

ภาคผนวก ก

ทฤษฎี และขั้นตอน ในการวัดสารตัวอย่างของระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาชนิด HPGe จัดเป็นเทคนิควัดที่มีประสิทธิภาพสูงแบบหนึ่งในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของ ^{226}Ra

การใช้หัววัดแบบ HPGe (high purity Germanium) HPGe มีสารเจือปนน้อย จะมีความบริสุทธิ์มากกว่าหัววัด Ge(Li) ใช้วิธี N – Type (n) บน P – Type (p) ที่บริสุทธิ์เท่าที่จะทำได้ โดย Li (donor) ที่ปริมาณมากบนฐาน Ge (acceptor) ซึ่งให้เป็น p การสร้าง 1 คู่ ประจุใน Ge ต้องใช้พลังงาน 2.9 eV ซึ่งต้องทำงานที่อุณหภูมิ 77 K คืออุณหภูมิจากไนโตรเจนเหลว เพื่อลดผลจากความร้อน และป้องกันการปนเปื้อนโดยการบรรจุอยู่ใน cryostat ซึ่งเป็นชุดสุญญากาศ มีการถ่ายเทความร้อนจากหัววัดผ่านแท่งทองแดง (copper coldfinger) ซึ่งต้องแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลวในถังชั้นในของถัง Dewar และในทางปฏิบัติการควรให้มีอุปกรณ์รอบหัววัดน้อยชิ้นที่สุดเพื่อลดการกระเจิงคอมป์ตันดังภาพประกอบ ก.1



ภาพประกอบ ก.1 อุปกรณ์หลักของเครื่องวัดรังสี หัววัดชนิด HPGe

สเปกตรัมรังสีแกมมาเป็นผลลัพธ์ที่ได้มา จากการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา วัดสารตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) ชนิดต่าง ๆ รวมกันอยู่

สเปกตรัมรังสีแกมมาของสารตัวอย่างอาจมีความซับซ้อนมากขึ้นกับจำนวน และความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ สารตัวอย่างในธรรมชาติ เช่น ดิน-หิน-แร่ มักมีนิวไคลด์กัมมันตรังสี ประกอบกันอยู่หลายชนิด แต่ในปริมาณน้อย ซึ่งนิวไคลด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม (^{238}U , ^{235}U) และทอเรียม (^{232}Th) ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติที่เรียกว่า “Naturally Occurring Radionuclides” ตัวอย่างบางประเภทอาจปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากมนุษย์สร้างที่เรียกว่า Man – made Radionuclides เช่น ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{131}I , ^{90}Sr , ^{241}Am ฯลฯ การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาจึงจัดว่ามีความสลับซับซ้อนไม่น้อย เนื่องจากเปกตรัมหนึ่งๆ เป็นที่รวมของพลังงานรังสีแกมมาทั้งหมดที่ปลดปล่อยมาจากวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยมากจากสิ่งแวดล้อม (Background radiation) และอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารและสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ของระบบวัดรังสี ซึ่งอาจทำให้สเปกตรัมรังสีแกมมามีความสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น ในการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนที่ถูกต้องเที่ยงตรง และมีมาตรฐานสูง ซึ่งจะ ได้กล่าวเป็นลำดับต่อไป

ก.1 สถิติของการนับ (Counting Statistics)

เนื่องจากการสลายตัวของนิวเคลียสเป็นกระบวนการแบบสุ่ม ดังนั้นในการวัดรังสีในช่วงเวลาหนึ่งๆ จึงไม่มีทางที่จะได้ค่าเดียวกันแน่นอน แต่ค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะเป็นค่าเฉลี่ยที่มีความไม่แน่นอนระดับหนึ่งประกอบอยู่ด้วย ถ้าต้องการค่าเฉลี่ยที่ดีกว่าอาจทำได้โดยการวัดรังสีนานขึ้นกว่าเดิมมากๆ ซึ่งอาจจะไม่สามารถทำได้ในเชิงปฏิบัติดังนั้นจึงจำเป็นต้องรู้วิธีการประเมินความถูกต้องของค่าเฉลี่ยหนึ่งๆ ที่เลือกทำการวัดไว้การสลายตัวของนิวเคลียสเป็นกระบวนการเชิงสถิติ โดยเป็นไปตามการแจกแจงปัวซองก้ ซึ่งการแจกแจงดังกล่าว เป็นกรณีจำกัดของการแจกแจงแบบปัวซองก้ เป็นกรณีในช่วงเวลาวัดมีจำนวนไม่จำกัดและมีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบนอร์มัลหรือเกาส์เซียน เมื่อจำนวนนับหรือการสลายตัวมีค่ามาก การแจกแจงปัวซองก้สำหรับค่าจำนวนนับ N และค่าเฉลี่ย เป็นดังนี้

$$P_N = \frac{\bar{N}^N e^{-\bar{N}}}{N!} \quad (\text{ก-1})$$

โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน S (หรือ σ) เท่ากับ \sqrt{N} กราฟของค่า P_N สำหรับค่า \bar{N} ระหว่าง 3-10 รูปกราฟจะไม่สมมาตร และมีสมบัติว่า \bar{N} ไม่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่แท้จริง แต่เป็นค่าที่ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อ N มีค่ามากขึ้น กราฟก็จะมีสมมาตรมากขึ้น จนเข้าใกล้การแจกแจงแบบเกาส์เซียน

$$P_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} e^{-x^2/2N} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (\text{ก-2})$$

$$\text{เมื่อ } X = N = \bar{N}$$

ค่าอินทิกรัลของพื้นที่ใต้ Gaussian curve ถูกใช้เพื่อหาค่าความผิดพลาดในทอมของระดับความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ (percent confidence level) เนื่องจากความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับ “รากกำลังสองของค่าจำนวนนับ” การเพิ่มความถูกต้องโดยเพิ่มเวลานับให้นานขึ้นหรือโดยใช้ หัววัด ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพียงสามารถเพิ่มความถูกต้องขึ้นเป็นฟังก์ชันของรากกำลังที่สองเท่านั้น

ก.2 การระบุชนิดของนิวไคลด์และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Nuclide Identification and Quantitative Analysis)

การวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากหัววัดรังสีแกมมาชนิด HPGe และ MCA จะประกอบด้วย การวิเคราะห์หัวพีครังสีแกมมาแต่ละพีคมาจากนิวไคลด์ตัวใด โดยปกติพีครังสีแกมมาของหัววัด HPGe จะมีความแหลมคมมากและถ้าการปรับเทียบพลังงานกับช่องทำได้โดยตรง การใช้ automatic peak search ของโปรแกรมวิเคราะห์ จะทำให้สามารถระบุชนิดของนิวไคลด์ได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ที่ใช้ Genie 2000 จะมีฟังก์ชันการทำงานดังกล่าวนี้ โดยจะมีทั้ง Standard Nuclide Library และที่เป็น User – generated Nuclide Library ให้เลือกใช้งานขั้นตอนสุดท้ายในการวิเคราะห์นิวไคลด์ คือการหาความเข้มของกัมมันตภาพรังสีของแต่ละไอโซโทป ซึ่งโดยปกติ Net Area จะสัมพันธ์โดยตรงเชิงเส้นกับความเข้มและความเข้มข้น แต่ก็จำเป็นต้องปรับแก้ค่าประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงานต่างๆ ด้วย (ประสิทธิภาพเป็นฟังก์ชันกับพลังงานรังสี) สัดส่วนการสลายตัวของพลังงานรังสีตัวนั้น

ค่ากัมมันตภาพ (Activity) ของไอโซโทปใด ๆ ในหน่วย μCi แสดงด้วยสมการ

$$\mu\text{Ci} = \frac{\text{Net Area}}{(\text{Live Time})(\text{Efficiency})(\text{Yield})(3.7 \times 10^4)} \quad (\text{ก-3})$$

เมื่อ Yield เป็นค่า the branching ratio fraction

การปรับแก้ครึ่งชีวิต (Half life correction) ทำได้โดยการคูณด้วย Exponential factor ดังนี้

$$\mu\text{Ci at time } t_0 = [\mu\text{Ci}] \exp\left(\frac{0.693 \times \text{Decay Time}}{\text{Half Life}}\right) \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อเวลาการสลายตัวและครึ่งชีวิตมีหน่วยเดียวกัน (วินาที นาที ชั่วโมง ปี)

ก.3 การปรับเทียบค่าประสิทธิภาพ (Efficiency Calibration)

ในสมการสำหรับคำนวณค่ากัมมันตภาพนั้น ค่าประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายตัว คือ Geometry ของ Sample –size, density และระยะทางจากหัววัด สำหรับหัววัดที่ใช้รังสีแกมมา ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับค่าพลังงานรังสี ดังนั้นในระบบการวัดรังสีหนึ่ง ๆ จึงต้องมีการปรับเทียบค่าประสิทธิภาพโดยการใช้สารมาตรฐานที่ทราบค่าความเข้มข้นหรือค่ากัมมันต

ภาพของไอโซโทปต่างๆ ที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาหลายค่าพลังงาน กลุ่มข้อมูลของค่าประสิทธิภาพ และค่าพลังงานจะมีความสัมพันธ์กันด้วยสมการ

$$Efficiency = \frac{Net Area}{(Live Time)(Activity)(Yield)} \quad (ก-5)$$

เมื่อ activity มีหน่วยเป็น Bq ของสารมาตรฐานที่พลังงานรังสีเฉพาะ

Yield เป็น branching ratio fraction

Life time คือ actual ADC life time

ก.4 การหาค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์ในสารตัวอย่างอื่น

สารตัวอย่างที่สามารถใช้สมการ Efficiency ในการหาค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์ใดๆ สารตัวอย่างนั้นจำเป็นต้องมี Geometry เหมือนกันกับสารอ้างอิงมาตรฐานที่ใช้หาสมการ Efficiency โดยต้องมีมวล ความหนาแน่น รูปทรง ที่ใกล้เคียงกัน บรรจุในภาชนะบรรจุที่มีค่า กัมมันตภาพของนิวไคลด์ที่ยอดพลังงานต่าง ๆคำนวณได้จาก

$$Activity(Bq) = \frac{Net Area}{Live Time(sec) \times Efficiency(CPS / Bq) \times Yield(Fraction)} \quad (ก-6)$$

ก.5 ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (Minimal Detectable Activity, MDA)

ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ของนิวไคลด์ใดๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะใช้สมการของ (Chiozzi, 2000) ซึ่งหนึ่งในกลุ่มสมการชุดดังกล่าว คือ

$$L_n(Bq) = \frac{2\sqrt{2}}{e_{i,n}} \left(\frac{R_i b}{t} \right)^{1/2} \quad (ก-7)$$

เมื่อ $e_{i,n}$ คือประสิทธิภาพของการนับ $R_i b$ คือจำนวนรังสีกัมมันตภาพ (cps) และ t คือเวลาที่ใช้ในการวัด

คำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัดชนิด HPGe จากสมการที่ (ก-7) เมื่อค่าประสิทธิภาพของการนับมีค่า 0.057430 CPS/Bq จำนวนรังสีกัมมันตภาพมีค่า 1.343×10^{-3} count/sec และเวลาที่ใช้ในการวัดมีค่าเท่ากับ 21600 sec จะได้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เท่ากับ

$$L_n(Bq) = \frac{2\sqrt{2}}{0.057430} \left(\frac{1.343 \times 10^{-3}}{21600} \right)^{1/2}$$

$$L_n(Bq) = 0.0123$$

$$L_n = 6.139 \times 10^{-4} Bq/l$$

$$L_n = 0.6 mBq/l$$

จะได้ขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.6 mBq/l

ก.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (Efficiency Calibration)

ใช้ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมาที่มีหัววัด HPGe และ MCA ขนาด 8 k หรือ 8192 ช่อง ทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานรังสีแกมมาโดย การวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยมาจากสารอ้างอิงมาตรฐาน (Certified Reference Material) ที่ทราบค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์ต่างๆ ที่มีประกอบอยู่ในสารอ้างอิงดังกล่าว ใช้เวลาวัดนาน 43200 sec แล้วนำสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อหาพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาของนิวไคลด์ที่น่าสนใจ ซึ่งจะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงกับค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์นั้นๆ ที่พลังงานรังสีแกมมานั้นๆ แล้วนำไปหาค่า Efficiency และค่า Activity จากสมการ (ก-5) และ (ก-6) แสดงในตาราง ก.1

ตาราง ก.1 ค่า Efficiency และค่า Activity ของ ^{226}Ra ในสารอ้างอิงมาตรฐาน Live Time = 43200 sec

