65	0.07	0.27	3.16	1.30	0.37	0.05	0.08	3.33
SS25	0.21	0.07	9.99	29.65	0.00	0.05	4.45	0.32	0.37	0.07	0.04	4.23
SS27	0.09	0.08	10.20	26.40	0.03	0.04	2.88	0.06	0.47	0.02	0.05	7.35

ตาราง ก.17 ค่าปริมาณความเข้มข้น (%) ของธาตุต่างๆ ในตัวอย่างทรายคลอง ขนาดตัวอย่าง < 0.106 mm

Sample	ความเข้มข้น (%)											
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cu	Zn	As	Ba	Cl	Br
SS1	0.15	0.01	0.01	0.21	0.03	0.032	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SS3	0.16	0.01	0.04	0.41	0.03	0.046	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
SS5	0.21	0.02	0.11	2.40	0.11	0.421	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00
SS7	0.22	0.02	0.05	0.58	0.04	0.075	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
SS9	0.26	0.00	0.21	0.11	0.01	0.053	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
SS11	0.28	0.00	0.00	0.03	0.02	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SS13	0.21	0.02	0.03	0.14	0.02	0.019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SS15	0.26	0.02	0.06	0.61	0.04	0.061	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
SS17	0.40	0.02	0.06	0.15	0.04	0.000	0.00	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00
SS19	0.15	0.02	0.03	0.13	0.03	0.000	0.01	0.04	0.00	0.00	2.17	0.04
SS21	0.09	0.76	0.03	0.24	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	2.26	0.00
SS23	0.17	0.06	0.03	0.50	0.02	0.022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00
SS25	0.15	0.02	0.02	0.26	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SS27	0.12	0.01	0.03	1.32	0.03	0.030	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Silica ในตัวอย่างทรายคลอง



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชน 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University

Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 1771/55 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 1763/55
 วันที่รับตัวอย่าง: 1 มิถุนายน 2555
 วันที่ขอใช้บริการฯ: 1 มิถุนายน 2555
 ผู้ทดสอบ: ดร. ชูনারี บคิพงษ์
 วันที่ทำการทดสอบ: 8 มิถุนายน 2555
 วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002
 เครื่องมือทดสอบ: X-ray fluorescence spectrometer, PW2400, PHILIPS, Netherlands
 เทคนิคการทดสอบ: X-ray fluorescence spectrometry
 สภาวะการทดสอบ: X-ray tube : Rh tube X-ray path : Vacuum
 Application : GP Semi Sample type : Pressed powder
 Objective : Semiquantitative measurement Scanning range :
 รายละเอียดตัวอย่าง: ตะกอนทราย จำนวน: 7 ตัวอย่าง
 ผลการทดสอบ:

S.	S.	Concentration (%)																	Traces
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	SnO ₂	ThO ₂	
1	SS1	-	0.39	13.23	71.68	0.49	3.79	0.29	0.58	0.15	5.29	0.13	0.02	-	0.18	-	-	-	Na P Cr Y Nb Sn Th
2	SS3	-	0.58	16.79	59.76	-	3.61	0.15	0.92	0.17	9.29	0.16	0.08	0.04	0.50	-	-	-	Na P S Cr Cu Zn As Nb Sn Pb Th
3	SS5	-	0.37	12.38	69.60	-	4.41	0.18	1.45	0.25	5.05	0.21	0.07	0.12	2.92	0.14	0.52	0.16	Na P S Cr Ba U
4	SS7	-	0.46	15.79	66.92	-	4.20	0.16	0.89	0.24	6.19	0.22	-	0.06	0.71	-	0.09	-	Na P S Cr Zn Sr Nb Pb Th
5	SS9	-	-	9.73	78.80	-	5.42	0.11	0.48	0.18	3.23	0.26	-	0.24	0.13	-	-	-	Na Mg S Cr Zn Nb Sn
6	SS11	-	-	10.83	61.58	-	5.08	-	0.42	0.15	3.27	0.28	-	-	-	-	-	-	Na Mg P Cl Ca Cr Zn Zr Nb
7	SS13	0.60	0.29	11.20	74.34	-	3.74	0.83	0.40	0.20	4.85	0.21	-	0.03	0.17	-	-	-	P S Cr Sr Nb Sn Pb Th

