

การตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติ (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K)
และที่มนุษย์สร้างขึ้น (^{137}Cs) ในดินจาก 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุง (ประเทศไทย)
โดยใช้เทคนิคแกมมาสเปกโตรเมตรี

Measurement of Specific Activity of Natural (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K) and Anthropogenic
(^{137}Cs) Radionuclides in Soil from 6 Districts in Phthalung Province (Thailand)
using Gamma Ray Spectrometry

มูรณี ดาโอ¹, สุชิน อุดมสมพร², ศุภวุฒิ เบ็ญกุล³ และประสงค์ เกษราธิคุณ^{4*}

Muranee Daoh¹, Suchin Udomsomporn², Supphawut Benjakul³ and Prasong Kessaratikoon^{4*}

บทคัดย่อ

ได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินที่เก็บจากบริเวณต่าง ๆ ใน 6 อำเภอ จำนวน 69 ตัวอย่าง (อำเภอป่าพะยอม อำเภอศรีบรรพต อำเภอควนขนุน อำเภอศรีนครินทร์ อำเภอเมือง และอำเภอกงหรา) ของจังหวัดพัทลุง โดยใช้ห้ววัดรังสีแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์วัสดุ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา ใช้แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-137 (Cs-137) โคบอลต์-60 (Co-60) และแบเรียม-133 (Ba-133) ในการปรับเทียบพลังงาน ใช้สารมาตรฐานชนิด KCl, IAEA/RGU-1 และ IAEA/RGTh-1 ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K , ^{238}U (หรือ ^{226}Ra) และ ^{232}Th ตามลำดับ และใช้สารมาตรฐาน IAEA/SL-2 ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินทั้งหมด การตรวจวัดแต่ละตัวอย่างใช้เวลาเป็น 10,800 วินาที จากผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินพบว่า มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 148.17-11,276.78 Bq/kg สำหรับ ^{40}K , 5.44 - 518.45 Bq/kg สำหรับ ^{226}Ra , 4.46-236.19 Bq/kg

¹ นิสิตปริญญาโท หลักสูตร วท.ม.(ฟิสิกส์) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ สงขลา 90000

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

² นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Nuclear Scientist, Office of Atoms for Peace, 16 Viphavadi Rangsit Road, Chatuchak District, Bangkok, 10900

³ ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อ. เมือง จ. สงขลา 90000

Research Assistant, Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla, 90000

⁴ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อ. เมือง จ. สงขลา 90000

Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla, 90000

* Corresponding author: โทรศัพท์ : 081-5423598 E-mail: prasong@tsu.ac.th

สำหรับ ^{232}Th และ 0.00 - 12.39 Bq/kg สำหรับ ^{137}Cs มีค่าเฉลี่ยเป็น $4,512.95 \pm 226.71$ Bq/kg 153.12 ± 7.20 Bq/kg 86.36 ± 5.76 Bq/kg และ 1.71 ± 0.80 Bq/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้คำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (R_a) ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (AED_{out}) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของการได้รับรังสีจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติของประชาชนโดยทั่วไป โดยใช้ข้อมูลของค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินที่ตรวจวัดได้นี้ และยังได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับข้อมูลจากรายงานประจำปีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ผลงานวิจัยของนักวิจัยในประเทศไทยและข้อมูลของกลุ่มนักวิจัยจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกอีกด้วย

คำสำคัญ : กัมมันตภาพจำเพาะ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ กัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี

Abstract

Specific activity of natural (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) and anthropogenic radionuclide (^{137}Cs) in 69 soil samples collected from 6 districts (Pa Phayom, Si Banphot, Khuan khanun, Srinagarindra, Muang and Kong Ra districts) in Phthalung 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 Cesium-137 (Cs-137), Cobalt-60 (Co-60) and Barium-133 (Ba-133) were used to calibrate the measurement system. The KCl and two well-known reference materials (TAEA/RGU-1 and IAEA/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 of the soil samples, respectively. 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 is 10,800 seconds. It was found that specific activity range from 148.17-1,1276.78 Bq/kg for ^{40}K , 5.44-518.45 Bq/kg for ^{226}Ra , 4.46-236.19 Bq/kg for ^{232}Th and 0.00-12.39 Bq/kg for ^{137}Cs with mean values of $4,512.95 \pm 226.71$ Bq/kg, 153.12 ± 7.20 Bq/kg, 86.36 ± 5.76 Bq/kg and 1.71 ± 0.80 Bq/kg, respectively. Furthermore, absorbed dose rate in air (D), radium equivalent activity (R_{eq}), external hazard index (H_{ex}), and annual effective dose rate 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.

