

การตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำใต้ดินและการประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ

บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง

Determination of Radionuclides in Groundwater and Health Risk Assessment

in Communities around Rayong Industrial Land Estate

วรินทร์ลดา แนนอน (Warinlada Naenon)* พัฒนา อนูรักษ์พงษ์สรร (Patana Anurakpongssatorn)**

สุนทรี ขุนทอง (Soontree Koontong)***

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำใต้ดิน และประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง โดยเก็บตัวอย่าง 27 จุดเก็บ ครอบคลุม 12 ชุมชน วิเคราะห์ นิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยใช้ระบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ที่มีหัววัดรังสีชนิด HPGe ที่แบคกราวด์ต่ำ พบว่ามี ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 เรเดียม-226 และโพแทสเซียม-40 ซึ่งมีปริมาณน้อยมากหรือเป็นปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อมทั่วไปการประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ โดยแบ่งเป็น 5 ช่วงอายุ คือ ทารก (0-6 เดือน) เด็กเล็ก (7 เดือน-4 ปี) เด็ก (5-11 ปี) วัยรุ่น (12-19 ปี) และผู้ใหญ่ (≥ 20 ปี) พบว่าในช่วงอายุน้อยจะมีความเสี่ยงมากกว่าที่ช่วงอายุมาก และ ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นแปรผัน โดยตรงกับกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ABSTRACT

The objective of this research was to determinate the radionuclides in groundwater and health risk assessment of the area around Rayong Industrial Land Estate. Samples in 27 sites were collected from 12 communities. Radionuclides were analyzed by using gamma spectrometry consisted of High Pure Germanium (HPGe) detector at low background. Radionuclides found were uranium-238 thorium-232 radium-226 and potassium-40 in trace amount which originated from natural source. Health risk assessment was among of the age of infant (0-6 month), toddler (7 month-4 years), child (5-11 years), teen (12-19 years) and adult (≥ 20 years) found that the younger showed higher more risk than older and risk varied with radioactivity of radionuclides.

คำสำคัญ: น้ำใต้ดิน การประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ นิวไคลด์กัมมันตรังสี

Key Words: Groundwater, Health Risk Assessment, Radionuclides

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

** รองศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาสังคมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา

บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อมนุษย์อย่างมาก เนื่องจากมนุษย์นำมาใช้ในการดำรงชีวิต ใช้ในครัวเรือน ภาคเกษตรกรรม รวมถึงภาคอุตสาหกรรม น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดสามารถเกิดขึ้นเองในธรรมชาติ และสามารถละลายธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในหิน ดิน และทรายได้ รวมถึงธาตุกัมมันตรังสี ได้แก่ ธาตุในอนุกรมยูเรเนียม ธาตุในอนุกรมโทเรียม และโพแทสเซียม-40 ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Al-Hamarneh & Awadallah, 2009) และยังมีกัมมันตรังสีที่ไม่ได้เกิดขึ้นเองในธรรมชาติแต่มาจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การวินิจฉัยโรคและรักษาโรคมะเร็ง หรือฝุ่นกัมมันตรังสี (fallout) จากการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ และวัสดุกัมมันตรังสีปริมาณเล็กน้อยที่เล็ดรอดออกสู่สิ่งแวดล้อมที่มาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2545) นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอีกด้วย เช่น การวัดและควบคุมปริมาณ การตรวจสอบรอยร้าวของท่อโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี หรือการเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมโพลีเมอร์ เป็นต้น (สมพร และอริรัตน์, 2549)

ระยองเป็นจังหวัดหนึ่งที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่อุตสาหกรรมภาคตะวันออก และมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากมีการกระจายตัวของนิคมอุตสาหกรรมและเขตอุตสาหกรรมหลายแห่งในพื้นที่ เช่น นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด นิคมอุตสาหกรรมมาบตา นิคมอุตสาหกรรมปลวกแดง และนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล ที่ทำอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการกลั่นน้ำมัน และการผลิตเม็ดพลาสติกเป็นหลัก จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจทำให้มีประชากรมาอาศัยเกิดเป็นชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรม โดยนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอลมีชุมชนล้อมรอบถึง 12 ชุมชน (โครงการวิจัยและพัฒนาฐานข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง, 2554) ส่งผลกระทบต่อความต้องการ

