

การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากเรดอนในแหล่งน้ำอุปโภคบริโภค  
ในพื้นที่เหมืองแร่ฟรุพีและเขานิพนธ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ภาคใต้ของประเทศไทย  
Annual Effective Doses Due to Radon in Consumer Water Supplies in the Phuphi and  
Khao Niphan Mining Areas, Surat Thani Province, Southern Thailand

ภัทรสุดา รอดประไพ<sup>1</sup> ศุทธิณี เอียดสิทธิ์รักษ์<sup>1</sup> ศุภสุดา แยมแสง<sup>1</sup> ปาริชาติ ศรีนิล<sup>1</sup> นภัสวรรณ เมืองจันทร์<sup>1</sup> อภิสรา ศรีขวัญแก้ว<sup>1</sup>  
สุมิตร จิระนิมิตสกุล<sup>1</sup> กชกร เพ็งศรี<sup>2</sup> และกนกกานต์ ฐิติภรณ์พันธ์<sup>2\*</sup>

Phattharasuda Rodprapai<sup>1</sup>, Sutthini Aiedsittirak<sup>1</sup>, Supasuta Yamsang<sup>1</sup>, Parichat Srinin<sup>1</sup>, Napatsawan Muengjan<sup>1</sup>,  
Apisara Sikhwankaeo<sup>1</sup>, Sumit Jirungnimitsakul<sup>1</sup>, Kotchakorn Pengsri<sup>2</sup> and Kanokkan Titipornpun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

<sup>1</sup>Faculty of Education, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani

<sup>2</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

<sup>2</sup>Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani

\*Corresponding author e-mail: kanokkan.tit@sru.ac.th

(Received: March 3, 2024, Revised: May 5, 2024, Accepted: August 6, 2024)

#### บทคัดย่อ

ในพื้นที่อำเภอบ้านนาสารและอำเภอยะรัง จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีการทำเหมืองแร่ฟรุพีและแอนไฮโดรต์ อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ซึ่งยังมีความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินค่อนข้างสูง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำ ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ และประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากเรดอนโดยการกินและการหายใจ ในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่ฟรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเขานิพนธ์ อำเภอยะรัง จังหวัดสุราษฎร์ธานี ตัวอย่างน้ำทั้งหมดจำนวน 30 ตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากน้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมือง ผลการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และปริมาณรังสีกัมมันต์ อยู่ที่ระดับ  $30.2 \pm 0.9$  °C,  $6.21 \pm 0.93$ ,  $0.06 \pm 0.07$  S/m,  $0.31 \pm 0.37$  g/L,  $0.31 \pm 0.37$  ppt,  $7.60 \pm 0.12$  mg/L และ  $1.2 \pm 0.3$  mSv/y ตามลำดับ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำมีค่าอยู่ในช่วง  $5.54 \pm 1.02$  Bq/L ถึง  $53.79 \pm 3.62$  Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ยรวม  $27.74 \pm 14.51$  Bq/L ซึ่งสูงเกินค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนเรดอนในน้ำดื่ม ( $11.1$  Bq/L) กำหนดโดย U.S. EPA เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนระหว่างพื้นที่เหมืองแร่ฟรุพี ( $31.69 \pm 15.82$  Bq/L) และเขานิพนธ์ ( $23.79 \pm 12.33$  Bq/L) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาล ( $45.90 \pm 6.35$  Bq/L) มีค่าสูงกว่าน้ำคลอง ( $33.34 \pm 12.09$  Bq/L) น้ำประปา ( $26.36 \pm 5.28$  Bq/L) และน้ำบ่อเหมือง ( $6.64 \pm 0.70$  Bq/L) ตามลำดับ เมื่อประเมินปริมาณรังสียังผลต่อปีที่ได้รับจากการกินและการหายใจโดยรวมพบว่า มีค่าเฉลี่ย  $75.73 \pm 39.60$   $\mu$ Sv/y ซึ่งต่ำกว่าระดับอ้างอิง ( $100$   $\mu$ Sv/y) ซึ่งแนะนำโดย WHO อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกินและการหายใจโดยรวมในน้ำบาดาล ( $125.31 \pm 17.33$   $\mu$ Sv/y) สูงกว่าระดับอ้างอิง ทั้งนี้แม้ว่าแหล่งน้ำอื่น ๆ มีค่าต่ำกว่าระดับอ้างอิง อย่างไรก็ตาม เพื่อความปลอดภัยไม่ควรดื่มน้ำจากแหล่งน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยตรงโดยปราศจากการบำบัดที่ได้มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม

**คำสำคัญ:** เรดอนในน้ำ ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี แหล่งเหมืองแร่

#### ABSTRACT

In Ban Na San District and Wiang Sa District of Surat Thani Province, gypsum and anhydrite are mined. This area also has a relatively high surface concentration of uranium, directly impacting radon gas levels in the environment, particularly in water sources for consumption, potentially causing health risks. Therefore, this research aims to study the physical characteristics of water, measure the concentration of radon gas in water, and evaluate the annual effective doses from radon due to ingestion and inhalation from water sources used for consumption around the Phuphi mining area in Ban Na San District and Khao Niphan in Wiang Sa District, Surat Thani Province. A total of 30 water samples were obtained from tap water, groundwater, canal water, and mine well water. The research results found that the average temperature, pH, electrical conductivity, dissolved solids, salinity, dissolved oxygen, and background radiation doses were at levels of  $30.2 \pm 0.9$  °C,  $6.21 \pm 0.93$ ,  $0.06 \pm 0.07$  S/m,  $0.31 \pm 0.37$  g/L,  $0.31 \pm 0.37$  ppt,  $7.60 \pm 0.12$  mg/L, and  $1.2 \pm 0.3$  mSv/y, respectively. The concentration of radon gas in water ranged from  $5.54 \pm 1.02$  Bq/L to  $53.79 \pm 3.62$  Bq/L, with an overall mean value of  $27.74 \pm 14.51$  Bq/L, exceeding the U.S. EPA standard limit for radon contamination in drinking water (11.1 Bq/L). When comparing the average radon gas concentration, the Phuphi mining area had  $31.69 \pm 15.82$  Bq/L, while Khao Niphan had  $23.79 \pm 12.33$  Bq/L. It was found that there was no statistically significant difference at the 0.05 level. Additionally, the mean radon gas concentration in groundwater ( $45.90 \pm 6.35$  Bq/L) was higher than in canal water ( $33.34 \pm 12.09$  Bq/L), tap water ( $26.36 \pm 5.28$  Bq/L), and mine well water ( $6.64 \pm 0.70$  Bq/L), respectively. The evaluation of the total annual radiation dose from ingestion and inhalation showed an average of  $75.73 \pm 39.60$   $\mu$ Sv/y, which is lower than the WHO recommended reference level of 100  $\mu$ Sv/y. However, the average annual exposure to radiation from ingestion and inhalation of groundwater ( $125.31 \pm 17.33$   $\mu$ Sv/y) was found to be higher than the reference level. Despite other water sources having values below the reference level, it is recommended not to drink water directly from these sources in the study area without standard treatment for drinking water.

**Keywords:** radon in water, annual effective dose, mining area

#### บทนำ

เรดอน (Rn-222) เป็นกัมมันตรังสีที่มีสถานะเป็นแก๊สเฉื่อย ไม่มีสี กลิ่น และรส มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน จัดอยู่ในอนุกรมยูเรเนียมที่พบได้ทั่วไปในดิน หิน พีช ทหยา น้ำ และฟุ้งกระจายสู่อากาศ [1, 2] และเข้าไปสะสมภายในอาคาร เช่น บ้านเรือน สำนักงาน และโรงเรียน ส่วนใหญ่คนมักจะได้รับแก๊สเรดอนในบ้านเรือนมากที่สุด เนื่องจากคนส่วนใหญ่ใช้เวลาอยู่ในบ้านเรือนนานที่สุด นอกจากนี้ เรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในครัวเรือนถือว่าเป็นอีกหนึ่งความเสี่ยงที่คนเราสามารถได้รับแก๊สเรดอนจากการหายใจเอาอากาศเข้าไปและจากการกินน้ำที่ปนเปื้อนแก๊สเรดอน มีผลการวิจัยพบว่า ความเสี่ยงจากการเป็นโรคมะเร็งปอดจากการหายใจเอาแก๊สเรดอนที่ปนเปื้อนในอากาศมีโอกาสสูงกว่าการเป็นโรคมะเร็งกระเพาะอาหารจากการกินน้ำที่ปนเปื้อนแก๊สเรดอน ทั้งนี้ ความเสี่ยงส่วนใหญ่ที่เกิดจากเรดอนในน้ำมาจากการฟุ้งกระจายของแก๊สเรดอนสู่อากาศระหว่างการใช้น้ำ เช่น การอาบน้ำ และใช้ชักล้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในครัวเรือน เรดอนในน้ำใต้ดิน เช่น บ่อน้ำส่วนตัวหรือระบบน้ำประปาสาธารณะที่ใช้น้ำใต้ดิน พบว่า มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนแก๊สเรดอนมากกว่าเรดอนในน้ำผิวดิน [2] องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency; U.S. EPA) ได้กำหนดระดับสูงสุดของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (Maximum Contaminant Level; MCL) ไว้ที่ระดับ 11.1 Bq/L และระดับสูงสุดของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (Alternative Maximum Contaminant Level; AMCL) ไว้ที่ระดับ 148 Bq/L [3] นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้กำหนดระดับ

อ้างอิงสำหรับน้ำดื่มไว้ที่ 100 Bq/L [4] และเกณฑ์การได้รับปริมาณรังสีรายบุคคล (Individual Dose Criterion; IDC) เนื่องจากน้ำดื่มอยู่ที่ระดับ 100  $\mu\text{Sv/y}$  (0.1 mSv/y) [5] ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม

นอกจากนี้ มีการประมาณค่าเฉลี่ยทั่วโลกของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากแหล่งธรรมชาติอยู่ที่ระดับ 2.4 mSv/y [6] และพบว่า อยู่ในช่วง 1–13 mSv/y [7, 8] ปริมาณรังสียังผลต่อปีที่เกิดจากการสัมผัสกับเรดอนโดยการหายใจ มีค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่ระดับ 1.26 mSv/y อยู่ในช่วง 0.2–10 mSv/y ส่วนปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกินอาหารและน้ำ มีค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่ระดับ 0.29 mSv/y อยู่ในช่วง 0.2–1 mSv/y [7, 8] นักวิจัยจากหลายประเทศได้ตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำและประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เนื่องจากเรดอนที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค โดยมีหลายพื้นที่พบว่า มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสูงกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยมีการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนในน้ำบ่อ ในพื้นที่อำเภอหนองน้ำหอม จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มียูเรเนียมที่ผิวดินสูง พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนอยู่ในช่วง 0.05–483.04 Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 32.0 $\pm$ 9.2 Bq/L [9] ในประเทศไนจีเรีย ได้ประเมินปริมาณรังสียังผล เนื่องจากเรดอนในน้ำดื่มในหลายพื้นที่ เช่น ในพื้นที่บริเวณเมืองแร่ทองคำ และบิสมัท เมือง Edu รัฐ Kwara พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำผิวดิน และน้ำบาดาล มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19.14 $\pm$ 3.98 Bq/L และ 24.16 $\pm$ 4.21 Bq/L ตามลำดับ [10] ในบริเวณเมืองแร่ตึกบูทที่ทิ้งร้าง เมือง Oyun รัฐ Kwara พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำผิวดินอยู่ที่ระดับ 35.87 $\pm$ 8.23 Bq/L [11] นอกจากนี้พบว่า ในเมืองแร่ทองและตะกั่ว ในเมือง Moro รัฐ Kwara มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ย 15.97 $\pm$ 4.21 Bq/L และ 17.98 $\pm$ 0.87 Bq/L ตามลำดับ [12] และในพื้นที่บริเวณเมืองแร่ถ่านหิน เมือง Maiganga ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไนจีเรีย พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาล อยู่ที่ระดับ 135.23 Bq/L [13] ซึ่งสูงกว่าระดับมาตรฐานอ้างอิงสำหรับน้ำดื่ม (100 Bq/L) ที่แนะนำโดย WHO [4] ในประเทศโรมาเนีย พื้นที่เมือง Baita Stei เขต Bihor พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบ่อ และน้ำประปา มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 35.5 $\pm$ 22.5 Bq/L และ 6.9 $\pm$ 3.5 Bq/L ตามลำดับ [14] ในเมือง Kowary ทางตอนใต้ของประเทศโปแลนด์ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลบริเวณเมืองแร่ยูเรเนียมมีค่าสูงสุดถึงระดับ 3,043 Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ย 437.7 Bq/L [15] นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ศึกษาความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบริเวณแหล่งเหมืองแร่ เพื่อหาแนวทางป้องกันและเฝ้าระวังอันตรายจากการได้รับแก๊สเรดอน ในพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานีนั้น มีการประกอบกิจการเหมืองแร่หลายอำเภอด้วยกัน ได้แก่ อำเภอบ้านนาสาร อำเภอเวียงสระ อำเภอดอนสัก อำเภอกาญจนดิษฐ์ อำเภอพุนพิน อำเภอพระแสง และอำเภอคีรีรัฐนิคม โดยงานวิจัยนี้สนใจพื้นที่เหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่เขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งมีการประกอบกิจการเหมืองแร่ยิปซัม (gypsum) และแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น การทำปูนปลาสเตอร์ ซอล์ก แผ่นยิปซัมบอร์ด ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ ดินสอสี ยาง แป้งนวล สิ่งทอจำพวกฝ้าย หรือผ้าสำเร็จรูป ส่วนแร่แอนไฮไดรต์นั้น ใช้เป็นวัสดุทดแทนยิปซัมในอุตสาหกรรมซีเมนต์ [16] และเป็นที่ทราบกันดีว่า ยิปซัมเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมหลักที่เกี่ยวข้องกับการใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง คือ การปล่อยเรดอน [17] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาข้อมูลดิจิทัลของความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดิน (ภาพที่ 1) แสดงให้เห็นว่าในพื้นที่เขตอำเภอบ้านนาสาร มีค่าสูงกว่า 3 ppm eU ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงโดยตรงต่อระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอน [18] นอกจากนี้ ปริมาณยูเรเนียมที่ผิวดินสูง ย่อมมีความเสี่ยงต่อการสะสมของแก๊สเรดอนในดิน หิน และแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่วนในพื้นที่อำเภอเวียงสระ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินไม่เกิน 3 ppm eU แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ไม่ว่าจะเป็นกิจกรรมการระเบิดเหมือง หรือกระบวนการผลิตแร่ ย่อมมีโอกาสที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับเหมืองแร่ หากบ้านเรือนตั้งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบแหล่งเหมืองแร่ อาจมีความเสี่ยงต่อการฟุ้งกระจายของแก๊สเรดอนสู่อากาศในบ้านเรือนและอาจปนเปื้อนในน้ำที่ใช้สำหรับอุปโภคบริโภคได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำ ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำ และประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี สำหรับการกินและการหายใจจากแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่บริเวณเมืองแร่พุทไฟ อำเภอบ้านนาสาร และเมืองแร่เขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้ สามารถนำไปพัฒนาเป็นฐานข้อมูลสารสนเทศเพื่อให้ประชาชนได้เข้าถึงความรู้ได้โดยง่าย และเป็นประโยชน์แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมตลอดจนหน่วยงานด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์ และสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำ การจัดการความเสี่ยงด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม และเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

### วัตถุประสงค์

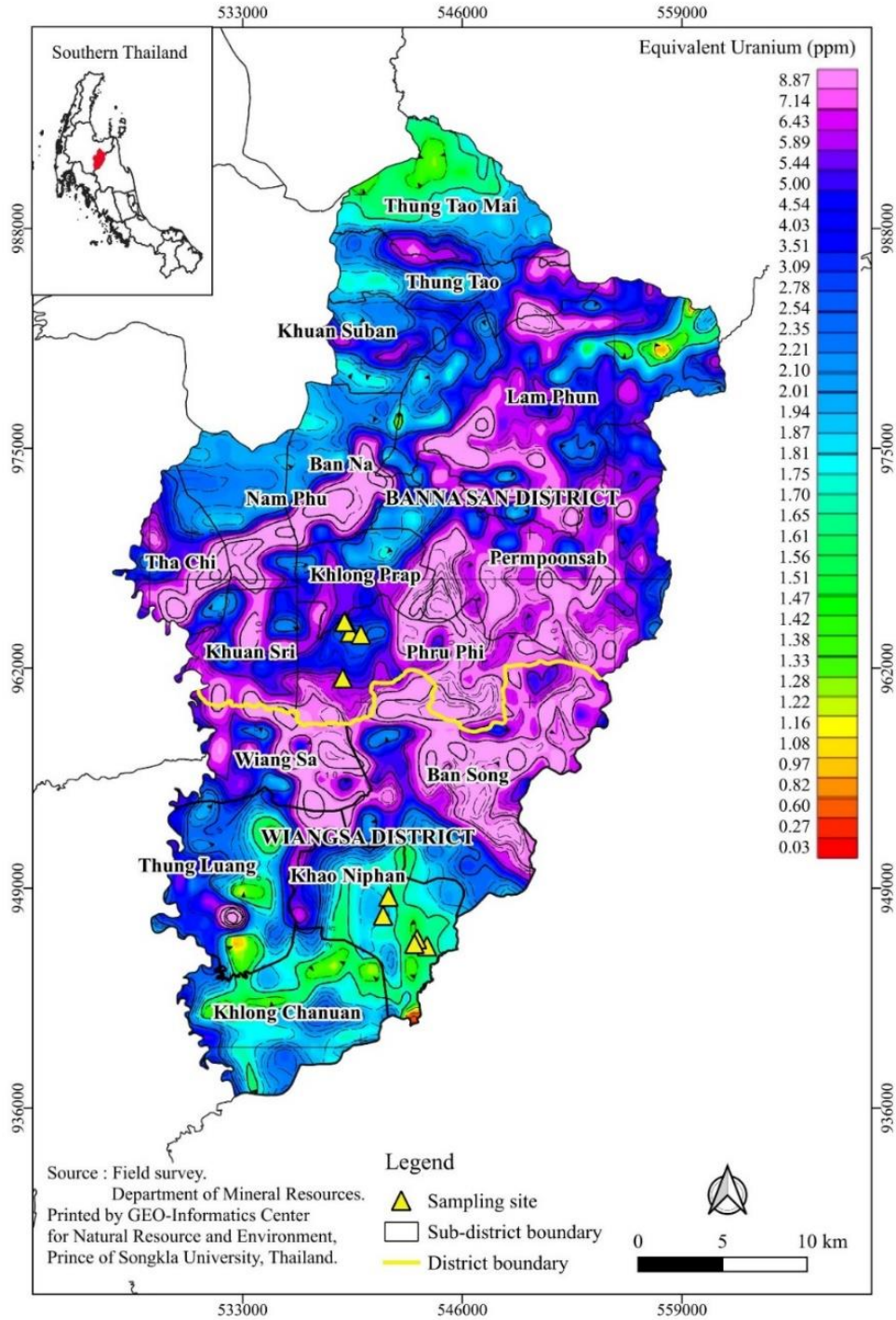
1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ในพื้นที่บริเวณเมืองแร่พุทไฟ ตำบลพุทไฟ อำเภอบ้านนาสาร และเมืองแร่เขานิพันธ์ ตำบลเขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี
2. ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา
3. ประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากเรดอนโดยการกินและการหายใจจากแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา

### การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่เมืองแร่พุทไฟ ตั้งอยู่ที่หมู่ 4 ตำบลพุทไฟ อำเภอบ้านนาสาร และเมืองแร่เขานิพันธ์ ตั้งอยู่ที่หมู่ 6 ตำบลเขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ในการเก็บตัวอย่าง มีจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคจากพื้นที่บริเวณเมืองแร่และบริเวณโดยรอบเมืองแร่ โดยเก็บตัวอย่างน้ำพื้นที่ละ 5 จุด รวมทั้งหมด 10 จุด โดยเก็บตัวอย่างจุดละ 3 ตัวอย่าง มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 30 ตัวอย่าง โดยเลือกศึกษาจากแหล่งน้ำทั้งหมดที่ใช้สำหรับอุปโภคบริโภคของประชาชนในพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำ 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา (12 ตัวอย่าง) น้ำบาดาล (6 ตัวอย่าง) น้ำคลอง (6 ตัวอย่าง) และน้ำบ่อเหมือง (6 ตัวอย่าง) โดยน้ำแต่ละประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกัน น้ำประปาจากบริเวณเมืองแร่พุทไฟ เป็นน้ำประปาหมู่บ้านแบบบาดาล ส่วนน้ำประปาจากบริเวณเมืองแร่เขานิพันธ์ เป็นน้ำประปาหมู่บ้านแบบผิวดิน ซึ่งประชาชนส่วนใหญ่ในพื้นที่ศึกษาใช้น้ำประปาสำหรับอุปโภคบริโภค ส่วนน้ำบาดาลทั้งสองพื้นที่ เป็นน้ำบาดาลที่ชาวบ้านขุดเจาะบ่อบาดาลไว้ใช้เองในครัวเรือน ซึ่งมีไม่มากนัก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะบ่อบาดาลค่อนข้างสูง ในขณะที่แหล่งน้ำคลองจากทั้งสองพื้นที่ เป็นคลองธรรมชาติที่ไหลผ่านชุมชน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการเกษตร ส่วนน้ำบ่อเหมืองเป็นน้ำที่กักเก็บไว้ เพื่อใช้ในกิจกรรมการระเบิดเหมืองเท่านั้น ไม่ได้ปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้แหล่งน้ำที่ประชาชนในพื้นที่นำมาใช้สำหรับอุปโภคบริโภคในครัวเรือนมากที่สุด คือ น้ำประปาหมู่บ้าน พื้นที่เก็บตัวอย่างแต่ละจุดนั้นได้บันทึกพิกัดภูมิศาสตร์ (geographic coordinate system) โดยใช้แอปพลิเคชัน Google Maps จากนั้น นำข้อมูลมาเขียนแผนที่โดยศูนย์วิจัยสารสนเทศภูมิศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง (แสดงด้วยสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม) กับความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินในหน่วย 1 ต่อ 1,000,000 ส่วน (parts per million; ppm) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลดิจิทัลของค่ากัมมันตภาพของธาตุยูเรเนียมจากกรมทรัพยากรธรณี

การเก็บตัวอย่างน้ำ ได้สุ่มตัวอย่าง โดยใช้ขวดแก้วสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำที่มีขนาด 250 ml ทั้งนี้ ในการเก็บน้ำจากบ่อเหมืองและน้ำคลอง ได้เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำ ส่วนน้ำประปาและน้ำบาดาลนั้นต้องเปิดน้ำทิ้งก่อนประมาณ 3-5 นาที เพื่อให้กำจัดน้ำที่ค้างในท่อและสายยาง เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศภายในขวด แล้วปิดฝาให้แน่นสนิทและใช้พาราฟิล์มปิดผนึกครอบฝาขวดให้แน่นอีกครั้ง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าและออกจากขวด ในขณะที่เก็บตัวอย่าง

ได้ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำด้วยเทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณรังสีกัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีกัมมันตภาพรังสี Survey Meter ยี่ห้อ Ranger รุ่น CE0197 นอกจากนี้ ค่า pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม และปริมาณ



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงระดับความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินและจุดเก็บตัวอย่าง (สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม) ในพื้นที่ศึกษา บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่พานิพนธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ได้ดำเนินการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องวัดคุณภาพน้ำ HACH รุ่น HQ40d ทั้งนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดปริมาณเหล่านี้ หลังจากตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำเสร็จสิ้นแล้ว

การตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำได้ใช้เครื่องวัด RAD 7 ซึ่งสามารถตรวจวัดและแยกแยะระดับพลังงานของอนุภาคแอลฟาได้ดี โดยมีหัววัดรังสีแอลฟาชนิดสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า -2 ถึง 2.5 kV อยู่ที่ผิวหน้าของหัววัดรังสีเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำไอออนบวก ทั้งนี้ เนื่องจากรังสีแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม-238 ในอากาศได้ง่าย การวัดพลังงานรังสีแอลฟาได้ถูกต้องนั้น ธาตุกัมมันตรังสีต้องอยู่ใกล้ผิวหน้าของหัววัดรังสี ในกรณีห้องวัดอากาศแบบไหลผ่าน ดังนั้น เครื่องวัด RAD7 จึงออกแบบให้วัดแก๊สเรดอนทางอ้อม โดยการวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของนิวไคลด์ลูก นั่นคือ พอลอเนียม-218 (Po-218) แทน เนื่องจากรีดอนมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงฟุ้งกระจายในห้องวัด แต่นิวไคลด์ของพอลอเนียม-218 ที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนนั้น อยู่ในสถานะไอออนบวก มีสภาพเป็นไอออนบวก จึงถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าไปเกาะที่ผิวหน้าของหัววัดรังสี ก่อนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า และสลายตัวให้รังสีแอลฟา ถ่ายโอนพลังงานให้หัววัดรังสี เมื่อ RAD7 ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแอลฟาแล้ว จึงแปลผลค่าปริมาณความแรงรังสีของพอลอเนียม-218 และทำการปรับเทียบค่าเป็นความแรงรังสีของแก๊สเรดอน ในการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า RAD7-RAD H<sub>2</sub>O ซึ่งสามารถวัดระดับเรดอนในน้ำได้ในช่วงความเข้มข้น ตั้งแต่ ค่าที่น้อยกว่า 0.37 Bq/L จนถึงค่าที่มากกว่า  $1.48 \times 10^4$  Bq/L ในเวลาสั้น ๆ [19] ทั้งนี้ ก่อนดำเนินการวัดแก๊สเรดอนในตัวอย่างน้ำ ต้องเตรียมเครื่องวัดให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้ โดยต่ออุปกรณ์ตามวงจรของระบบวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำเข้ากับเครื่องวัด RAD7-RAD H<sub>2</sub>O ดังภาพที่ 2 ใช้ขวดแก้วเปล่าขนาด 250 ml ต่อเข้ากับระบบวัด แล้วดำเนินการเปิดเครื่องวัดและเครื่องพิมพ์ (printer) ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องวัด จากนั้น เริ่มกระบวนการวัดโดยการไล่ความชื้น (purge) ภายในเครื่องวัดประมาณ 5 นาที เพื่อให้ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีค่าต่ำกว่า 10 % จากนั้น เปลี่ยนจากขวดแก้วเปล่ามาเป็นขวดที่มีตัวอย่างน้ำ แล้วต่อเข้ากับระบบวัด เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ โดยใช้เวลาในการทำงานขั้นตอนนี้ให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สเรดอนฟุ้งกระจายออกจากขวด จากนั้น ดำเนินการวัดจำนวน 4 รอบ ๆ ละ 5 นาที เมื่อกระบวนการวัดเสร็จสิ้น ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ได้แสดงในหน่วยเป็น Bq/m<sup>3</sup> และข้อมูลที่วัดได้จำนวน 4 ครั้ง จากนั้น ประมวลผลเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) และพิมพ์ผลการวัดออกมาจากเครื่องพิมพ์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องวัด RAD7-RAD H<sub>2</sub>O นอกจากนี้ ข้อมูลทั้งหมดได้ถูกจัดเก็บไว้ในตัวเครื่อง และสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2 ระบบวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำด้วยเครื่องวัด RAD7-RAD H<sub>2</sub>O

เตอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAPTURE เพื่อนำข้อมูลความเข้มข้นแก๊สเรดอนจากการวัดแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคนั้น หลังจากได้ข้อมูลผลการวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ จากเครื่องวัด RAD7-RAD H<sub>2</sub>O ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น Bq/m<sup>3</sup> จากนั้น จึงเปลี่ยนหน่วยวัดเป็น Bq/L โดยเทียบจาก 1 kBq/m<sup>3</sup> มีค่าเท่ากับ 1 Bq/L ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่ตรวจวัดที่อ่านได้จากเครื่องวัดได้นำมาคำนวณย้อนกลับเป็นความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง โดยใช้สมการ (1) [20]

$$C = C_{Rn} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่ตรวจวัด (Bq/L)

$C_{Rn}$  คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง (Bq/L)

$\lambda$  คือ อัตราการสลายตัวของเรดอนมีค่าเท่ากับ  $2.1 \times 10^{-6}$  dps (disintegration per second) หรือ ครั้งต่อวินาที (1/s) [21]

t คือ เวลาที่นับย้อนกลับจากเวลาที่ตรวจวัดไปยังเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

สำหรับปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีในการกิน (Annual Effective Dose for Ingestion; AED<sub>ing</sub>) สามารถคำนวณตามรายงานของคณะกรรมการวิทยาศาสตร์แห่งสหประชาชาติ ว่าด้วยผลของรังสีปรมาณู (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR) [6, 22] ดังสมการที่ (2)

$$AED_{ing} = C_{Rn} \times DCF \times C_w \quad (2)$$

เมื่อ DCF (Effective Dose Coefficient Factor for Ingestion) เป็นปัจจัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเรดอนที่มีผลมาจากการบริโภคน้ำมีค่าเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-9}$  Sv/Bq

$C_w$  คือ ปริมาณการบริโภคน้ำ โดยเทียบกับน้ำประปาของประชากรโดยประมาณเท่ากับ 60 L/y [21]

สำหรับปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการหายใจ (Annual Effective Dose for Inhalation; AED<sub>inh</sub>) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [6, 22-24]

$$AED_{inh} = C_{Rn} \times R \times D \times F \times T \quad (3)$$

เมื่อ R คือ อัตราส่วนของเรดอนในอากาศต่อเรดอนในน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $10^{-4}$

D คือ แฟกเตอร์การเปลี่ยนแปลงของเรดอน มีค่าเท่ากับ  $9 \times 10^{-6}$  Sv/(h Bq/L)

F คือ แฟกเตอร์สมดุลทางรังสีระหว่างเรดอนกับผลผลิตลูกที่เกิดจากการสลายของเรดอนมีเท่ากับ 0.4