Keywords : Specific Activity, Absorbed Dose Rate in Air, Radium Equivalent Activity, External Hazard Index, Annual Effective Dose Rate

คำนำ

นิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติมีการแพร่กระจายอยู่ทั่วไปตามสภาพแวดล้อมของโลก และมักจะมีอยู่ทั่วไปในรูปแบบต่างๆ ทางธรณีวิทยา ซึ่งมีอยู่ในดิน หิน พืช น้ำ และอากาศ นิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในดินและทรายส่วนใหญ่มาจาก ^{226}Ra และ ^{238}U ที่มีอยู่ในอนุกรมยูเรเนียม (uranium series) และ ^{232}Th ในอนุกรมทอเรียม (thorium series) รวมไปถึงผลผลิต (product) รุนทุกรุ่นหลานที่เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมสารกัมมันตรังสีต่างๆ เหล่านี้ในอีกมากมาย และนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติอยู่แล้วตั้งแต่กำเนิดของโลกมนุษย์ แต่ไม่ได้เป็นสารกัมมันตรังสีที่อยู่ในอนุกรมสารกัมมันตรังสีที่ได้กล่าวไปแล้ว ได้แก่ ^{40}K เป็นต้น ส่วนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นก็มีอยู่ในดินและทรายด้วยเช่นกัน เช่น ^{137}Cs ซึ่งนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากฝุ่นกัมมันตรังสีของการทดสอบอาวุธนิวเคลียร์ของประเทศที่มีการสะสมอาวุธนิวเคลียร์ การตรวจวัดปริมาณของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนี้การนำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติไปคำนวณหาค่าปริมาณโดสของรังสีแกมมา (gamma radiation dose) จากนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ใหญ่ที่สุด ก็มีความจำเป็นและสำคัญเช่นกัน [1-4] หลังจากนั้นจึงได้มีการกำหนดให้เป็นค่าปริมาณโดสของรังสีแกมมาที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (external dose) ของประชากรโลก (world population) โดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์การสหประชาชาติเกี่ยวกับผลรังสีปรมาณู (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR) [5-7]

สำหรับในประเทศไทยนั้น ทางสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นหน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงในการตรวจสอบ ดูแลและประเมินค่าความเป็นอันตรายในการได้รับรังสีจากธรรมชาติและจากที่มนุษย์ผลิตขึ้น ทางสำนัก

งานฯ ได้ดำเนินการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น อากาศ น้ำ น้ำฝน ฝุ่นกัมมันตรังสี (fallout) ดิน หญา พืชผักและอาหารประเภทต่างๆ จากตัวอย่างในบริเวณต่างๆ ทั่วประเทศไทยมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2504 เป็นต้นมาและดำเนินการอย่างต่อเนื่อง โดยมีหน่วยงานภายในที่ทำหน้าที่รับผิดชอบโดยตรง คือ กองการวัดกัมมันตภาพรังสี ในปัจจุบันนี้ทางสำนักงานสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู ได้เข้ามาทำหน้าที่รับผิดชอบดังกล่าวนี้แทนสำหรับในภาคใต้ของประเทศไทยนั้น ทางสำนักงานฯ ก็ได้มีการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติในตัวอย่างจากธรรมชาติไว้ด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่แล้วการดำเนินการของสำนักงานฯ จะเป็นการดำเนินการแบบสุ่ม คือ จะดำเนินการสุ่มเลือกบริเวณเก็บตัวอย่างเฉพาะบางบริเวณ บางอำเภอ และบางจังหวัดเพื่อทำการตรวจวัดและวิเคราะห์เท่านั้น ทั้งนี้ เนื่องจากงบประมาณที่ได้รับในแต่ละปีมีจำนวนจำกัดและจำนวนเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานยังมีจำนวนค่อนข้างน้อย ด้วยเหตุนี้จึงยังทำให้ขาดข้อมูลของปริมาณรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติหลายๆ บริเวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณจังหวัดที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่ใช้ในการเพาะปลูกหรือการเกษตรกรรมของทางภาคใต้ เช่น พัทลุง กระบี่ สตูล และ นครศรีธรรมราช เป็นต้น