ในการใช้น้ำทั้งจากชุมชนและภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความขาดแคลนทรัพยากรน้ำ ดังนั้นน้ำใต้ดิน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำของคนในชุมชนและภาคอุตสาหกรรม จากการใช้แหล่งน้ำที่อยู่ในพื้นที่ภาคอุตสาหกรรม อาจทำให้แหล่งน้ำมีสิ่งปนเปื้อนทั้งที่มาจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรม กิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น กัมมันตรังสี ที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงทางด้านสุขภาพของประชากรในชุมชนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงแหล่งอุตสาหกรรม

เนื่องจากกัมมันตรังสีเหล่านี้สามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการที่มนุษย์รับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารรังสีอยู่ ดังนั้นประชากรที่อาศัยอยู่รอบๆ นิคมอุตสาหกรรมจึงมีความเสี่ยงที่จะได้รับสารรังสีทั้งที่มาจากธรรมชาติและทั้งที่มนุษย์สร้างขึ้นได้ ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำข้อมูลมาเป็นแนวทางในการจัดการและแก้ไขปัญหาทางด้านสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้

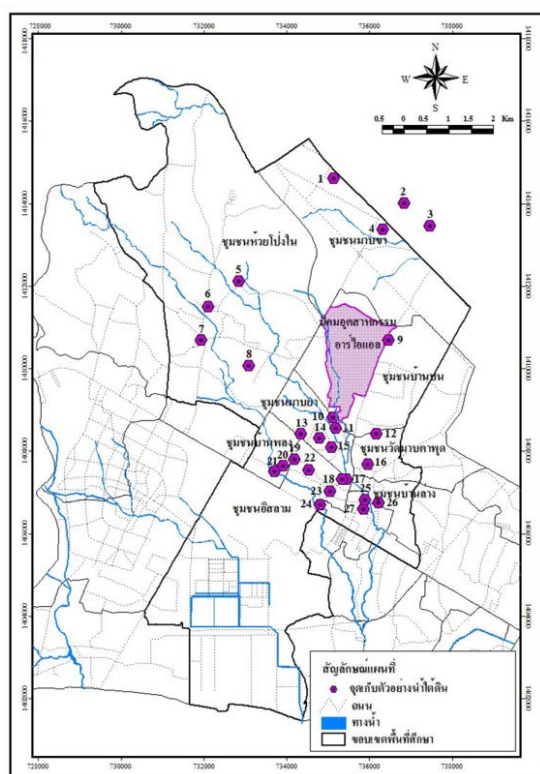
วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง และประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพของผู้ที่ได้รับสัมผัสน้ำใต้ดินโดยการบริโภค เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาจัดการ แก้ไขหรือลดความเสี่ยงทางด้านสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง
เก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน 27 จุดเก็บ บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง ซึ่งครอบคลุม 12 ชุมชน ได้แก่ ชุมชนมาบตา-สำนักอ้ายจอน (F01-F03) ชุมชนมาบตาใน (F04) ชุมชนห้วยโป่ง-สะพานน้ำท่วม (F05) ชุมชนห้วยโป่งใน 1

(F06-F07) ชุมชนห้วยโป่งใน 2 (F08) ชุมชนบ้านเนินพะยอม (F09) ชุมชนบ้านบน (F10-F12) ชุมชนมาบยา (F13-F15) ชุมชนมาบตาพุด (F16-F18) ชุมชนบ้านพลง (F19-F21) ชุมชนอิสลาม (F22-F24) และชุมชนบ้านล่าง (F25-F27) ดังภาพที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินจุดละ 2 ลิตร บรรจุในขวดโพลีเอทิลีน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยกรดไนตริกเข้มข้นให้มีค่าเท่ากับ 2 (US EPA, 2003) จากนั้นนำไปประเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้มีปริมาตรเหลือ 1 ลิตร นำไปบรรจุในภาชนะที่มีขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และชนิดของภาชนะเหมือนกับภาชนะที่บรรจุต้นกำเนิดรังสีอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบเชิงพลังงาน และประสิทธิภาพการวัด



