

การตรวจวัดและวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ^{232}Th ^{226}Ra ^{40}K และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินจากจังหวัดพัทลุง (ประเทศไทย)

โดยใช้เทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี

มูรณี คาโอ๊ะ¹ ประสงค์ เกษราธิคุณ² และสุชิน อุคมสมพร³

¹นิสิตปริญญาโท (วท. ม. ฟิสิกส์) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อ. เมือง จ. สงขลา 90000

โทรศัพท์ 087-3939033 โทรสาร 074-693974 E-Mail: Murnee_daoh@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อ. เมือง จ. สงขลา 90000

โทรศัพท์ 074 -311885-7 ต่อ 2115 โทรสาร 074-693974 E-Mail: prasong@tsu.ac.th

³นักวิทยาศาสตร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 02-5795230, 02-5967600, 02-5620123 โทรสาร 02-5613013 E-Mail: suchin@oaep.go.th

บทคัดย่อ

ได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ^{232}Th ^{226}Ra ^{40}K และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินที่เก็บจากบริเวณต่าง ๆ ใน 11 อำเภอ จำนวน 109 ตัวอย่าง ของจังหวัดพัทลุง โดยใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์วัสดุ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา ใช้แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน ^{60}Co , ^{137}Cs และ ^{133}Ba ในการปรับเทียบพลังงาน ใช้สารมาตรฐาน KCl และสารมาตรฐานอ้างอิง IAEA/RGU-1 และ IAEA/RGTh-1 ในการคำนวณกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{238}U (หรือ ^{226}Ra) และ ^{232}Th ตามลำดับ และใช้สารมาตรฐานอ้างอิง IAEA/SL-2 ในคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินทั้งหมด ในการตรวจวัดแต่ละตัวอย่างใช้เวลาเป็น 10,800 วินาที จากผลการวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินพบว่า มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 148.17 – 11,276.78 Bq/kg สำหรับ ^{40}K , 58.29 – 518.45 Bq/kg สำหรับ ^{226}Ra , 8.40 – 236.19 Bq/kg สำหรับ ^{232}Th และ 0.00 – 12.39 Bq/kg สำหรับ ^{137}Cs มีค่าเฉลี่ยเป็น $3,573.35 \pm 203.89$ Bq/kg, 135.89 ± 6.71 Bq/kg, 76.34 ± 5.32 Bq/kg และ 1.05 ± 0.70 Bq/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้คำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับรอบปี (AED_{out}) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของการได้รับรังสีจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติของประชาชนโดยทั่วไป โดยใช้ข้อมูลของค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินที่ตรวจวัดได้นี้ และยังสามารถเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับข้อมูลจากรายงานประจำปีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ผลงานวิจัยของนักวิจัยในประเทศไทยและข้อมูลของกลุ่มนักวิจัยจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกอีกด้วย และยังสามารถสร้างแผนภาพทางรังสีของกัมมันตภาพจำเพาะนิวไคลด์รังสีทั้งหมดที่ตรวจวัดได้ โดยใช้โปรแกรม ArcGis Version 9.2 อีกด้วย

คำสำคัญ: กัมมันตภาพจำเพาะ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ กัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับรอบปี

Measurement and Analysis of Specific Activities of ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K and ^{137}Cs in Soil Samples from Phatthalung Province (Thailand) using Gamma Ray Spectrometry

*Murnee Daoh,¹ Prasong Kessaratikoon² and Suchin Udomsomporn³

¹Graduate Student, Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla 90000

Phone: 087-3939033, Fax: 074-693974, E-mail: Murnee_daoh@hotmail.com

²Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla 90000

Phone: 081-5423598, Fax: 074-693974, E-mail: prasong@tsu.ac.th

³Scientist, Office of Atoms for Peace, 16 Vibhavadi Rangsit Rd, Chatuchak, Bangkok 10900

Phone: 02-5795230, 02-5967600, 02-5620123 Fax: 02-5613013 E-mail: suchin@oaep.go.th