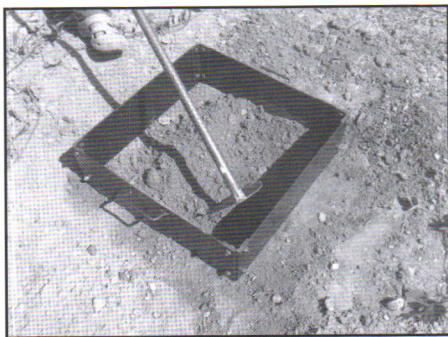
เมื่อพิจารณาจากรายงานประจำปีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส) ที่ได้ทำการตรวจวัด ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ตัวอย่างดินบางบริเวณของจังหวัดพัทลุง (มีข้อมูลค่อนข้างน้อยเฉพาะในอำเภอกงหราของจังหวัดพัทลุงเท่านั้น) มีค่าเฉลี่ยของกัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{40}K , ^{226}Ra , และ ^{232}Th เป็น 1,186 Bq/kg, 183 Bq/kg และ 163 Bq/kg ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลของนักวิจัยทั่วโลกที่มีค่าเป็น 474 Bq/kg, 33 Bq/kg และ 36 Bq/kg ตามลำดับ โดยที่สำนักงานฯ ยังไม่ได้มีการสำรวจหรือตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของนิวไคลด์กัมมันตรังสีใน

ธรรมชาติ (โดยเฉพาะค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs) ในตัวอย่างดินของทุกอำเภอในจังหวัดพัทลุงมาก่อน ดังนั้น พื้นที่ดังกล่าวข้างต้นเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ในการทำวิจัยเกี่ยวกับการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน โดยเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ 6 อำเภอ ได้แก่ อำเภอป่าพะยอม อำเภอศรีบรรพต อำเภอกวนขนุน อำเภอศรีนครินทร์ อำเภอเมือง และอำเภอกงหรา ของจังหวัดพัทลุง โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการได้รับรังสีจากธรรมชาติของประชาชนที่อาศัยอยู่ในแต่ละอำเภอของจังหวัดและสามารถนำข้อมูลดังกล่าวนี้ไปประเมินค่าความเสี่ยงของการได้รับรังสีในธรรมชาติของพื้นที่ดังกล่าวของจังหวัดพัทลุงได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

1. เก็บตัวอย่างดิน จำนวน 69 ตัวอย่าง โดยทำการเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่างดินให้ได้ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 นำตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกให้ได้น้ำหนักประมาณ 1,500 กรัม บันทึกสถานที่และพิกัดทางภูมิศาสตร์



ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างดินจากแหล่งชุมชน

2. นำตัวอย่างดินที่เก็บมาผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้แห้งในระดับหนึ่ง หลังจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 100°C จากนั้นทำการร่อนตัวอย่างดินด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างดินที่ตากไว้ ณ อุณหภูมิห้อง
และการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh

3. นำตัวอย่างดินบรรจุลงในกระปุกพลาสติกที่เตรียมไว้ ทำการปิดกระปุกพลาสติกให้สนิท เพื่อป้องกันการปลดปล่อยแก๊สเรดอน-ทอรอน ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน ก่อนทำการวัด เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน ดังแสดงในภาพที่ 3 แล้วนำตัวอย่างดินทั้งหมดไปตรวจวัดด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี



ภาพที่ 3 ตัวอย่างดินที่บรรจุในกระปุกพลาสติก
และปิดผนึกด้วยเทปกาว

วิธีดำเนินการทดลองและการคำนวณ

1. จัดเตรียมหัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี เปิดโปรแกรมและปรับค่าต่าง ๆ ของหัววัดและระบบ วิเคราะห์ข้อมูล ทำการวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสี แกมมาของตัวอย่างดิน จำนวน 69 ตัวอย่าง ใช้เวลาในการ ตรวจวัดตัวอย่างละ 10,800 วินาทีหรือ 3 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์พีคพลังงาน (photo peak) จาก สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์ Genie 2000 ในการวิเคราะห์สเปกตรัม พลังงานของรังสีแกมมาและคำนวณค่ากัมมันตภาพ จำเพาะของ ^{40}K ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน ทั้ง 69 ตัวอย่าง ที่เก็บจาก 6 อำเภอ ทางตอนบนของจังหวัด พัทลุง โดยมีหลักในการวิเคราะห์ คือ วิเคราะห์ ^{40}K จะใช้ โฟโตพีคที่พลังงาน 1,460.8 keV จากเส้นสเปกตรัม พลังงานของตัวเอง สำหรับ ^{226}Ra จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 351.9 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ^{214}Pb ส่วน ^{232}Th จะใช้โฟโตพีคที่พลังงาน 583.2 keV จากเส้น สเปกตรัมพลังงานของ ^{208}Tl และ ^{137}Cs จะใช้โฟโตพีค ที่พลังงาน 661.7 keV จากเส้นสเปกตรัมพลังงานของ ตัวเอง ทั้งนี้ ได้คำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (absorbed dose rates in air ; D) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (radium equivalent activity ; R_{eq}) ดัชนีความเสี่ยงของ รังสีภายนอก (external hazard index ; H_{ex}) และค่าปริมาณ รังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (annual external effective dose rate ; AED_{out}) ของ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณต่าง ๆ ในจังหวัดพัทลุง โดยนำข้อมูล ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th มาใช้ในการคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้ [8-11]

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

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

$$H_{ex} = \frac{C_K}{4810} + \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} \leq 1 \dots\dots\dots(3)$$

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

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

3. เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs และค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ในตัวอย่างดินทั้ง 69 ตัวอย่างที่เก็บจาก 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุงกับค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดินที่ทำการตรวจวัดโดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติบริเวณจังหวัดสงขลาของประเทศไทย ข้อมูลของกลุ่มนักวิจัยในประเทศต่าง ๆ และค่าเฉลี่ยของการวิจัยทั่วโลก

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสี ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดินที่เก็บจาก 6 อำเภอ จำนวน 69 ตัวอย่างของจังหวัดพัทลุง ได้คำนวณค่าพิสัยและค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ทั้งหมดข้างต้นไว้ในตารางที่ 1

จากข้อมูลที่แสดงค่าพิสัยและค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสี ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ

ตารางที่ 1 แสดงค่าพิสัยและค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน 69 ตัวอย่าง จาก 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุง

สถานที่	ค่าพิสัยและค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย (Bq/kg)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{137}Cs
อ.ป่าพะยอม	1,132.79 – 6,898.04	41.54 - 150.91	29.35 - 99.59	0.00 - 4.63
(10 ตัวอย่าง)	$3,377.62 \pm 201.88$	91.12 ± 5.94	67.46 ± 5.07	0.82 ± 0.39
อ.ศรีบรรพต	978.55 – 11,276.78	51.61 - 294.16	32.95 - 137.78	0.00 - 1.33
(7 ตัวอย่าง)	$5,127.25 \pm 242.48$	139.94 ± 6.85	78.56 ± 5.48	0.32 ± 0.68
อ.ควนขนุน	148.17 – 6,708.85	16.89 - 183.06	22.93 - 102.94	0.00 - 2.94
(17 ตัวอย่าง)	$1,878.05 \pm 150.75$	79.39 ± 5.44	53.21 ± 4.46	0.32 ± 0.50
อ.ศรีนครินทร์	1,038.37 – 10,939	36.23 - 263.52	21.49 - 160.02	0.00 - 6.22
(8 ตัวอย่าง)	$6,356.39 \pm 272.07$	175.98 ± 7.89	95.18 ± 6.26	1.60 ± 1.11
อ.เมือง	318.00 – 8,943.04	17.23 - 494.92	12.75 - 221.67	0.00 - 5.20
(19 ตัวอย่าง)	$3,444.73 \pm 201.09$	157.53 ± 7.29	86.64 ± 5.69	1.58 ± 0.85
อ.กงหรา	1,272.56 – 10,343.83	42.30 - 518.45	42.54 - 236.19	0.00 - 12.39
(8 ตัวอย่าง)	$6,893.66 \pm 309.91$	274.74 ± 9.81	137.10 ± 7.59	3.29 ± 1.26
พิสัย	148.17 – 11,276.78	16.89 – 518.45	12.75 – 236.19	0.00 - 12.39
ค่าเฉลี่ย	$4,512.95 \pm 226.71$	153.12 ± 7.20	86.36 ± 5.76	1.17 ± 0.80

