

กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

ปรีดา นวลจริง¹ ธวัช ชิตตระการ² และ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ³

Abstract

Nuanjing, P., Chittrakarn, T. and Bhongsuwan, T.

Natural radioactivity in the area of Nakhon Si Thammarat Province

Songklanakar J. Sci. Technol., 2007, 29(4) : 1183-1198

This research work aims to study the specific activity of natural radioactivity in soil, rock, construction sand and shallow well water samples in the area of Nakhon Si Thammarat Province. Totally 161 samples were collected and analysed using gamma-ray spectrometry technique. The specific activities of Ra-226, Th-232 and K-40 in soil samples ranged from 8 to 203 (mean 96 ± 18) Bq/kg, 12 to 236 (mean 88 ± 23) Bq/kg and 21 to 1191 (mean 524 ± 127) Bq/kg, in rock samples ranged from 11 to 113 (mean 46 ± 14) Bq/kg, 3 to 113 (mean 47 ± 16) Bq/kg and 18 to 1305 (mean 472 ± 187) Bq/kg, in sand samples ranged from 3 to 91 (mean 42 ± 5) Bq/kg, 14 to 91 (mean 50 ± 5) Bq/kg and 102 to 966 (mean 509 ± 57) Bq/kg, respectively. The radium equivalent activity of soil samples in 2 districts was found to be higher than 370 Bq/kg. The radiation hazard indices calculated for assessment of the radiation hazards arising due to the use of these rock and sand samples in the construction of dwellings were within the safety limits recommended by UNSCEAR. The mean estimated outdoor dose rates in soil and rock samples were 119 ± 23 and 70 ± 21 nGy/h, respectively. The mean estimated indoor dose rate in sand samples was 134 ± 9 nGy/h. The specific activities of Ra-226 in well water samples ranged from 2 to 179 (Mean 17 ± 7) mBq/l. Only one water sample from Muang District had the Ra-226 specific activity of 179 mBq/l, which was higher than the maximum contaminant level (111 mBq/l).

Key words : natural radioactivity, radium-226, soil, rock, construction sand, shallow well water, gamma-ray spectrometer

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand.

¹นักศึกษาลัทธิสุตร วท.ม. (ฟิสิกส์) ²Ph.D. (Nuclear Physics) รองศาสตราจารย์ ³Ph.D. (Applied Geophysics) รองศาสตราจารย์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112.

Corresponding e-mail : tripop.b@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 1 พฤศจิกายน 2549 รับลงพิมพ์ 12 กุมภาพันธ์ 2550

บทคัดย่อ

ปรีดา นวลจริง ธวัช ชิตตระการ และ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ
กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2550 29(4) : 1183-1198

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเก็บตัวอย่างดิน หิน ทราช และน้ำบ่อตื้น รวม 161 ตัวอย่าง วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา ผลการวิจัยพบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างดิน อยู่ในช่วง 8-203 (เฉลี่ย 96 ± 18) Bq/kg, 12-236 (เฉลี่ย 88 ± 23) Bq/kg และ 21-1191 (เฉลี่ย 524 ± 127) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างหินมีค่าอยู่ในช่วง 11-113 (เฉลี่ย 46 ± 14) Bq/kg, 3-113 (เฉลี่ย 47 ± 16) Bq/kg และ 18-1305 (เฉลี่ย 472 ± 187) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างทราชมีค่าอยู่ในช่วง 3-91 (เฉลี่ย 42 ± 5) Bq/kg, 14-91 (เฉลี่ย 50 ± 5) Bq/kg และ 102-966 (เฉลี่ย 509 ± 57) Bq/kg ตามลำดับ ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของดินใน 2 อำเภอมีค่าสูงกว่า 370 Bq/kg เมื่อประเมินความเสี่ยงการได้รับสัมผัสรังสีของประชาชนด้วยค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) จากการใช้วัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือน พบว่า ตัวอย่างหิน และทราช มีค่า H_{ex} และค่า H_{in} ไม่เกินระดับปลอดภัย การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างดินและหิน พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 119 ± 23 และ 70 ± 21 nGy/h ตามลำดับ การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายในอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทราช พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 134 ± 9 nGy/h และจากการหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ในน้ำบ่อตื้น พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 2-179 mBq/l (เฉลี่ย 17 ± 7 mBq/l) โดยมีตัวอย่างน้ำบ่อตื้น 1 ตัวอย่างจากอ.เมือง ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 เท่ากับ 179 mBq/l ซึ่งสูงกว่าค่าระดับปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (111 mBq/l)

ในชีวิตประจำวันมนุษย์ได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีจากธรรมชาติที่มีอยู่ในและภายนอกอวัยวะ การได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอก (external exposure) มาจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติทั้งในดิน หิน และจากรังสีคอสมิกจากนอกโลกที่แผ่เข้ามาถึงชั้นบรรยากาศของโลก การได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีจากภายใน (internal exposure) มาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในอาหาร ในน้ำที่บริโภคเข้าไป และในอากาศ กัมมันตภาพรังสีในดินมาจากอนุกรมกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในธรรมชาติ (Singh et al., 2005) โดยมี U-238 และ ทอเรียม-232 เป็นนิวไคลด์แม่ของอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียม ตามลำดับ ผลกระทบจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา ซึ่งเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (ionizing radiation) มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตคือ เมื่อมีการได้รับสัมผัสรังสีเข้าสู่ร่างกายจะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีการแตกตัว ซึ่งอาจทำให้เซลล์และระบบการทำงานของ

เซลล์เปลี่ยนแปลงไปจนเกิดอาการผิดปกติในร่างกาย การได้รับสัมผัสรังสีจากธรรมชาติดังกล่าวแม้จะมีปริมาณไม่สูงมากนัก แต่หากเป็นการได้รับสัมผัสอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายสิบปี ก็อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้เนื่องจากไม่มีขีดเริ่มใดๆ ในการได้รับสัมผัสรังสีแล้วไม่เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ การได้รับสัมผัสรังสีปริมาณสูงขึ้นไปเพิ่มโอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพมากขึ้นเป็นสัดส่วนกัน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ เพื่อใช้ในการประเมินการได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีของประชาชน และตรวจสอบระดับความปลอดภัยจากรังสี

กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน หิน พืช น้ำ และอากาศ (Malanca et al., 1996) ดังนั้นการได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอกของประชากรโลกโดยส่วนใหญ่จึงเป็นผลมาจากการแผ่รังสีจากธรรมชาติ (UNSCEAR, 1988) ผลการประเมินปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อปีที่มนุษย์ได้รับสัมผัสจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติ พบว่ามี

ค่าประมาณ 2.4 mSv (UNSCEAR, 2000) แบ่งเป็นการได้รับสัมผัสรังสีจากรังสีคอสมิก 0.4 mSv จากการแผ่รังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ในโลก 0.5 mSv จากการหายใจโดยการสูดเอาเรดอนและนิวไคลด์ลูกที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอนเข้าสู่ร่างกาย 1.2 mSv และจากอาหารและน้ำที่เรบริโภคเข้าไป 0.3 mSv

สำหรับในประเทศไทย ผลการตรวจวัดอัตราปริมาณรังสีคอสมิกเฉลี่ยในอากาศจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลก (terrestrial gamma radiation) มีค่าเท่ากับ 77 และ 48 nGy/h สำหรับภายนอก (outdoor) และภายใน (indoor) อาคารบ้านเรือน ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000) ทั้งนี้การได้รับสัมผัสปริมาณรังสีจากภายนอกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรม U-238, อนุกรม ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ที่มีอยู่ในดิน หิน ตามลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่นั้นๆ (Quindos *et al.*, 1994)

จากรายงานการวิจัยผลการตรวจวัดปริมาณยูเรเนียมสมมูล (equivalent uranium) ของหินแกรนิตในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย (Ishihara, 1980) พบว่า หินแกรนิตที่เขากระช่องมีความเข้มข้น 11 ppm ที่ อ.เมือง จ.สงขลา มีค่า 18 ppm และจากการตรวจวัดปริมาณยูเรเนียมในหิน

