

การประเมินปริมาณรังสียังผลรายปีที่ได้รับจากแก๊สเรดอนปนเปื้อนในน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภค
บริโภคในพื้นที่น้ำพุร้อนเค็มควนสระ อำเภอบะเหลียน จังหวัดตรัง ภาคใต้ของประเทศไทย

Assessment of Annual Effective Radiation Dose from Radon Gas Contamination in Hot
Spring Water and Domestic Water in the Khuan Sa Hot Spring Area, Palian District,
Trang Province, Southern Thailand

กนกวรรณ อินแฉล้ม¹ ณิชารีย์ วังขุนพรหม¹ อาริสสา จันตุต¹ อรณัฐ อารง¹ อารีญา ศรีรักษา¹ พัจรี อามิง¹

กชกร เพ็งศรี² และกนกกานต์ ฐิติภรณ์พันธ์^{2*}

Kanokwan Inchalaem¹, Nicharee Wangkunphom¹, Arrisa Juntud¹, Orranut Arong¹, Areeya Sriraksa¹,

Fajree Aming¹, Kotchakorn Pengsri² and Kanokkan Titipornpun^{2*}

¹คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

¹Faculty of Education, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

²Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani

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

(Received: January 13, 2025, Revised: May 5, 2025, Accepted: June 20, 2025)

บทคัดย่อ

น้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอบะเหลียน จังหวัดตรัง ได้ถูกค้นพบมานานกว่า 100 ปี หลังจากนั้น ได้
งบประมาณจากโครงการไทยนิยมยั่งยืน เพื่อนำมาพัฒนาและขยายบ่อน้ำพุร้อนเค็ม ซึ่งพร้อมให้บริการแก่ประชาชน
นักท่องเที่ยว และผู้มาใช้บริการทุกคนในการแช่น้ำแร่จากบ่อน้ำพุร้อนเค็มเพื่อบำบัดโรค อย่างไรก็ตาม แหล่งน้ำพุร้อนเค็ม
ซึ่งเกิดจากรอยแยกของเปลือกโลก และมีโอกาสที่แก๊สเรดอนจะฟุ้งกระจายจากน้ำสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความ
เสี่ยงต่อสุขภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และตรวจวัดระดับความเข้มข้นของแก๊ส
เรดอนในน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค รวมทั้งประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับต่อปีสำหรับการกินและ
การหายใจ ในการศึกษาครั้งนี้ มีตัวอย่างน้ำ ทั้งหมด 27 ตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากน้ำพุร้อนเค็ม และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ซึ่ง
ได้แก่ น้ำประปา และน้ำบาดาล ผลการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง สภาพนำไฟฟ้า
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำพุร้อนเค็ม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ
 42.8 ± 1.42 °C, 6.67 ± 0.46 , 1.52 ± 0.03 S/m, 8.53 ± 0.18 g/L, 8.84 ± 0.18 ppt และ 8.16 ± 0.53 mg/L ตามลำดับ ส่วน
ในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 27.2 ± 0.67 °C, 7.06 ± 0.46 , 0.02 ± 0.01 S/m, 0.10 ± 0.06 g/L,
 0.10 ± 0.06 ppt และ 7.89 ± 0.20 mg/L ตามลำดับ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนเค็ม และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค มี
ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ 33.48 ± 10.11 Bq/L ซึ่งสูงเกินค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1
Bq/L) อย่างไรก็ตาม เมื่อประมาณค่าความเข้มข้นแก๊สเรดอนจากน้ำในพื้นที่ศึกษาสู่ชั้นบรรยากาศ พบว่า มีค่าเฉลี่ย
 3.35 ± 1.01 Bq/m³ ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของแก๊สเรดอนภายนอกอาคารทั่วโลก (15 Bq/m³) นอกจากนี้ เมื่อประเมินปริมาณ
รังสีเฉลี่ยที่ได้รับต่อปี 92.88 ± 6.95 μSv/y อยู่ในช่วงระดับอ้างอิง (100 μSv/y) และค่าปริมาณรังสีภูมิหลังอยู่ที่ระดับ
 1.50 ± 0.19 mSv/y

คำสำคัญ: เรดอน, ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี, น้ำพุร้อนเค็ม, เครื่องวัด RAD7-RAD H₂O