^{137}Cs ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างดินที่เก็บจาก 6 อำเภอ จำนวน 69 ตัวอย่างของจังหวัดพัทลุง ดังแสดงในตารางที่ 1 ได้นำข้อมูลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดและวิเคราะห์ในตัวอย่างดินที่เก็บจากบางบริเวณในจังหวัดสงขลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537-2545 ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ [12] และข้อมูลจากการวิจัยทั่วโลก โดยแสดงผลการเปรียบเทียบที่ได้ไว้ในตารางที่ 2

ส่วนผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) กัมมันตภาพสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}) ดัชนี

ความเสี่ยงของรังสีภายนอก (H_{ex}) และอัตราปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี โดยใช้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างดินที่เก็บจาก 6 อำเภอ ในจังหวัดพัทลุง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้เมื่อใช้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างดินจากบริเวณต่าง ๆ ทั้งในประเทศและทั่วโลก ได้แสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดินจาก 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุง กับข้อมูลของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ในประเทศไทยและข้อมูลจากการวิจัยทั่วโลก

รายการ	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย (Bq/kg)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{137}Cs
ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างดิน จาก 6 อำเภอ ในจังหวัดพัทลุง	$4,512.95 \pm 226.71$	153.12 ± 7.20	86.36 ± 5.76	1.17 ± 0.80
ค่าเฉลี่ยของสำนักงาน ปส. (จังหวัดสงขลา)	511.04 ± 7.04	171.55 ± 3.13	211.19 ± 1.98	1.13 ± 0.49
ค่าเฉลี่ยของสำนักงาน ปส. (ประเทศไทย)	400	48	40	—*
ค่าเฉลี่ยของการวิจัยทั่วโลก	400	35	30	—*

* ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินจาก 6 อำเภอ
ของจังหวัดพัทลุง ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) กัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq})
ดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย
ประจำปี (AED_{out}) และเปรียบเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR [5-7]

สถานที่ (จำนวนตัวอย่าง)	S.A (average) (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.ศรีนครินทร์ (8)	6356.39	175.98	95.18	403.85	800.91	2.16	0.50
อ.เมือง (19)	3444.73	157.53	86.64	268.75	546.28	1.48	0.33
อ.งหรา (8)	6893.66	247.74	137.10	497.21	1000.89	2.71	0.61
ค่าเฉลี่ย	4512.95	153.12	86.36	311.09	623.64	1.69	0.38
UNSCEAR[5-7]	—*	—*	—*	55.00	370.00	1.00	0.48

* ไม่มีข้อมูล

อภิปรายผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) เกี่ยวกับชนิดของไอโซโทปที่มีอยู่ในตัวอย่างดิน

ไอโซโทปสารกัมมันตรังสีที่ตรวจพบในตัวอย่างดิน
ณ บริเวณต่างๆ จำนวน 69 ตัวอย่าง จาก 6 อำเภอ
ทางตอนบนของจังหวัดพัทลุง โดยไอโซโทปของสาร
กัมมันตรังสีที่ตรวจพบนี้มีอยู่ในอนุกรมทอเรียม คือ ^{208}Tl ,
 ^{212}Pb , ^{228}Ac และในอนุกรมยูเรเนียม คือ ^{214}Pb และ ^{214}Bi
ยังมีไอโซโทปสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน ซึ่งเกิดจาก
การกระทำของมนุษย์ คือ ^{137}Cs นอกจากนี้ ยังพบว่า
ไอโซโทปสารกัมมันตรังสีที่ไม่ได้อยู่ในอนุกรมกัมมันตรังสี
ใดๆ คือ ^{40}K ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสะสมอยู่ในดิน หิน และทราย
บนผิวโลกมาตั้งแต่การก่อกำเนิดของโลก

2. ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของค่ากัมมันตภาพ
จำเพาะของ ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน

จาก 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง

เมื่อพิจารณาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์
 ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน ณ บริเวณต่าง ๆ
จำนวน 69 ตัวอย่าง จาก 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุง
ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 148.17-
11,276.78 Bq/kg สำหรับ ^{40}K , 16.89 - 518.45 Bq/kg
สำหรับ ^{226}Ra , 12.75 - 236.19 Bq/kg สำหรับ ^{232}Th
และ 0.00-12.39 Bq/kg สำหรับ ^{137}Cs มีค่าเฉลี่ยเป็น
 $4,512.95 \pm 226.71$ Bq/kg, 153.12 ± 7.20 Bq/kg,
 86.36 ± 5.76 Bq/kg และ 1.71 ± 0.80 Bq/kg ตามลำดับ
ซึ่งได้แสดงผลโดยสรุป ในตารางที่ 1

3. ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพ
จำเพาะในตัวอย่างดิน จาก 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง
กับข้อมูลของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ใน
ประเทศไทยและข้อมูลจากการวิจัยทั่วโลก

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดิน จาก 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง กับข้อมูลของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ในประเทศไทยและข้อมูลจากการวิจัยทั่วโลก ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในบริเวณจังหวัดสงขลาของประเทศไทย ประมาณ 7.83 เท่า และมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทยและทั่วโลก เป็นปริมาณเท่ากัน คือ ประมาณ 10.28 เท่า

สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{226}Ra ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เฉพาะในบริเวณจังหวัดสงขลาของประเทศไทย อยู่ประมาณ 0.11 เท่า และมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทยและทั่วโลก ประมาณ 2.19 เท่า และ 3.37 เท่า ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{232}Th ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เฉพาะในบริเวณจังหวัดสงขลาของประเทศไทย ประมาณ 0.59 เท่า แต่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทยและทั่วโลกเป็นปริมาณ 1.16 เท่า และ 1.89 เท่า ตามลำดับ กรณีที่ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ทั้ง 3 นิวไคลด์ คือ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดิน จาก 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุงมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่นำมาเปรียบเทียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลของนักวิจัยที่มีอยู่ทั่วโลก ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจาก ทั่วทุกบริเวณบนโลกจะมีการกระจายของนิวไคลด์รังสีต่างๆ เหล่านี้แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศของบริเวณนั้นๆ สำหรับประเทศไทยนั้น ยังไม่มีข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวนี้ที่มีการตรวจวัดไว้อย่างเป็นระบบ ทั้งนี้เพื่อนำใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงที่เป็นที่ยอมรับได้ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

และสำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{137}Cs ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 เช่นเดียวกัน พบว่า มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในบริเวณจังหวัดสงขลาของประเทศไทยอยู่เล็กน้อย คือประมาณ 0.04 เท่า

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างดิน จำนวน 69 ตัวอย่าง ที่เก็บจากบริเวณต่าง ๆ ใน 6 อำเภอ ของจังหวัดพัทลุง พบว่า มีค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K สูงกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในบริเวณจังหวัดสงขลา ค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทยและค่าเฉลี่ยของการวิจัยทั่วโลก ส่วน ^{226}Ra และ ^{232}Th ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในเขตจังหวัดสงขลา แต่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทยและค่าเฉลี่ยของการวิจัยทั่วโลก สำหรับค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{137}Cs ในตัวอย่างดิน พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในเขตจังหวัดสงขลาของประเทศไทย

เมื่อนำค่าดังกล่าวที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างดิน ไปคำนวณค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}) และค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่เผยแพร่โดย UNSCEAR (1988, 1993, 2000)[5-7] แต่ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (AED_{out}) มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่เผยแพร่โดย UNSCEAR (1988, 1993, 2000)[5-7]

สำหรับค่าเฉลี่ยของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K ในตัวอย่างดินทั้ง 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุงมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเฉพาะในเขตจังหวัดสงขลาของประเทศไทย และค่าเฉลี่ย

ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่มีอยู่ทั่วประเทศไทย และทั่วโลก และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}) และค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ที่คำนวณได้ในตัวอย่างดิน 69 ตัวอย่างที่เก็บจาก 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่เผยแพร่โดย UNSCEAR

ดังนั้น จึงควรมีการตรวจสอบและทำการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K ในตัวอย่างดินบริเวณจังหวัดพัทลุง ทั้งนี้ เพื่อเป็นการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพของงานวิจัยขึ้นนี้ โดยใช้วิธีการวิจัยในรูปแบบอื่นๆ เช่น วิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ทางเคมี เป็นต้น และเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนที่จะประกาศผลการทดลองสู่สาธารณชนต่อไป และเมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้ว โดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างดินจำนวน 69 ตัวอย่างใน 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง ในการคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงของการได้รับอันตรายจากรังสี สามารถกล่าวได้ว่า ประชาชนที่อาศัยอยู่ใน 6 อำเภอของจังหวัดพัทลุง ได้แก่ อำเภอป่าพะยอม อำเภอศรีบรรพต อำเภอกวนขนุน อำเภอศรีนครินทร์ อำเภอเมือง และอำเภอกงหรา มีการได้รับปริมาณรังสีจากธรรมชาติโดยเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าบริเวณต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ แต่ยังมีปริมาณรังสีเฉลี่ยจากการได้รับรังสีจากธรรมชาติอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย เมื่อใช้การเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลของค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (AED_{out}) ที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลของ UNSCEAR [5-7]

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตบัณฑิตวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยี ระดับปริญญาโท ของโครงการร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณทางสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

ที่ให้การสนับสนุนทางด้านวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง ขอขอบคุณ รศ. ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารมาตรฐานทางรังสีเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีในตัวอย่างดินที่ต้องการตรวจวัด และท้ายสุดต้องขอขอบคุณนางสาวอุทัยรัตน์ บุญครองชีพ และนางสาวธมวดี ทองนะ นิสิตปริญญาโท และน้องานิสิตปริญญาตรี วท.บ. ฟิสิกส์ทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Othman, I. and Yassine, T. (1995). Natural Radioactivity in the Syrian Environment. **The Science of the Total Environment**. 170. 119-124.
- [2] Kannan, V., Rajan, M.P., Iyengar, M.A.R. and Ramesh, R. (2002). Distribution of natural and anthropogenic radionuclide in soil and beach sand sample of Kalpakkam (India) using hyperpure germanium (HeGe) gamma ray spectrometry. **Applied Radiation and Isotopes**. 57, 109-119.
- [3] Seddeek, M.K., Badran, H.M., Sharshar, T. and Elnimr, T. (2005). Characteristics Spatial Distribution and Vertical Profile of Gamma-Ray Emitting Radionuclides in the Coastal Environment of Nort Sinai. **Journal of Environmental Radioactivity**. 84, 21-50.
- [4] Oyedele, J.A. (2006). Measurment of the Natural Radioactivity at the International High Energy Stereoscopic System (HESS) Project in Sourthern Africa. **Applied Radiation and Isotopes**. 64, 686-688.

- [5] UNSCEAR. (1988). **Sources, effects and risk of ionizing radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
- [6] UNSCEAR. (1993). **Exposure from natural sources of radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
- [7] UNSCEAR. (2000). **Sources, effects and risk of ionizing radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations.
- [8] Singh, S., Rani, A. and Mahajan, R.K. (2005). ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. **Radiation Measurements**, 39, 413-439.
- [9] Beretka, J. and Mathew, P.J. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. **Health Physics**, 48, 87-95.
- [10] Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J.G., Santos, A.M.A., Mosquera, B., Carvalho, C., Baptista Filho, M. and Umisedo, N.K. (2006). Measurement of Natural Radioactivity in Brazilian Beach Sands. **Radiation Measurements**, 41, 189-196
- [11] Mohanty, A.K., Sengupta, D., Das, S.K., Vijayan, V. and Saha, S.K. (2004). Natural radioactivity in the newly discovered high background radiation area on the eastern coast of Orissa, India. **Radiation Measurement**, 38, 153- 165.
- [12] สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2545. การศึกษาและการประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม. รายงานวิชาการประจำปี 2537-2545. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.