สารมาตรฐาน	E (keV)	Yield (%)	Net Area (counts)	Activity (Bq)	Activity (mBq/l)	Efficiency (CPS / Bq)
IAEA – RGU-1	186.2	3.28	201 ± 20	2.47 ± 0.2	82.33	0.057430

เมื่อได้ค่า Efficiency แล้วนำค่านี้ไปหาค่า Activity จากสมการ (ก-6) ของนิวไคลด์ในสารตัวอย่างอื่น เช่น ผลการวิเคราะห์ค่า Activity ของ ^{226}Ra ในสารตัวอย่างน้ำรัศ (W-PPU1) มี Net Area ของพีคพลังงานดังกล่าวมีค่า $47 \pm 26.81\%$ ที่ยอดพลังงานรังสีแกมมา 186.2 keV , Yield 3.28% จะได้

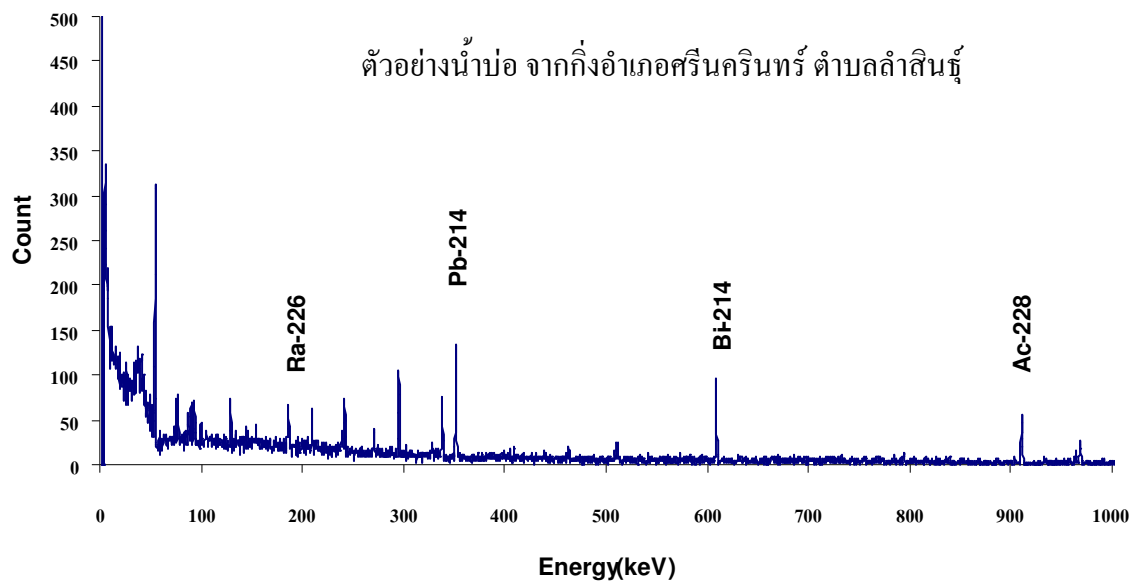
$$Activity(Bq) = \frac{Net\ Area}{Live\ Time(sec) \times Efficiency(CPS / Bq) \times Yield(Fraction)}$$

$$Activity(Bq) = \frac{47(counts)}{21600(sec) \times 0.057430(CPS / Bq) \times 0.0328}$$

$$Activity(Bq) = 1.155 Bq$$

ฉะนั้นในตัวอย่างน้ำรัศ (W-PPU1) มี ^{226}Ra คิดเป็นค่ากัมมันตภาพ เท่ากับ 1.155 Bq

ก.7 กราฟสเปกตรัมแสดงรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ของการวัดรังสีแกมมาจากน้ำป๋อ



ภาคผนวก ข

กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดพัทลุง

Natural Radioactivity in the Area of Phatthalung Province

กนกพร นามโชติ¹ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ² และ ธวัช ชิตตระการ^{3*}

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

^{3*} Corresponding e-mail : tripop.b@ratree.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดพัทลุง โดยเก็บตัวอย่าง ดิน หิน ทราย และน้ำบ่อตื้น รวมทั้งหมด 258 ตัวอย่าง ผลจากการตรวจวัดพบว่าในตัวอย่างดินมีค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ²³²Th, ²²⁶Ra และ ⁴⁰K อยู่ในช่วง 42-208 (เฉลี่ย 104 ± 13) Bq/kg, 49-199 (เฉลี่ย 109 ± 14) Bq/kg และ <LLD-757 (เฉลี่ย 238 ± 40) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างหินมีค่าอยู่ในช่วง <LLD-156 (เฉลี่ย 42 ± 23) Bq/kg, 10-234 (เฉลี่ย 61 ± 25) Bq/kg และ <LLD-1111 (เฉลี่ย 219 ± 147) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างทรายมีค่าอยู่ในช่วง <LLD-181 (เฉลี่ย 56 ± 12) Bq/kg, 6-232 (เฉลี่ย 65 ± 14) Bq/kg และ <LLD-550 (เฉลี่ย 299 ± 47) Bq/kg ตามลำดับ นำค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ²³²Th, ²²⁶Ra และ ⁴⁰K มาหาค่ากัมมันตภาพรังสีโดยรวม พบว่าตัวอย่างดินที่ อ.บางแก้ว (519 Bq/kg) และตัวอย่างหินที่ อ.ป่าบอน (442 Bq/kg) อ.กงหรา (427 Bq/kg) อ.ศรีบรรพต (424 Bq/kg) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ปลอดภัย 370 Bq/kg เมื่อประเมินความเสี่ยงการได้รับสัมผัสรังสีของประชาชนด้วยค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก และภายในร่างกาย (H_{ex}, H_{in}) จากการใช้วัสดุก่อสร้างบ้านเรือน พบว่าค่าที่ได้ส่วนมากน้อยกว่าระดับปลอดภัย (1) การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือน (Outdoor) ของตัวอย่างดิน และหิน มีค่าอยู่ในช่วง 62-230 (เฉลี่ย 123 ± 13) nGy h⁻¹ และ 5-202 (เฉลี่ย 63 ± 29) nGy h⁻¹ ตามลำดับ ส่วนในอาคารบ้านเรือน (Indoor) ในตัวอย่างทรายมีค่าในช่วง 6-328 (เฉลี่ย 146 ± 24) nGy h⁻¹ และจากการหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶Ra ในน้ำบ่อตื้น พบค่าอยู่ในช่วง <LLD-186 (เฉลี่ย 18 ± 07) mBq/l โดยมีตัวอย่างน้ำบ่อตื้น 1 ตัวอย่างที่มีค่าสูงกว่าค่าของทบวงพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ (111 mBq/l) ที่ อ.บางแก้ว (186 mBq/l)

ABSTRACT

This research work aims to study the activity concentration of natural radioactivity in area of Phatthalung Province. Collected soil rock sand and shallow well water samples totally 258 samples. The activity concentration of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in soil samples ranged from 42 to 208 (Mean 104 ± 13) Bq/kg, 49 to 199 (Mean 109 ± 14) Bq/kg and <LLD to 757 (Mean 238 ± 40) Bq/kg, in rock samples ranged from <LLD to 156 (Mean 42 ± 23) Bq/kg, 10 to 234 (Mean 61 ± 25) Bq/kg and <LLD to 1111 (Mean 219 ± 147) Bq/kg, in sand samples ranged from <LLD to 181 (Mean 56 ± 12) Bq/kg, 6 to 232 (Mean 65 ± 14) Bq/kg and <LLD-550 (Mean 299 ± 47) Bq/kg, respectively. The radium equivalent activity of soil samples in Bangkaew district (519 Bq/kg) and rock samples in Pabon district (442 Bq/kg) Kongra district (427 Bq/kg) Sribanphot district (424 Bq/kg) was found to be higher than the limit set in the OECD report (370 Bq/kg). The radiation hazard indices calculated for assessment of the radiation hazards arising due to the of these rock and sand samples in the construction of dwellings were within the safety limits recommended by UNSCEAR. The estimated outdoor dose rates in soil and rock samples ranged from 62 to 230 (Mean 123 ± 13) nGy h^{-1} and 5 to 202 (Mean 63 ± 29) nGy h^{-1} , respectively. The estimated indoor dose rate in sand samples ranged from 6 to 328 (Mean 146 ± 24) nGy h^{-1} . The specific activities of ^{226}Ra in well water samples ranged from <LLD to 186 (Mean 18 ± 07) mBq/l. Only one water sample from Bangkaew district (186 mBq/l), Which was higher than the action level set by US EPA (111 mBq/l).

Key words : Natural Radioactivity, Radium-226, soil, rock, constucting sand, shallow well water, gamma-ray spectrometer

บทนำ

กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ (Natural radioactivity) เป็นส่วนหนึ่งของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม สามารถตรวจพบในธรรมชาติ เช่น อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม โพแทสเซียม โดยอนุกรมยูเรเนียม และทอเรียม จะมีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นทอดๆ ซึ่งในกระบวนการสลายตัวจะได้ก๊าซกัมมันตรังสีเรดอน (^{222}Rn) และทอรอน (^{220}Rn) โดย ^{222}Rn เป็นก๊าซกัมมันตรังสี สลายตัวด้วยครึ่งชีวิต 3.8 วัน เป็นผลผลิตจากการสลายตัวของธาตุตั้งต้นคือ ^{238}U ส่วน ^{220}Rn เป็นก๊าซกัมมันตรังสี สลายตัวด้วยครึ่งชีวิต 5.15 วินาที เป็นผลผลิตจากการสลายตัวของธาตุตั้งต้นคือ ^{232}Th (General Electric, 1996) เมื่อเกิดขึ้นแล้ว ก๊าซทั้งสองชนิดนี้จะลอยขึ้นสู่อากาศ แพร่ผ่านรอยแตก

แยกของหิน ดิน ไปสู่น้ำบาดาล หรือน้ำสาธารณะที่ใช้น้ำในพื้นดิน มีบางส่วนซึ่งอยู่ในดิน และ บางส่วนได้แพร่กระจายผ่านชั้นไปสู่พื้นผิวดิน เข้าสู่บรรยากาศรอบตัวเรา เนื่องจากเรดอนมีอายุ ก่อนข้างยาว และทอรอนมีอายุสั้นมาก ดังนั้น ก๊าซเรดอนจึงมีอยู่ในอากาศเป็นส่วนใหญ่ ทั้งก๊าซ เรดอน และทอรอนเมื่อสลายตัวในการแผ่รังสีจะกลายเป็นธาตุอื่น ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง และเป็นสารกัมมันตภาพรังสี สารเหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็จะเกาะติดอยู่กับฝุ่นผงชนิดต่างๆ ในอากาศ และ ส่งกัมมันตภาพรังสีออกมาอยู่เรื่อยๆ ทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณที่มีการแผ่รังสีนั้น

ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตคือ เมื่อหายใจเอาก๊าซกัมมันตรังสีเหล่านี้เข้าไปเป็นจำนวนมาก จะทำให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งในปอดสูง เช่นเดียวกับการดื่มน้ำที่มีก๊าซกัมมันตรังสีปะปน อยู่ภายในก็จะมีโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งในทางเดินอาหาร อันตรายที่เกิดขึ้นไม่ได้มาจากก๊าซ กัมมันตรังสีเหล่านี้ แต่เกิดจากอนุภาคแอลฟาที่ได้จากการสลายตัวของก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนและ ทอรอน อนุภาคแอลฟานี้จะมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อเซลล์สูง ประกอบกับมีปัจจัยร่วมด้วย เช่นการ สูบบุหรี่ก็จะทำให้เพิ่มการเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด (Lung cancer) มากขึ้น (US EPA, 1993)

จากผลการวิจัยความเข้มข้นก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนในอากาศ และในน้ำบาดาลในพื้นที่ กลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (ไทรภพ ผ่องสุวรรณ และคณะ, 2544) พบว่ามีค่าความเข้มข้นก๊าซ กัมมันตรังสีเรดอน อยู่ระหว่าง $267-144,212 \text{ Bq/m}^3$ (ค่าเฉลี่ย $8,060 \text{ Bq/m}^3$) และพบว่ามี 2 อำเภอ ที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนในน้ำบาดาลเกินค่ามาตรฐาน ของประเทศ สหรัฐอเมริกา ($11,111 \text{ Bq/m}^3$) คือ อ.นาหม่อม จ.สงขลา ($47,471 \text{ Bq/m}^3$) และ อ.กงหรา จ.พัทลุง ($12,158 \text{ Bq/m}^3$)

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลของหินแกรนิตในจังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี (สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2537) พบความเข้มข้นของยูเรเนียมสมมูลสูงกว่าความเข้มข้น ยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินทั่วประเทศ (4-5 ppm) โดยวัดค่าได้ที $18.43 \pm 4.81 \text{ ppm}$

จากการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนในน้ำบาดาล และที่แพร่ขึ้นมาสู่ผิวดิน ในบริเวณลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2543) พบว่าบริเวณที่มีปริมาณก๊าซ เรดอนที่สูงในน้ำบาดาล คือบริเวณ อ.กงหรา ($12158 \pm 11992 \text{ Bq/m}^3$) อ.ควนขนุน ($7745 \pm 9314 \text{ Bq/m}^3$) อ.บางแก้ว ($6905 \pm 9684 \text{ Bq/m}^3$) และ อ.เมือง ($53 \pm 2636 \text{ Bq/m}^3$)

จากข้อมูลแผนที่แนวหินจังหวัดพัทลุง ของฝ่ายข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ยังพบแนวหินแกรนิตซึ่งเป็นหินที่มีปริมาณยูเรเนียมสูง ทอดผ่านหลายอำเภอ ในพื้นที่จังหวัดพัทลุงทางด้านตะวันตกซึ่งเป็นเทือกเขาบรรทัด แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มี ผลต่อระดับความเข้มข้นก๊าซกัมมันตรังสีเรดอน เช่น วัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างบ้านเรือน การระบาย อากาศของบ้าน เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น แสดงให้เห็นผลกระทบของกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ

ต่อสุขภาพของประชาชนในเขตพื้นที่ ที่ได้รับสัมผัสรังสีในปริมาณสูง ทำให้ประชาชนได้รับอัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งในปอด ระบบทางเดินอาหาร และระบบทางเดินหายใจ จึงเป็นการดีที่จะศึกษาทำการรวบรวม วิเคราะห์ข้อมูลในเขตพื้นที่จังหวัดพัทลุงเพื่อการประเมินขั้นต้นของระดับความเสี่ยงที่จะได้รับสารกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในเขตพื้นที่จังหวัดพัทลุง ดังนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสนใจกับพื้นที่ของจังหวัดพัทลุงเป็นพิเศษ

วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

ได้ทำการเก็บตัวอย่างครอบคลุมพื้นที่จังหวัดพัทลุง ซึ่งมีทั้งหมด 10 อำเภอ กับอีก 1 กิ่งอำเภอ เก็บตัวอย่างในดิน ทราบ หิน และน้ำ รวมทั้งรวม 258 ตัวอย่าง ตัวอย่างดิน 93 ตัวอย่าง ตัวอย่างทราบ 85 ตัวอย่าง ตัวอย่างหิน 20 ตัวอย่าง และตัวอย่างน้ำ 60 ตัวอย่าง แสดงใน Figure 1 โดยได้ดำเนินการดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. การเตรียมงานในภาพสนาม

ทำการเก็บตัวอย่างตามเส้นทางของถนนสายต่างๆ โดยศึกษาจากแผนที่ 1:50,000 ที่ได้จากทาง GIS คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จุดที่พบตัวอย่างได้ง่าย เช่น ตัวอย่างดิน จะทำการเก็บทุกๆ 5 กิโลเมตร แต่บางจุดที่กำหนดระยะทางในการเก็บไม่ได้ เช่น ตัวอย่างทราบ น้ำ และตัวอย่างหิน จะใช้วิธีระเหวนหาตัวอย่างในอำเภอที่วางแผนจะเก็บ ลักษณะการเก็บตัวอย่างดิน จะเก็บลึกประมาณ 30 ซม. เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเนื้อดินบริเวณเดิม ในทราบจะเก็บทราบก่อสร้าง ในหินจะเก็บหินโผล่บริเวณเดิม ส่วนในน้ำจะเป็นน้ำบ่อที่ยังบริโภคน้ำอยู่ บรรจุในขวดลิตร

2. การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมสารตัวอย่างดิน หิน และทราบ จะต้องนำตัวอย่างที่ได้จากการเก็บนำมาร่อนเอาเศษขยะ และเศษหญ้าออก ส่วนตัวอย่างหินจะต้องนำมาทุบให้ละเอียดเท่าหัวไม้ขีดไฟ จากนั้นไปอบเพื่อไล่น้ำออก ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จแล้ว นำมาชั่งกับเครื่องชั่งสารความละเอียด 2 ตำแหน่ง (OHAUS ARB 120, USA) บรรจุดิน หิน และทราบใส่กระดาษชั่งขนาด 5.5×5 ซม. โดยใน 1 กระดาษจะมีตัวอย่างในบริเวณใกล้เคียงกัน ผสมกันอยู่ในสัดส่วนที่เท่ากัน ยกเว้นตัวอย่างหิน นำเทปกาวปิดทับฝากระดาษชั่งเพื่อกันไม่ให้อากาศเข้าไป และป้องกันการรั่วไหลของกัมมาเรดอน-ทอรอน ทิ้งไว้ 30 วันเพื่อให้เข้าสู่สมดุลทางรังสี นำตัวอย่างที่เข้าสู่สมดุลแล้วไปวัดความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีกับเครื่องวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัด NaI(Tl) (Gammadata, GDM 10, Sweden)

การเตรียมสารตัวอย่างน้ำ นำตัวอย่างน้ำที่เก็บจากภาคสนามจุดละ 20 ลิตรมาใส่เครื่องปั้มน้ำ (สุภัทร, 2547) เพื่อให้ผ่านสารจับเรเดียม นำสารจับเรเดียมที่ผ่านน้ำแล้วมาใส่กระปุกสารขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5×5.5 ซม. แล้วเติมกรดไนตริก (NHO₃) ความเข้มข้น 1 N ลงไป 50 ml นำเทปกาวพันฝากระปุกเพื่อกันไม่ให้อากาศเข้าไป นำตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัด HPGe (Canberra, Model GC 1319, USA)

3. ประสิทธิภาพของระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัดชนิด HPGe และ NaI (TI)

ทดลองหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวัด (Lower Limit of Detection , L.L.D.) ของระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ โดยคำนวณค่า L.L.D. จากสมการ (Chiozzi ,2000) จะได้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เท่ากับ 1.88×10^{-2} Bq/l หรือ 19 mBq/l

คำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัดชนิด NaI (TI) จากสมการเดียวกันจะคำนวณค่า $L_K = 12.44 Bq$ $L_U = 3.621 Bq$ และ $L_{Th} = 3.11 Bq$

4. การปรับแก้ประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงานต่างๆ ของตัวอย่างน้ำ

การวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากหัววัดรังสีแกมมาชนิด HPGe และ MCA จะประกอบด้วย การวิเคราะห์พีครังสีแกมมา แต่ละพีคมาจากนิวไคลด์ตัวใด ขั้นตอนสุดท้ายในการวิเคราะห์นิวไคลด์คือการหาความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของแต่ละไอโซโทปซึ่งโดยปกติ NET AREA จะสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นแต่ก็จำเป็นต้องปรับแก้ค่าประสิทธิภาพ ของหัววัดที่พลังงานต่างๆ ดังสมการ

$$Efficiency = \frac{Net Area}{(Live Time)(Activity)(Yield)} \quad (1)$$

ค่าประสิทธิภาพที่ได้หาได้จากสารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA-RGU-1 แสดงไว้ใน Table 10 และนำค่าประสิทธิภาพที่ได้ไปหาค่า Activity ของตัวอย่างอื่นๆ จากสมการ

$$Activity(Bq) = \frac{Net Area}{Live Time(sec) \times Efficiency(CPS / Bq) \times Yield(Fraction)} \quad (2)$$

5. การวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัด NaI (TI)

และเครื่องวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัด HPGe ในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดิน ทราช และหิน เมื่อสมมูลทางรังสีแล้ว นำไปวัดกับเครื่องวัดรังสีแบบเปล่งแสงวับ อุปกรณ์หลักประกอบด้วย หัววัดรังสีแกมมาแบบเปล่งแสงวับ (Scintillation Detector) ชนิดผลึก NaI (TI) ขนาด 3"×3" สเปกโตรมิเตอร์เป็นแบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer) มีวงจร

photomultiplier ติดอยู่กับส่วนหัววัด มีโลหะอลูมิเนียมกำบังหัววัด สำหรับตัวอย่างที่วัด จะใช้เวลา วัดรังสีนานตัวอย่างละ 3 ชั่วโมง

ตัวอย่างน้ำ เมื่อสมมูลทางรังสีแล้วนำตัวอย่างที่เข้าสมมูลแล้ว ไปวัดรังสีด้วยเครื่อง วิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาหัววัด HPGe เทคนิคนี้จัดเป็นเทคนิควัดที่มีประสิทธิภาพสูง แบบหนึ่งในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของ ^{226}Ra สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด HPGe การวัดรังสี ทำงานที่อุณหภูมิ 77 K คืออุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว สำหรับตัวอย่าง 1 ตัวอย่างจะใช้เวลาวัด รังสีนาน 6 ชั่วโมง

6. สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

สถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean) หรือค่าเฉลี่ย (Mean) หาได้จากการเอาผลรวมจากข้อมูลทั้งหมดหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่ามัธยฐาน (Median) เป็น ค่าที่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมด เมื่อเรียงค่าข้อมูลจากน้อยสุดไปมากที่สุด หรือจาก มากที่สุดไปหาน้อยสุด เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนข้อมูลที่มากกว่า และน้อยกว่าค่านี้อยู่ร้อยละ 50 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation ; S.D) ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error ; SE) โดยที่ $SE = SD / \sqrt{N}$ เมื่อ N คือจำนวนตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูล ในงานวิจัยนี้ จะแสดงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต $\pm 1.96 \times SE$ ซึ่งแสดงช่วงข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % รอบค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีการแจกแจงแบบคลัสป์ปกติ

ผลและการวิเคราะห์ผล

1. ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน ทราย และ หิน

ในตัวอย่างดินค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 1 โดยมีค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K อยู่ในช่วง 42-208 (ค่าเฉลี่ย 104 ± 13) Bq/kg , 49-199 (ค่าเฉลี่ย 109 ± 14) Bq/kg และ <LLD-757 (ค่าเฉลี่ย 238 ± 40 Bq/kg) ตามลำดับ โดยความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีมากที่สุดของ ^{232}Th อยู่ที่ อ.บางแก้ว (208 Bq/kg), ^{226}Ra อยู่ที่ อ.บางแก้ว (199 Bq/kg) และ ^{40}K อยู่ที่ อ.ป่าบอน (757 Bq/kg) พิจารณาที่ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th แต่ละอำเภอพบว่าค่าต่ำสุด และสูงสุด เป็นของ อ.ป่าพะยอม (71 ± 29 Bq/kg) และ อ.บางแก้ว (129-208 Bq/kg) ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย กัมมันตภาพรังสี ของ ^{226}Ra ต่ำสุดที่ อ.ป่าพะยอม (84 ± 38 Bq/kg) และอ.เมือง (84 ± 21 Bq/kg) สูงสุดที่ อ.บางแก้ว (164 ± 45 Bq/kg) ส่วนค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสีของ ^{40}K ต่ำสุดที่ อ.ปากพะยูน (48 ± 94 Bq/kg) สูงสุดที่ อ.ตะโหมด (485 ± 282 Bq/kg)

ในตัวอย่างทรายค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 2 โดยมีค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K อยู่ในช่วง <LLD-181 (เฉลี่ย 56 ± 12) Bq/kg, 6-232 (เฉลี่ย 65 ± 14) Bq/kg และ <LLD-550 (เฉลี่ย 299 ± 47) Bq/kg ตามลำดับ โดยค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีมากที่สุดของ ^{232}Th อยู่ที่ อ.ปากพะยูน (181 Bq/kg), ^{226}Ra อยู่ที่ อ.งขลา (232 Bq/kg) และ ^{40}K อยู่ที่ อ.เขาชัยสน (550 Bq/kg) พิจารณาที่ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th แต่ละอำเภอพบว่าค่าต่ำสุด และสูงสุด เป็นของ อ.ควนขนุน (37 ± 21 Bq/kg) และ อ.ปากพะยูน (116 ± 17 Bq/kg) ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสี ของ ^{226}Ra ต่ำสุดที่ อ.ควนขนุน (37 ± 8 Bq/kg) สูงสุดที่ อ.งขลา (141 ± 96 Bq/kg) ส่วนค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสีของ ^{40}K ต่ำสุดที่ อ.ศรีนครินทร์ (145 ± 165 Bq/kg) สูงสุดที่ อ.งขลา (412 ± 129 Bq/kg)