T คือ เวลาภายในอาคารต่อปีประมาณ 7000 h/y

สำหรับปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม (Total Annual Effective Dose, AED<sub>t</sub>) เป็นผลรวมของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกินและการหายใจ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) [10-12]

$$AED_t = AED_{ing} + AED_{inh} \quad (4)$$

## ผลการวิจัย

ผลการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของน้ำในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี ตำบลพรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ตำบลเขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี จำแนกแหล่งน้ำออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมือง ซึ่งมีจำนวนตัวอย่าง (n) พื้นที่ละ 15 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง โดยมีปริมาณทางกายภาพของน้ำที่ศึกษาจำนวน 7 ปริมาณ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature, T) ค่า pH สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) ค่าความเค็ม (Salinity) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) และปริมาณรังสีภูมิหลัง (Background Radiation, BG) ซึ่งแสดงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคบริเวณเหมืองแร่ในพื้นที่ศึกษา

ประเภท ของน้ำ	n	ปริมาณทางกายภาพของน้ำ (mean±SD)						
		T (°C)	pH	EC (S/m)	TDS (g/L)	Salinity (ppt)	DO (mg/L)	BG (mSv/y)
น้ำประปา	6	29.7±0.7	6.62±0.25	0.04±0.02	0.08±0.01	0.09±0.01	7.63±0.10	1.3±0.3
น้ำบาดาล	3	31.2±0.0	6.82±0.13	0.05±0.00	0.26±0.03	0.26±0.03	7.50±0.02	1.4±0.0
น้ำคลอง	3	31.9±0.2	6.31±0.22	0.02±0.00	0.16±0.00	0.16±0.00	7.40±0.11	1.2±0.0
น้ำบ่อเหมือง	3	29.4±0.3	6.04±0.18	0.18±0.00	0.88±0.00	0.88±0.01	7.80±0.01	1.4±0.3
รวม (พรุพี)	15	30.4±1.1	6.48±0.34	0.07±0.06	0.29±0.31	0.29±0.31	7.59±0.16	1.3±0.2
น้ำประปา	6	29.9±0.8	6.69±0.16	0.02±0.00	0.09±0.01	0.09±0.01	7.62±0.09	1.3±0.0
น้ำบาดาล	3	30.0±0.0	6.67±0.14	0.05±0.00	0.25±0.00	0.25±0.00	7.56±0.03	1.4±0.0
น้ำคลอง	3	30.3±0.0	6.00±0.05	0.02±0.00	0.08±0.00	0.07±0.01	7.66±0.02	0.8±0.0
น้ำบ่อเหมือง	3	30.3±0.0	3.63±0.08	0.23±0.00	1.14±0.01	1.15±0.01	7.61±0.01	0.9±0.0
รวม (เขานิพันธ์)	15	30.1±0.5	5.94±1.23	0.06±0.08	0.33±0.43	0.33±0.43	7.61±0.06	1.1±0.3
รวมทั้งหมด	30	30.2±0.9	6.21±0.93	0.06±0.07	0.31±0.37	0.31±0.37	7.60±0.12	1.2±0.3
ระดับอ้างอิง			6.5-8.5 [5, 25]	0.005-0.08 [26]	0.5 [25]	0.5 [27]	5-8 [28]	2.4 [6]

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร มีจำนวนตัวอย่างรวม 15 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยรวมของอุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และปริมาณรังสีภูมิหลัง อยู่ที่ระดับ 30.4±1.1 °C, 6.48±0.34, 0.07±0.06 S/m, 0.29±0.31 g/L, 0.29±0.31 ppt, 7.59±0.16 mg/L และ 1.33±0.20 mSv/y ตามลำดับ ส่วนในพื้นที่เหมืองแร่เขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ มีจำนวนตัวอย่างรวม 15 ตัวอย่าง พบว่า มีค่าเฉลี่ยรวมของอุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และปริมาณรังสีภูมิหลัง อยู่ที่ระดับ 30.1±0.5 °C, 5.94±1.23, 0.06±0.08 S/m, 0.33±0.43 g/L, 0.33±0.43 ppt, 7.61±0.06 mg/L และ 1.12±0.25 mSv/y ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยรวมของตัวอย่างน้ำทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา 2 อำเภอ จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่า ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของอุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณ



ของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด ค่าความเค็ม ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และปริมาณรังสีกัมมันตภาพรังสีที่ระดับ  $30.2 \pm 0.9$  °C,  $6.21 \pm 0.93$ ,  $0.06 \pm 0.07$  S/m,  $0.31 \pm 0.37$  g/L,  $0.31 \pm 0.37$  ppt,  $7.60 \pm 0.12$  mg/L และ  $1.22 \pm 0.25$  mSv/y ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิจำแนกตามประเภทของน้ำ พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ สาเหตุความแตกต่าง อาจขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ในวันที่เก็บตัวอย่าง ส่วนค่าเฉลี่ยของ pH พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) และค่าเฉลี่ยของ pH ของน้ำบ่อเหมืองต่ำกว่าน้ำชนิดอื่น นอกจากนี้พบว่า น้ำบ่อเหมืองพุทพิมีค่าเฉลี่ยของ pH ( $6.04 \pm 0.18$ ) สูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำบ่อเหมืองเขานิพันธ์ที่ระดับ ( $3.63 \pm 0.08$ ) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากบ่อเหมืองเขานิพันธ์เป็นบ่อเหมืองที่ยังมีการขุดเจาะแร่และระเบิดหินอยู่ อาจส่งผลให้ค่า pH ต่ำ มีสภาพเป็นกรดมากกว่าน้ำจากบ่อเหมืองพุทพิมิ ซึ่งเป็นบ่อที่ไม่ได้ดำเนินการแล้ว แต่กักเก็บน้ำไว้สำหรับนำกลับไปใช้ในกระบวนการระเบิดหิน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวมของ pH ระหว่างพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พุทพิมิ ( $6.48 \pm 0.34$ ) และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $5.94 \pm 1.23$ ) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ ) ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของ 30 ตัวอย่าง พบว่า อยู่ที่ระดับ  $6.21 \pm 0.93$  ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐานของน้ำดื่ม ( $6.5-8.5$ ) [5, 25]

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสภาพนำไฟฟ้าจำแนกตามประเภทของน้ำ พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) โดยสภาพนำไฟฟ้าของน้ำประปาในพื้นที่เหมืองแร่พุทพิมิ ( $0.04 \pm 0.02$  S/m) มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าในพื้นที่เหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $0.02 \pm 0.00$  S/m) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) นอกจากนี้พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของน้ำบ่อเหมืองพุทพิมิและบ่อเหมืองเขานิพันธ์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแหล่งน้ำชนิดอื่นอยู่ที่ระดับ  $0.18 \pm 0.00$  S/m และ  $0.23 \pm 0.00$  S/m ตามลำดับ โดยแตกต่างจากน้ำชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) ส่วนน้ำคลอง มีค่าเฉลี่ยต่ำสุด โดยทั้งสองพื้นที่ พบว่า อยู่ที่ระดับ  $0.02 \pm 0.00$  S/m เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวมในพื้นที่เหมืองแร่พุทพิมิ ( $0.07 \pm 0.06$  S/m) และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $0.06 \pm 0.08$  S/m) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $0.06 \pm 0.07$  S/m ซึ่งยังอยู่ในช่วงของสภาพนำไฟฟ้าในน้ำประปา ( $0.005-0.08$  S/m) และน้ำจืด ( $0.01-0.2$  S/m) [26]

เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำและค่าความเค็ม โดยนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มจำแนกตามประเภทของน้ำ พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ พบว่า น้ำบ่อเหมือง มีค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ และค่าความเค็มสูงกว่าน้ำชนิดอื่น ค่าเฉลี่ยรองลงมา คือ น้ำคลอง น้ำบาดาล และน้ำประปา ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำและค่าความเค็ม พบว่า เหมืองแร่พุทพิมิและเหมืองแร่เขานิพันธ์นั้น ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำและค่าความเค็มอยู่ที่ระดับ  $0.31 \pm 0.37$  g/L และ  $0.31 \pm 0.37$  ppt ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำมีค่าไม่เกินระดับมาตรฐานน้ำดื่ม ( $0.5$  g/L) [25] และค่าความเค็มไม่เกิน  $0.5$  ppt [27]

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทั้ง 4 ประเภท พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) โดยแหล่งน้ำบริเวณเหมืองแร่พุทพิมิ พบว่า น้ำบ่อเหมืองมีค่าเฉลี่ยของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงสุดอยู่ที่ระดับ  $7.80 \pm 0.01$  mg/L และน้ำคลองมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ระดับ  $7.40 \pm 0.11$  mg/L และแหล่งน้ำบริเวณเหมืองแร่เขานิพันธ์ พบว่า น้ำคลองมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ระดับ  $7.66 \pm 0.02$  mg/L และน้ำบาดาล มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ระดับ  $7.56 \pm 0.03$  mg/L ซึ่งพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ

0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในพื้นที่เหมืองแร่พรุพี ( $7.59 \pm 0.16$  mg/L) และเหมืองแร่เชานิพันธ์ ( $7.61 \pm 0.06$  mg/L) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $7.60 \pm 0.12$  mg/L ซึ่งอยู่ในช่วงของระดับมาตรฐานน้ำที่มีคุณภาพดี คือ 5-8 mg/L [28]

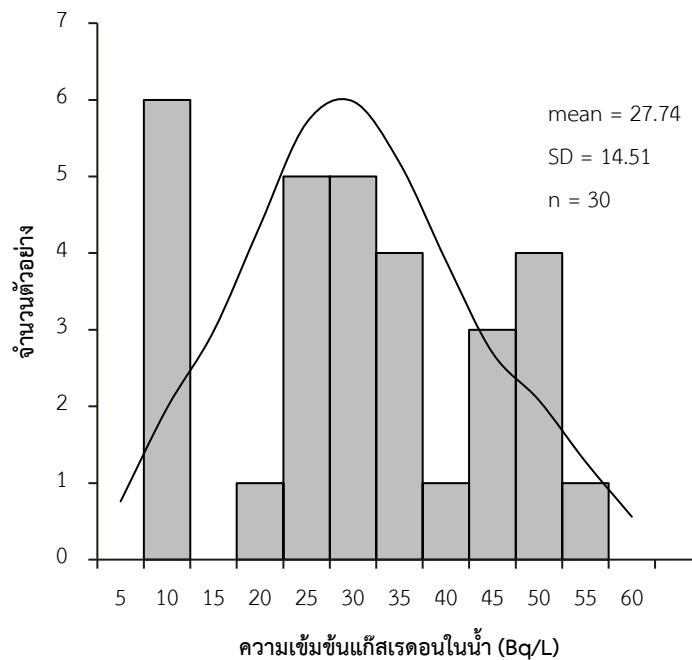
เมื่อพิจารณาปริมาณรังสีกัมมันตรังสีของแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคในพื้นที่เหมืองแร่พรุพีและเชานิพันธ์ พบว่า ค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มของน้ำชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีกัมมันตรังสีของน้ำประปา และน้ำบาดาล พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) ส่วนค่าเฉลี่ยของน้ำคลอง ( $0.8 \pm 0.0$  mSv/y) และน้ำบ่อเหมือง ( $0.9 \pm 0.0$  mSv/y) ในพื้นที่เหมืองแร่เชานิพันธ์ มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าน้ำชนิดอื่น โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณรังสีกัมมันตรังสีของแหล่งน้ำทั้งสองพื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยรวมในพื้นที่เหมืองแร่พรุพี ( $1.3 \pm 0.2$  mSv/y) สูงกว่าเหมืองแร่เชานิพันธ์ ( $1.1 \pm 0.3$  mSv/y) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p < 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $1.2 \pm 0.3$  mSv/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก ( $2.4$  mSv/y) [6]