Abstract

Specific activity of natural (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K) and anthropogenic radionuclide (^{137}Cs) in 109 soil samples collected from 11 districts in Phatthalung province have been measured and analyzed. Experimental results were obtained by using a high-purity germanium (HPGe) detector and gamma spectrometry analysis system at Nuclear and Material Physics laboratory in Department of Physics Faculty of Science Thaksin University Songkhla Campus. Gamma ray radioactive standard sources ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{133}Ba were used to calibrate the measurement system. The KCl and two reference materials (RGU-1 and RGTh-1) obtained from the International Atomic Energy Agency were also used to analyze and compute the ^{40}K , ^{238}U (or ^{226}Ra) and ^{232}Th specific activity in all soil samples. The IAEA/SL-2 was also used to evaluate the specific activity of ^{137}Cs in all soil samples. The measuring time of each sample was 10,800 seconds. It was found that specific activity ranged from 148.17 – 11276.78 Bq/kg for ^{40}K , 58.29 – 518.45 Bq/kg for ^{226}Ra , 8.40 – 236.19 Bq/kg for ^{232}Th and 0.00 – 12.39 Bq/kg for ^{137}Cs with mean values of 3573.35 ± 203.89 Bq/kg, 135.89 ± 6.71 Bq/kg, 76.34 ± 5.32 Bq/kg and 1.05 ± 0.70 Bq/kg respectively. Furthermore, absorbed dose rate in air (D), radium equivalent activity (Ra_{eq}), external hazard index (H_{ex}), and annual effective dose rate (AED_{out}) of this area were also evaluated by using the mean values of specific activities of the ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th . Moreover, the experimental results were also compared with Office of Atoms for Peace (OAP) research data, Thailand and global radioactivity measurement and evaluations. The radioactive contour maps of specific activities of natural and anthropogenic radionuclides from this study were created by using the program ArcGis Version 9.2.

Keywords: specific activity, absorbed dose rate in air, radium equivalent activity, external hazard index, annual effective dose rate

1. บทนำ

มนุษย์และสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกได้อาศัยและสัมผัสอยู่กับรังสีและอนุภาคที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (natural radionuclides) อยู่ตลอดเวลา โดยรังสีและอนุภาคดังกล่าวนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากภายในและภายนอกของโลก การได้รับรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เป็นผลเนื่องมาจากการสลายกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ของสารรังสีปฐมภูมิของอนุกรมสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในดิน ทราบ และหินจากรังสีคอสมิกที่ส่งผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศของโลก และจากรังสีที่มีอยู่ในอาหาร น้ำ และอากาศ ซึ่งในแต่ละพื้นที่บนผิวโลก จะมีการสะสมของสารกัมมันตรังสีในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป สารกัมมันตรังสีเหล่านี้พบว่าการปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ อากาศ ดังนั้นในการตรวจวัดกัมมันตรังสีในดินจึงมีความสำคัญเพราะเป็นส่วนหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของมนุษย์ ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจในการศึกษาและตรวจวัดกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ (^{40}K ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{238}U) และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (^{137}Cs) ในตัวอย่างดินที่เก็บจากบริเวณ 11 อำเภอของจังหวัดพัทลุง จำนวน 109 ตัวอย่างโดยใช้ห้ววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์วัสดุ ชั้น 6 ห้อง SC 618 อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์(เดิม) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการได้รับรังสีของประชาชนที่อาศัยอยู่ในแต่ละพื้นที่ของจังหวัดพัทลุงและสามารถนำข้อมูลดังกล่าวนี้ไปประเมินค่าความเป็นอันตรายของการได้รับรังสีในภาพรวมของทางจังหวัดได้อีกด้วย