ในตัวอย่างหินค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 3 โดยมีค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K อยู่ในช่วง <LLD-156 (เฉลี่ย 42 ± 23) Bq/kg, 10-234 (เฉลี่ย 61 ± 25) Bq/kg และ <LLD-1111 (เฉลี่ย 219 ± 147) Bq/kg ตามลำดับ โดยค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีมากที่สุดของ ^{232}Th อยู่ที่ อ.ป่าบอน (156 Bq/kg), ^{226}Ra อยู่ที่ อ.งขลา (234 Bq/kg) และ ^{40}K อยู่ที่ อ.ศรีบรรพต (1111 Bq/kg)

2. ค่าเรเดียมสมมูล (Radium Equivalent Activity : Ra_{eq})

ค่าเรเดียมสมมูลเป็นค่าดัชนีที่ใช้โดยทั่วไป ในการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีโดยรวมของทั้ง 3 นิวไคลด์ แสดงค่าเรเดียมสมมูล (Ra_{eq}) ดังสมการ (OECE ,1979)

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + (A_{Th} \times 1.43) + (A_K \times 0.077) \quad (3)$$

โดย A_{Ra} , A_{Th} , A_K คือความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสี ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ในหน่วย Bq/kg ตามลำดับ โดยค่าเรเดียมที่คำนวณได้ควรต่ำกว่า 370 Bq/kg (Beretka and Mathew ,1985) ถือเป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ เมื่อคำนึงถึงความเสี่ยง สำหรับก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนที่มีต่อระบบการหายใจ ค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 4 ในตัวอย่างดินจะพบค่ากัมมันตภาพเรเดียมสมมูลเกินค่ามาตรฐานเพียงอำเภอเดียวคือ อ.บางแก้ว (412 ± 113 Bq/kg) เมื่อพิจารณาทุกอำเภอจะพบค่าทั้งหมดอยู่ในช่วง 139-519 (เฉลี่ย 276 ± 5) Bq/kg โดยพบอำเภอที่มีค่าสูงสุดมากกว่าค่ามาตรฐาน คือ อ.บางแก้ว (519 Bq/kg) อ.ตะโหมด (399 Bq/kg) อ.ควนขนุน (399 Bq/kg) และอ.ศรีบรรพต (377 Bq/kg)

ในตัวอย่างทรายมีค่ากัมมันตภาพเรเดียมสมมูลอยู่ในช่วง 6-413 (เฉลี่ย 169 ± 28) Bq/kg ค่าเฉลี่ยที่ได้้น้อยกว่าค่ามาตรฐานทุกอำเภอ แต่เมื่อพิจารณาค่าสูงสุดเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน ก็จะมีพบค่าที่เกินมาตรฐานที่ อ.ปากพะยูน (413 Bq/kg) และ อ.งขลา (371 Bq/kg) ค่าที่ได้เกินค่ามาตรฐานเล็กน้อย

ในตัวอย่างหินมีค่ากัมมันตภาพเรเดียมสมมูลอยู่ในช่วง 10-442 (เฉลี่ย 138 ± 65) Bq/kg ค่าเฉลี่ยหินที่ได้้น้อยกว่าค่ามาตรฐานเช่นเดียวกับตัวอย่างทราย แต่ก็พบบางอำเภอที่มีค่าสูงสุดเกิน คือ อ.ป่าบอน (442 Bq/kg) อ.กงหรา (427 Bq/kg) และศรีบรรพต (424 Bq/kg) ซึ่งเป็นค่าที่เกินค่ามาตรฐานไม่มากนัก

3. ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีจากภายนอก และ ภายในร่างกาย (External and internal hazard index)

ดัชนีความเสี่ยงรังสีภายนอก (H_{ex}) คือ ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีที่รับจากภายนอกในร่างกาย โดยส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมาที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ที่มาจกแหล่งกำเนิดธรรมชาติภายนอกในร่างกาย ค่า H_{ex} คำนวณได้จากสมการ (Beretka and Mathew,1995)

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

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

สมการนี้เป็นรูปแบบจำลอง (conservative model) ของการได้รับอันตรายจากรังสีภายนอกเมื่อใช้วัสดุจากธรรมชาติ เช่น หิน ทราย มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน เมื่อค่า $H_{ex} < 1$ แสดงว่าอันตรายจากรังสีภายนอกมีน้อยจนละทิ้งได้ แต่ถ้า $H_{ex} = 1$ แสดงว่า Ra_{eq} มีค่าเท่ากับ 370 Bq/kg และผู้ได้รับสัมผัสรังสีภายนอกจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 1.5 mGy/y หากค่า $H_{ex} > 1$ อันตรายจากการได้รับสัมผัสรังสีภายนอกมีมาก ซึ่งไม่ควรจะนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน จาก Table 5 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีภายนอกของตัวอย่างทราย และหินอยู่ในช่วง 0.02-1.12 (เฉลี่ย 0.46 ± 0.08) และ 0.03-1.19 (เฉลี่ย 0.37 ± 0.17) โดยมีบางอำเภอที่มีค่าสูงสุดที่มากกว่า 1 คือ ในตัวอย่างทรายคือ อ.ปากพะยูน (1.12) ในตัวอย่างหินคือ อ.ป่าบอน (1.19) , อ.กงหรา (1.15) , และอ.ศรีบรรพต (1.15) แต่อย่างไรก็ตามค่า H_{ex} ที่ได้ก็มากกว่า 1 ไม่มากนัก

ดัชนีความเสี่ยงรังสีภายใน (H_{in})

คือค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับภายในร่างกาย มาจากกัมมันตรังสีเรดอน ทอรอน และผลผลิตจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา จาก Table 5 พบค่า H_{in} ในทรายอยู่ในช่วง 0.03-1.63 (เฉลี่ย 0.63 ± 0.11) ค่าที่ได้ส่วนใหญ่้น้อยกว่า 1 แต่มีบางอำเภอที่มีค่าสูงสุดมากกว่า 1 คือ อ.ปากพะยูน (1.42) และอ.กงหรา (1.63) ค่าที่ได้มากกว่า 1 ไม่มากนัก แต่ก็ถือเป็นปัจจัยเสี่ยงในการใช้วัสดุทรายสร้างบ้าน

4. การวิเคราะห์หาค่า ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rate) และ ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี (Annual effective doses)

ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ จากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลกสำหรับภายนอกบ้านเรือน ซึ่งคำนวณจากค่ากัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K โดยสมมติว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดอื่นที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ^{137}Cs , ^{90}Sr และ ^{235}U มีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ โดยค่ารังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างดินสามารถคำนวณได้จากสมการ (UNSCEAR, 2000)

$$D(\text{nGy}/\text{h}) = 0.462A_{\text{Ra}} + 0.604A_{\text{Th}} + 0.0417A_{\text{K}} \quad (6)$$

$$\text{Annual excess effective dose (Indoor)} = 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7000 \text{ h} \times D(\text{nGy}/\text{h}) \quad (7)$$

$$\text{Annual excess effective dose (outdoor)} = 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 1760 \text{ h} \times D(\text{nGy}/\text{h}) \quad (8)$$

ค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 6-8

Table 6 แสดงปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศของตัวอย่างดินที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 62-230 (เฉลี่ย 123 ± 13) nGy h^{-1} โดยค่าสูงสุดอยู่ที่ อ.บางแก้ว (230 nGy h^{-1}) ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่ กิ่งอ.ศรีนครินทร์ (62 nGy h^{-1}) เมื่อนำค่าที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานรังสีดูดกลืนในอากาศของโลก คือ 60 nGy h^{-1} พบค่าเฉลี่ยที่เกินมาตรฐานทุกอำเภอ นำค่าที่ได้ไปหาปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปี ที่ค่ามาตรฐานโลกกำหนดไว้ คือ 0.48 mSv ต่อปี โดยแบ่งเป็น ภายในบ้าน และนอกบ้าน คือ 0.41 mSv และ 0.07 mSv ตามลำดับ จากตัวอย่างดินที่ศึกษาเป็นตัวอย่างนอกบ้าน ดังนั้นจึงพิจารณาที่ค่าเพราะค่ารังสีในบ้านอาจมาจากปัจจัยอื่น เช่น วัสดุก่อสร้างต่าง ๆ รวมทั้งการระบายอากาศในบ้านด้วย เมื่อนำปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีจากนอกบ้านมาวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้มากกว่าค่ามาตรฐานโลกเล็กน้อย แต่จะพบค่าที่มากกว่าค่ามาตรฐานมากที่ อ.บางแก้ว ($0.23 \pm 0.06 \text{ mSv y}^{-1}$) และอ.ตะโหนด ($0.20 \pm 0.02 \text{ mSv y}^{-1}$) เมื่อคูที่ค่าเฉลี่ยรวมทั้งจังหวัด ($0.15 \pm 0.02 \text{ mSv y}^{-1}$) ค่าที่ได้เกินค่ามาตรฐานไม่มากนัก

Table 7 เมื่อพิจารณาที่ตัวอย่างหินพบค่ารังสีที่ถูกดูดกลืนในอากาศอยู่ในช่วง $5-202 \text{ nGy h}^{-1}$ โดยค่ามากที่สุดจะอยู่ที่ อ.ป่าบอน (202 nGy h^{-1}) ส่วนค่าน้อยสุดอยู่ที่ อ.ศรีบรรพต (5 nGy h^{-1}) เมื่อนำไปคำนวณค่ารังสีประสิทธิผลต่อปี โดยคิดค่ารังสีนอกบ้านเนื่องจากตัวอย่างหินที่เก็บเป็นตัวอย่างหินภูเขาส่วนมากจึงใช้เกณฑ์ปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปีของค่าเฉลี่ยมาตรฐานโลก เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน คือ 0.07 mSv ต่อปี จากตารางพบว่าค่าที่ได้ส่วนมากน้อยกว่า 0.07 mSv ต่อปี พบเพียงบางอำเภอที่มีค่ามากกว่า คือ อ.ป่าบอน (0.25 mSv) อ.กงหรา ($0.10 \pm 0.09 \text{ mSv}$) และอ.ศรีบรรพต ($0.12 \pm 0.23 \text{ mSv}$)

Table 8 เมื่อพิจารณาตัวอย่างทรายที่เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับที่อยู่อาศัย จึงต้องตรวจวัดรังสีเพื่อความปลอดภัยในการรับรังสีในบ้าน โดยการหาค่ารังสีดูดกลืนในอากาศ และค่าปริมาณประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีได้จากสมการ (European Commission, 1999)

$$D(\text{nGy}/h) = 0.92A_{Ra} + 1.1A_{Th} + 0.080A_K \quad (9)$$

$$\text{Annual excess effective dose (Indoor)} = 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7000 \text{ h} \times D(\text{nGy}/h) \quad (10)$$

ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 6-328 (เฉลี่ย 146 ± 24) nGy h^{-1} โดยค่ามากที่สุดพบที่ อ.งทรา (328 nGy h^{-1}) และน้อยสุดที่ กิ่งอ.ศรีนครินทร์ (6 nGy h^{-1}) นำค่าที่ได้ไปหาปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี โดยทาง European Commission (1999) ได้กำหนดค่าไม่เกิน 1 mSv ต่อปีในวัสดุก่อสร้างชนิดต่างๆ ไว้ เช่นในวัสดุที่หนาและใช้สร้างบ้านในปริมาณมาก เช่น อิฐ คอนกรีต ส่วนวัสดุที่มีขีดจำกัดหรือใช้ไม่มาก เช่น พวกไม้กระดาน และกระเบื้องกำหนดไว้ไม่เกิน 6 mSv ต่อปี จากงานวิจัยได้ใช้เกณฑ์ 1 mSv ต่อปีในพวกทราย โดยค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้มีปริมาณน้อยจะพบเพียงบางอำเภอที่มีปริมาณมากกว่าค่าที่กำหนดเพียงเล็กน้อย คือที่ อ.ปากพะยูน (1.25 ± 0.56 mSv) และที่ อ.งทรา (1.28 ± 0.33 mSv)

5. ผลการวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในหินชนิดต่างๆ แล เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในหินทั่วไป

จากการเก็บข้อมูลในตัวอย่งหินโคล่บริเวณต่างๆ 20 ตัวอย่าง ในจังหวัดพัทลุงมาคิดเทียบเป็นค่าความเข้มข้นสมมูลโดยแยกเป็นชนิดหินต่างๆ ดัง Figure 7 แยกพิจารณาตามชนิดหินดัง Table 9 ดังนี้