Normalised to 100 % and refer to: \55\1763

(นายเวียงชัย จงศรีรัตนกุล)

ผู้ช่วยหัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๘ มิถุนายน 2555

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
 ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Silica ในตัวอย่างทรายชายหาด



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University

Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 1266/55 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: นายธานี หีมตระกูลวงศ์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 1172/55

วันที่รับตัวอย่าง: 3 เมษายน 2555

วันที่ขอใช้บริการฯ: 3 เมษายน 2555

ผู้ทดสอบ: ดร. สุนารี บคิงค์

วันที่ทำการทดสอบ: 11 เมษายน 2555

วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002

เครื่องมือทดสอบ: X-ray fluorescence spectrometer, PW2400, PHILIPS, Netherlands

เทคนิคการทดสอบ: X-ray fluorescence spectrometry

สภาวะการทดสอบ: X-ray tube : Rh tube X-ray path : Vacuum
Application : GP Semi Sample type : Pressed powder
Objective : Semiquantitative measurement Scanning range : -

รายละเอียดตัวอย่าง: ดินตะกอนและทราย จำนวน: 5 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

Sample	Concentration (%)															Traces	
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	ZrO ₂	Cl		Br
1 SB6	-	0.26	0.89	84.33	-	-	0.43	11.00	-	0.18	2.08	-	0.30	-	0.55	-	Na P S Ti
2 SB7	-	-	0.93	88.65	-	-	0.48	7.59	0.17	-	1.54	-	0.18	0.06	0.41	-	Na Mg S Cr Rb
3 SB8	1.83	1.02	15.47	43.59	0.22	3.88	2.50	4.80	0.81	-	7.46	0.10	0.10	0.13	4.00	0.06	Cr Mn Cu Y Nb Pb Th
4 SB9	-	0.33	2.71	85.34	-	-	0.97	7.40	-	0.14	2.39	-	0.10	0.03	0.57	-	Na P S Ti Mn Rb
5 SB10	-	0.34	1.42	88.27	-	-	0.72	5.88	0.34	-	2.12	-	0.07	0.24	0.59	-	Na S Cr Rb Nb

Normalised to 100 % and refer to: \55\1172

(นายเวียงชัย จงศิริคุณกุล)

ผู้ช่วยหัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

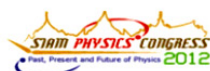
๑๐ เมษายน ๒๕๕๕

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก ง

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน





NORM Content in Sand Collected from Klong Takua Pa, Phang Nga Province

H. Hemtragoonwong¹, D. Bhongsuwan² and T. Bhongsuwan^{1,3,*}

¹*Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, 90112 Thailand*

²*Department of Material Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, 90112, Thailand*

³*Geophysics Research Center, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, 90112 Thailand*

*Corresponding author. E-mail: tripop.b@psu.ac.th

Abstract

This work aims at studying the naturally occurring radioactive materials (NORM) in river sediment (sand) from Klong Takua Pa, Phang Nga Province. Sediment samples were collected from 28 sites along Klong Takua Pa and streams. Experimental results were obtained by a HPGe gamma ray spectrometric system. The ranges and mean values of the specific activity of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K in samples were 65-208 (mean 91 ± 10) Bq/kg, 63-583 (mean 145 ± 14) Bq/kg and 199-1407 (mean 545 ± 41) Bq/kg, respectively. The mean specific activity of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K in samples collected were found to be higher than the world average values (33 Bq/kg, 45 Bq/kg and 420 Bq/kg, respectively). Moreover, absorbed dose rate, annual effective dose equivalent, radium equivalent activities, external and internal hazard indices and gamma radiation hazard index of the measured samples used to assess the radiation hazards arising due to these sands used in dwelling construction were calculated and compared with the recommended values by the UNSCEAR.