ชนิดต่างๆ ในพื้นที่ จ.สงขลา พัทลุง และ ปัตตานี (สุขสวัสดิ์, 2537) พบว่า มีปริมาณยูเรเนียมสมมูลเฉลี่ยสำหรับหินแกรนิตเท่ากับ 18.43 ± 4.81 ppm หินปูน 3.12 ± 2.83 ppm หินดินดาน 17.97 ± 3.53 ppm และหินทราย 1.28 ± 3.83 ppm เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณยูเรเนียมในหินแกรนิตที่มีค่า 18.43 ppm กับปริมาณยูเรเนียมในหินแกรนิตทั่วไปที่มีค่าเท่ากับ 4.8 ppm พบว่ามีค่าสูงกว่าถึง 4 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหินแกรนิตในพื้นที่ภาคใต้มีความเข้มข้นยูเรเนียมสูงกว่าหินแกรนิตทั่วไปมาก

จากการวิเคราะห์แผนที่กัมมันตภาพรังสีทางอากาศ (DMR, 1989) พบว่า มีบางพื้นที่ใน จ.นครศรีธรรมราช มีความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินสูงกว่า 4 ppm (Figure 1) ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometrical mean) ของความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินทั่วประเทศที่มีค่าเท่ากับ 2.1 ppm (ไตรภพ ผ่องสุวรรณ, ติดต่อส่วนตัว) ซึ่งอาจทำให้ประชาชนที่อาศัยในพื้นที่ดังกล่าวมีการได้รับสัมผัสรังสีจากธรรมชาติสูงกว่าในพื้นที่อื่น จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาของการศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่นี้

รายงานวิจัยนี้เป็นผลการศึกษาจากกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จ.นครศรีธรรมราช ได้แก่ ยูเรเนียมสมมูล

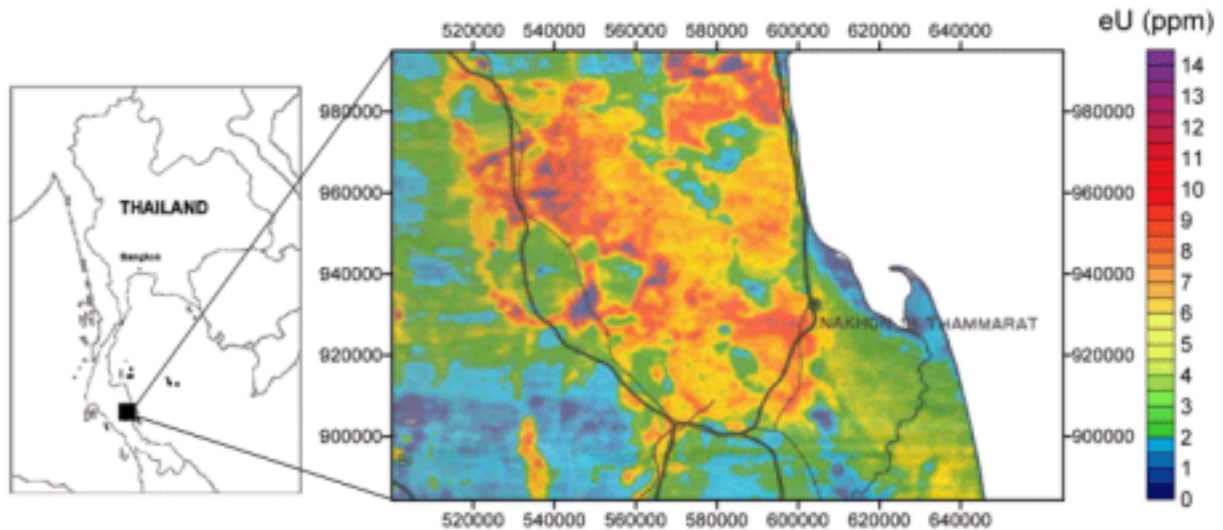


Figure 1. Color map showing the concentration of equivalent uranium at ground surface in Nakhon Si Thammarat Province. (Modified from DMR, 1989)

(Color figure can be viewed in the electronic version)

หรือเรเดียม-226 (Ra-226) ทอเรียมสมมูล หรือทอเรียม-232 (Th-232) และโพแทสเซียม-40 (K-40) ในตัวอย่างดิน หิน และทรายก่อสร้าง รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำบ่อต้น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา พื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 6 อำเภอ 2 กิ่งอำเภอ ได้แก่ อ.เมือง อ.ฉวาง กิ่งอ.ช้างกลาง อ.ลานสกา อ.ลำพรพรรณ อ.พิปูน อ.พรหมคีรี และกิ่ง อ.นบพิตำ ซึ่งมีลักษณะทางธรณีวิทยาของหินประกอบด้วยหินแกรนิตมหายุคมีโซโซอิกในบริเวณตอนกลางวางตัวอยู่ในแนวเหนือใต้ ด้านทิศตะวันตกประกอบด้วยหินปูนยุคครีตอเวียเนียน ตะกอนยุคควอเตอร์นารี และหินดินดานยุคคาร์บอนิเฟอรัส ส่วนด้านทิศตะวันออกประกอบด้วยตะกอนควอเตอร์นารี ซึ่งวางตัวเป็นแนวกว้าง

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินได้ชั้นหน้าดิน โดยขุดลึกจากผิวดินลงไปประมาณ 15 cm จำนวน 26 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินเก็บจากหินโผล่ในพื้นที่ศึกษา จำนวน 18 ตัวอย่าง ตัวอย่างทรายก่อสร้าง เก็บจากจุดที่กำลังมีการก่อสร้างบ้านเรือน จำนวน 62 ตัวอย่าง และตัวอย่างน้ำจากบ่อต้นจำนวน 55 บ่อ ซึ่งในแต่ละจุดจะเก็บน้ำจำนวน 20 L ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา Figure 2 แสดงตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่าง

ตรวจสอบด้วยเครื่องบอกพิกัดภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม (Trimble Navigator, Basic Plus, USA)

2. การเตรียมตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง และน้ำบ่อต้น

นำตัวอย่างดิน และทรายก่อสร้างมาทำการคัดแยกขยะออกจากตัวอย่าง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 h เพื่อกำจัดความชื้น ส่วนตัวอย่างหินจะทำการบดละเอียดก่อนจะนำเข้าตู้อบ วางตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจะนำไปร่อนผ่านตะแกรง เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จากนั้นจะนำตัวอย่างบรรจุใส่กระปุก ชั่งน้ำหนัก และปิดฝาให้สนิท

นำตัวอย่างน้ำบ่อต้นจำนวน 20 L มาผ่านอุปกรณ์จับเรเดียมในน้ำที่ภายในบรรจุสารจับเรเดียมในน้ำ (สุภัทรา, 2547; จเร, 2548) โดยให้ตัวอย่างน้ำผ่านสารจับเรเดียมด้วยอัตรา 2 L/min จากนั้นบรรจุสารจับเรเดียมที่เตรียมได้ลงในกระปุกพลาสติก ปิดผนึกกระปุกตัวอย่างให้สนิท เพื่อเตรียมวัดรังสีแกมมาของเรเดียม-226 ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา

3. การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่าง

สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างดิน หิน และทรายก่อสร้างจะวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา ที่ใช้

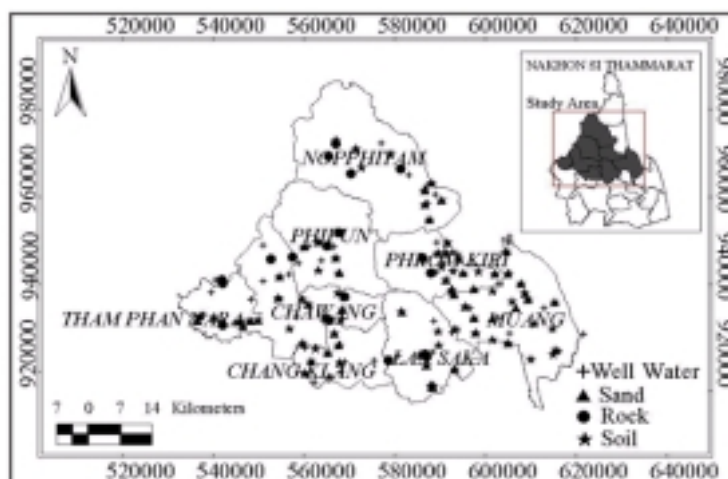


Figure 2. Boundary map of Nakhon Si Thammarat Province showing the study area and the sampling sites.