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของทุกปริมาณในภาพรวม เห็นได้ว่ามีค่าอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานน้ำที่มีคุณภาพ ยกเว้นค่าเฉลี่ยของ pH ที่ต่ำกว่าระดับมาตรฐานน้ำประปาที่ใช้ดื่มได้ ( $6.5-8.5$ ) [5, 25] นอกจากนี้พบว่า น้ำบ่อเหมืองเชานิพันธ์ที่มีค่าเฉลี่ยของ pH ( $3.63 \pm 0.08$ ) ต่ำกว่าระดับมาตรฐานน้ำประปา และมาตรฐานน้ำทิ้ง ( $5.5-9.0$ ) [29] ซึ่งไม่ปลอดภัยในการนำมาใช้อุปโภคบริโภค

เมื่อนำค่าความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำที่ตรวจวัดได้จากแหล่งน้ำในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่เชานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี พื้นที่ละ 15 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด (n) 30 ตัวอย่าง มาแจกแจงความถี่ เพื่อศึกษาการกระจายของปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา ได้ผลดังภาพที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายของข้อมูลปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นโค้งปกติ (Kolmogorov-Smirnov normality test,  $p > 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด (mean) ของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษาจำนวน 30 ตัวอย่าง อยู่ที่ระดับ 27.74 Bq/L และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 14.51 Bq/L โดยมีจำนวนตัวอย่างเพียง 6 ตัวอย่าง (ร้อยละ 20) ที่มีระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง 5-10 Bq/L ซึ่งต่ำกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนเรดอนในน้ำดื่ม หรือ ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม ( $11.1$  Bq/L) ซึ่งกำหนดโดย U.S. EPA [3]

นอกจากนี้พบว่า มีจำนวนตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดจำนวน 24 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 80 นั้น มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสูงกว่า  $11.1$  Bq/L [3] แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นแก๊สเรดอนของทุกตัวอย่างมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานอ้างอิงสำหรับน้ำดื่ม ( $100$  Bq/L) ที่แนะนำโดย WHO [4] และระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่มแบบทางเลือก ( $148$  Bq/L) ซึ่งกำหนดโดย U.S. EPA [3]

เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคจากแหล่งน้ำบริเวณเหมืองแร่พรุพีและเหมืองแร่เชานิพันธ์ ซึ่งประกอบด้วย น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมือง ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างน้ำ ทั้งหมด 30 ตัวอย่าง แสดงให้เห็นเชิงเปรียบเทียบด้วยค่าต่ำสุด (min) ค่าสูงสุด (max) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร มีค่าต่ำสุดและสูงสุดของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคโดยรวมอยู่ที่ระดับ  $6.04 \pm 1.06$  Bq/L และ  $53.79 \pm 3.62$  Bq/L ตามลำดับ



**ภาพที่ 3** การแจกแจงความถี่ของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคบริเวณเมืองแร่ในพื้นที่ศึกษา

โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับ  $31.69 \pm 15.82$  Bq/L ส่วนบริเวณเมืองแร่เขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำมีค่าต่ำสุดและสูงสุดโดยรวม อยู่ที่ระดับ  $5.54 \pm 1.02$  Bq/L และ  $47.28 \pm 3.38$  Bq/L ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับ  $23.79 \pm 12.33$  Bq/L เมื่อพิจารณาในภาพรวมทั้งหมดของทั้งสองพื้นที่ จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่า มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ระดับ  $5.54 \pm 1.02$  Bq/L และ  $53.79 \pm 3.62$  Bq/L ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $27.74 \pm 14.51$  Bq/L ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีค่าสูงกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่มที่ระดับ 11.1 Bq/L ซึ่งกำหนดโดย U.S. EPA [3] แต่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงสำหรับน้ำดื่ม (100 Bq/L) ซึ่งแนะนำโดย WHO [4] และระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (148 Bq/L) กำหนดโดย U.S. EPA [3]

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำจากแหล่งน้ำชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่บริเวณเมืองแร่พรุพีและเขานิพันธ์ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาเป็นรายคู่ พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำคลองบริเวณเมืองแร่พรุพี ( $44.21 \pm 2.13$  Bq/L) ในน้ำบาดาลบริเวณเมืองแร่พรุพี ( $50.24 \pm 3.08$  Bq/L) และน้ำบาดาลบริเวณเมืองแร่เขานิพันธ์ ( $41.57 \pm 3.16$  Bq/L) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) แต่ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนของน้ำทั้ง 3 กลุ่มนี้สูงกว่าค่าเฉลี่ยในน้ำคลองบริเวณเมืองแร่เขานิพันธ์ ( $22.47 \pm 2.43$  Bq/L) น้ำประปาบริเวณเมืองแร่พรุพี ( $28.60 \pm 3.34$  Bq/L) และน้ำประปาบริเวณเมืองแร่เขานิพันธ์ ( $24.13 \pm 6.19$  Bq/L) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบ่อเหมืองในพื้นที่เมืองแร่พรุพี ( $6.78 \pm 0.65$  Bq/L) และเมืองแร่เขานิพันธ์ ( $6.50 \pm 0.86$  Bq/L) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) แต่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าน้ำประปาอื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) และต่ำกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่มที่ระดับ 11.1 Bq/L อย่างไรก็ตามแม้ว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนอยู่ในระดับที่ต่ำ แต่เมื่อพิจารณาค่า pH ของน้ำในบ่อเหมืองทั้งสองพื้นที่ พบว่า มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงไม่สามารถนำน้ำบ่อเหมืองมาใช้ในการอุปโภคบริโภคได้

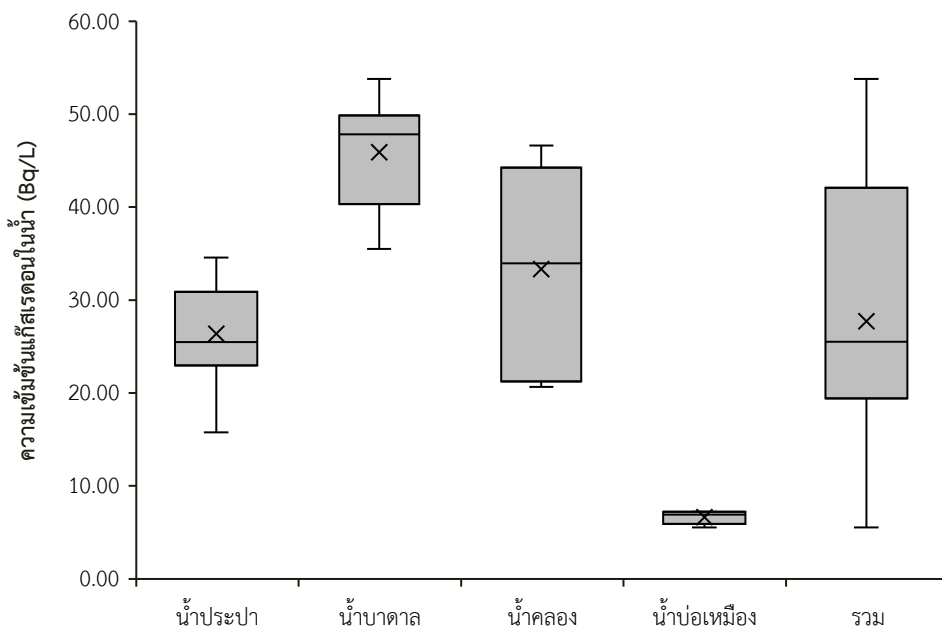
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรวมในพื้นที่เหมืองแร่พรุพี ( $31.69 \pm 15.82$  Bq/L) และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $23.79 \pm 12.33$  Bq/L) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ ) ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับข้อมูลในแผนที่ความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดิน (ภาพที่ 1) ที่แสดงว่าในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนา-สาร มีค่าสูงกว่าพื้นที่บริเวณเหมืองแร่เขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ ทั้งนี้ อาจมีปัจจัยอื่นเข้ามามีส่วนทำให้ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำทั้งสองพื้นที่ไม่แตกต่างกัน เช่น การระเบิดเหมือง หรือ กระบวนการผลิตแร่ ที่อาจส่งผลต่อการปนเปื้อนของแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา

**ตารางที่ 2** ปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา

ประเภทของน้ำ	n	ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ (Bq/L)		
		min±SD	max±SD	mean±SD
น้ำประปา	6	23.70±2.34	32.38±2.42	28.60±3.34
น้ำบาดาล	3	48.35±3.29	53.79±3.62	50.24±3.08
น้ำคลอง	3	42.57±3.33	46.62±3.69	44.21±2.13
น้ำบ่อเหมือง	3	6.04±1.06	7.22±1.15	6.78±0.65
รวม (พรุพี)	15	6.04±1.06	53.79±3.62	31.69±15.82
น้ำประปา	6	15.77±2.10	34.58±3.00	24.13±6.19
น้ำบาดาล	3	35.48±2.89	47.28±3.38	41.57±3.16
น้ำคลอง	3	20.64±2.31	25.33±2.66	22.47±2.43
น้ำบ่อเหมือง	3	5.54±1.02	7.20±1.16	6.50±0.86
รวม (เขานิพันธ์)	15	5.54±1.02	47.28±3.38	23.79±12.33
รวมทั้งหมด	30	5.54±1.02	53.79±3.62	27.74±14.51
ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม			U.S. APA [3]	11.1 Bq/L
			WHO [4]	100 Bq/L