หินแกรนิต พบความเข้มข้นของโพแทสเซียม ยูเรเนียมสมมูล และทอเรียมสมมูล อยู่ในช่วง 0.2-0.6 (เฉลี่ย 0.4 ± 0.2) ppm , 8.4-19.0 (เฉลี่ย 13 ± 6.1) ppm และ 8.4-38.6 (เฉลี่ย 26 ± 17.8) ppm ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราเสี่ยงกับความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในหินทั่วไป (Fowler, 1990) มีค่าความเข้มข้นโพแทสเซียม ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นในหินแกรนิตทั่วไป (3.3 – 3.5 ppm) แต่มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล (2.6 เท่า) และทอเรียมสมมูล (1.4 เท่า)

หินปูน พบความเข้มข้นของโพแทสเซียม ยูเรเนียมสมมูล และทอเรียมสมมูลในช่วง <LLD-3.7 (เฉลี่ย 0.5 ± 0.6) ppm , 2.0-10.7 (เฉลี่ย 3.5 ± 1.5) ppm และ 0.3-35.7 (เฉลี่ย 6.0 ± 6.1) ppm ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราเสี่ยงกับความเข้มข้นรังสีธรรมชาติในหินมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นหินปูนทั่วไป โดยสูงกว่าความเข้มข้น ^{40}K (1.7 เท่า), ^{238}U (1.6 เท่า) และ ^{232}Th (3.5 เท่า)

หินทรายแป้ง พิจารณาปริมาณ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th พบความเข้มข้นอยู่ในช่วง <LLD-1.1 (เฉลี่ย 0.5 ± 0.4) ppm , 0.8-5.4 (เฉลี่ย 2.2 ± 1.6) ppm และ <LLD-20.8 (เฉลี่ย 7.3 ± 8.7) ppm ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราเสี่ยงกับความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในหินทั่วไปมีค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นในหินดินดาน ทั่วไป (1.2 ppm) แต่มีค่า

ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล (1.5 เท่า) และ ทอริยมสมมูล (2.4 เท่า) และจาก Figure 8 แสดงปริมาณโพแทสเซียม พบความเข้มข้นมากที่สุดที่ อ.ศรีบรรพต บริเวณอุทยานเขาปู่ (St-SBP2) คือ 3.7% ชนิดหินเป็นหินปูน พิจารณาปริมาณยูเรเนียมสมมูล พบความเข้มข้นมากที่สุดที่ อ.งหรา บริเวณน้ำตกไพรวัลย์ (St-KR1) คือ 19.0 ppm ชนิดหินเป็นหินแกรนิต ส่วนความเข้มข้นทอริยมสมมูลพบมากที่สุดที่ อ.ป่าบอน บริเวณน้ำตกโตนสะตอ (St-PB) คือ 38.6 ppm ชนิดหินเป็นหินแกรนิต

6. ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติของ ^{226}Ra ในน้ำบ่อต้นของจังหวัดพัทลุง

ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบ่อที่ใช้ในการบริโภค มาหาค่ากัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra ในน้ำ ค่าที่ได้แสดงไว้ใน Table 11 พบว่าอยู่ในช่วง <LLD-186 (เฉลี่ย 18 ± 07) mBq/l จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้ต่างกับค่าสูงสุดมากเป็นไปได้ว่าค่าความเข้มข้นสูงอาจกระจุกตัวในบางพื้นที่ ของจังหวัดพัทลุง เมื่อพิจารณาการกระจายของกัมมันตภาพรังสี ^{226}Ra ดัง Figure 8 จะพบค่าสูงสุดที่ อ.บางแก้ว ต.นาปะขอ บ้านทุ่งเศรษฐี (W-BK1) (186 mBq/l) ที่มีค่าโดดเด่นเพียงตัวอย่างเดียว และค่าที่ได้สูงกว่าค่าปริมาณเรเดียมของทบวงพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้กำหนดค่ามาตรฐานไว้ที่ 111 mBq/l จะเห็นว่าค่าที่ได้สูงกว่าค่ามาตรฐานเพียงตัวอย่างเดียว

7. ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีจาก ^{226}Ra

เมื่อประเมินปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีจาก ^{226}Ra ในการบริโภคน้ำเข้าสู่ร่างกายของประชาชนในจังหวัดพัทลุง โดยอนุโลมใช้เกณฑ์ตาม WHO (2002) ซึ่งประมาณอัตราการบริโภคน้ำไว้ที่ 2 ลิตรต่อวัน ในเวลา 1 ปีจะดื่มน้ำ 730 ลิตร เมื่อใช้ค่าปัจจัย 2.8×10^{-7} Sv/Bq เป็นปัจจัยสำหรับการประเมินปริมาณรังสีสมมูลที่ร่างกายได้รับต่อปีในผู้ใหญ่ (Adult annual equivalent dose) ผลการคำนวณปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้แสดงใน Table 11 มีค่าอยู่ในช่วง <LLD-37.9 (เฉลี่ย 3.8 ± 1.5) μSv ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เกณฑ์ในการกำหนดปริมาณรังสีขนาดเสี่ยงที่จะได้รับจาก ^{226}Ra ต่อ อายุ-น้ำหนัก ว่าไม่ควรได้รับเกิน 8 μSv ต่อปี (UNSCEAR, 2000) พิจารณาอำเภอที่เสี่ยงต่อค่ามาตรฐาน จากตารางพบว่ามีกระจายข้อมูลมากจึงแยกพิจารณาเป็นบางอำเภอที่พบค่าสูงสุดมีอัตราเสี่ยงมี 5 อำเภอด้วยกัน คือ อ.ปากพะยูน (128 μSv) อ.บางแก้ว (38 μSv) อ.เมือง (12 μSv) กิ่งอ.ศรีนครินทร์ (16 μSv) และอ.ศรีบรรพต (15 μSv)

เมื่อพิจารณาที่ Figure 9 แสดงการแจกแจงความถี่พบว่าในจำนวนตัวอย่างบ้านทั้งหมด 60 บ้านในจังหวัดพัทลุงที่ยังคงมีการบริโภคน้ำบ่ออยู่ มีอยู่ 8 ตัวอย่าง ที่เกินปริมาณรังสีขนาดเสี่ยง และในจำนวนนั้นพบมากที่สุดที่ อ.บางแก้ว (38 μSv) อย่างไรก็ตามปริมาณรังสีดังกล่าวคำนวณจากการ

บริโภคน้ำดื่มเพียงอย่างเดียว หากในอาหารอื่นๆ เช่น ข้าว เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ มีปริมาณ ^{226}Ra อยู่ด้วย ประชาชนก็จะได้รับปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นด้วยตามสัดส่วนที่บริโภค และความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra ในอาหารประเภทนั้น ๆ

8. ความสัมพันธ์ปริมาณความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในจังหวัดพัทลุง กับงานวิจัยอื่น ๆ

ไทรภพ ผ่องสุวรรณ และคณะ (2544) วิจัยการประเมินความเสี่ยงต่อก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนภายใน และภายนอกอาคารในพื้นที่ชุมชน เขตลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา โดยใช้เทคนิคการกัทรอยนิวเคลียร์ พบว่าค่าเฉลี่ยก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนของน้ำบาดาลในจังหวัดพัทลุง มีค่ามากที่สุดที่ อ.งขลา (12158 ± 11992 Bq/m³) รองลงมาที่ อ.ควนขนุน (7745 ± 9314 Bq/m³) อ.บางแก้ว (6905 ± 9684 Bq/m³) อ.ป่าพะยอม (5561 ± 4571 Bq/m³) และ อ.เมือง (5377 ± 2636 Bq/m³) ตามลำดับ โดยค่าสูงสุดที่พบใน อ.งขลา (38884 Bq/m³) กับ อ.บางแก้ว (34397 Bq/m³) ค่าที่ได้ใกล้เคียงกันมาก พิจารณาในตัวอย่างดิน ได้แสดงคอนทัวร์บริเวณที่มีก๊าซกัมมันตรังสีเรดอนแพร่ขึ้นมาจากใต้พื้นผิวดินสูงที่ อ.งขลา อ.ตะโหมด และ อ.ควนขนุน

เมื่อนำผลการวิจัยมาหาความสัมพันธ์กับการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในน้ำบ่อ และในดินของพื้นที่จังหวัดพัทลุง พบว่ามีบางอำเภอที่สอดคล้องกัน คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra ในน้ำบ่อ จะพบมากที่สุดที่ อ.บางแก้ว (69 ± 115 mBq/l) ส่วนในตัวอย่างอำเภออื่นจะพบค่าน้อยมาก เมื่อพิจารณาในตัวอย่างดิน พบปริมาณความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{238}U เฉลี่ยมากที่สุดที่ อ.บางแก้ว (164 ± 45 Bq/kg) อ.ตะโหมด (157 ± 32 Bq/kg) อ.ควนขนุน (117 ± 59 Bq/kg) และอ.เขาชัยสน (115 ± 11 Bq/kg) ตามลำดับ โดย อ.ควนขนุน อ.เขาชัยสน และอ.ตะโหมดจะสอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาค่าสูงสุดที่ อ.งขลา (146 Bq/kg) พบค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่ อ.เขาชัยสน (122 Bq/kg)

สุขสวัสดิ์ (2537) ได้ทำการวัดความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลในหินชนิดต่างๆ ในจังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสำหรับหินแกรนิต เท่ากับ 18.43 ± 4.81 ppm eU สำหรับหินปูนเท่ากับ 3.12 ± 2.83 ppm eU ซึ่งข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างหินแกรนิต และหินปูนที่ตรวจวัดได้ในจังหวัดพัทลุง โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลในหินแกรนิต เท่ากับ 13.0 ± 6.1 ppm eU ค่าสูงสุดคือ 19 ppm eU และในหินปูนเท่ากับ 3.5 ± 1.5 ppm eU

จะเห็นว่าเมื่อนำข้อมูลที่ได้อามาหาความสัมพันธ์กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง จะพบข้อมูลคล้ายกันบางส่วน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการในการหาความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีที่แตกต่างกัน หรือใช้เครื่องมือในการตรวจวัดไม่เหมือนกัน อาจจะทำให้ความสอดคล้องของข้อมูลมีความแตกต่างกันบ้าง นอกจากนั้นในการใช้เทคนิคการกัทรอยนิวเคลียร์ สามารถวัดรังสีที่แผ่มาจากผิวดินบริเวณนั้น ซึ่งอาจจะมาจากหินที่อยู่ใต้ดินทำให้ตรวจวัดรังสีได้มากกว่า และรวดเร็วกว่า

ในตัวอย่างดินที่นำมาวัดในห้องปฏิบัติการโดยใช้ระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา แต่เมื่อพิจารณาถึงความละเอียดในการวัด เฉพาะตัวอย่าง เช่น ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างดินอย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงรังสีที่แผ่ขึ้นมาจากหินใต้ดิน การใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาจะมีความละเอียดในการวัดมากกว่า

สรุป

ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในดิน ทราบ หิน และน้ำ บริเวณพื้นที่จังหวัดพัทลุงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา และใช้เทคนิคการจับเรเดียมในน้ำ ผลที่ได้แยกพิจารณาตามชนิดของตัวอย่างดังนี้

ตัวอย่างดิน ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K ในช่วง 42-208 (เฉลี่ย 104 ± 13) Bq/kg, 49-199 (เฉลี่ย 109 ± 14) Bq/kg และ $<\text{LLD}-757$ (เฉลี่ย 238 ± 40) Bq/kg ตามลำดับ พิจารณาค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra และ ^{232}Th ซึ่งให้ลูกหลานเป็น ^{222}Rn และ ^{220}Rn พบปริมาณความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีเด่นชัดอยู่ 4 บริเวณ คือ อ.บางแก้ว (164 ± 45 , 162 ± 46 Bq/kg) อ.ตะโหมด (157 ± 32 , 120 ± 14 Bq/kg) อ.ควนขนุน (117 ± 59 , 122 ± 40 Bq/kg) และ อ.เขาชัยสน (115 ± 11 , 122 ± 25 Bq/kg) ตามลำดับ

ตัวอย่างทรายก่อสร้าง ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K มีค่าอยู่ในช่วง $<\text{LLD}-181$ (เฉลี่ย 56 ± 12) Bq/kg, 6-232 (เฉลี่ย 65 ± 14) Bq/kg และ $<\text{LLD}-550$ (เฉลี่ย 299 ± 47) Bq/kg ตามลำดับ พิจารณาค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{226}Ra และ ^{232}Th พบเพียง 2 อำเภอที่มีค่าสูงเด่นชัด คือ อ.กงหรา (141 ± 96 , 89 ± 23 Bq/kg) และ อ.ปากพะยูน (105 ± 9 , 116 ± 77 Bq/kg) ตามลำดับ