2. วัสดุและอุปกรณ์

สำหรับวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ

1. ห้ววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี
2. แหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานชนิดปิดผนึก ได้แก่ ซีเซียม-137 (Cs-137) โคบอลต์-60 (Co-60) และแบเรียม-133 (Ba-133)
3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Genie 2000 และ ArcGIS Version 9.2
4. สารมาตรฐาน KCL สารมาตรฐานอ้างอิง (Reference material) IAEA/RGU-1, IAEA/RGTh-1 และ IAEA/SL-2 ใช้ในการคำนวณกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{238}U (หรือ ^{226}Ra) ^{232}Th และ ^{137}Cs ตามลำดับ ในตัวอย่างดินที่เก็บจาก 11 อำเภอของจังหวัดพัทลุง จำนวน 109 ตัวอย่าง

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินจำนวน 109 ตัวอย่าง นำตัวอย่างดินมาผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้แห้งในระดับหนึ่ง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100°C แล้วร่อนตัวอย่างดินด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh นำตัวอย่างดิน ปริมาณ 250 กรัมบรรจุลงในภาชนะพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.2 ซม. สูง 7.5 ซม. ที่จัดเตรียมไว้ ทำการปิดภาชนะพลาสติกให้สนิท เพื่อป้องกันการปลดปล่อยกัมแก๊ส ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน ก่อนทำการตรวจวัดและวิเคราะห์

การตรวจวัดและวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสีธรรมชาติ (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K) และนิวไคลด์สารรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (^{137}Cs)

จัดเตรียมเครื่องมือวัดรังสีแกมมา เปิดโปรแกรมและปรับค่าต่าง ๆ ของเครื่องมือวัดและระบบวิเคราะห์ข้อมูล ทำการวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาของตัวอย่างดิน จำนวน 109 ตัวอย่าง โดยใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ใช้เวลาในการตรวจวัดตัวอย่างละ 10,800 วินาที ในการคำนวณกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน มีหลักในการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ ^{40}K จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 1460.8 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ^{40}K สำหรับ ^{226}Ra จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 351.9 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ^{214}Pb ส่วน ^{232}Th จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 583.2 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ^{208}Tl และ ^{137}Cs จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 661.7 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ^{137}Cs และได้คำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (absorbed dose rates in air; D) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (radium equivalent activity; Ra_{eq}) ดัชนีความเสี่ยงของรังสีภายนอก (external hazard index; H_{ex}) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายรอบปี (annual external effective dose rate; AED_{out}) โดยนำข้อมูลกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th มาใช้ในการคำนวณ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ (R. Veiga *et al.*, 2005)

$$D(\text{nGy/h}) = 0.0417C_K + 0.462C_{\text{Ra}} + 0.604C_{\text{Th}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = 0.077C_K + C_{\text{Ra}} + 1.43C_{\text{Th}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{H}_{\text{ex}} = (C_K/4810) + (C_{\text{Ra}}/370) + (C_{\text{Th}}/259) \leq 1 \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{AED}_{\text{out}} (\text{mSv/y}) = D(\text{nGy/h}) \times 8,760 \text{ h} \times 0.2 \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 10^{-6} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ C_K , C_{Ra} และ C_{Th} คือ กัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการตรวจวัดและวิเคราะห์กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสี ^{40}K ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน จำนวน 109 ตัวอย่างของจังหวัดพัทลุง ได้คำนวณค่าเฉลี่ยของกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์และคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงทางรังสี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

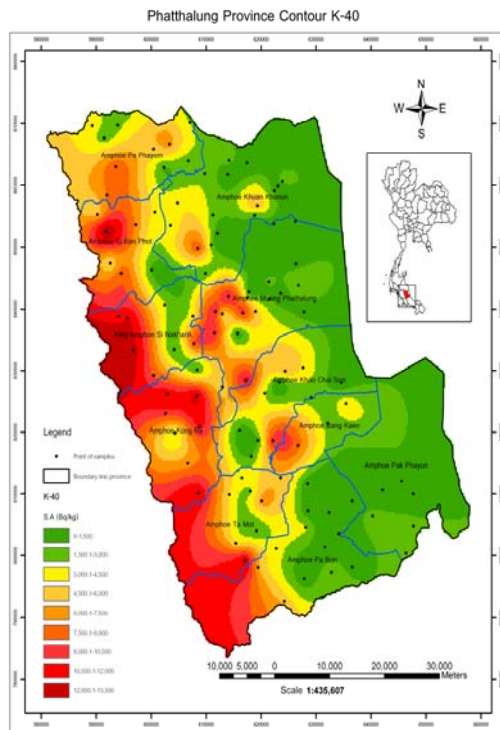
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินจาก 11 อำเภอของจังหวัดพัทลุง ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) กัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}) ดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และ ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายรอบปี (AED_{out}) และเปรียบเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR (1988,1993,2000)