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวมของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษาจำแนกตามประเภทของน้ำ ได้ผลดังภาพที่ 4 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยรวมของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคจำแนกตามประเภทของน้ำด้วยแผนภาพกล่อง (box plot) ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าต่ำสุดของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในภาพรวม ( $5.54 \pm 1.02$  Bq/L) พบในน้ำบ่อเหมือง อาจเป็นไปได้ว่า น้ำบ่อเหมืองเป็นน้ำผิวดินที่ผ่านการขุดเอาแร่ออกไปใช้ประโยชน์แล้ว ซึ่งอาจส่งผลให้มีปริมาณของแก๊สเรดอนต่ำและต่ำกว่าแหล่งน้ำอื่น ๆ ในขณะที่ค่าสูงสุดโดยรวม ( $53.79 \pm 3.62$  Bq/L) พบในน้ำบาดาล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่โดยส่วนใหญ่ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลมีโอกาสปนเปื้อนแก๊สเรดอนสูงกว่าน้ำประเภทอื่น (ตารางที่ 6) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มของน้ำแต่ละประเภท พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อพิจารณารายคู่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของน้ำบาดาล ( $45.90 \pm 6.35$  Bq/L) สูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำคลอง ( $33.34 \pm 12.09$  Bq/L) น้ำประปา ( $26.36 \pm 5.28$  Bq/L) และน้ำบ่อเหมือง ( $6.64 \pm 0.70$  Bq/L) ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำทั้งหมด ( $27.74 \pm 14.51$  Bq/L) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของน้ำคลอง พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของน้ำประปา

นอกจากนี้พบว่า มีเพียงน้ำบ่อเหมืองเท่านั้นที่มีค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนต่ำกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ซึ่งกำหนดโดย U.S. EPA [3] แต่หากพิจารณา น้ำคลองและน้ำบ่อเหมืองรวมกัน (จำนวน 12 ตัวอย่าง) และจัดประเภทเป็นน้ำผิวดิน พบว่า มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนอยู่ในช่วง 5.54–46.62 Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ย  $19.19 \pm 16.16$  Bq/L แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประปา น้ำบาดาล และน้ำผิวดิน ในพื้นที่ศึกษามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L)



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษาจำแนกตามประเภทของน้ำ

เมื่อนำความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา ไปประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนสำหรับการกิน ( $AED_{ing}$ ) การหายใจ ( $AED_{inh}$ ) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากการกินและการหายใจโดยรวม ( $AED_t$ ) ได้ผลดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนสำหรับการกิน การหายใจ และโดยรวม ในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี อำเภอบ้านนาสาร อยู่ที่ระดับ  $6.65 \pm 3.32$   $\mu$ Sv/y,  $79.85 \pm 39.88$   $\mu$ Sv/y และ  $86.50 \pm 43.20$   $\mu$ Sv/y ตามลำดับ ส่วนในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่เชานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับต่อปีจากการกิน การหายใจ และโดยรวม อยู่ที่ระดับ  $5.00 \pm 2.59$   $\mu$ Sv/y,  $59.95 \pm 31.08$   $\mu$ Sv/y และ  $64.95 \pm 33.67$   $\mu$ Sv/y ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากการกิน การหายใจ และโดยรวม อยู่ที่ระดับ  $5.83 \pm 3.05$   $\mu$ Sv/y,  $69.90 \pm 36.56$   $\mu$ Sv/y และ  $75.73 \pm 39.60$   $\mu$ Sv/y ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่ระดับ  $100$   $\mu$ Sv/y ซึ่งแนะนำโดย WHO [5]

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกินและการหายใจโดยรวม ( $AED_t$ ) ในน้ำแต่ละประเภทในแต่ละพื้นที่ศึกษาพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาเป็นรายคู่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวมในน้ำคลองบริเวณเหมืองแร่พรุพี ( $120.70 \pm 5.81$  mSv/y) น้ำบาดาลบริเวณเหมืองแร่พรุพี ( $137.16 \pm 8.41$  mSv/y) และน้ำบาดาลบริเวณเหมืองแร่เชานิพันธ์ ( $113.47 \pm 16.12$  mSv/y) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ แหล่งน้ำทั้งสามแหล่ง มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับต่อปีโดยรวมสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัย  $100$  mSv/y

ตารางที่ 3 ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนสำหรับการกินและการหายใจ

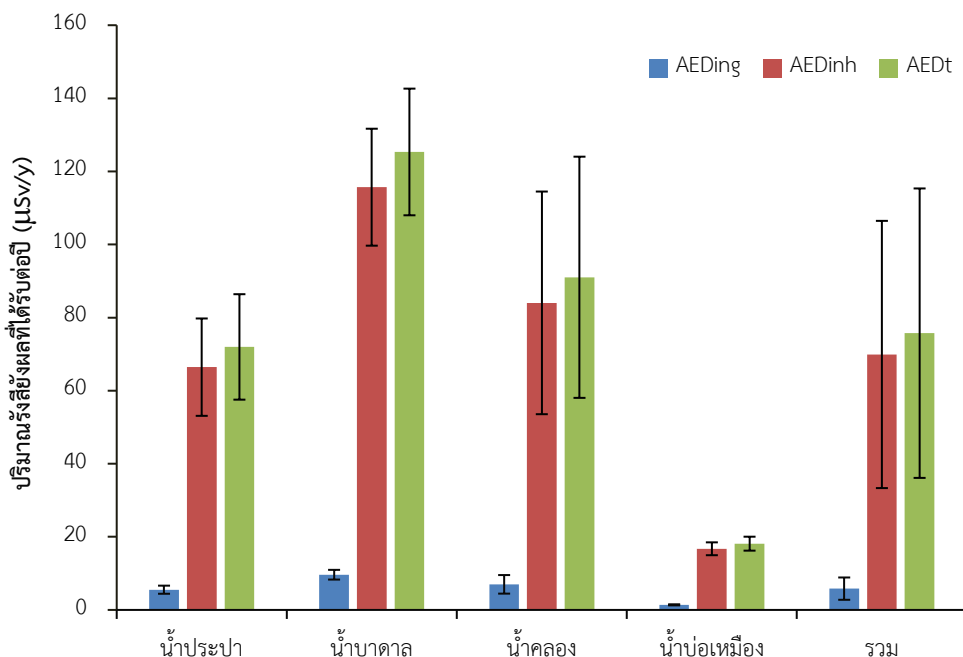
ประเภทของน้ำ	n	ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (mean±SD; $\mu\text{Sv/y}$ )		
		AED <sub>ing</sub>	AED <sub>inh</sub>	AED <sub>t</sub>
น้ำประปา	6	6.01±0.70	72.07±8.42	78.07±9.12
น้ำบาดาล	3	10.55±0.65	126.61±7.76	137.16±8.41
น้ำคลอง	3	9.28±0.45	111.42±5.37	120.70±5.81
น้ำบ่อเหมือง	3	1.42±0.14	17.10±1.63	18.52±1.77
รวม (พรุพี)	15	6.65±3.32	79.85±39.88	86.50±43.20
น้ำประปา	6	5.07±1.30	60.80±15.59	65.86±16.89
น้ำบาดาล	3	8.73±1.24	104.75±14.88	113.47±16.12
น้ำคลอง	3	4.72±0.53	56.63±6.31	61.35±6.84
น้ำบ่อเหมือง	3	1.36±0.18	16.37±2.17	17.74±2.35
รวม (เขานิพันธ์)	15	5.00±2.59	59.95±31.08	64.95±33.67
รวมทั้งหมด	30	5.83±3.05	69.90±36.56	75.73±39.60
ค่ามาตรฐานความปลอดภัย			WHO [5]	100 $\mu\text{Sv/y}$

[5] นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวมของน้ำทั้ง 3 กลุ่มข้างต้น มีค่าสูงกว่าในน้ำคลองบริเวณเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $61.35 \pm 6.84 \mu\text{Sv/y}$ ) น้ำประปาบริเวณเหมืองแร่พรุพี ( $78.07 \pm 9.12 \mu\text{Sv/y}$ ) และน้ำประปาบริเวณเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $65.86 \pm 16.89 \mu\text{Sv/y}$ ) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวมในน้ำบ่อเหมืองพรุพี ( $18.52 \pm 1.77 \mu\text{Sv/y}$ ) และน้ำบ่อเหมืองเขานิพันธ์ ( $17.74 \pm 2.35 \mu\text{Sv/y}$ ) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม น้ำบ่อเหมืองมีค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวมต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ )

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับต่อปีโดยรวม ในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี ( $86.50 \pm 43.20 \mu\text{Sv/y}$ ) และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $64.95 \pm 33.67 \mu\text{Sv/y}$ ) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (independent samples t-test,  $p > 0.05$ )

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนโดยการกิน (AED<sub>ing</sub>) การหายใจ (AED<sub>inh</sub>) และโดยรวม (AED<sub>t</sub>) จำแนกตามประเภทของน้ำ ได้ผลดังภาพที่ 5 โดยแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการกิน การหายใจและโดยรวมในน้ำแต่ละชนิด พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อพิจารณารายคู่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม (AED<sub>t</sub>) ในน้ำบาดาล ( $125.31 \pm 17.33 \mu\text{Sv/y}$ ) มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ น้ำคลอง ( $91.03 \pm 33.00 \mu\text{Sv/y}$ ) น้ำประปา ( $71.97 \pm 14.43 \mu\text{Sv/y}$ ) และน้ำบ่อเหมือง ( $18.13 \pm 1.91 \mu\text{Sv/y}$ ) ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยรวมของน้ำบาดาลสูงกว่าค่าเฉลี่ยรวมของตัวอย่างน้ำทั้งหมด ( $75.73 \pm 39.60 \mu\text{Sv/y}$ ) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าเฉลี่ยของน้ำคลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(Tukey HSD,  $p > 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของน้ำประปา นอกจากนี้พบว่า มีเพียงน้ำบาดาลเท่านั้นที่มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวมสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัย



ภาพที่ 5 ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนโดยการกินและการหายใจจากน้ำตามประเภทของน้ำ

ในการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ (ตารางที่ 2) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม (ตารางที่ 3) ระหว่างแหล่งน้ำ 8 กลุ่ม ซึ่งได้แก่ น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมืองในพื้นที่บริเวณเมืองแพร่พัพพีและเขานินพัน์ โดยใช้สถิติ One-way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ โดยพิจารณาจาก Tukey HSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ได้ผลดังตารางที่ 4 นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณทางกายภาพของน้ำ ดังตารางที่ 1 ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ดังภาพที่ 4 และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม ดังภาพที่ 5 จากแหล่งน้ำ 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมือง โดยใช้สถิติ One-way ANOVA นอกจากนี้ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณต่าง ๆ ระหว่างพื้นที่ศึกษา 2 อำเภอ นั่นคือ พื้นที่บริเวณเมืองแพร่พัพพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่เขานินพัน์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยใช้สถิติทดสอบสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกัน และกำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ได้ผลดังตารางที่ 5

นอกจากนั้น ได้ศึกษางานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นที่บริเวณเมืองแพร่พัพพีและเหมืองแร่เขานินพัน์ในงานวิจัยนี้ โดยได้พ่งเล็งปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคที่มีลักษณะพื้นที่ศึกษาเป็นแหล่งเหมืองแร่และมียูเรเนียมในชั้นดินและหินสูง เช่นเดียวกัน โดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 6 จากตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาในภาพรวม พบว่า น้ำบาดาลมีความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงกว่าน้ำประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงสุดที่เมือง Nisa ประเทศโปรตุเกส โดยมีค่าเฉลี่ย 914 Bq/L และพบค่าสูงสุดที่ระดับ 3,856 Bq/L รองลงมา คือเมือง Ciudad Rodrigo ประเทศสเปน มีค่าเฉลี่ย 580 Bq/L และพบค่าสูงสุดที่ระดับ 2,426 Bq/L โดยทั้งสองพื้นที่นี้มีปริมาณรังสีสูง เนื่องจากมีหินยูเรเนียมในพื้นที่ศึกษา [31] และถัดมาเป็นเมือง Kowary ทางตอนใต้ของประเทศโปแลนด์ มีค่าเฉลี่ย 437.7 Bq/L และมีค่าสูงสุด 3,043 Bq/L ซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่อยู่บริเวณแหล่งเหมืองแร่ยูเรเนียม [15] ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของแก๊สเรดอน [2] ระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่มีค่าสูงรองลงมาจากน้ำบาดาล คือ น้ำบ่อ พบว่าในพื้นที่อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาที่มียูเรเนียมในดินสูง พบว่า ค่าสูงสุดอยู่ที่ระดับ 483.0 Bq/L โดยมี

**ตารางที่ 4** ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ( $C_{Rn}$ ) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม ( $AED_t$ ) ระหว่างแหล่งน้ำ 8 กลุ่ม

One-way ANOVA				
	$C_{Rn}$		$AED_t$	
	F	Sig.	F	Sig.
Between Group	50.179	.000*	33.924	.000*

Turkey HSD							
แหล่งน้ำ	$C_{Rn}$			$AED_t$			Sig.
	Subset for $\alpha = 0.05$						
	n	1	2	3	1	2	
น้ำบ่อเหมืองพรุพี	3	6.78			18.52		
น้ำบ่อเหมืองเขานิพันธ์	3	6.50			17.74		
น้ำประปาพรุพี	6		28.60			78.07	
น้ำประปาเขานิพันธ์	6		24.13			65.86	
น้ำคลองเขานิพันธ์	3		22.47			61.35	
น้ำบาดาลพรุพี	3			50.24			137.16
น้ำบาดาลเขานิพันธ์	3			41.57			113.47
น้ำคลองพรุพี	3			44.21			120.70
Sig.		1.000	.514	.144	1.000	.514	.143

หมายเหตุ \*ค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

**ตารางที่ 5** ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณทางกายภาพของน้ำ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ( $C_{Rn}$ ) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม ( $AED_t$ ) ระหว่างแหล่งน้ำ 4 ประเภท และพื้นที่ศึกษา 2 อำเภอ

Variables	One-way ANOVA		Independent Samples t-test		
	F	Sig.	t	df	Sig.
T	5.372	.005*	.925	19.975	.366
pH	13.872	.000*	1.654	16.158	.118
EC	157.322	.000*	.003	28	.997
TDS	280.680	.000*	-.255	28	.800
Salinity	269.609	.000*	-.252	28	.803
DO	4.135	.016*	-.460	18.718	-.49
BG	3.865	.021*	2.463	28	.020*
$C_{Rn}$	33.927	.000*	1.531	28	.137
$AED_t$	33.924	.000*	1.531	28	.137

หมายเหตุ \*ค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05



ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประเภทต่าง ๆ กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของน้ำ	ประเทศ	พื้นที่ศึกษา	ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ (Bq/L)	อ้างอิง
น้ำประปา	โรมาเนีย	เมือง Baita Stei เขต Bihor	1.9–22.5 (6.9±3.5)	[14]
	อินเดีย	จังหวัด Kannada รัฐ Karnataka	4.87–6.86	[32]
	โรมาเนีย	เมือง Bucovina	0.17±0.05–8.51±2.34	[33]
	ตุรกี	จังหวัด Giresun	0.98–27.28	[34]
	ไทย	อำเภอบ้านนาสารและเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี	15.77–34.58 (26.36±5.28)	งานวิจัยนี้
น้ำบาดาล	ไนจีเรีย	เมือง Edu รัฐ Kwara	24.16±4.21	[10]
	ไนจีเรีย	เมือง Moro รัฐ Kwara	17.98±0.87	[12]
	ไนจีเรีย	เมือง Maiganga	1.46–779.00 (135.23)	[13]
	โปแลนด์	เมือง Kowary	0.2–3,043 (437.7)	[15]
	โปรตุเกส	เมือง Nisa	17–3,856 (914)	[31]
	สเปน	เมือง Ciudad Rodrigo	26–2,426 (580)	[31]
	ไทย	อำเภอบ้านนาสารและเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี	35.48–53.79 (45.90±6.35)	งานวิจัยนี้
น้ำผิวดิน	ไนจีเรีย	เมือง Edu รัฐ Kwara	19.14±3.98	[10]
	ไนจีเรีย	เมือง Oyun รัฐ Kwara	35.86±8.23	[11]
	ไนจีเรีย	เมือง Moro รัฐ Kwara	15.97±4.21	[12]
	อินเดีย	จังหวัด Kannada รัฐ Karnataka	2.37–5.16	[32]
	ไทย	อำเภอบ้านนาสารและเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี	5.54–46.62 (19.19±16.16)	งานวิจัยนี้
น้ำบ่อ	โรมาเนีย	เมือง Baita Stei เขต Bihor	4.6–134 (35.5±22.5)	[13]
	อิหร่าน	เมือง Zarand	5.16–14.4	[30]
	อินเดีย	จังหวัด Kannada รัฐ Karnataka	5.04–54	[32]
	ไทย	อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา	0.05–483.04 (32.0±9.2)	[9]
	ไทย	อำเภอบ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี	7.81–162.35 (60.64±53.89)	[35]

ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 32.0±9.2 Bq/L [9] นอกจากนี้พบว่า พื้นที่บริเวณเหมืองแร่เก่า ตำบลเพิ่มพูนทรัพย์ อำเภอบ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีค่าสูงสุดอยู่ 162.35 Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 60.64±53.89 Bq/L [35] และบริเวณเหมืองแร่ที่เมือง Baita Stei เขต Bihor ประเทศโรมาเนีย มีค่าสูงสุด 134 Bq/L และมีเฉลี่ยอยู่ที่ 35.5±22.5 Bq/L [14] ซึ่งทั้ง 3 พื้นที่ มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบ่อสูงกว่าค่ามาตรฐานการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ที่กำหนดโดย U.S. EPA [3] และมีค่าสูงสุดเกินระดับอ้างอิง (100 Bq/L) ซึ่งกำหนดโดย WHO [4] นอกจากนี้พบว่า น้ำผิวดินซึ่งปกติมีความเข้มข้น

แก๊สเรดอนต่ำกว่า 11.1 Bq/L แต่ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำผิวดินบริเวณเหมืองแร่ ทั้ง 3 เมือง ในรัฐ Kwara ประเทศไนจีเรีย [10-12] มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงกว่า 11.1 Bq/L เช่นเดียวกับน้ำประปาในพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า แหล่งน้ำในพื้นที่ใดมีปริมาณยูเรเนียมในดินหรือหินสูง ย่อมส่งผลต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำที่สูงด้วย