ตัวอย่างหิน ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของ ^{232}Th , ^{226}Ra และ ^{40}K มีค่าอยู่ในช่วง $<\text{LLD}-156$ (เฉลี่ย 42 ± 23) Bq/kg, 10-234 (เฉลี่ย 61 ± 25) Bq/kg และ $<\text{LLD}-1111$ (เฉลี่ย 219 ± 147) Bq/kg ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวอย่างหินที่เก็บได้จะเป็นหินแถบเทือกเขาบรรทัดเรียงลงมาตั้งแต่ อ.ศรีบรรพต ถึง อ.ศรีนครินทร์ อ.กงหรา และ อ.ตะโหมด มีบางอำเภอที่เก็บได้นอกแนวหินนี้ คือ อ.ควนขนุน อ.เมือง และ อ.ปากพะยูน ส่วนมากจะเป็นหินปูน เนื้อหินประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (CaCO_3) นอกนั้นยังมีหินอัคนี หินทรายแป้ง และแร่ควอร์ตซ์ ที่เป็นแร่ประกอบหินอัคนี โดยจะพบความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล เหนือมากในหินแกรนิตทั้ง 3 ตัวอย่าง ค่ามากที่สุดพบถึง 19 ppm ที่น้ำตกไพรวัลย์ อ.กงหรา ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลของหินแกรนิตสงขลา (สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2537) เมื่อหาค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแยกตามชนิดของหิน พบว่าในหินแกรนิตมีค่าสูงกว่าหินทั่วไป (Fowler, 1990) ในความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล (2.6 เท่า) และทอเรียมสมมูล (1.4 เท่า) ในหินปูนมีค่าสูงกว่าหินทั่วไปทั้งโพแทสเซียม (1.7 เท่า)

และยูเรเนียมผสม (1.6 เท่า) และทอเรียมผสม (3.5 เท่า) ส่วนในหินทรายแป้งมีค่าสูงกว่าหินทั่วไปในความเข้มข้นยูเรเนียมผสม (1.5 เท่า) และทอเรียมผสม (2.4 เท่า)

เมื่อนำตัวอย่างดิน ทราย และหินมาหาค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีโดยรวม ในตัวอย่างดิน ค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ อ.บางแก้ว (412 ± 113 Bq/kg) เพียงอำเภอเดียว ตัวอย่างทรายทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ามาตรฐาน และตัวอย่างหิน พบอำเภอที่มีค่าเกินมาตรฐานที่ อ.ป่าบอน (442 Bq/kg) อ.งหรา (427 Bq/kg) และอ.ศรีบรรพต (424 Bq/kg) ส่วนอำเภออื่นที่มีค่าเกิน แต่ก็เกินค่ามาตรฐานไม่มาก

ผลการตรวจวัดค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีที่รับจากภายนอกในร่างกายในตัวอย่างทรายพบค่าเฉลี่ยในอำเภอทุกอำเภอมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถนำมาสร้างบ้านได้ ส่วนในตัวอย่างหินมีเพียงบางอำเภอเท่านั้น คือ อ.ป่าบอน (1.19) , อ.งหรา (1.15) , และอ.ศรีบรรพต (1.15) แต่อย่างไรก็ตามค่า H_{ex} ที่ได้ก็มากกว่า 1 ไม่มากนัก ส่วนค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่รับจากภายในร่างกายในตัวอย่างดินค่าที่ได้ส่วนใหญ่มีน้อยกว่า 1 แต่มีบางอำเภอที่มีค่าสูงที่สุดมากกว่า 1 คือ อ.ป่าพะยอม (1.42) และอ.งหรา (1.63) ค่าที่ได้มากกว่า 1 ไม่มากนัก แต่ก็ถือเป็นปัจจัยเสี่ยงในการใช้วัสดุทรายสร้างบ้าน

พิจารณาปริมาณรังสีประสิทธิผลที่รับต่อปีในตัวอย่างดิน ทราย และหิน โดยได้ปริมาณรังสีในดินมากกว่าค่ามาตรฐานโลก (0.07 mSv) ทุกอำเภอ แต่ค่าที่ได้มากกว่าไม่มาก พบเพียงบางอำเภอที่มีค่ามากจนเด่น คือ อ.บางแก้ว (0.23 ± 0.06 mSv) ส่วนในตัวอย่างทรายทาง European Commission (1999) ได้กำหนดค่าไม่ให้เกิน 1 mSv ต่อปี ค่าที่ได้ถือเป็นค่าที่น้อย ไม่มีอัตราเสี่ยงต่อทรายที่นำมาสร้างบ้านเรือน ในตัวอย่างหินซึ่งเป็นหินภูเขาส่วนมากจะใช้เกณฑ์เดียวกับดิน คือ ไม่เกิน 0.07 mSv ต่อปี ค่าที่ได้ส่วนมากน้อยกว่า 0.07 mSv ต่อปี แต่จะพบค่าเฉลี่ยบางตัวอย่างที่มีค่ามากคือที่ อ.งหรา (0.1 ± 0.09 mSv) และที่ อ.ศรีบรรพต (0.12 ± 0.23 mSv)

ตัวอย่างน้ำ ค่ากัมมันตภาพรังสี ^{226}Ra ที่วัดได้ส่วนมากค่าไม่มากนัก คือ น้อยกว่าค่ามาตรฐานเรเดียมในน้ำ คือ 111 mBq/l พบค่าสูงสุดและเกินมาตรฐานเพียงตัวอย่างเดียวที่ อ.บางแก้ว ต.นาปะขอ บ้านทุ่งเศรษฐี คือ 186 mBq/l แต่ก็เกินค่ามาตรฐานไม่มากนัก พิจารณาปริมาณเรเดียมที่ได้รับต่อปีโดยกำหนดที่ $8 \mu\text{Sv}$ ต่อปี (UNSCEAR, 2000) พบ 8 ตัวอย่างจาก 60 ตัวอย่าง ที่เกินค่ามาตรฐาน ค่าที่ได้อยู่ในช่วง $9.29-37.93 \mu\text{Sv}$ ต่อปี โดยค่ามากที่สุดเป็นตัวอย่างเดียวกับค่าสูงสุดที่ อ.บางแก้ว แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบันการบริโภคน้ำบ่อมีจำนวนลดลง และหันมาบริโภคน้ำที่ผ่านการกรองจาก ผลการศึกษา พบว่า สามารถกำจัดเรเดียมในน้ำให้ลดลงหรือหมดไปได้ โดยใช้เครื่องกรองน้ำที่ใช้สารกรองชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีประสิทธิภาพการกรองเรเดียมได้สูงสุดถึง 98% (จเร วุฒิสาสตน์, 2548)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ และหลักสูตรธรณีฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือที่จำเป็นในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อแผนที่ 1:50,000 ของจังหวัดพัทลุง และขอขอบคุณสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้ความอนุเคราะห์สารมาตรฐานเรเดียม

เอกสารอ้างอิง

- ไทรภพ ผ่องสุวรรณ ธวัช ชิตตระกูล สมพร จงคำ พรศรี พลพงษ์ สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล อภินันท์ จิตติภรณ์พันธ์ คมฤทธิ วัฒนวาที และจร วุฒิสาสตร์. 2544. “การประเมินความเสี่ยงต่อเรดอนภายใน และภายนอกอาคารในพื้นที่ชุมชน เขตลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา”, รายงานวิจัยเสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จำนวนหน้า 235 หน้า.
- สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล. 2537. “การตรวจวัดปริมาณยูเรเนียม (U - 238) ในหินชนิดต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี”, โครงการฟิสิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล. 2543. “การตรวจวัดปริมาณแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลรอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาด้วยเทคนิคการกัตรอยนิวเคลียร์”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุภัทร ภัทรกิจโสภณ. 2547. “ประสิทธิภาพการจับเรเดียมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคดไอออน”, โครงการฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จร วุฒิสาสตร์. 2548. “ความเข้มข้นของเรเดียม-226 ในน้ำบริโภค (น้ำบ่อตื้น) ในอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Beretka, J. and Mathew P.J. 1985. “Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product”, *Health Physics*. 48(1985), 87-95.
- Chiozzi, P., De Felice, P., Fazio, A., Pasquale, V. and Verdoya, M. 2000. “Laboratory application of NaI(Tl) γ -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics”, *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 53(2000), 127-132.
- EC. 1999. “European Commission Report on Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials”, Radiation protections. 112.

- Farai I.P., and Ademola, J.A., 2004. "Radium equivalent activity concentrations on concrete building Blocks in eight cities in Southwestern Nigeria", Journal of Environmental Radioactivity
- Faure, G. 1986. Principle of isotope geology (Second Edition). Singapore, John Wiley & Son, Inc., 589p.
- General Electric, 1996. Chart of Nuclides (Twelfth Edition), General Electric company, USA, 52 p.
- IAEA. 1987. Preparation and Certification of IAEA Gamma Spectrometry Reference Materials RGU-1, RG-Th-1 and RGK-1, IAEA/RL/148, Vienna, Austria, 48 p.
- ICRP 60. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford.
- 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.
- Strachnov V., Valkovic V., Zeisler R. and Dekner R., Report on the Intercomparison Run IAEA-314 : ^{226}Ra , Th and U in Strram Sediment. IAEA/AL/038, IAEA, Vienna, Austria 1991.
- 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.

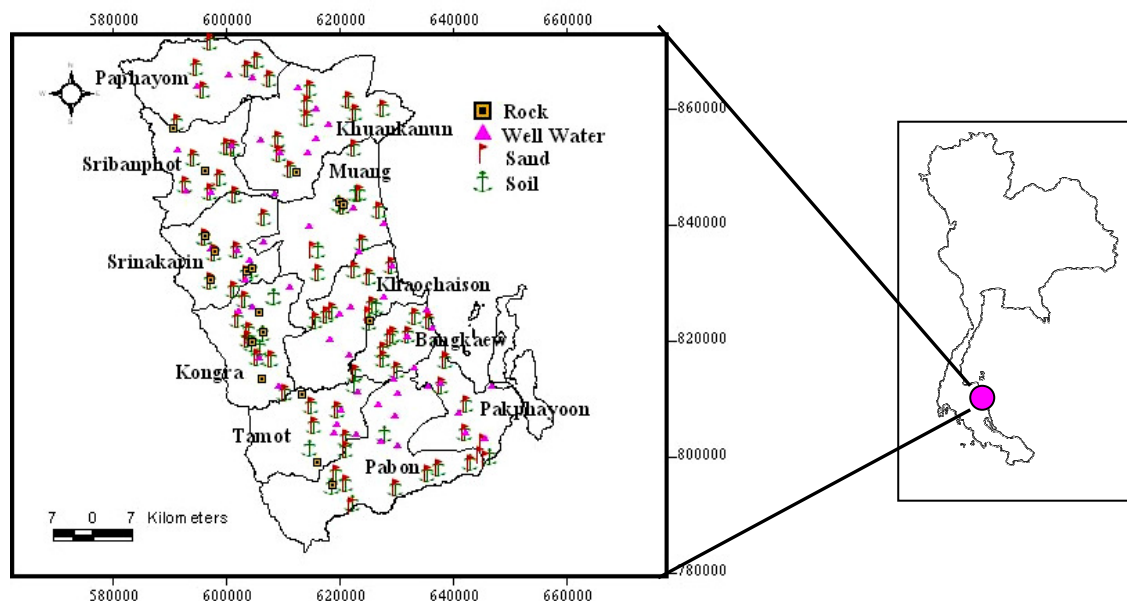


Figure 1 Simplified map showing the sampling localities in Phatthalung Province.

Table 1 Minimum, maximum and mean values including the standard error at the 95% confidence of activities of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in soil samples.

District	^{232}Th		^{226}Ra		^{40}K	
★ Sub-district	(Bq/kg)		(Bq/kg)		(Bq/kg)	
(No. of sample)	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Pakphayoon(2)	74-75	74 ± 2	65-109	88 ± 42	<LLD-96	48 ± 94
Pabon(3)	45-70	59 ± 15	87-162	109 ± 53	184-757	481 ± 325
Tamot(3)	110-134	120 ± 14	127-184	157 ± 32	197-635	485 ± 282
Bangkaew(3)	129-208	162 ± 46	121-199	164 ± 45	122-286	202 ± 93
KhaoChaison(3)	103-147	122 ± 25	103-122	115 ± 11	44-586	237 ± 343
Kongra(4)	83-90	85 ± 3	49-146	96 ± 48	65-639	342 ± 273
Muang(4)	63-139	105 ± 35	62-108	84 ± 21	31-86	53 ± 23
★ Srinakarin(3)	49-166	98 ± 69	69-129	93 ± 36	<LLD-692	310 ± 398
Sribanphot(3)	93-170	119 ± 49	95-143	103 ± 41	<LLD-515	224 ± 298
Khuankanun(3)	88-158	122 ± 40	57-154	117 ± 59	<LLD-250	93 ± 155
Paphayom(3)	42-88	71 ± 29	58-121	84 ± 38	13-266	102 ± 162
Over all (34)	42-208	104 ± 13	49-199	109 ± 14	<LLD-757	238 ± 40

* : < LLD (Lower limit of detection).