Keywords: NORM, River Sediment, Gamma-Ray Spectrometry, HPGe Detector

Introduction

Human beings are exposed to low levels of ionizing radiation from natural sources during their daily lives. Naturally occurring radioactive materials (NORM) are present in the wider environment such as foods, soil, water, air, building materials, including the human body itself (such as ⁴⁰K and ¹⁴C in bones) (Wilson, 1994)[8]. Primordial radionuclides are typically long lived, with half-lives at least comparable to the estimated age of the earth (4.5×10^9 yr) (NCRP, 1987)[9]. The most important primordial radionuclides are ⁴⁰K (half-life 1.28×10^9 yr), ²³⁸U (half-life 4.47×10^9 yr) and ²³²Th (half-life 1.41×10^{10} yr).

Radionuclides of both the uranium and thorium decay series can be often present to a high degree in the materials occurring in frame of tin mining activities, which are then to be considered as technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM). The negative impact of tin mining activities on the environment is mainly due to the excavation of large amounts of sand and the eventual accumulation of a large volume of tailings (Banat et al., 2005)[4], which significantly alter the natural constituents of

radionuclides in the soil and thus affect the terrestrial ecosystem. It has been observed that mining, milling and processing of uranium- and thorium-bearing minerals lead to enhanced radiation exposures not only to the workers but also to the inhabitants of the mining and processing sites (UNSCEAR, 2000)[6].

Klong is Thai word meaning river or canal. Klong Takua Pa or Takua Pa river originates in Kapong district of Phang Nga province and ends in the Andaman sea. It is about 20 kilometers long with many branches. Traces of the mining industry can still be along Klong Takua Pa with its many sand bars and island formed from materials washed out from the mines.

Among the various building materials, river sand is one of the most important materials for building construction. In addition to being the main source of continuous radiation exposure to humans, sediment acts as a medium of migration for the transfer of radionuclides to biological systems (Ramasamy et al., 2011)[1]. Natural radionuclides in river sediment generate a significant component of the background radiation exposure of the population (Degerlier et al., 2008). Therefore, the knowledge of the concentrations and distributions of the natural radionuclides in the river sediments



are of great interest since it provides useful information for monitoring environmental contamination and associated human health by natural radioactivity.

In the present study, river sediment from 28 localities was analyzed using gamma ray spectrometry to determine the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K . The results were used to assess the potential radiological hazards associated with these materials by absorbed dose rate, annual effective dose equivalent, radium equivalent activity, external and internal hazard indices and gamma radiation hazard index values.

Materials and Methods

Sample collection

The present study area (Klong Takua Pa and steams) covers a total distance of 30 km, from which 28 successive localities were selected (Figure 1). The sample locations were recorded using a hand-held global positioning system (GPS) (Model: Garmin etrex, USA). Distance between nearby sampling localities is 1-2 km. Each sediment sample weighs about 4-5 kg. The collected samples were air dried at room temperature in open air.

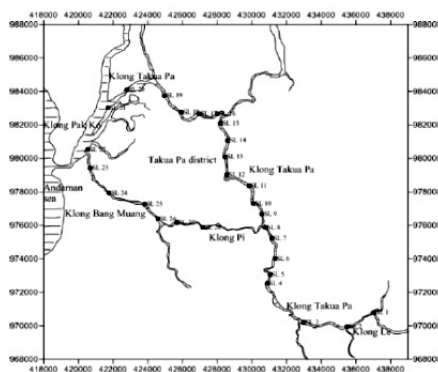


Figure 1. Location of Klong Takua Pa with their sampling localities in Phang Nga province.

Sample preparation

The collected samples were homogenized, dried in oven at $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 hours and sieved through mesh 2 mm. The samples were then packed and sealed in an impermeable air tight 250 ml polyethylene container to prevent the escape of radiogenic gases of ^{222}Rn and ^{220}Rn . About 75 ml of samples were used for measurements. Before measurements, the containers were kept sealed hermetically for about four weeks in order to reach equilibrium of the ^{226}Ra and ^{232}Th and their decay products. The exact net weight of the samples was determined before counting.

Instrumentation

A gamma-ray spectrometric system with a Canberra coaxial high purity germanium detector (HPGe, Canberra, USA) with an active volume of 59.9 cm^3 was used to measure the gamma rays emitted from samples. The detector had a gamma ray energy resolution of 1.75 keV full-width at half maximum (FWHM) at 1.332.5 keV gamma-ray line of ^{60}Co . A low background lead shield (Canberra model 747, USA) was used to reduce background gamma-ray in detector chamber. After attaining secular equilibrium, each of the prepared samples was analyzed for the ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K content using the gamma-ray spectrometric system.

The specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K were averaged from gamma-ray photo peaks at several energies. Gamma-rays from ^{214}Pb (at 295.2 and 351.9 keV) and ^{214}Bi (at 609.3, 1120.3 and 1764.3 keV) were used to determine the activity of ^{226}Ra (also known as the ^{238}U equivalent). Gamma-rays emitted from ^{228}Ac (at 338.3, 911.6 and 969.1 keV) were used to determine the average the activity of ^{232}Th , whereas potassium was measured directly by the ^{40}K isotope.

The International Atomic Energy Agency (IAEA) standard reference material (a standard soil of known radioactivity, Soil 06) was used for calibrating the gamma-ray spectrometric system. All the samples were counted for a period of 10800 s. The spectra were analyzed using the Genie2k computer software (Canberra, USA).

Radiological parameters

Residential houses and other building construction in Takua Pa area are mostly built with sand and sediments from Klong Takua Pa. To assess the radiological risk of the river sediments, the measured specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K are useful to calculate the different radiological indices such as :

(a) *absorbed dose rate* is the first major step for evaluating the health risk. With regard to biological effects, the radiological and clinical effects are directly related to the absorbed dose rate. The measured specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K are converted into doses by applying the conversion factors 0.462, 0.604 and 0.0417 for radium, thorium and potassium, respectively (UNSCEAR, 2000)[6]. These factors are used to calculate the total dose rate (D) (nGy/h) using the following equation (1):

$$D = (0.462A_{\text{Ra}} + 0.604A_{\text{Th}} + 0.0417A_{\text{K}}) \text{ nGy/h} \quad (1)$$

Where A_{Ra} , A_{Th} and A_{K} are the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in (Bq/kg), respectively.

(b) *The annual effective dose equivalent (AEDE)* since the present sediments are the main mixing material with cement and cement products



for building construction, the determination of AEDE of each site sample is important. For that, the living style of the people or indoor or outdoor factor of a location is considered. A typical resident in a location, both male and female, would spend about 8 h of the day in an office or classroom, 11 h indoors and the remaining 5 h outdoors. Hence, 19/24 (0.8) and 5/24 (0.2) is adopted as the indoor (80%) and outdoor occupancy factors (20%), respectively, with a conversion factor of 0.7 Sv/Gy (Singh et al., 2009)[2] to convert absorbed dose rate (nGy/h) to annual effective dose equivalent ($\mu\text{Sv/y}$) for this study. The annual effective dose is determined using the following equations (2) and (3) :

$$\text{AEDE}_{\text{Out}} (\mu\text{Sv/y}) = (\text{Absorbed dose}) \text{ nGy/h} \times 8760\text{h} \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 0.2 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$\text{AEDE}_{\text{In}} (\mu\text{Sv/y}) = (\text{Absorbed dose}) \text{ nGy/h} \times 8760\text{h} \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 0.8 \times 10^{-3} \quad (3)$$

The world average values of AEDE in sediment are 70 $\mu\text{Sv/y}$ and 450 $\mu\text{Sv/y}$ for outdoor and indoor, respectively (Orgun et al., 2007)[3].

(c) *Radium equivalent activities (Ra_{eq})* is a common index used to represent the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K by a single quantity which takes into account the radiation hazards associated with them. The Ra_{eq} is a weighted sum of activities of the above three radionuclides, based on the estimation that 370 Bq/kg of ^{226}Ra , 259 Bq/kg of ^{232}Th and 4,810 Bq/kg of ^{40}K produce the same gamma-ray dose. It is defined by equation (4) (Beretka and Mathew, 1985)[5]:

$$Ra_{\text{eq}} (\text{Bq/kg}) = A_{\text{Ra}} + 1.43A_{\text{Th}} + 0.077A_{\text{K}} \quad (4)$$

Where A_{Ra} , A_{Th} and A_{K} are the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in (Bq/kg), respectively. The recommended maximum value of Ra_{eq} in sediment is 370 Bq/kg for the safe use of materials in the construction of buildings (NEA-OECD, 1979)[10].