ภาพที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง

2. การวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมาด้วยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี โดยใช้ coaxial High Pure Germanium (HPGe) detector ที่แบคกราวด์ต่ำ โดยมีที่กำบังรังสี (Shield) 2 ชั้น ชั้นนอกประกอบด้วยตะกั่ว (Pb shield) หนา 10 เซนติเมตร และชั้นในประกอบด้วยทองแดง (Cu Shield) หนา 0.1 เซนติเมตร หัววัดรังสีจะแสดงโฟโตพีค (photopeak) ที่ 2.0 keV ถึง 1332.5 keV และจะเชื่อมต่อเข้ากับ spectroscopy amplifier (Ortec) และ multi-channel analyser (MCA)

การเปรียบเทียบค่าพลังงานและประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ใช้ต้นกำเนิดรังสีอ้างอิงหลายนิวไคลด์ (No.SH-424; Am-241 60 keV, Cd-109 88 keV, Co-57 122 keV, Ce-139 166 keV, Sn-113 392 keV, Cs-137 662 keV, Y-88 898 keV, Co-60 1,173 keV, Co-60 1,333 keV และ Y-88 1,836 keV) ใช้เวลานับวัด 30000 วินาที และคำนวณกัมมันตภาพรังสี (Activity) ในหน่วยเบคเคอเรลต่อลิตร (Bq/L) จากสมการ (1) (กลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู, 2553)

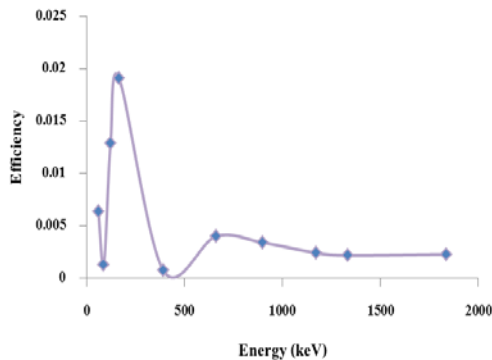
$$A = (N/t) / (\epsilon_{\gamma} \times a) / V \quad (1)$$

เมื่อ N คือ เวลารับวัดสุทธิ, ϵ_{γ} คือ ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีจากกราฟ (ภาพที่ 2), a คือค่าโอกาสการสลายตัวของรังสีแกมมาของพลังงานที่สนใจ, t คือ เวลารับวัด (วินาที) และ V คือ ปริมาตรตัวอย่าง (ลิตร)

3. การประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพจากการรับสัมผัสน้ำใต้ดิน คำนวณปริมาณการได้รับสัมผัสจากการบริโภค (Dose_{water ingestion}; D_{WI}) ในหน่วยเบคเคอเรลต่อลิตรต่อวัน (Bq/L-Day) ได้จากสมการ (2) (Hatfield Consultants, 2009)

$$\text{Dose}_{\text{water ingestion}} = \frac{C_w \times IR_w \times AF_{GIT} \times D_{\text{Day}} \times D_{\text{Weeks}}}{BW \times 365} \quad (2)$$

เมื่อ C_w คือ ความเข้มข้นที่ปนเปื้อนในน้ำ (Bq/L), IR_w คือ อัตราการบริโภคน้ำในแต่ละวัน (L/Day), AF_{GIT} คือ Absorption Factor for the gastrointestinal tract (1), D_{days} คือ จำนวนวันใน 1 สัปดาห์ ที่ได้รับสัมผัส (Days) D_{weeks} คือ จำนวนสัปดาห์ใน 1 ปี ที่ได้รับสัมผัส (Weeks) และ BW คือ น้ำหนักตัว (kg) โดยประเมินความเสี่ยงเป็น 5 ช่วงอายุ ดังนี้ 0-6 เดือน (8.2 kg) 7 เดือน-4 ปี (16.5 kg) 5-11 ปี (32.9 kg) 12-19 ปี (59.7 kg) และ 20 ปีขึ้นไป (70.7 kg) และมีอัตราการบริโภคน้ำในแต่ละวัน ดังนี้ 0.3, 0.6, 0.8, 1 และ 1.5 L/Day ตามลำดับ