Table 2 Minimum, maximum and mean values of activities of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in sand samples.

District	^{232}Th		^{226}Ra		^{40}K	
★ Sub-district	(Bq/kg)		(Bq/kg)		(Bq/kg)	
(No.of sample)	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Pakphayoon(2)	44-181	116 ± 77	95-113	105 ± 9	129-549	388 ± 256
Pabon(3)	30-72	56 ± 27	32-84	61 ± 30	188-360	263 ± 100
Tamot(3)	<LLD-6	38 ± 43	42-78	57 ± 21	<LLD-290	149 ± 164
Bangkaew(3)	30-96	61 ± 37	84-98	89 ± 9	301-460	367 ± 94
KhaoChaison(3)	24-50	41 ± 17	33-72	51 ± 23	324-550	405 ± 143
Kongra(4)	75-112	89 ± 23	63-232	141 ± 96	341-544	412 ± 129
Muang(4)	21-66	44 ± 18	20-75	53 ± 24	193-415	287 ± 97
★ Srinakarin(3)	<LLD-83	41 ± 47	6-65	38 ± 34	<LLD-292	145 ± 165
Sribanphot(3)	34-59	48 ± 14	22-47	39 ± 15	243-372	320 ± 77
Khuankanun(3)	21-56	37 ± 21	32-45	37 ± 8	200-448	321 ± 140
Paphayom(3)	35-58	48 ± 13	43-64	55 ± 12	128-382	233 ± 150
Over all (34)	<LLD-181	56 ± 12	6-232	65 ± 14	<LLD-550	299 ± 47

Table 3 Minimum, maximum and mean values of activities of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in Rock samples.

District	^{232}Th		^{226}Ra		^{40}K	
★ Sub-district	(Bq/kg)		(Bq/kg)		(Bq/kg)	
(No.of sample)	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Pakphayoon(2)	2	2	12	12	103	103
Pabon(3)	156	156	144	144	981	981
Tamot(3)	12-40	23 ± 21	36-104	70 ± 67	37-115	76 ± 76
KhaoChaison(3)	1	1	25	25	54	54
Kongra(4)	17-126	62 ± 45	18-234	78 ± 102	22-231	137 ± 86
Muang(4)	3-6	5 ± 3	31-39	35 ± 8	<LLD	<LLD
★ Srinakarin(3)	1-112	38 ± 38	28-67	53 ± 27	<LLD -798	225 ± 244

Table 3 Minimum, maximum and mean values of activities of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in Rock samples.

District	^{232}Th		^{226}Ra		^{40}K	
★ Sub-district	(Bq/kg)		(Bq/kg)		(Bq/kg)	
(No.of sample)	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Sribanphot(2)	<LLD	144	72±141	10	133	71±120
Khuankanun(1)	8	8	8	50	50	50
Over all (20)	<LLD	156	42±23	10	234	61±25

Table 4 Minimum, maximum and mean values of radium equivalent activities in soil,sand and rock samples

District	Radium equivalent activities (Bq/kg)					
★ Sub-district	Soil (34 samples)		Sand (34 samples)		Rock (20 samples)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Pakphayoon	172-224	198 ± 51	168-413	300 ± 141	22	22
Pabon	190-308	230 ± 76	93-202	156 ± 75	442	442
Tamot	344-399	366 ± 33	42-209	122 ± 96	56-161	108 ± 103
Bangkaew	322-519	412 ± 113	151-261	205 ± 69	-	-
KhaoChaison	254-335	308 ± 52	133-145	141 ± 58	31	31
Kongra	173-299	244 ± 55	263-371	300 ± 139	58-427	177 ± 166
Muang	156-292	238 ± 58	110-167	137 ± 58	40-44	42 ± 4
★ Srinakarin	139-419	257 ± 164	6-183	108 ± 113	35-336	124 ± 98
Sribanphot	206-377	291 ± 97	121-150	132 ± 41	10-424	217 ± 406
Khuankanun	185-399	298 ± 121	85-131	115 ± 48	68	68
Paphayom	139-243	194 ± 59	126-169	141 ± 43	-	-
Over all	139-519	276 ± 5	6-413	169 ± 28	10-442	138 ± 65

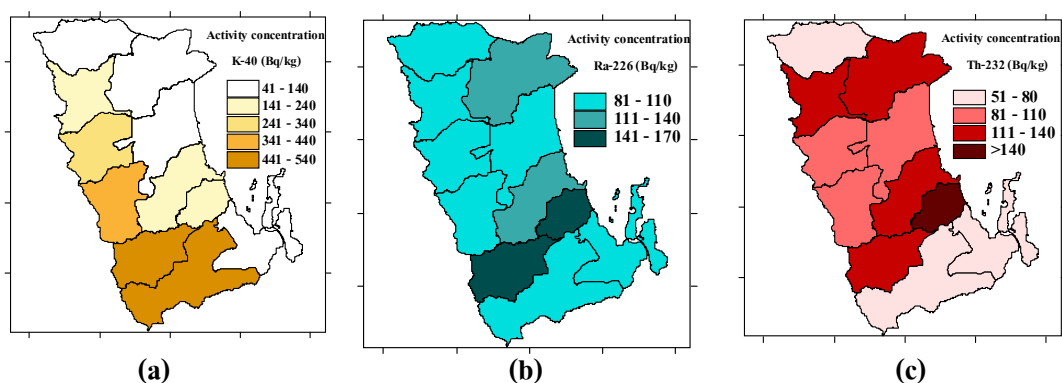


Figure 2 Activity concentration map of (a) ^{40}K , (b) ^{226}Ra and (c) ^{232}Th in soil samples.

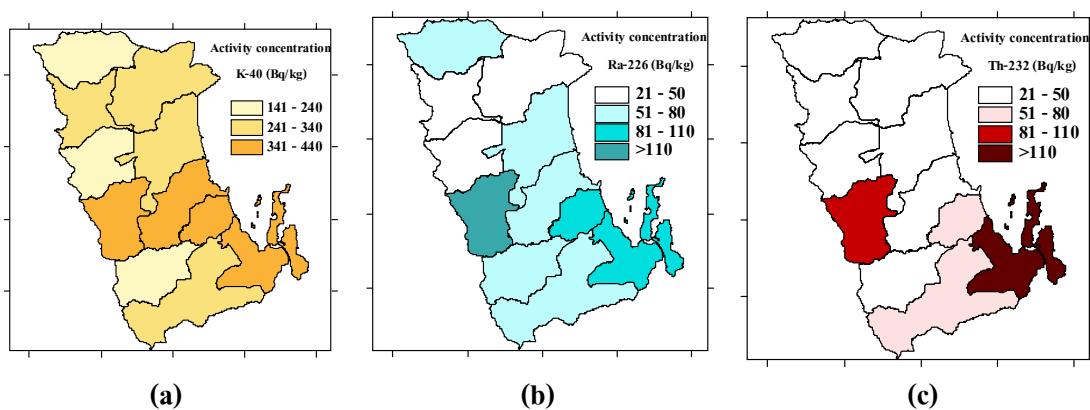


Figure 3 Activity concentration map of (a) ^{40}K , (b) ^{226}Ra and (c) ^{232}Th in sand samples.

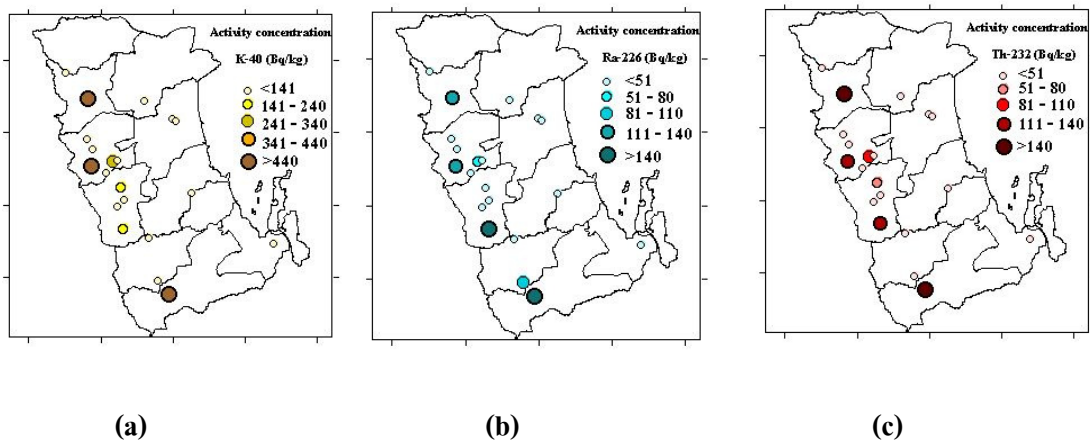


Figure 4 Activity concentration map of (a) ^{40}K , (b) ^{226}Ra and (c) ^{232}Th in rock samples

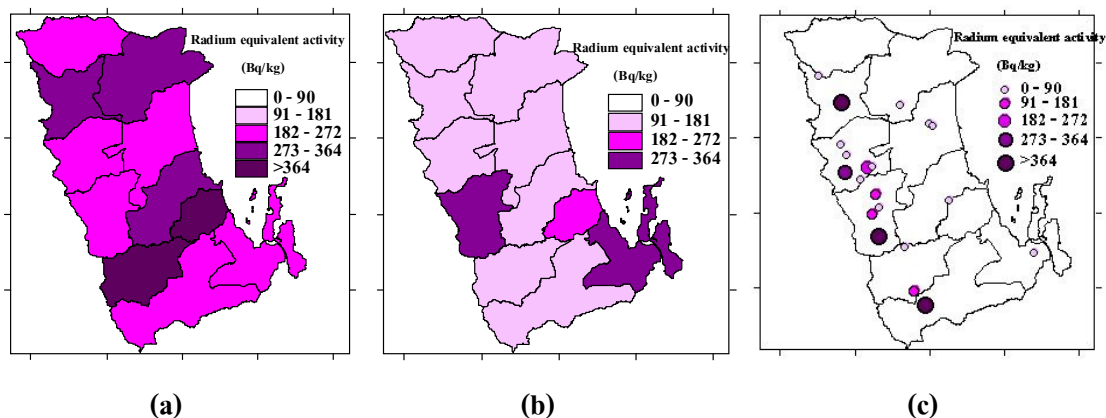


Figure 5 Activity concentration map of radium equivalent activity in (a) soil,(b) sand and (c) rocksamples.

Table 5 Minimum, maximum and mean values of hazard index in sand and rock samples.