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำ ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ และประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี เนื่องจากแก๊สเรดอนจากการกินและการหายใจในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่พรุพี ตำบลพรุพี อำเภอบ้านนาสาร และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ตำบลเขานิพันธ์ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำคลอง และน้ำบ่อเหมือง พื้นที่ละ 15 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ผลการวิจัย พบว่า ค่าเฉลี่ยรวมของอุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด ค่าความเค็ม ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และปริมาณรังสีกัมมันตภาพรังสี อยู่ในระดับ  $30.2 \pm 0.9$  °C,  $6.21 \pm 0.93$ ,  $0.06 \pm 0.07$  S/m,  $0.31 \pm 0.37$  g/L,  $0.31 \pm 0.37$  ppt,  $7.60 \pm 0.12$  mg/L และ  $1.22 \pm 0.25$  mSv/y ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยรวมของทุกปริมาณอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานความปลอดภัย ยกเว้น pH เฉลี่ย พบว่า อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของน้ำประปาที่ใช้ได้ (6.5-8.5) [5] โดยเฉพาะในน้ำบ่อเหมืองเขานิพันธ์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ pH ( $3.63 \pm 0.08$ ) ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของน้ำดื่ม (5.5-9.0) [29] ดังนั้น ควรผ่านระบบการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ผลการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา พบว่า มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระดับ  $5.54 \pm 1.02$  Bq/L และสูงสุด  $53.79 \pm 3.62$  Bq/L ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ระดับ  $27.74 \pm 14.51$  Bq/L ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ที่กำหนดโดย U.S. EPA [3] นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนน้ำบาดาล ( $45.90 \pm 6.35$  Bq/L) มีค่าสูงกว่าน้ำคลอง ( $33.34 \pm 12.09$  Bq/L) น้ำประปา ( $26.36 \pm 5.28$  Bq/L) และน้ำบ่อเหมือง ( $6.64 \pm 0.70$  Bq/L) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่เหมืองแร่พรุพี ( $31.69 \pm 15.82$  Bq/L) และเหมืองแร่เขานิพันธ์ ( $23.79 \pm 12.33$  Bq/L) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี เนื่องจากแก๊สเรดอนจากการกิน การหายใจ และโดยรวม พบว่า มีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ระดับ  $5.83 \pm 3.05$   $\mu$ Sv/y,  $69.90 \pm 36.56$   $\mu$ Sv/y และ  $75.73 \pm 39.60$   $\mu$ Sv/y ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งแนะนำโดย WHO [5] นอกจากนี้พบว่า มีเพียงค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกินและการหายใจโดยรวมในน้ำบาดาล ( $125.31 \pm 17.33$   $\mu$ Sv/y) มีค่าสูงกว่า 100  $\mu$ Sv/y อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแหล่งน้ำอื่น ๆ มีปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากแก๊สเรดอนสำหรับการกินและการหายใจต่ำกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัย แต่เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินสูง และผลกระทบจากการทำเหมืองแร่อาจส่งผลต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำในพื้นที่ศึกษาให้มีค่าสูง ดังนั้น จากผลการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำทุกชนิดยังไม่ปลอดภัยสำหรับการนำมาใช้เป็นน้ำดื่มโดยตรง จำเป็นต้องผ่านระบบบำบัดน้ำที่ได้มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม และควรผ่านการตรวจสอบและรับรองคุณภาพน้ำดื่มจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยสำหรับผู้บริโภคในพื้นที่ศึกษา และหากใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ภายในครัวเรือน เช่น การอาบน้ำ และการซักล้างต่าง ๆ ไม่ควรเก็บกักน้ำไว้ภายในบ้าน เพราะเรดอนในน้ำมีโอกาสฟุ้งกระจายสู่อากาศภายในบ้านเรือน และอาจเป็นอันตรายต่อการหายใจ นอกจากนี้ ควรหมั่นเปิดบ้านระบายอากาศอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในอากาศที่สะสมในบ้านเรือนได้

## ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย เห็นได้ว่า มีข้อมูลที่น่าสนใจ เนื่องจากความเข้มข้นแก๊สเรดอนในภาพรวมสูงกว่าระดับมาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม ดังนั้น ควรมีการศึกษาความเข้มข้นแก๊สเรดอนทั้งในน้ำและในอากาศภายในอาคารในพื้นที่บริเวณแหล่งเหมืองแร่ให้ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี เพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงเนื่องจากแก๊สเรดอนในน้ำและในอากาศในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่ทั้งจังหวัด เพื่อเป็นฐานข้อมูลปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการเฝ้าระวังและป้องกันภัยที่อาจจะได้รับจากแก๊สเรดอน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Issa, M. Uosif and R. Elsaman, "Gamma radioactivity measurements in Nile River sediment samples," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 37, 2013.
- [2] U.S. EPA, the United States Environmental Protection Agency, *A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon*. EPA 402-K-12-002, 2016.
- [3] U.S. EPA, 64 FR 59246-National Primary Drinking Water Regulations; Radon-222. Washington, D.C.: Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, 1999.
- [4] WHO, *Guidelines for Drinking-Water Quality, Vol. 1, Recommendations*, 4<sup>th</sup> ed. Geneva: World Health Organization Press, 2011.
- [5] WHO, *Guidelines for Drinking-Water Quality. Vol. 1, Recommendations*, 3<sup>rd</sup> ed. Geneva: World Health Organization Press, 2004.
- [6] UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations, 2000.
- [7] UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations, 2008.
- [8] WHO, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4<sup>th</sup> ed. Geneva: World Health Organization Press, 2017.
- [9] P. Pisapak and T. Bhongsuwan, "Radon concentration in well water from Namom district (Southern Thailand): a factor influencing cancer risk," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 313, pp. 123–130, 2017.
- [10] T. B. Ajibola, M. M. Orosun, W. A. Lawal, F. C. Akinyose and N. B. Salawu, "Assessment of annual effective dose associated with radon in drinking water from gold and bismuth mining area of Edu, Kwara, North-central Nigeria," *Pollution*, vol. 7, no. 1, pp. 231-240, 2021.
- [11] M. M. Orosun, T. B. Ajibola, O. E. Ehinlafa, A. K. Issah, B. N. Salawu, S. D. Ishaya and A. D. Adewuyi, "Annual effective dose assessment of radon in drinking water from abandoned tin and Cassiterite mining site in Oyun, Kwara State, Nigeria," *Pollution*, vol. 8, no. 1, pp. 181-192, 2022.
- [12] M. M. Orosun, T. B. Ajibola, F. C. Akinyose, O. Osanyinlusi, O. D. Afolayan and M. O. Mahmud, "Assessment of ambient gamma radiation dose and annual effective dose associated with radon in drinking water from gold and lead mining area of Moro, North-Central Nigeria," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 328, pp. 129–136, 2021.
- [13] A. U. Mohammed, A. Z. Aris, M. F. Ramli and N. M. Isa, "A Monte Carlo simulation of unmitigated risk of radon exposure from soil and groundwater around Maiganga Coal Mine, North-Eastern Nigeria. Arab," *Arabian Journal of Geoscience*, vol. 15, 2022.

- [14] M, Moldovan, D. C. Nita, A. Cucos-Dinu, T. Dicu, N. Bican-Brisan and C. Cosma, "Radon concentration in drinking water and supplementary exposure in Baita-Steii mining area, Bihor county (Romania)," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 158, no. 4, pp. 447-452, 2014.
- [15] T. A. Przylibski, J. Gorecka, A. Kula, L. Fijałkowska-Lichwa, K. Zagózdzon, P. Zagózdzon, W. Miśta and R. Nowakowski, "<sup>222</sup>Rn and <sup>226</sup>Ra activity concentrations in groundwaters of southern Poland: New data and selected genetic relations," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 301, pp. 757-764, 2014.
- [16] กรมทรัพยากรธรณี, *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดสุราษฎร์ธานี*. กรุงเทพมหานคร: โอเด็ย สแควร์, 2550.
- [17] M. P. Campos, L. J. P. Costa, M. B. Nisti and B. P. Mazzilli. "Phosphogypsum recycling in the building materials industry: Assessment of the radon exhalation rate," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 172, pp. 232-236, 2017.
- [18] J. S. Duval, "Indoor radon prediction using gamma-ray spectrometric data," *EOS, Transactions American Geophysical Union*, vol. 70, pp. 496-502, 1988.
- [19] Durrige Company, (2012), RAD7 - RAD H<sub>2</sub>O, Radon in Water Accessory, Owner's Manual, [Online]. Available: <http://www.durrige.com>.
- [20] K. Titipornpun, P. Komsan, S. Tohsuemaee and N. Sukgree, "Risk assessment of radon concentrations in water of the Tapi River nearby the Tapi Estuary of Bandon Bay, Muang District, Surat Thani Province," *Srinakharinwirot Science Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 12-28, 2021.
- [21] M. J. McPherson, "Radiation and radon gas," in *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Berlin: Springer Science & Business Media, 1993, pp. 457-487.
- [22] S. Suresh, D. R. Rangaswamy, E. Srinivasa and J. Sannappa, "Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, pp. 12-26, 2020.
- [23] M. Mostafa, M. A. Olaoye, A. K. Ademola, O. A. Jegede, A. A. Saka and H. Khalaf, "Measurement of radon concentration in water within Ojo Axis of Lagos State, Nigeria," *Analytica*, vol. 3, pp. 325-334, 2022.
- [24] S. Raksawong, P. Sola, P. Tampraserd, K. Macha, S. Khonman and C. Somingmee, "Measurement of radon concentrations and effective dose assessment in groundwater from Kamphaeng-Saen district, Nakhon Pathom province and Ban-Pong district, Ratchaburi province," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1380, 012019, 2019.
- [25] กรมอนามัย, *เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้*. กรุงเทพฯ: กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2563.
- [26] *Fundamentals of Environmental Measurement*, (2014), Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids, [Online]. Available: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>.
- [27] ศิลาวุธ ดำรงศิริ, "น้ำดื่ม เค็มได้แค่ไหน," *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 25, ฉ. 1, 2564.

- [28] วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์, (2560), ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ห้องปฏิบัติการเคมี และ สิ่งแวดล้อม, [ออนไลน์]. จาก: <https://www3.rdi.ku.ac.th>.
- [29] กระทรวงอุตสาหกรรม, (2560), ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจาก โรงงาน พ.ศ. 2560, [ออนไลน์]. จาก: <https://www.mwa.co.th>.
- [30] F. Z. Darabi, M. Rahimi, M. Malakootian and N. Javid, "Studying radon concentration in drinking water resources in Zarand city (Iran) and its villages," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 326, pp. 33-39, 2020.
- [31] A. J. S. C. Pereira, M. D. Pereira, L. J. P. F. Neves, J. M. M. Azevedo and A. B. A. Campos, "Evaluation of groundwater quality based on radiological and hydrochemical data from two Uraniferous regions of Western Iberia: Nisa (Portugal) and Ciudad Rodrigo (Spain)," *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, pp. 2717-2731, 2015.
- [32] S. Suresh, D. R. Rangaswamy, E. Srinivasa and J. Sannappa, "Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, 12-26, 2020.
- [33] M. R. Calin, A. C. Ion, I. Radulescu, C. A. Simion, M. M. Mincu and I. Ion, "Analysis of the radon concentrations in natural mineral and tap water using Lucas cells technique," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 30, no. 3, 370-379, 2022.
- [34] H. Büyüksulu, F. Banu Özdemir, T. Ö. Öge and H. Gökce, "Indoor and tap water radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) concentration measurements at Giresun University campus areas," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 139, pp. 285-291, 2018.
- [35] แก้วชนก แสนเสนาะ, ชลธิชา จันทร์กระจ่าง, สุภารัตน์ สุขเม่า และกนกกานต์ ฐิติภรณ์พันธ์, "การประเมินความเสี่ยงของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่โดยรอบเหมืองแร่เก่า ตำบลเพิ่มพูนทรัพย์ อำเภอ บ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี," ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไปสัมพันธ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเขตภูมิศาสตร์ภาคใต้ ครั้งที่ 23*, สุราษฎร์ธานี, 2567, น. 16-32.