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบค่าพลังงานและประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. นิวไคลด์กัมมันตรังสีนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบ คือ ทอเรียม-232 (Th-232) เรเดียม-226 (Ra-226) ยูเรเนียม-238 (U-238) และโพแทสเซียม-40 (K-40) ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ โดย Bahari et al. (2007) ได้กล่าวว่า K-40, Th-232, Ra-226 และ U-238 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถพบได้ในน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน และตะกอนดิน ที่มีความสำคัญต่อการนำมาประเมินความเสี่ยง โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบมากที่สุด คือ U-238 (เฉลี่ย 20.99838 ± 9.99923 Bq/L), K-40 (เฉลี่ย 6.85268 ± 1.01548 Bq/L), Th-232 (เฉลี่ย 2.67816 ± 0.71089 Bq/L) และ Ra-226 (เฉลี่ย 2.20829 ± 0.60879 Bq/L) ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

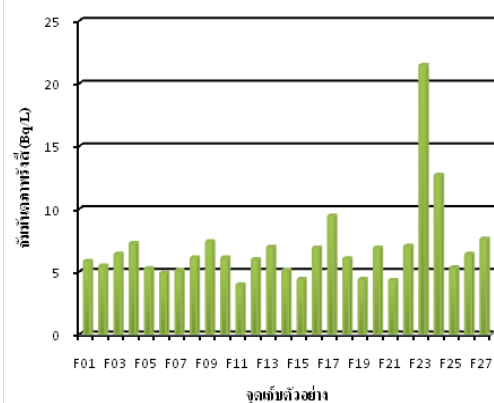
และพบ K-40 ในทุกจุดเก็บ เช่นเดียวกับพรพรรณ และคณะ (2554) ตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำผิวดิน บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง โดยพบ Ra-226 และ K-40 เนื่องจาก K-40 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เป็นหนึ่งองค์ประกอบหลักของเปลือกโลก และยังเป็นส่วนประกอบของดินที่เป็นสารอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพืชและมนุษย์อีกด้วย (Argonne National Laboratory Environmental Science Division, 2007) ปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ตรวจวัดเป็นปริมาณที่พบได้ในธรรมชาติหรือในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อการนำมาบริโภค

2. ผลการประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ จากการรับสัมผัสน้ำใต้ดินโดยการบริโภคแบ่งตามช่วงอายุพบว่าอายุ 0-6 เดือน มีอัตราการได้รับเฉลี่ย 0.1999 ± 0.036 Bq/L-Day อายุ 7 เดือน-4 ปี มีอัตราการได้รับเฉลี่ย 0.1986 ± 0.036 Bq/L-Day อายุ 5-11 ปี มีอัตรา

ตารางที่ 1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในน้ำใต้ดินทั้งหมด

27 จุดเก็บบริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง

	Activity (Bq/L)			
	Th-232	Ra-226	K-40	U-238
minimum	0.7709 ± 0.1116	0.70573 ± 0.16937	4.29942 ± 0.85988	20.99838 ± 9.99923
	12.2625 ± 4.0875	6.41523 ± 1.59055	21.43379 ± 3.01661	
maximum	1.2475 ± 0.2975	0.97050 ± 0.21393	6.09085 ± 0.85988	
	2.6782 ± 0.7109	2.20829 ± 0.60879	6.85268 ± 1.01548	
mean				



ภาพที่ 3 กัมมันตภาพรังสีของ K-40 ในน้ำใต้ดิน

การได้รับเฉลี่ย 0.1550 ± 0.028 Bq/L-Day อายุ 12-19 ปี มีอัตราการรับเฉลี่ย 0.0917 ± 0.001 Bq/L-Day และที่อายุ 20 ปีขึ้นไป มีอัตราการได้รับเฉลี่ย 0.1848 ± 0.021 Bq/L-Day (ตารางที่ 2) จะเห็นว่าในช่วงอายุน้อยจะมีปริมาณที่ได้รับสัมผัสนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูงกว่าช่วงอายุมาก แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสุขภาพของผู้รับสัมผัส ระยะเวลาการรับสัมผัส และปริมาณที่ได้รับสัมผัส (Muhammad, 2010) ซึ่งความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณที่ได้รับสัมผัส

ตารางที่ 2 การประมาณความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำใต้ดิน บริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง

Radio-nuclides	Activity (Bq/L)	Dose _{Water Ingestion} (Bq/L-Day)				
		0-6 mo.	7 mo. -4 y	5-11 y	12-19 y	≥ 20 y
Th-232	2.6782 ± 0.7109	0.098 ± 0.03	0.097 ± 0.03	0.065 ± 0.02	0.045 ± 0.01	0.057 ± 0.02
	2.2083 ± 0.6088	0.081 ± 0.02	0.080 ± 0.02	0.053 ± 0.01	0.037 ± 0.01	0.047 ± 0.01
Ra-226	6.8527 ± 1.0155	0.250 ± 0.04	0.249 ± 0.04	0.166 ± 0.02	0.114 ± 0.02	0.145 ± 0.02
	20.9984 ± 9.9992	0.766 ± 0.36	0.761 ± 0.36	0.509 ± 0.24	0.351 ± 0.18	0.444 ± 0.21
K-40						
U-238						

สรุปผลการวิจัย

จากการวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำใต้ดินบริเวณชุมชนรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล จังหวัดระยอง พบนิวไคลด์กัมมันตรังสีดังนี้ K-40, Th-232, Ra-226 และ U-238 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมทั่วไป สามารถพบได้ในดิน ในหิน และพบว่ามีกัมมันตภาพรังสีต่ำ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติไม่เป็นอันตรายต่อการนำมาบริโภคของประชาชน การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพนั้นพบว่าหากช่วงอายุน้อย เป็นช่วงอายุที่มีความเสี่ยงทางด้านสุขภาพมากที่สุด แต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการสัมผัส สุขภาพของผู้รับสัมผัส และปริมาณที่ได้รับสัมผัส โดยประมาณความเสี่ยงที่เกิดขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่พบ หากพบในปริมาณมากก็จะมีความเสี่ยงทางด้านสุขภาพมากขึ้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

การประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพนั้นควรจะมีการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับตรวจติดตามและเฝ้าระวังการเกิดความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ และจัดทำแผนที่บอกตำแหน่งที่ควรมีการเฝ้าระวัง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่สนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือสำหรับการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู. 2553. คู่มือการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีเกมมาในน้ำผิวดิน. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

โครงการวิจัยและพัฒนาฐานข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม
บริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอแอล
จังหวัดระยอง. 2554. จุกเก็บตัวอย่างน้ำบ่อ
ดิน

พรพรรณ ถีรวงศ์, ภัทรนันท์ เรืองรัมย์ และอชิรญา
วาปีโก. 2554. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบ่อ
ดินและน้ำผิวดิน เบริโอโนไวท์, เบริโอแอล
คิตตี้บริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมอาร์ไอ
แอล จังหวัดระยอง. ปัญหาพิเศษปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาสังแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา.

สมพร จอคำและอริรัตน์ คอนดวงแก้ว. 2551. รังสี
จากธรรมชาติ. ค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2555,
จาก [http://www.nst.or.th/article /
notes01/article004.htm](http://www.nst.or.th/article/notes01/article004.htm).

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี. 2545. การป้องกันอันตราย
จาก รังสีระดับ 1.กรุงเทพฯ.

Al-Hamarneh, IF. andAwadallah, MI.. 2009. Soil
radioactivity levels and radiation hazard
assessment in the highlands of northern
Jordan. Radiation Measurements. 44:
102-110.

Argonne National Laboratory Environmental Science
Division. 2007. Radiological and Chemical
Fact Sheets to Support Health Risk Analyses
for Contaminated Areas. Retrieved July 18,
2012, from [http://www.ead.anl.gov/pub/
doc/ANL_ContaminantFactSheets_All_07041
8.pdf](http://www.ead.anl.gov/pub/doc/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf).

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

Hatfield Consultants.2009. Regional Capacity
Building Program for Health Risk
Management of Persistent Organic
Pollutants (POPs) in South East
Asia.Persistent Organic Pollutants Stoolkit.
Retrieved August 3, 2012, from
<http://www.popstoolkit.com/>

Muhammad, S., .Shah,MT. and Khan,S. 2010.
Arsenic health risk assessment in drinking
water and source apportionment using
multivariate statistical techniques in
Kohistan region, northern Pakistan. Food
and Chemical Toxicology 48: 2855-2864.