(d) *Hazard indices (H_{ex} and H_{in})* (Beretka and Mathew, 1985)[5] defined two indices that represent external and internal radiation hazards. The prime objective of these indices is to limit the radiation dose to a dose equivalent limit of 1 mSv/y. H_{ex} was calculated using equation (5) :

$$H_{\text{ex}} = (A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810) \leq 1 \quad (5)$$

Where A_{Ra} , A_{Th} and A_{K} are the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in (Bq/kg), respectively. The internal hazard index (H_{in}) gives the internal exposure of carcinogenic radon and its short-lived progeny and is given by equation (6) (Beretka and Mathew, 1985[5]; Orgun et al., 2007)[3] :

$$H_{\text{in}} = (A_{\text{Ra}}/185 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810) < 1 \quad (6)$$

Where A_{Ra} , A_{Th} and A_{K} are the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in (Bq/kg), respectively.

(e) *Gamma radiation hazard index (I_{γ})* deals with the assessment of excess gamma radiation originating from building materials (river sediment). I_{γ} was calculated using equation (7) (NEA-OECD,1979)[10]:

$$I_{\gamma} = (A_{\text{Ra}}/300 + A_{\text{Th}}/200 + A_{\text{K}}/3000) \quad (7)$$

Where A_{Ra} , A_{Th} and A_{K} are the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in (Bq/kg), respectively.

Results and Discussion

The specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in the samples are presented in Table 1 and Figure 2. The ranges and mean values of the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in samples are 65-208 (mean 91 ± 10) Bq/kg, 63-583 (mean 145 ± 14) Bq/kg and 199-1407 (mean 545 ± 41) Bq/kg, respectively. The mean specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in samples collected were found to be higher than the UNSCEAR world average values (33 Bq/kg, 45 Bq/kg and 420 Bq/kg, respectively).

Table 1: Summary of specific activities in the Klong Takua Pa sediment samples

Nuclide	Mean	Max	Min
^{226}Ra (Bq/kg)	91 ± 10	208 ± 19	65 ± 8
^{232}Th (Bq/kg)	145 ± 14	583 ± 36	63 ± 9
^{40}K (Bq/kg)	545 ± 41	1407 ± 65	199 ± 24

The calculated radiological parameters of all samples are presented in Table 2. The range and mean value of D is 90-484 (mean 153 ± 15) nGy/h. The mean D value is higher than the world average value (57 nGy/h) (UNSCEAR, 2000)[6].

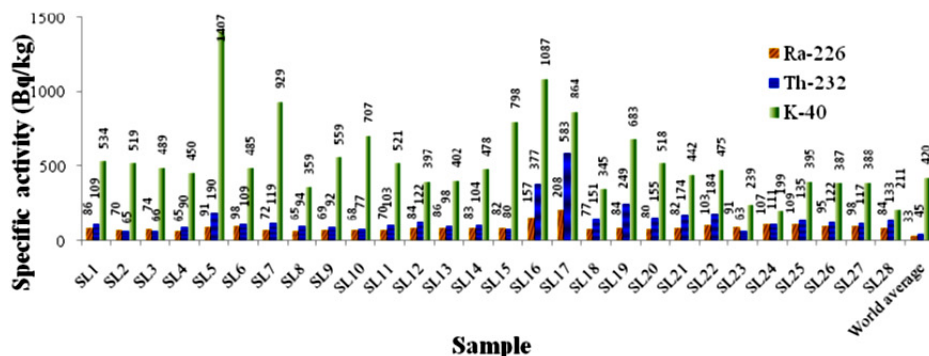


Figure 1. Specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in the Klong Takua Pa sediment samples (SL1-SL28).