ห้ววัดผลึกโซเดียมไอโอดี (Gammadata, Model GDM 10, Sweden) โดยห้ววัดอยู่ภายในถ้ำตะกั่วกำบังรังสีกัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ทำโดยใช้สารอ้างอิงมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) ได้แก่ IAEA RGU-1 (IAEA, 1987), IAEA RGTh-1 (IAEA, 1987) และ KCl (Merck, USA)

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้ ค่ากัมมันตภาพของยูเรเนียม คำนวณจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของ Bi-214 ที่พลังงาน 1.76 MeV ค่ากัมมันตภาพของทอเรียม-232 คำนวณจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของ Tl-208 ที่พลังงาน 2.62 MeV และสำหรับโพแทสเซียม-40 คำนวณจากยอดพลังงาน 1.46 MeV แต่เนื่องจากในตัวอย่างที่ศึกษามักจะมีนิวไคลด์ทั้งสามร่วมกันอยู่ในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งทำให้มีการรบกวนรังสีแกมมาซึ่งกันและกัน จึงต้องทำการปรับแก้ผลการรบกวนรังสีแกมมาระหว่างนิวไคลด์ทั้งสามโดยใช้เทคนิค Compton Stripping (Chiozzi *et al.*, 2000)

สเปกตรัมรังสีแกมมาของน้ำบ่อต้นจะถูกวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ติดตั้งห้ววัด HPGc (Canberra, Model GC1319, USA) ซึ่งอยู่ภายในถ้ำตะกั่วกำบังรังสีกัมมันตภาพ (Canberra, Model 747, USA) ห้ววัดมีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 13.9% และมีกำลังแยก 1.75 keV ที่พลังงานรังสีแกมมาของโคบอลต์-60 ที่ 1332 keV และมีอัตราส่วนระหว่างยอดพลังงานต่อฐานคอมพ์ตัน 44.8 : 1

การวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพของเรเดียม-226 คำนวณจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของเรเดียม-226 ที่พลังงาน 186.2 keV ใช้เวลาวัดรังสี 21600 s โดยได้ทำการปรับเทียบมาตรฐานระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ในการวิเคราะห์เรเดียม-226 ที่ยอดพลังงาน 186.2 keV ด้วยสารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA RGU-1 โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.057430 cps/Bq ค่าประสิทธิภาพที่ได้นี้จะใช้ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพของเรเดียม-226 ในสารตัวอย่างต่อไป

ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ หรือค่าขีดจำกัดของการวัด (the detection limit; Ln) ของระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ในการศึกษารังสี คำนวณจากสูตรของ Rybach (1988) สำหรับระบบวัดที่ใช้ห้ววัด

NaI(Tl) มีค่าขีดจำกัดของการวัดเท่ากับ 11, 4 และ 3 Bq สำหรับโพแทสเซียม-40 ยูเรเนียมสมมูล และทอเรียมสมมูลตามลำดับ ส่วนระบบที่ใช้ห้ววัด HPGc มีค่าขีดจำกัดของการวัดเรเดียม-226 เท่ากับ 19 mBq

4. กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม

ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (radium equivalent activity; Ra) เป็นค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักของกัมมันตภาพรังสีของทั้ง 3 นิวไคลด์ จากการศึกษพบว่าเรเดียม-226 ที่มีกัมมันตภาพ 370 Bq/kg จะให้ค่าอัตราปริมาณรังสีเทียบเท่าทอเรียม-232 กัมมันตภาพ 259 Bq/kg หรือโพแทสเซียม-40 กัมมันตภาพ 4810 Bq/kg ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมคำนวณได้จากสมการ (1)

$$Ra_{eq} = 370 \left(\frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \quad (1)$$

เมื่อ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะในหน่วย Bq/kg ของเรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ตามลำดับ

5. อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

5.1 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือน

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ หรือโดสจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลก สำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือน ที่วัดเหนือพื้นดิน 1 เมตร คำนวณจากค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 โดยสมมติว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดอื่นที่มีอยู่ในธรรมชาติมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ (Kocher and Sjoreen, 1985) สามารถคำนวณโดสได้จากสมการ (2) (UNSCEAR, 2000)

$$D(nGy/h) = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K \quad (2)$$

5.2 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายในอาคารบ้านเรือน

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ หรือโดสสำหรับภายในอาคารบ้านเรือน ที่วัดจากการอาศัยอยู่ภายใน

บ้าน หรือภายในอาคารที่สร้างด้วยวัสดุก่อสร้างที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีปะปนอยู่ ค่าขนาดค่าโดสได้จากค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ที่มีในวัสดุก่อสร้าง จากสมการ (3) (EC, 1999)

$$D(nGy/h) = 0.92A_{Ra} + 1.1A_{Th} + 0.08A_K \quad (3)$$

6. ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกและภายในร่างกาย

ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (external hazard index; H_{ex}) โดยกัมมันตภาพรังสีที่ได้รับจากภายนอกส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมาที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงซึ่งมาจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติ ค่า H_{ex} สามารถได้จากสมการ (4) (Beretka and Mathew, 1985) สมการนี้เป็นรูปแบบจำลองของการได้รับอันตรายจากรังสีจากภายนอก เมื่อใช้วัสดุจากธรรมชาติ เช่น หิน ทราโยมาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน โดยรูปแบบจำลองนี้จะสมมติว่าบ้านที่ก่อสร้างมีผนังหนามาก ไม่มีหน้าต่างและประตู (Krieger, 1981)

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

เมื่อค่า $H_{ex} \leq 1.0$ แสดงว่า ความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยถ้า $H_{ex} = 1.0$ ผู้ได้รับสัมผัสรังสีภายนอกจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 1.5 mGy/y พอดี และถ้า $H_{ex} > 1.0$ ผู้อาศัยในบ้านเรือนดังกล่าวจะมีความเสี่ยงอันตรายจากการได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอกสูงกว่าเกณฑ์ปกติ โดยใช้ค่านี้เป็นเกณฑ์ว่าไม่ควรจะนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน

ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายในร่างกาย (internal hazard index; H_{in}) มาจากก๊าซกัมมันตรังสีเรดอน ทอรอน และผลผลิตจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ ค่าขนาดค่าดังกล่าวได้จากสมการ (5)

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (5)$$

7. ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี

ปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปี (annual effective

dose) ที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน สามารถหาได้จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ 0.7 Sv/Gy (UNSCEAR, 2000) ซึ่งใช้สำหรับประเมินการได้รับรังสีในผู้ใหญ่ โดยคิดว่าคนเราอาศัยอยู่ภายนอกอาคารบ้านเรือนคิดเป็น 20% ของเวลาทั้งหมด ค่าขนาดปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีได้จากสมการ (6)

$$\text{Annual effective dose(mSv)} = \text{absorbed dose rate} \\ (\text{mGy/h}) \times 8,760\text{h} \times 0.2 \times 0.7\text{SvGy}^{-1} \quad (6)$$

ปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปีที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือน สามารถหาได้จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ 0.7 Sv/Gy เช่นเดียวกับการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน โดยคิดว่าคนเราอาศัยอยู่ภายในอาคารบ้านเรือนคิดเป็น 80% ของเวลาทั้งหมด ค่าขนาดปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีได้จากสมการ (7)

$$\text{Annual effective dose(mSv)} = \text{absorbed dose rate} \\ (\text{mGy/h}) \times 8,760\text{h} \times 0.8 \times 0.7\text{SvGy}^{-1} \quad (7)$$

มนุษย์เราควรได้รับสัมผัสรังสีกัมมันตรังสีหลังจากธรรมชาติให้น้อยที่สุด โดยต้องมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดปริมาณรังสีรายบุคคลสำหรับคนงานด้านรังสี คือ 100 mSv ในเวลา 5 ปี สำหรับบุคคลทั่วไป ค่าปริมาณรังสีขนาดเสี่ยง (committed dose) ที่ได้รับไม่ควรเกิน 0.1 mSv/y หรือเท่ากับ 1/10 ของเกณฑ์ปลอดภัย (1 mSv/y; ICRP, 1991)

ค่าสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิต หรือค่าเฉลี่ย ซึ่งหาได้จากการเอาผลรวมของข้อมูลทั้งหมดหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่ามัธยฐานเป็นค่าที่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมด เมื่อเรียงค่าข้อมูลจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด หรือจากมากที่สุดไปหาน้อยสุด ค่ามัธยฐานเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนข้อมูลที่มากกว่าและน้อยกว่าค่านี้ร้อยละ 50 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (standard error; SE) โดยที่ $SE = SD / \sqrt{N}$ เมื่อ N คือ จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูลในงานวิจัยนี้ จะแสดงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต $\pm 1.96 \times SE$ ซึ่ง

แสดงช่วงข้อมูลในระดับความเชื่อมั่น 95% รอบค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีการแจกแจงแบบคล้ายปกติ

ผลและการวิเคราะห์ผล

1. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างดิน

Table 1 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน ในพื้นที่ 8 อำเภอของ จ.นครศรีธรรมราช พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 อยู่ระหว่าง 8-203 (เฉลี่ย 96 ± 18), 12-236 (เฉลี่ย 88 ± 23) และ 21-1191 (เฉลี่ย 524 ± 127) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยแต่ละอำเภอ พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ต่ำสุดพบที่ อ.เมือง (69 ± 43 Bq/kg) ค่าเฉลี่ยสูงสุดพบที่ อ.พิปูน (146 ± 58 Bq/kg) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของทอเรียม-232 ต่ำสุด พบที่ อ.ถ้าพรธนา (19 ± 27 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.พิปูน (162 ± 77 Bq/kg) สำหรับกัมมันตภาพจำเพาะ โพแทสเซียม-40 ค่าเฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.ถ้าพรธนา (34 ± 47 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.ลานสกา (975 ± 308 Bq/kg) Figure 3 แสดงแผนที่ระดับสีของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินแต่ละอำเภอใน จ.นครศรีธรรมราช และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยกัมมันต-

ภาพรังสีในดินจากทั่วโลก ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 เท่ากับ 35, 30 และ 400 Bq/kg ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสามในตัวอย่างดินเกือบทั้งหมดของ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของดินจากทั่วโลก ยกเว้นค่ากัมมันตภาพจำเพาะของทอเรียม-232 ใน อ.ถ้าพรธนา (19 ± 27 Bq/kg) ที่มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโพแทสเซียม-40 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของดินจากทั่วโลก คือ อ.ถ้าพรธนา (34 ± 47 Bq/kg) อ.พรหมคีรี (372 ± 290 Bq/kg) กิ่งอ.ช้างกลาง (389 ± 219 Bq/kg) และ อ.เมือง (391 ± 96 Bq/kg)

เมื่อประเมินเป็นค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของตัวอย่างดิน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 61-572 (เฉลี่ย 261 ± 51) Bq/kg (Table 1) เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติ 370 Bq/kg (OECD, 1979) พบว่ามี 2 อำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ปกติ คือ อ.ลานสกา (373 ± 172 Bq/kg) และ อ.พิปูน (425 ± 165 Bq/kg) Figure 7a แสดงกราฟแท่งแจกแจงค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างดินที่ศึกษา

2. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างหิน
ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226, ทอเรียม-232

Table 1. Average specific activities, Radium equivalent activity, absorbed dose rate and annual effective dose in soil samples

District/ Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)						Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
	Ra-226		Th-232		K-40				
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean			
Muang (5)	8-130	69±43	43-100	53±32	296-571	391±96	174±83	80±37	0.10±0.05
Chawang (3)	71-100	85±16	136-170	154±19	466-968	719±284	361±59	162±28	0.20±0.03
Chang Klang (3)	39- 142	85±59	25-128	77±58	219-599	389±219	225±86	102±37	0.13±0.05
Lan Saka (3)	82-203	130±73	75-178	118±61	670-1191	975±308	373±172	172±77	0.21±0.09
Tham Phan Nara (3)	64-148	93±54	12-46	19±27	21-80	34±47	123±89	56±40	0.07±0.05
Phipun (3)	95-197	146±58	102-236	162±77	488-833	616±214	425±165	191±72	0.23±0.09
Phrom Kiri (3)	41-108	84±41	21-94	47±47	140-647	372±290	179±118	82±54	0.10±0.07
Nopphitam (3)	57-139	93±48	54-115	94±39	441-1111	788±380	289±18	133±10	0.16±0.01
Over all (26)	8-203 (90)	96±18	12-236 (86)	88±23	21-1191 (477)	524±127	261±51 (275)	119±23 (124)	0.15±0.03 (0.15)

Values in parentheses represent the median.

The uncertainty of the mean values is represented by 95% confidence limits of the standard error about the mean.

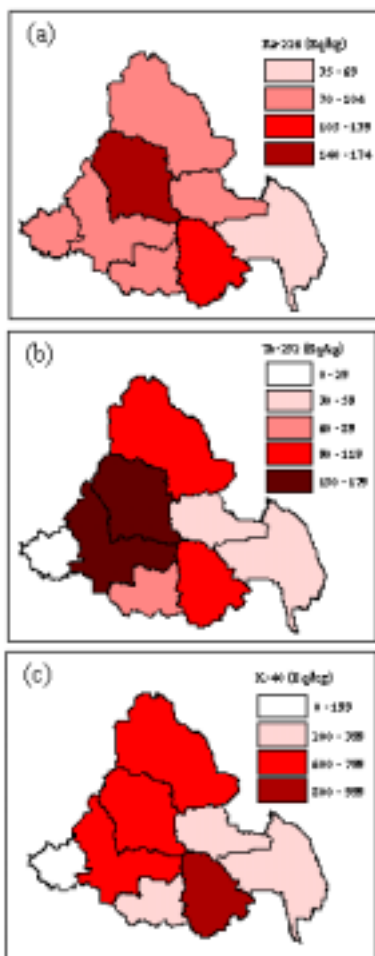


Figure 3. Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in soil samples.

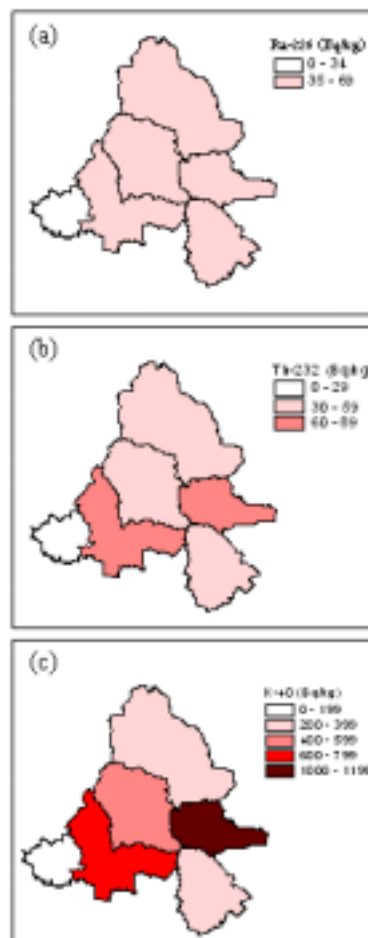


Figure 4. Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in rock samples.