สถานที่ (จำนวนตัวอย่าง)	S.A (ค่าเฉลี่ย) (Bq/kg)			D (nGy/h)	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	AED_{out} (mSv/y)
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th				
อ.ป่าพะยอม (10)	3377.62	91.12	67.46	223.69	447.30	1.21	0.27
อ.ศรีบรรพต (7)	5127.25	139.94	78.56	325.91	646.57	1.75	0.40
อ.ควนขนุน (17)	1878.05	79.39	53.21	147.13	299.88	0.81	0.18
อ.เมือง (19)	3444.73	157.53	86.64	268.75	546.28	1.48	0.33
อ.ศรีนครินทร์(8)	6356.39	175.98	95.18	403.85	800.91	2.16	0.50
อ.กงหรา (8)	6893.66	274.74	137.10	497.21	1000.89	2.71	0.61
อ.ป่าบอน (12)	1532.28	65.38	39.53	117.98	239.72	0.65	0.14
อ.บางแก้ว (4)	3194.12	171.84	96.55	270.90	555.47	1.50	0.33
อ.เขาชัยสน (9)	2406.12	143.76	71.86	210.16	431.51	1.17	0.26
อ.ตะโหมด (8)	4091.95	127.95	71.69	273.04	545.12	1.47	0.33
อ.ปากพะยูน (7)	1004.65	67.19	41.96	98.28	204.41	0.55	0.12
ค่าเฉลี่ย	3573.35	135.89	76.34	257.90	519.82	1.40	0.32
UNSCEAR(1988, 1993, 2000)	-*	-*	-*	55.00	370.00	1.00	0.48

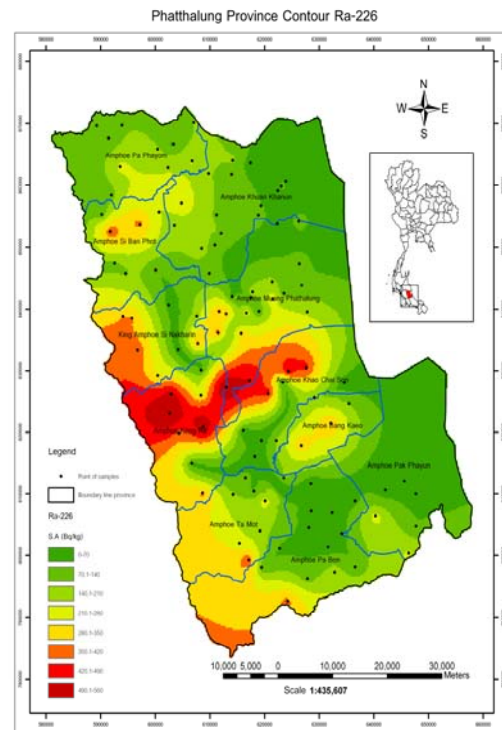
*ไม่มีข้อมูล

จากนั้นนำข้อมูลกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สารรังสีธรรมชาติ (^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th) และนิวไคลด์สารรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (^{137}Cs) นี้ ไปจัดทำเป็นแผนภาพทางรังสี (radioactive contour