ตารางที่ผนวก 1 กัมมันตภาพรังสีและอัตราการได้รับกัมมันตรังสีในแต่ละช่วงอายุ

ตัวอย่าง	Radionuclides	Activity (Bq/L)	Dose _{Water Ingestion}					
			(Bq/L-Day)					
			0-6 mo.	7 mo.-4 y	5-11 y	12-19 y	≥ 20 y	
ชุมชนมาบข่า- สำนักอัยยงอน	F01	Th-232	0.77088±0.11157	0.0281±0.004	0.0280±0.004	0.0187±0.003	0.0129±0.002	0.0163±0.002
		Ra-226	0.70573±0.16937	0.0257±0.006	0.0256±0.006	0.0171±0.004	0.0118±0.003	0.0149±0.004
		K-40	5.80422±0.85988	0.2118±0.031	0.2105±0.031	0.1407±0.021	0.0970±0.014	0.1228±0.018
	F02	K-40	5.44593±0.78823	0.1987±0.029	0.1975±0.029	0.1321±0.019	0.0910±0.013	0.1152±0.017
	F03	K-40	6.37747±0.78823	0.2327±0.029	0.2313±0.029	0.1547±0.019	0.1065±0.013	0.1349±0.017
ชุมชนมาบข่าใน	F04	Ra-226	4.87769±1.21942	0.1780±0.044	0.1769±0.044	0.1183±0.003	0.0815±0.000	0.1032±0.026
		K-40	7.23736±0.71657	0.2641±0.026	0.2625±0.026	0.1755±0.017	0.1209±0.000	0.1531±0.015
ชุมชนห้วยโป่ง- สะพานน้ำท่วม	F05	K-40	5.23096±0.85988	0.1909±0.031	0.1897±0.031	0.1268±0.021	0.0874±0.000	0.1107±0.018
ชุมชนห้วยโป่งใน 1	F06	Th-232	0.79111±0.16384	0.0289±0.006	0.0287±0.006	0.0192±0.004	0.0132±0.000	0.0167±0.003
		K-40	4.87268±0.78823	0.1778±0.029	0.1767±0.029	0.1182±0.019	0.0814±0.000	0.1031±0.017
	F07	Th-232	1.23964±0.36457	0.0452±0.013	0.0450±0.013	0.0301±0.009	0.0207±0.000	0.0262±0.008
		K-40	5.08765±0.93154	0.1856±0.034	0.1845±0.034	0.1234±0.023	0.0850±0.000	0.1076±0.020
ชุมชนห้วยโป่งใน 2	F08	K-40	6.09085±0.71657	0.2222±0.026	0.2209±0.026	0.1477±0.017	0.1017±0.000	0.1289±0.015
ชุมชนบ้านเนิน พะยอม	F09	K-40	7.38067±0.71657	0.2693±0.026	0.2677±0.026	0.1790±.017	0.1233±0.000	0.1562±0.015
ชุมชนบ้านบน	F10	K-40	6.09085±0.93154	0.2222±0.034	0.2209±0.034	0.1477±0.023	0.1017±0.000	0.1289±0.002
	F11	Th-232	1.06251±0.22091	0.0388±0.008	0.0385±0.008	0.0258±0.005	0.0177±0.000	0.0225±0.005
		K-40	3.94114±0.78823	0.1438±0.029	0.1429±0.029	0.0956±0.019	0.0658±0.000	0.0834±0.017
	F12	K-40	5.94753±0.71657	0.2170±0.026	0.2157±0.026	0.1442±0.017	0.0994±0.000	0.1258±0.015
ชุมชนมาบตา	F13	Ra-226	0.9705±0.29537	0.0354±0.011	0.0352±0.011	0.0235±0.007	0.0162±0.000	0.0205±0.006
		K-40	6.95073±0.85988	0.2536±0.031	0.2521±0.031	0.1686±0.021	0.1161±0.000	0.1471±0.018
	F14	Ra-226	0.78766±0.16409	0.0287±0.006	0.0286±0.006	0.0191±0.004	0.0132±0.000	0.0167±0.003
		U-238	20.99838±9.99923	0.7661±0.365	0.7615±0.363	0.5092±0.242	0.3508±0.002	0.4443±0.221
		K-40	5.08765±0.78823	0.1856±0.029	0.1845±0.029	0.1234±0.019	0.0850±0.000	0.1076±0.017
	F15	Th-232	12.26247±4.08749	0.4474±0.149	0.4447±0.148	0.2974±0.099	0.2048±0.001	0.2595±0.086
		K-40	4.37108±1.0032	0.1595±0.037	0.1585±0.036	0.1060±0.024	0.0730±0.000	0.0925±0.021
ชุมชนมาบตาพุด	F16	Ra-226	6.41523±1.59055	0.2341±0.058	0.2326±0.058	0.1556±0.039	0.1072±0.000	0.1357±0.034
		K-40	6.87907±0.85988	0.2510±0.031	0.2495±0.031	0.1668±0.021	0.1149±0.000	0.1455±0.018
	F17	Ra-226	0.97664±0.21393	0.0356±0.008	0.0354±0.008	0.0237±0.005	0.0163±0.000	0.0207±0.005
		K-40	9.41917±2.22635	0.3437±0.081	0.3416±0.081	0.2284±0.054	0.1573±0.000	0.1993±0.047
	F18	K-40	6.01919±0.78823	0.2196±0.029	0.2183±0.029	0.1460±0.019	0.1005±0.000	0.1274±0.017