District	Sand (34 samples)				Rock (20 samples)	
★ Sub-district	H_{ex}		H_{in}		H_{ex}	
	Rang	Mean	Rang	Mean	Rang	Mean
Pakphayoon	0.45-1.12	0.81 ± 0.38	0.71-1.42	1.09 ± 3.39	0.06	0.06
Pabon	0.25-0.54	0.44 ± 0.18	0.34-0.77	0.60 ± 0.26	1.19	1.19
Tamot	0.11-0.57	0.33 ± 0.26	0.23-0.78	0.48 ± 0.31	0.15-0.44	0.29 ± 0.28
Bangkaew	0.41-0.71	0.55 ± 0.17	0.64-0.97	0.80 ± 0.19	-	-
KhaoChaison	0.36-0.39	0.38 ± 0.02	0.48-0.56	0.52 ± 0.04	0.08	0.08
Kongra	0.71-1.00	0.81 ± 0.19	0.89-1.63	1.19 ± 0.44	0.15-1.15	0.48 ± 0.45
Muang	0.30-0.45	0.37 ± 0.08	0.35-0.66	0.51 ± 0.13	0.11-0.12	0.11 ± 0.01
★ Srinakarin	0.02-0.49	0.29 ± 0.28	0.03-0.61	0.40 ± 0.36	0.09-0.91	0.33 ± 0.27
Sribanphot	0.33-0.40	0.36 ± 0.05	0.39-0.53	0.46 ± 0.08	0.03-1.15	0.59 ± 1.10
Khuankanun	0.23-0.35	0.31 ± 0.08	0.32-0.47	0.41 ± 0.09	0.18	0.18
Paphayom	0.35-0.46	0.38 ± 0.07	0.46-0.61	0.53 ± 0.09	-	-
Over all	0.02-1.12	0.46 ± 0.08	0.03-1.63	0.63 ± 0.11	0.03-1.19	0.37 ± 0.17

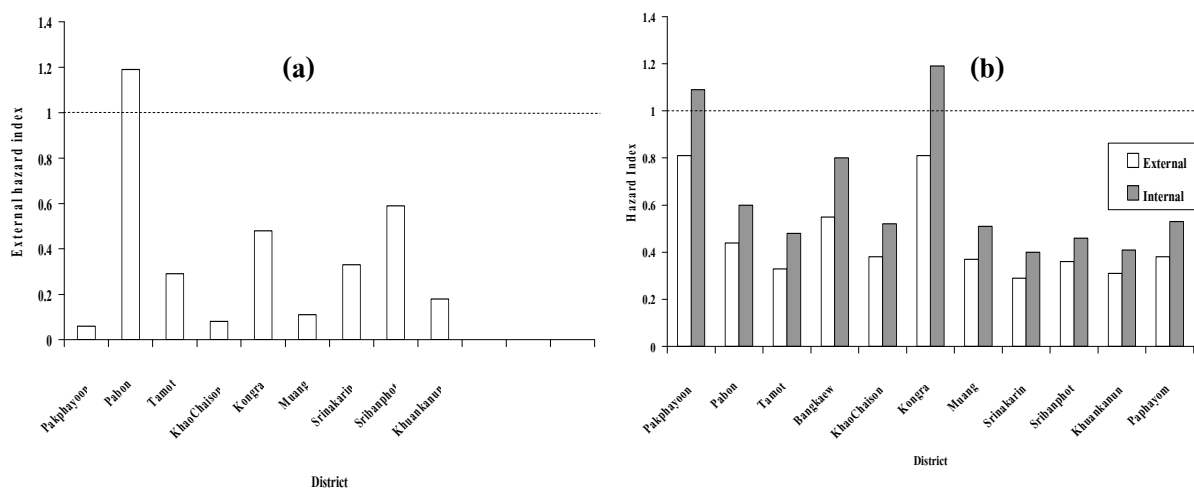


Figure 6 Bar diagram showing the values of external and internal hazard index in (a) rock and (b) sand samples.

Table 6 Minimum, maximum and mean values of absorbed dose rate and annual effective doses in soil samples.

District (No.of sample)	Absorbed dose rate (nGy h ⁻¹)			Annual effective doses (mSv y ⁻¹)	
	Min	Max	Mean	Indoors	Outdoors
Pakphayoon(2)	75	100	87 ± 24	0.43 ± 0.09	0.11 ± 0.03
Pabon(3)	86	143	106 ± 37	0.52 ± 0.16	0.13 ± 0.05
Tamot(3)	156	181	165 ± 15	0.81 ± 0.06	0.20 ± 0.02
Bangkaew(3)	143	230	182 ± 50	0.89 ± 0.22	0.23 ± 0.06
KhaoChaisoon(3)	12	151	137 ± 24	0.67 ± 0.10	0.17 ± 0.03
Kongra(4)	75	136	110 ± 26	0.54 ± 0.13	0.14 ± 0.03
Muang(4)	69	127	104 ± 25	0.51 ± 0.12	0.13 ± 0.03
★ Srinakarin(3)	62	189	115 ± 75	0.56 ± 0.32	0.14 ± 0.09
Sribanphot(3)	90	168	129 ± 44	0.63 ± 0.19	0.16 ± 0.06
Khuakanun(3)	81	177	131 ± 55	0.64 ± 0.24	0.16 ± 0.07
Paphayon(3)	63	107	86 ± 25	0.42 ± 0.11	0.11 ± 0.03
Over all(34)	62	230	123 ± 13	0.60 ± 0.20	0.15 ± 0.02

Table 7 Absorbed dose rate and annual effective doses in rock samples.

District (No.of sample)	Absorbed dose rate (nGy h ⁻¹)			Annual effective doses (mSv y ⁻¹)
	Min	Max	Mean	Mean
Pakphayoon(1)	11	11	11	0.01
Pabon(1)	202	202	201	0.25
Tamot(2)	25	73	49 ± 47	0.06 ± 0.06
KhaoChaison(1)	15	15	15	0.02
Kongra(4)	26	191	79 ± 74	0.10 ± 0.09
Muang(2)	18	20	19 ± 2	0.02 ± 0.002
★ Srinakarin(6)	17	154	57 ± 45	0.07 ± 0.06
Sribanphot(2)	5	195	100 ± 186	0.12 ± 0.23
Khuankanun(1)	31	31	31	0.04
Over all (20)	5	202	63 ± 29	0.08 ± 0.04

Table 8 Absorbed dose rate and annual effective doses in sand samples.

District (No.of sample)	Absorbed dose rate (nGy h ⁻¹)			Annual effective doses (mSv y ⁻¹)
	Min	Max	Mean	Mean
Pakphayoon(3)	146	346	255 ± 114	1.25 ± 0.56
Pabon(3)	81	172	139 ± 57	0.68 ± 0.28
Tamot(3)	39	179	106 ± 79	0.52 ± 0.39
Bangkaew(3)	136	223	179 ± 49	0.88 ± 0.24
KhaoChaison(3)	120	128	124 ± 5	0.61 ± 0.02
Kongra(3)	225	328	260 ± 66	1.28 ± 0.33
Muang(4)	94	149	119 ± 26	0.59 ± 0.13
★ Srinakarin(3)	6	153	92 ± 87	0.45 ± 0.42
Sribanphot(3)	103	127	114 ± 14	0.56 ± 0.06
Khuankanun(3)	77	115	101 ± 23	0.50 ± 0.11
Paphayon(3)	106	146	122 ± 24	0.60 ± 0.12
Over all(34)	6	328	146 ± 24	0.71 ± 0.12

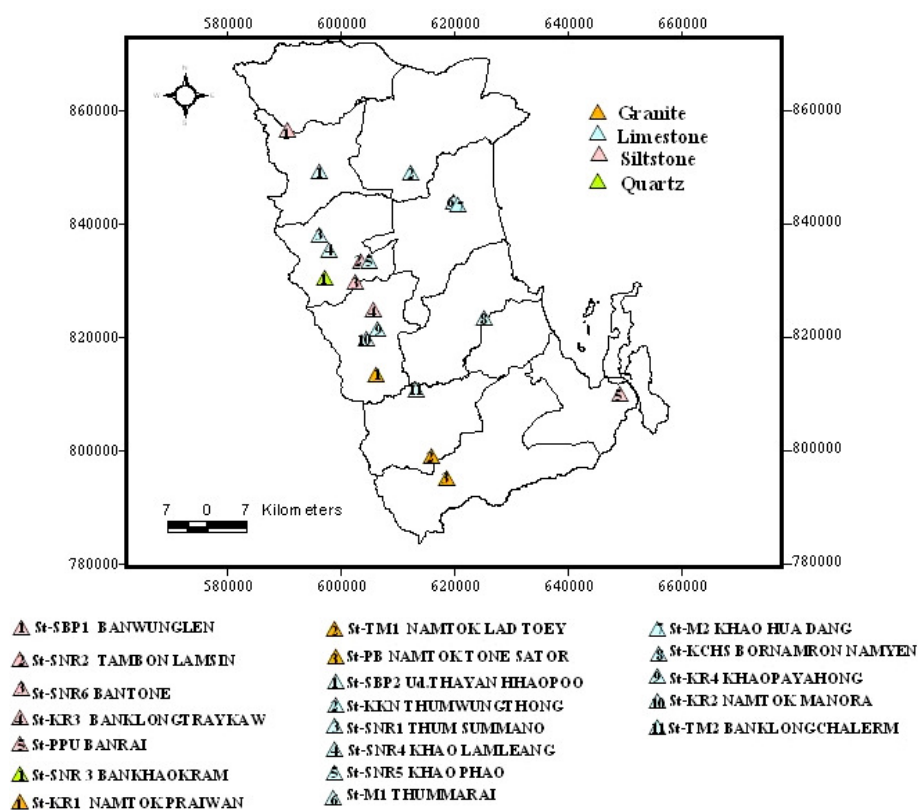


Figure 7 Rock type map of Phatthalung Province.

Table 9 Average concentration in rock type

Rock type (No. of sample)	Concentration					
	K (%)		eU (ppm)		eTh (ppm)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Granite(3)	0.2-0.6	0.4 ± 0.2 (3.3 – 3.5) ^b	8.4-19.0	13.0 ± 6.1 (4-5) ^b	8.4-38.6	26.0 ± 17.8 (15-18) ^b
Limestone(11)	<LLD-3.7	0.5 ± 0.6 (0.3) ^b	2.0-10.7	3.5 ± 1.5 (2.2) ^b	0.3-35.7	6.0 ± 6.1 (1.7) ^b
Siltstone(5)	<LLD-1.1	0.5 ± 0.4 (1.2) ^b	0.8-5.4	2.2 ± 1.6 (1.5) ^b	<LLD-20.8	7.3 ± 8.7 (3.0) ^b
^a Quartz (1)	2.6	2.6	9.2	9.2	27.7	27.7

*: ^a1 sample.

: ^b (Fowler,1990).

Table 10 Efficiency and activity of Ra-226 in standard.

Live Time = 43200 sec

Standard	E (keV)	Yield (%)	Net Area (counts)	Activity (Bq)	Activity (mBq/l)	Efficiency (CPS / Bq)
IAEA – RGU-1	186.2	3.28	201 ± 20	2.47 ± 0.2	82.33	0.057430

Table 11 Activity concentration of Ra-226 and annual effective dose in well water samples.

District (No.of sample)	Activity concentration (mBq/l)		annual effective doses (μ Sv)	
	Rang	Mean	Rang	Mean
Pakphayoon(7)	12-58	33 ± 13	2.5-11.8	6.7 ± 2.6
Pabon(5)	<LLD-16	03 ± 04	<LLD-3.3	0.6 ± 0.9
Tamot(3)	<LLD-17	08 ± 06	<LLD-3.5	1.7 ± 1.3
Bangkaew(3)	1-186	69 ± 115	0.3-37.9	14.1 ± 23.5
KhaoChaison(6)	<LLD-32	08 ± 10	<LLD-6.5	2.0 ± 1.9
Kongra(7)	<LLD-33	16 ± 11	<LLD-6.8	3.3 ± 2.2
Muang(4)	14-59	41 ± 21	2.8-12.0	8.3 ± 4.3
★ Srinakarin(6)	<LLD-77	19 ± 25	<LLD-15.8	3.8 ± 5.1
Sribanphot(5)	<LLD-75	21 ± 28	<LLD-15.3	4.3 ± 5.7
Khuankanun(7)	<LLD-17	05 ± 05	<LLD-3.5	1.1 ± 1.1
Paphayon(3)	1-27	12 ± 15	0.3-5.5	2.5 ± 3.0
Over all(60)	<LLD-186	18 ± 07	<LLD-37.9	3.8 ± 1.5

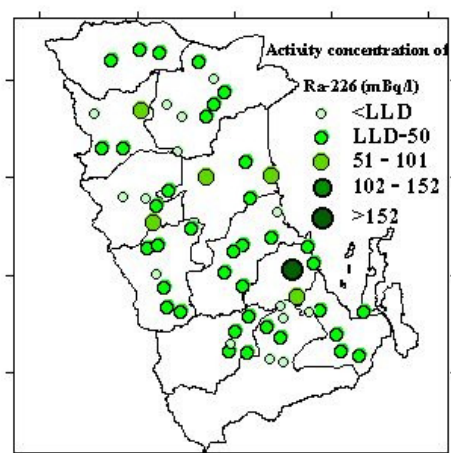


Figure 8 Activity concentration map of ^{226}Ra in well water samples.

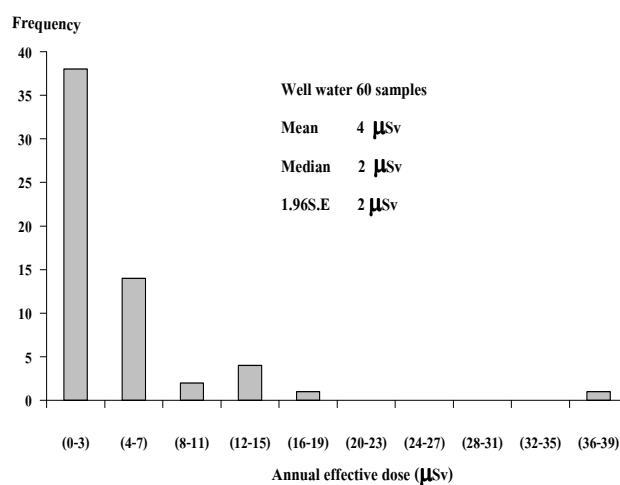


Figure 9 Bar diagram showing annual effective dose (μSv) ^{226}Ra in well water samples.