Table 2: Summary of radiation hazard parameter values of the Klong Takua Pa sediment samples

Parameters	Mean	Max	Min	World recommended value
Absorbed dose rate (nGy/h)	153 ± 15	484 ± 34	90 ± 11	57
AEDE _{out} ($\mu\text{Sv/y}$)	187 ± 18	594 ± 41	110 ± 14	70
AEDE _{in} ($\mu\text{Sv/y}$)	748 ± 73	2376 ± 165	441 ± 55	450
Ra _{eq} (Bq/kg)	341 ± 33	1108 ± 76	199 ± 25	370
H _{ex}	0.92 ± 0.09	2.99 ± 0.21	0.54 ± 0.07	1
H _{in}	1.17 ± 0.12	3.56 ± 0.26	0.74 ± 0.09	1
I _{tr}	1.21 ± 0.12	3.90 ± 0.27	0.70 ± 0.09	0.5

The ranges and mean values of the AEDE for indoor and outdoor are 441-2376 (mean 748 ± 73) $\mu\text{Sv/y}$ and 110-594 (mean 187 ± 18) $\mu\text{Sv/y}$, respectively. The mean AEDE for indoor and outdoor values are higher than the world average value (450 $\mu\text{Sv/y}$ for indoor, 70 $\mu\text{Sv/y}$ for outdoor; Orgun et al., 2007)[3]. The range and mean value of Ra_{eq} is 199-1108 (mean 341 ± 33) Bq/kg. The mean Ra_{eq} is lower than the recommended maximum value of 370 Bq/kg for the safe use of materials in the construction of buildings (NEA-OECD, 1979)[10]. The ranges and mean values of H_{ex} and H_{in} are 0.54-2.99 (mean 0.92 ± 0.09) and 0.74-3.56 (mean 1.17 ± 0.12), respectively. The mean H_{ex} value is slightly lower than the recommended maximum value of 1 and the mean H_{in} value is higher than the recommended maximum value of 1 (EC, 1999)[7]. The range and mean value of I_{tr} is 0.70-3.90 (mean 1.21 ± 0.12). The mean I_{tr} value is higher than the criterion value for an effective dose of 300 $\mu\text{Sv/y}$ corresponds to I_{tr} ≤ 0.5 for materials used in bulk amounts (EC, 1999)[7].

Conclusions

The mean values of the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in samples from study area are higher than world average values. For calculated radiological parameters, the mean values of absorbed dose rate, AEDE_{out}, AEDE_{in}, H_{in} and I_{tr} are higher than the world recommended level. The mean values of Ra_{eq} and H_{ex} are slightly lower than the world recommended level. The result from this study will be used to set up our Thai recommended values for natural radioactivity background level.

Acknowledgments

The first author is grateful to the Graduate School at the Prince of Songkla University for grant support and thanks the Department of Physics, Department of Material Science and Technology, Faculty of Science, for equipment support and other necessary facilities.



References

1. V. Ramasamy, G. Suresh, V. Meenakshisundaram, and V. Ponnusamy, "Horizontal and Vertical Characterization of Radionuclides and Minerals in River Sediments", *Applied Radiation and Isotopes* **69** (2011) 184–195.
2. J. Singh, H. Singh, S. Singh, B.S. Bajwa, and R.G. Sonkawade, "Comparative Study of Natural Radioactivity Levels in Soil Samples from the Upper Siwaliks and Punjab, India using Gamma-Ray Spectrometry", *Journal of Environmental Radioactivity* **100** (2009) 94–98.
3. Y. Orgun, N. Altinsoy, S.Y. Sahin, Y. Gungor, A.H. Gultekin, G. Karaham, and Z. Karaak, "Natural and Anthropogenic Radionuclides in Rocks and Beach Sands from Ezine Region (canakkale), Western Anatolia, Turkey", *Applied Radiation and Isotopes* **65** (2007) 739–747.
4. K.M. Banat, F.M. Howari, and A.A. Al-Hamad, "Heavy Metals in Urban Soils of Central Jordan: Should We Worry about Their Environmental Risks", *Environmental Research Section A* **97** (2005) 258–273.
5. J. Beretka, and P.J. Mathew, "Natural Radioactivity of Australian Building Materials, Industrial Wastes and by Products", *Health Physics* **48** (1985) 87–95.
6. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2000.
7. EC, European Commission. Radiation Protection Unit, Radiological Protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, *Radiation Product*, 11, 1999.
8. W.F. Wilson, "A Guide to Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)", USA, PennWell Publishing Company, 1994.
9. NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements, Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, NCRP Report no. 94. Maryland, 1987.
10. NEA-OECD, Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by NEA Group of Experts, OECD, Paris. 1979.