ตารางที่ผนวก 1 กัมมันตภาพรังสีและอัตราการได้รับกัมมันตรังสีในแต่ละช่วงอายุ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Radionuclides		Activity (Bq/L)	Dose _{Water Ingestion}				
				(Bq/L-Day)				
				0-6 mo.	7 mo.-4 y	5-11 y	12-19 y	≥ 20 y
ชุมชนบ้านพลอง	F19	Th-232	1.25533±0.17213	0.0458±0.006	0.0455±0.006	0.0304±0.004	0.0210±0.000	0.0266±0.004
		K-40	4.37108±0.78823	0.1595±0.029	0.1585±0.029	0.1060±0.019	0.0730±0.000	0.0925±0.017
	F20	Th-232	0.79100±0.11742	0.0289±0.004	0.0287±0.004	0.0192±0.003	0.0132±0.000	0.0167±0.002
		K-40	6.87907±0.93154	0.2510±0.034	0.2495±0.034	0.1668±0.023	0.1149±0.000	0.1455±0.020
	F21	Th-232	1.43754±0.35144	0.0524±0.013	0.0521±0.013	0.0349±0.009	0.0240±0.000	0.0304±0.007
		Ra-226	0.72455±0.14115	0.0264±0.005	0.0263±0.005	0.0176±0.003	0.0121±0.000	0.0153±0.003
K-40		4.29942±0.85988	0.1569±0.031	0.1559±0.031	0.1043±0.021	0.0718±0.000	0.0910±0.018	
ชุมชนอิสลาม	F22	Th-232	0.77103±0.17047	0.0281±0.006	0.0280±0.006	0.0187±0.004	0.0129±0.000	0.0163±0.004
		K-40	7.02239±0.85988	0.2562±0.031	0.2547±0.031	0.1703±0.021	0.1173±0.000	0.1486±0.018
	F23	Th-232	5.82404±1.65159	0.2125±0.060	0.2112±0.060	0.1412±0.040	0.0973±0.000	0.1232±0.035
		K-40	21.43379±3.01661	0.7820±0.011	0.7773±0.109	0.5198±0.073	0.3580±0.001	0.4535±0.064
	F24	Th-232	6.02152±0.72674	0.2197±0.027	0.2184±0.026	0.1460±0.018	0.1006±0.000	0.1274±0.015
		K-40	12.67307±2.39761	0.4624±0.087	0.4596±0.087	0.3073±0.058	0.2117±0.000	0.2681±0.051
ชุมชนบ้านลำง	F25	K-40	5.30262±0.85988	0.1935±0.031	0.1923±0.031	0.1286±0.021	0.0886±0.000	0.1122±0.018
	F26	Th-232	1.17024±0.85988	0.0427±0.031	0.0424±0.031	0.0284±0.021	0.0195±0.000	0.0248±0.018
		K-40	6.37747±0.78823	0.2327±0.029	0.2313±0.029	0.1547±0.019	0.1065±0.000	0.1349±0.017
	F27	Th-232	1.41879±0.24356	0.0518±0.009	0.0515±0.009	0.0344±0.060	0.0237±0.000	0.0300±0.005
		K-40	7.59564±0.78823	0.2771±0.029	0.2754±0.029	0.1842±0.019	0.1269±0.000	0.1607±0.017