(Color figure can be viewed in the electronic version)

และโพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างหิน แสดงใน Table 2 พบว่ามีค่าระหว่าง 11-113 (เฉลี่ย 46 ± 14) Bq/kg, 3-113 (เฉลี่ย 47 ± 16) Bq/kg และ 18-1305 (เฉลี่ย 472 ± 187) Bq/kg ตามลำดับ คิดเป็นค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล 0.9-9.2 (เฉลี่ย 3.7 ± 1.1) ppm ค่าความเข้มข้นทอเรียมสมมูล มีค่าอยู่ในช่วง 0.7-27.8 (เฉลี่ย 11.6 ± 4.0) ppm และค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-4.2 (เฉลี่ย 1.5 ± 0.6) % ตามลำดับ (Table 3) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (25 ± 8 Bq/kg) สูงสุดที่ อ.ฉวาง (68 ± 27 Bq/kg) ทอเรียม-232 เฉลี่ยต่ำสุดที่ อ.ถ้ำพรรณรา (22 ± 22 Bq/kg) และ

สูงสุดที่ อ.ฉวาง (87 ± 25 Bq/kg) ส่วนโพแทสเซียม-40 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (96 ± 94 Bq/kg) และสูงสุดพบที่ อ.พรหมคีรี (1180 ± 245 Bq/kg) Figure 4 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างหินของแต่ละอำเภอใน จ.นครศรีธรรมราช เมื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างหินที่ศึกษากับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 เฉลี่ยจากทั่วโลกในหินชั้นเปลือกโลกที่มีค่าเท่ากับ 40, 40 และ 400 Bq/kg (EC, 1999) พบว่าหินในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 สูงกว่าค่าเฉลี่ยของหิน

Table 2. Average specific activities of Ra-226, Th-232 and K-40 in rock samples

District/ Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)					
	Ra-226		Th-232		K-40	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Chawang (3)	52-95	68±27	74-113	87±25	695-869	794±101
Lan Saka (3)	25-62	41±21	8-80	36±43	18-691	271±414
Tham Phan Nara (3)	18-31	25±8	31-35	22±22	137-151	96±94
Phipun (3)	27-78	45±33	25-82	50±33	162-821	405±410
Phrom Kiri (2)	56-69	62±13	53-90	72±37	1055-1305	1180±245
Nopphitam (4)	11-113	43±50	3-84	30±38	31-638	360±302
Over all (18)	11-113 (43)	46±14	3-113 (39)	47±16	18-1305 (419)	472±187

Table 3. Average concentration of equivalent uranium, equivalent thorium and potassium in rock samples

District/ Sub-district (No. of sample)	Concentration					
	ppm eU		ppm eTh		K (%)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Chawang (3)	4.2-7.7	5.5±2.2	18.2-27.8	21.5±6.2	2.2-2.8	2.6±0.3
Lan Saka (3)	2.0-5.0	3.4±1.7	2.0-19.6	8.9±10.6	0.1-2.2	0.9±1.3
Tham Phan Nara (3)	1.4-2.5	2.0±0.6	7.6-8.7	5.4±5.4	0.4-0.5	0.3±0.3
Phipun (3)	2.2-6.3	3.6±2.6	6.1-20.1	12.2±8.1	0.5-2.7	1.3±1.3
Phrom Kiri (2)	4.5-5.6	5.0±1.0	13.0-22.3	17.6±9.1	3.4-4.2	3.8±0.8
Nopphitam (4)	0.9-9.2	3.5±4.0	0.7-20.7	7.3±9.4	0.1-2.1	1.2±1.0
Over all (18)	0.9-9.2 (3.5)	3.7±1.1	0.7-27.8 (9.6)	11.6±4.0	0.1-4.2 (1.4)	1.5±0.6

จากทั่วโลกเล็กน้อย คือ 1.15, 1.17 และ 1.18 เท่า ตามลำดับ เมื่อแยกพิจารณาตามชนิดของหิน ซึ่งประกอบด้วย หินแกรนิต หินทรายแป้ง และหินปูน ผลที่ได้แสดงอยู่ใน Table 5 โดยความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลในหินแกรนิตในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.7±2.0 ppm เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลในหินแกรนิตทั่วไปที่มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 4.8 ppm (Faure, 1986) พบว่า หินแกรนิตในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลสูงกว่าค่าความเข้มข้นในหินแกรนิตทั่วไป 1.2 เท่า

Table 4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของตัวอย่างหิน ซึ่งพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 18-320 (เฉลี่ย 150±45) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติพบว่าทุกอำเภอที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ กราฟแท่งการ

แจกแจงค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างหิน แสดงใน Figure 7b

3. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างทรายก่อสร้าง

ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของตัวอย่างทรายก่อสร้าง แสดงใน Table 6 พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 อยู่ระหว่าง 3-91 (เฉลี่ย 42±5) Bq/kg, 14-91 (เฉลี่ย 50±5) Bq/kg และ 102-966 (เฉลี่ย 509±57) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลในระดับอำเภอ พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ กิ่งอ.นบพิตำ (31±10 Bq/kg) ค่าเฉลี่ยสูงสุดพบที่ อ.พิปูน (66±9 Bq/

Table 4. Average radium equivalent activity, absorbed dose rate, annual effective dose and hazard index in rock samples

District/Sub-district (No. of sample)	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	annual effective dose (mSv)	H _{ex}	H _{in}
Chawang (3)	254±65	117±29	0.14±0.04	0.69±0.18	0.87±0.25
Lan Saka (3)	114±113	52±52	0.06±0.06	0.31±0.30	0.42±0.36
Tham Phan Nara (3)	63±31	29±14	0.04±0.02	0.17±0.08	0.24±0.07
Phipun (3)	147±110	68±51	0.08±0.06	0.40±0.30	0.52±0.38
Phrom Kiri (2)	255±47	121±18	0.15±0.02	0.69±0.13	0.86±0.16
Nopphitam (4)	113±90	53±42	0.06±0.05	0.31±0.24	0.42±0.35
Over all (18)	150±45 (133)	70±21 (63)	0.09±0.03 (0.08)	0.41±0.12 (0.36)	0.53±0.15 (0.54)

Table 5. Average concentration of equivalent uranium, equivalent thorium and potassium in rock samples

Type of rock (No. of sample)	Concentration					
	ppm eU		ppm eTh		K (%)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
granite (6)	2.2-9.2	5.7±2.0	10.5-27.8	15.5±7.9	0.7-4.2	2.5±1.0
siltstone (3)	4.2-6.3	5.0±1.3	18.2-20.1	19.0±1.1	2.2-2.8	2.6±0.3
limestone (9)	0.9-3.9	2.0±0.8	0.7-20.7	6.5±4.0	0.1-2.1	0.5±0.4

Table 6. Average specific activity of Ra-226, Th-232 and K-40 in sand samples

District/Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)					
	Ra-226		Th-232		K-40	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Muang (13)	3-60	36±10	14-80	40±11	102-742	379±116
Chawang (9)	25-56	40±7	16-83	55±14	440-716	620±57
Chang Klang (6)	10-73	45±21	26-91	53±18	486-691	609±61
Lan Saka (7)	22-91	46±19	35-77	57±11	182-966	582±188
Tham Phan Nara (6)	44-56	49±4	33-61	44±9	113-679	430±182
Phipun (5)	56-78	66±9	25-83	54±24	625-759	702±50
Phrom Kiri (9)	17-61	35±9	33-78	50±10	106-916	390±227
Nopphitam (7)	20-60	31±10	45-72	56±7	250-749	531±129
Over all (62)	3-91 (40)	42±5	14-91 (49)	50±5	102-966 (581)	509±57

kg) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะทอเรียม-232 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.เมือง (40±11 Bq/kg) และสูงสุดที่อ.ลานสกา (เฉลี่ย 57 ±11 Bq/kg) ส่วนอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะโพแทสเซียม-40 เฉลี่ยต่ำสุดคือที่ อ.เมือง (379±116 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.พิปูน (702±50 Bq/kg) Figure 5 เป็นแผนที่

ระดับสีแสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในตัวอย่างทรายก่อสร้างในพื้นที่ศึกษาแต่ละอำเภอใน จ. นครศรีธรรมราช

ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของ ทรายก่อสร้าง แสดงใน Table 7 ซึ่งพบว่ามีความอยู่ในช่วง 66-

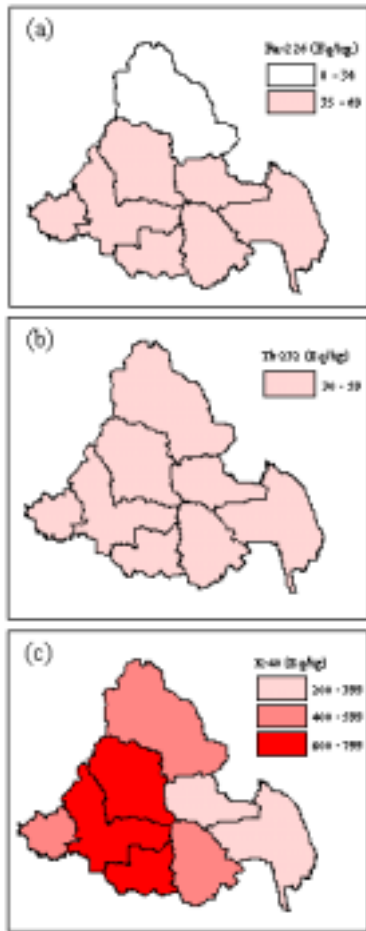


Figure 5. Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in sand samples.

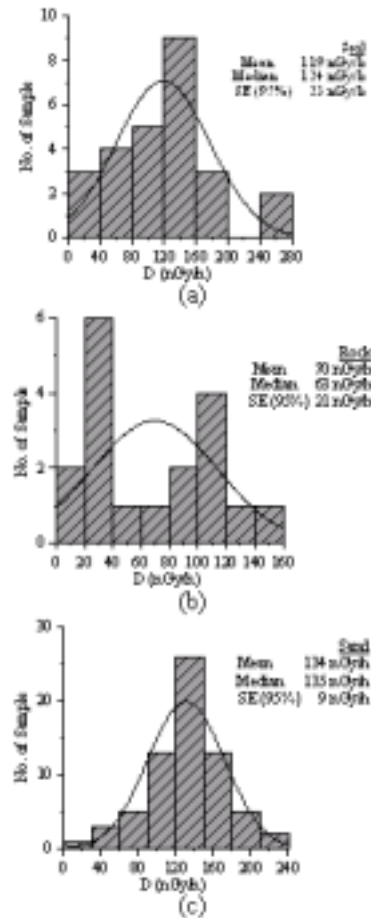


Figure 6. Histograms of absorbed dose rate in (a) soil, (b) rock and (c) sand samples.

(Color figure can be viewed in the electronic version)

255 (เฉลี่ย 153 ± 10) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติ (370 Bq/kg) พบว่าทุกอำเภอที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์ Figure 7c แสดงกราฟแท่งการแจกแจงค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างทรายก่อสร้าง

4. การกระจายค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ของตัวอย่างน้ำบ่อตื้นและการประเมินปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับต่อปี

ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ในตัวอย่างน้ำบ่อตื้นทั้งหมด 55 ตัวอย่าง แสดงใน Table 8 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2-179 (เฉลี่ย 17 ± 7) mBq/l

เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนเรเดียม-226 สูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Level; MCL) ของทบวงการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US EPA, 1976) ได้กำหนดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ในน้ำบริโภคว่าไม่ควรเกิน 111 mBq/l ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เรเดียม-226 ในน้ำบ่อตื้น ในจ.นครศรีธรรมราช พบว่ามีน้ำบ่อตื้นเพียง 1 ตัวอย่าง ใน อ.เมือง มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเท่ากับ 179 mBq/l ซึ่งเกินค่า MCL แสดงให้เห็นว่าน้ำบ่อตื้นส่วนใหญ่ในบริเวณที่ทำการศึกษามีความปลอดภัยทางรังสี ยกเว้นน้ำบ่อตื้นที่พบใน อ.เมือง 1 ตัวอย่าง

Table 7. Average radium equivalent activity, absorbed dose rate, annual effective dose, hazard index for building materials in sand samples

District/Sub-district (No. of sample)	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H _{ex}	H _{in}
	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean
Muang (13)	122±19	107±17	0.53±0.08	0.33±0.05	0.43±0.06
Chawang (9)	167±21	147±17	0.72±0.09	0.45±0.06	0.56±0.06
Chang Klang (6)	167±23	148±19	0.73±0.09	0.45±0.06	0.57±0.09
Lan Saka (7)	172±27	151±25	0.74±0.12	0.46±0.07	0.59±0.10
Tham Phan Nara (6)	145±24	128±7	0.63±0.03	0.39±0.07	0.52±0.07
Phipun (5)	197±40	176±32	0.87±0.16	0.53±0.11	0.71±0.12
Phrom Kiri (9)	137±28	119±26	0.58±0.13	0.37±0.08	0.47±0.08
Nopphitam (7)	152±9	133±7	0.65±0.03	0.41±0.02	0.50±0.04
Over all (62)	153±10 (150)	134±9 (135)	0.66±0.04 (0.66)	0.41±0.03 (0.41)	0.52±0.03 (0.52)

Table 8. Average specific activity of radium-226 in shallow well water and annual effective dose

District/Sub-district (No. of sample)	Range (mBq/l)	Mean ± 1.96 SE (mBq/l)	Mean Annual effective dose (µSv)
Muang (11)	5-179	31±30	6±6
Chawang (6)	5-29	12±9	3±2
Chang Klang (6)	4-28	15±8	3±2
Lan Saka (8)	10-45	11±11	2±2
Tham Phan Nara (7)	2-50	23±14	5±3
Phipun (4)	21-36	21±15	4±3
Phrom Kiri (6)	2-16	4±5	1±1
Nopphitam (7)	2-59	13±16	3±3
Over all 8 districts (55)	2-179 (10)	17±7	4±1(2)

เมื่อประเมินปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับต่อปีจากการบริโภคน้ำของประชาชนในพื้นที่ 8 อำเภอของ จ.นครศรีธรรมราช โดยใช้เกณฑ์ตาม WHO (2002) ซึ่งประเมินการบริโภคน้ำไว้ที่ 2 ลิตร/วัน หรือ 730 ลิตร/ปี เมื่อใช้ค่าปัจจัย 2.8×10^{-7} Sv/Bq เป็นปัจจัยสำหรับการประเมินปริมาณรังสีสมมูลที่ร่างกายได้รับต่อปีในผู้ใหญ่ (Adult Annual Equivalent Dose) ซึ่งผลการคำนวณปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับจากการบริโภคน้ำบ่อตื้นแสดงใน Table 8 นอกจากนี้ UNSCEAR (2000) ยังได้กำหนดปริมาณรังสีที่ได้รับจากเรเดียม-226 ต่ออายุ-น้ำหนัก ว่าไม่ควรเกิน 8 µSv ต่อปี