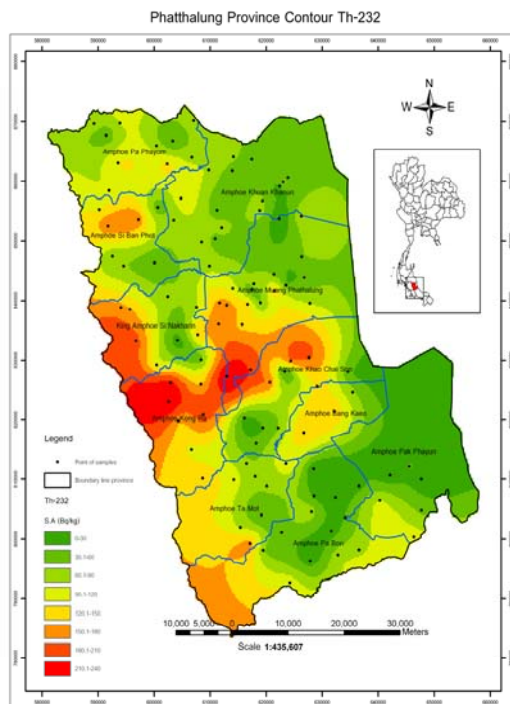
maps) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่มีชื่อว่าโปรแกรม ArcGIS Version 9.2 ดังได้แสดงในรูปที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ ดังต่อไปนี้



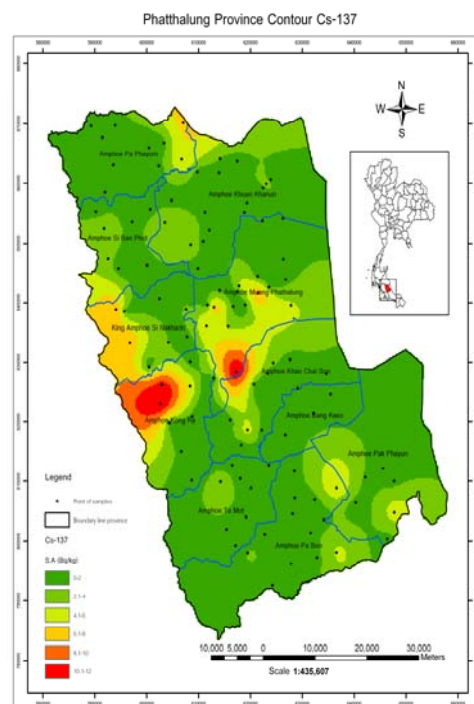
รูปที่ 1 แผนภาพทางรังสีของ ^{40}K



รูปที่ 2 แผนภาพทางรังสีของ ^{226}Ra



รูปที่ 3 แผนภาพทางรังสีของ ^{232}Th



รูปที่ 4 แผนภาพทางรังสีของ ^{137}Cs

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้ว สามารถกล่าวได้ว่า ประชาชนที่อาศัยอยู่ใน 11 อำเภอของจังหวัดพัทลุง (ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอกงหรา อำเภอเขาชัยสน อำเภอดงระหวง อำเภอควนขนุน อำเภอปากพะยูน อำเภอศรีบรรพต อำเภอป่าบอน อำเภอบางแก้ว อำเภอป่าพะยอม อำเภอศรีนครินทร์) จะได้รับปริมาณรังสีจากธรรมชาติโดยเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าบริเวณต่างๆที่นำมาเปรียบเทียบ แต่ยังมีปริมาณรังสีเฉลี่ยจากการได้รับรังสีจากธรรมชาติอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย โดยพิจารณาจากปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายรอบปี (AED_{out}) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่เผยแพร่โดย UNSCEAR (1988,1993,2000)

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทางสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านเงินทุนบางส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

1. ประสงค์ เกษราธิคุณ. 2548. เอกสารประกอบการสอนเรื่องทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับรังสีแกมมาสเปกโตรสโคปี. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
2. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2534-2546. การศึกษาและการประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม. รายงานวิชาการประจำปี 2534 - 2546. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
3. UNSCEAR, 1988. Sources, effects and risk of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
4. UNSCEAR, 1993. Exposure from natural sources of radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
5. UNSCEAR, 2000. Sources, effects and risk of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
6. Veiga, R., Sances, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J.G., Santos, A.M.A., Mosquera, B., Carvalho, C., Batista Filho, M., Umisedo, N.K., 2005. Measurement natural radioactivity in Brazilian beach sands. Radiat. Meas. 41, 189-196.