ผลการวิจัยพบว่า มีตัวอย่างน้ำบ่อตื้น 4 บ่อ จากทั้งหมด 55 บ่อ ที่มีปริมาณรังสีเกิน 8 µSv ต่อปี ได้แก่ ตัวอย่างที่พบใน กิ่ง อ.ช้างกลาง อ.เมือง อ.ฉวาง และกิ่ง อ.นบพิตำ ซึ่งมีปริมาณรังสีจากเรเดียม-226 ที่ได้รับต่อปี มีค่า 9, 37, 10 และ 12 µSv ตามลำดับ ซึ่งอาจทำให้ประชาชนที่บริโภคน้ำบ่อดังกล่าวจะมีความเสี่ยงที่จะได้รับปริมาณรังสีจากเรเดียม-226 สูงกว่าเกณฑ์ปกติ โดยเฉพาะตัวอย่างน้ำบ่อตื้นจากอ.เมือง จะมีปริมาณเรเดียม-226 ปะปนอยู่สูงมากที่สุด Figure 8 แสดงกราฟแจกแจงปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีจากเรเดียม-226 จากการบริโภคน้ำบ่อตื้น

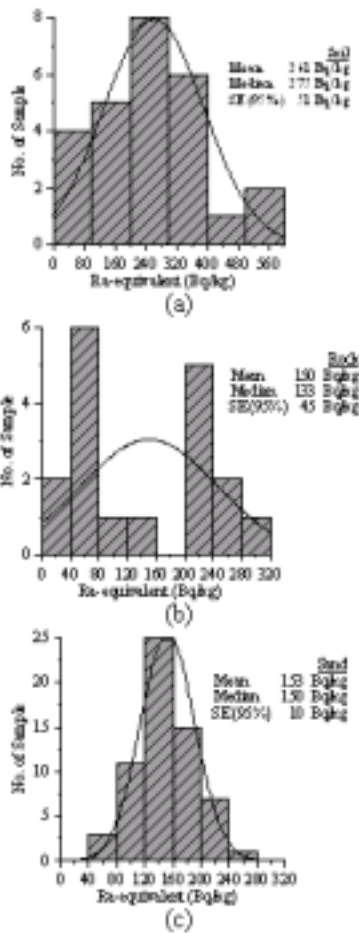


Figure 7. Histograms of radium equivalent activity in (a) soil, (b) rock and (c) sand samples.

5. การกระจายปริมาณรังสีที่ประชาชนได้รับจากดิน หิน ทรายก่อสร้าง

ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคาร บ้านเรือนที่ประชาชนจะได้รับจากตัวอย่างดิน มีค่าอยู่ในช่วง 30-254 (เฉลี่ย 119 ± 23) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคารบ้านเรือนที่ตรวจวัดในประเทศไทย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77 nGy/h (UNSCEAR, 2000) พบว่า มี อ.ถ้ำพรหมเพียงอำเภอเดียวที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 77 nGy/h (Table 1, Figure 6a)

ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคาร บ้านเรือนที่มาจากตัวอย่างหิน พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 8-146 (เฉลี่ย 70 ± 21) nGy/h โดยมี 2 อำเภอที่มีค่าปริมาณรังสี

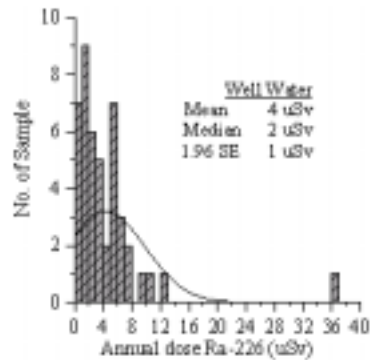


Figure 8. Histograms of annual effective dose (μSv) Ra-226 in Nakhon Si Thammarat Province.

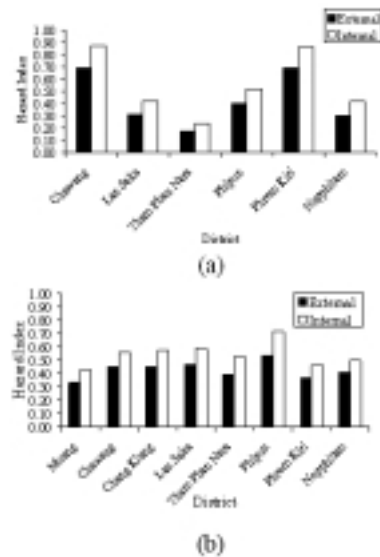


Figure 9. Bar diagrams showing the values of external and internal hazard index in (a) rock and (b) sand samples.

เฉลี่ยสูงกว่า 77 nGy/h ได้แก่ อ.ฉวาง (117 ± 29 nGy/h) และอ.พรหมคีรี (121 ± 18 nGy/h) ส่วนอำเภออื่นๆ มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 77 nGy/h (Table 4, Figure 6b)

การประเมินค่าปริมาณรังสีที่มาจากตัวอย่างทราย ก่อสร้างจะคำนวณเป็นปริมาณรังสีที่ประชาชนได้รับจากการอาศัยอยู่ภายในอาคารบ้านเรือน ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับสัมผัสรังสีจากทรายก่อสร้าง ส่วนใหญ่จะมาจากการที่เราอาศัยอยู่ภายในบ้านที่ทำด้วยวัสดุก่อสร้างที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีปะปนอยู่ ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีที่มาจากตัวอย่าง

Table 9. Comparison for the natural radioactivity contents in soil and absorbed dose rate in Nakhon Si Thammarat Province (Thailand) with those in other countries as given in UNSCEAR (2000)

Region/ Country	Specific activity in soil (Bq/kg)						Absorbed dose rate (nGy/h)	
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K		Average	Range
	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range		
Egypt	17	5-64	18	2-96	320	29-690	32	20-133
United States	40	8-160	35	4-130	370	100-700	47	14-118
China	32	2-440	41	1-360	440	9-1800	62	2-340
Hong Kong	59	20-110	95	16-200	530	80-1100	87	51-120
India	29	7-81	64	14-160	400	38-760	56	20-1100
Japan	33	6-98	28	2-88	310	15-990	53	21-77
Malaysia	67	38-94	82	63-110	310	170-430	53	21-77
Iran	28	8-55	22	5-42	640	250-980	71	36-130
Denmark	17	9-29	19	8-30	460	240-610	52	35-70
Sweden	42	12-170	42	19-94	780	560-1150	56	40-500
Switzerland	40	10-900	25	4-70	370	40-1000	45	15-120
Poland	26	5-120	21	4-77	410	110-970	45	18-97
Greece	25	1-240	21	1-190	360	12-1570	56	30-109
Portugal	44	8-65	51	22-100	840	220-1230	84	4-230
Median	35		30		400		57	
Present study	96	8-203	88	12-236	524	21-1191	119	56-191

Note data from other countries are taken from UNSCEAR (2000)

ทรายก่อสร้าง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 58-224 (เฉลี่ย 134±9) nGy/h โดยค่าปริมาณรังสีในทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 48 nGy/h (Table 7, Figure 6c)

6. ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย

Table 4 แสดงผลการคำนวณดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) ของตัวอย่างหิน Figure 9a แสดงกราฟแท่งของดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย โดยมีค่า H_{ex} อยู่ในช่วง 0.05-0.86 โดยไม่มีอำเภอใดที่มีค่าเฉลี่ย $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอก็ไม่พบว่ามีตัวอย่างใดที่มีค่า $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย H_{in} ของหินพบว่า ทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 1.0 แต่เมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอ พบว่ามีตัวอย่างหิน 1 ตัวอย่างจาก.ฉวาง ที่มีค่า $H_{in} = 1.12$ กล่าวโดยสรุปหินในพื้นที่ที่มีความปลอดภัย และสามารถนำไปใช้ป็นวัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือนได้

ยกเว้นหินแกรนิตในพื้นที่.ฉวาง ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

Table 7 แสดงผลการคำนวณดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) ของทรายก่อสร้าง Figure 9b แสดงกราฟแท่งของดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย ซึ่งพบว่า มีค่า H_{ex} อยู่ในช่วง 0.18-0.69 โดยไม่มีอำเภอใดที่มีค่าเฉลี่ย $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอก็ไม่พบว่ามีตัวอย่างใดที่มีค่า $H_{ex} > 1.0$ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายในร่างกาย (H_{in}) ที่เกี่ยวข้องกับแก๊สเรดอน ทอรอน และผลผลิตที่สลายตัวให้รังสีแอลฟาของเรดอน ทอรอน พบว่าทรายก่อสร้างทุกตัวอย่างมีค่า $H_{in} < 1.0$ กล่าวคือ ทรายก่อสร้างในพื้นที่ที่มีความปลอดภัย และสามารถนำไปใช้ป็นวัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือนได้

7. กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่นครศรีธรรมราช กับพื้นที่ อ.นาหม่อม จ.สงขลา

ผลการเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ

เรเดียม-226, ทอเรียม-232, โปแทสเซียม-40 และค่า Ra_{eq} ของทรายก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อม จ.สงขลา (ไตรภพ และ แพร, 2549) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 34-90 (เฉลี่ย 56 ± 17) Bq/kg, 19-124 (เฉลี่ย 47 ± 27) Bq/kg, 377-1421 (เฉลี่ย 1048 ± 355) Bq/kg และ 106-330 (เฉลี่ย 204 ± 68) Bq/kg ตามลำดับ กับทรายก่อสร้างในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช ที่มีค่าอยู่ในช่วง 3-91 (เฉลี่ย 42 ± 5), 14-91 (เฉลี่ย 50 ± 5) และ 102-966 (เฉลี่ย 509 ± 57) และ 66-255 (เฉลี่ย 153 ± 10) Bq/kg ตามลำดับ พบว่า ทรายก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อม มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 และ ทอเรียม-232 อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช โดยทรายก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อม มีค่าเฉลี่ยของเรเดียม-226 มากกว่าในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช 1.3 เท่า

8. การประเมินปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปี ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปีที่มาจก ตัวอย่างดิน (Table 1) มีค่า 0.04-0.31 mSv (เฉลี่ย 0.15 ± 0.03 mSv) เมื่อเปรียบเทียบเกณฑ์ปริมาณรังสีขนาดเสี่ยง ที่บุคคลทั่วไปได้ว่าควรได้รับไม่เกิน 0.1 mSv พบว่า เกือบทุกอำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv ยกเว้นอ.ถ้าพระพรหม เพียงอำเภอเดียวที่ได้รับรังสีไม่เกิน 0.1 mSv

ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปี ที่มาจก ตัวอย่างหิน (Table 4) มีค่า 0.01-0.18 mSv (เฉลี่ย 0.09 ± 0.03) โดยมี 2 อำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv ได้แก่ อ.พรหมคีรี และอ.ฉวาง

ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปีจกทราย ก่อสร้าง (Table 7) มีค่า 0.29-1.10 mSv (เฉลี่ย 0.66 ± 0.04 mSv) โดยทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv

สรุป

การวิจัยเพื่อตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ อ.เมือง อ.ฉวาง กิ่งอ.ช้างกลาง อ.ลานสกา อ.ถ้าพระพรหม อ.พิปูน อ.พรหมคีรี และกิ่ง อ.นบพิตำ ในตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง และน้ำบ่อต้น โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ผลที่ได้พบว่า พื้นที่ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูง สอดคล้องกันทั้งในตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง ได้แก่

อ.พิปูน อ.ลานสกา อ.ฉวาง อ.พรหมคีรี และ กิ่งอ.นบพิตำ ซึ่งพื้นที่โดยส่วนใหญ่ในอำเภอดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิต ส่วนอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่ำ คือ อ.ถ้าพระพรหม โดยเฉพาะค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโพแทสเซียม-40 เนื่องจากพื้นที่นี้มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินปูน ซึ่งหินชนิดนี้มีส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) จึงทำให้มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีในปริมาณต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างดินในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช กับพื้นที่ศึกษาในภูมิภาคอื่นของโลก พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ของพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราชมีค่าสูงกว่าที่ตรวจพบในหลายๆ ประเทศ (Table 6) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของทอเรียม-232 มีค่าใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดในประเทศมาเลเซีย ของโพแทสเซียม-40 มีค่าใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดในฮ่องกง ส่วนตัวอย่างน้ำบ่อต้นในพื้นที่ศึกษามีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226 อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย สามารถใช้ในการบริโภคได้ ยกเว้นตัวอย่างน้ำบ่อต้น 1 ตัวอย่างจากอ.เมืองที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226 เท่ากับ 179 mBq/l เกินค่า MCL (111 mBq/l)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือที่จำเป็นในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถานวิจัยสารสนเทศ ภูมิศาสตร์ฯ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุญาตให้ยืมแผนที่สำหรับการออกเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

จเร วุฒิสานัน. 2548. ความเข้มข้นเรเดียม-226 ในน้ำบริโภค (น้ำบ่อต้น) ในอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และ แพร นีรนาทรังสรรค์. 2549. กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ เรเดียม-

- 226, ทอริยม-232 และโพแทสเซียม-40 ในทรายจากบ่อทรายใน อ.หาดใหญ่ และ อ.นาหม่อม จ.สงขลา, ว.สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย 6(1) :26-35.
- สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล. 2537. การวัดปริมาณยูเรเนียม (U-238) ในหินชนิดต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี. โครงการงานฟิสิกส์. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุภัทร ภัทรกิจโสภณ. 2547. ประสิทธิภาพการจับเรเดียมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคตไอออน. โครงการงานฟิสิกส์. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Beretka, J. and Mathew P.J. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product. *Health Physics.*, 48:87-95.
- Chiozzi, P., De Felice, P., Fazio, A., Pasquale, V. and Verdoya, M. 2000. Laboratory application of NaI(Tl) -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics. *J. of Applied Radiation and Isotopes.*, 53: 127-132.
- Curie, L.A. 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Analyst Chem.*, 40: 586-593.
- DMR. 1989. Airborne Radiometric Map: Uranium Equivalent Concentration, Economic and Information Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- EC. 1999. European Commission Report on Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Radiation protections 112.
- Faure, G. 1986. Principle of Isotope Geology (second edition), John Wiley and Sons, Singapore.
- IAEA. 1987. Preparation and Certification of IAEA Gamma Spectrometry Reference Materials RGU-1, RG-Th-1 and RGK-1, IAEA/RL/148, IAEA, Vienna, Austria, 48 p.
- ICRP 60. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford.
- Ishihara, S., Sawata, H., Shibata, K., Terashima, S., Arrykul, S. and Sato, K. 1980. Granites and Sn-W deposits of peninsular Thailand. *In: Mining Geol. Spec. Issue*, 8.
- Kocher, D.C. and Sjoreen, A.L. 1985. Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Health Physics.*, 48: 193-205.
- Krieger, R. 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteilechnik.*, 47: 468-473.
- Malanca, A., Gaidolfi, L., Pessina, V. and Dallara, G. 1996. Distribution of ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K in soils of Rio Grande do Norte (Brazil). *J. of Environmental Radioactivity.*, 30: 55-67.
- Organization for Economic Cooperation and Development. 1979. Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency. OECD, Paris, France.
- Quindos, L.S., Fernandez, P.I., Soto, J., Rodenas, C. and Gomez, J. 1994. Natural radioactivity in Spanish soils. *Health Physics.*, 66: 194-200.
- Rybach, L. 1988. Determination of the heat production rate. *In: Haenel, R., Rubach, L., Stegena, L. (Eds.), Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, pp. 125-142.
- Singh, S., Rani, A. and Mahajan, R. 2005. ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K analysis in soil samples from some areas of Panjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *J. of Radiation Measurements.*, 39: 431-439.
- UNSCEAR 1988. The United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York.
- UNSCEAR 2000. The United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York.
- US. Environmental Protection Agency. 1976. Interim primary drinking water regulations. Washington, DC, EPA.570/9-76-003.
- WHO (World Health Organization) 2002. Guidelines for drinking water quality, third edition: radiological aspects.