ABSTRACT

The Khuan Sra Salty Hot Spring, located in Suso Subdistrict, Palian District, Trang Province, was discovered over 100 years ago. Later, it received funding from the Thai Niyom Yangyuen (Sustainable Thai-ism) project for development and expansion, making it available to the public, tourists, and visitors for mineral water soaking therapy. However, this salty hot spring originates from fissures in the Earth's crust, which may allow radon gas to diffuse from the water into the atmosphere, posing potential health risks. This study aimed to examine the physical characteristics and measure radon gas concentrations in the salty hot spring and domestic water (including tap water and groundwater), as well as assess the annual effective radiation dose from ingestion and inhalation. A total of 27 water samples were collected from the salty hot spring and domestic water sources. The results revealed that the average values for temperature, pH, electrical conductivity, total dissolved solids (TDS), salinity, and dissolved oxygen (DO) in the salty hot spring were $42.8 \pm 1.42^\circ\text{C}$, 6.67 ± 0.46 , 1.52 ± 0.03 S/m, 8.53 ± 0.18 g/L, 8.84 ± 0.18 ppt, and 8.16 ± 0.53 mg/L, respectively. In contrast, domestic water sources had average values of $27.2 \pm 0.67^\circ\text{C}$, 7.06 ± 0.46 , 0.02 ± 0.01 S/m, 0.10 ± 0.06 g/L, 0.10 ± 0.06 ppt, and 7.89 ± 0.20 mg/L, respectively. The average radon concentration in both the salty hot spring and domestic water was 33.48 ± 10.11 Bq/L, exceeding the standard limit for radon contamination in drinking water (11.1 Bq/L). However, when estimating radon diffusion from the water into the atmosphere, the average concentration was 3.35 ± 1.01 Bq/m³, which is below the global outdoor average (15 Bq/m³). Additionally, the estimated average annual radiation dose was 92.88 ± 6.95 $\mu\text{Sv/y}$, within the reference level (100 $\mu\text{Sv/y}$), while the background radiation level was 1.50 ± 0.19 mSv/y.

Keywords: Radon, annual effective doses, salt hot spring, RAD7-RAD H₂O

บทนำ

แก๊สเรดอน (Rn-222) เป็นผลผลิตกัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัวอย่างต่อเนื่องของธาตุยูเรเนียม (U-238) ทอเรียม (Th-230) และเรเดียม (Ra-226) หินและดิน แก๊สเรดอน ซึ่งมีองไม่เห็น ไม่มีกลิ่น ได้ซึมขึ้นมาจากพื้นดิน และแพร่กระจายไปในอากาศในบางพื้นที่ ขึ้นอยู่กับธรณีวิทยาในพื้นที่ แก๊สเรดอนละลายในน้ำใต้ดินและสามารถปลดปล่อยออกมาในอากาศได้เมื่อใช้น้ำ [1] ครึ่งชีวิตของแก๊สเรดอนมีค่าเท่ากับ 3.82 วัน นิวเคลียสของแก๊สเรดอนสลายตัวภายในเวลาเพียงไม่กี่นาที ปล่อยรังสีแอลฟาออกมา ซึ่งอาจทำลายเนื้อเยื่อของมนุษย์ได้ แก๊สเรดอนเป็นแก๊สเฉื่อย ซึ่งสามารถลอยอยู่ในอากาศได้นาน เมื่อสลายตัว มีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา และมีผลกระทบสูง เมื่อการสลายตัวเกิดขึ้นภายในร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อหายใจเอาแก๊สเรดอนเข้าไปสู่อปอด เรดอนเกิดการสลายตัวภายในปอด อนุภาคแอลฟาสามารถทำลายเนื้อเยื่อภายในปอด และนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งสลายตัวอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแก๊สเรดอนที่ตกค้างอยู่ในปอดเหล่านั้นได้ปลดปล่อยรังสีอื่น ๆ เช่น อนุภาค แอลฟา บีตา หรือ แกมมาออกมา ซึ่งเพิ่มศักยภาพการทำลายเนื้อเยื่อภายในปอดได้ ถ้าได้รับในปริมาณมากและเวลานาน อาจเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งได้ [2] แก๊สเรดอนสามารถเข้าสู่ตัวอาคารได้โดยผ่านรอยแตกร้าวบนพื้น ช่องว่างระหว่างโครงสร้าง หน้าต่าง ท่อระบายน้ำ หรือ ช่องว่างรอบ ๆ สายเคเบิล และท่อ มักพบเจอแก๊สเรดอนบริเวณภายนอกอาคารในปริมาณน้อยมาก แต่แก๊สเรดอนสามารถสะสมในพื้นที่ ซึ่งไม่มีการระบายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่สำคัญ แก๊สเรดอนสามารถละลายและสะสมในแหล่งน้ำใต้ดิน เช่น บ่อน้ำ หรือ บ่อน้ำที่เจาะในพื้นที่ทางธรณีวิทยาที่มียูเรเนียมสูง แก๊สเรดอนในน้ำอาจถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศในระหว่างการใช้งานน้ำตามปกติ เช่น การอาบน้ำ หรือ ชักผ้า [3] องค์การอนามัยโลก (WHO) แนะนำว่า ค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำบริโภคไม่ควรเกิน 100 Bq/L (ประมาณ 2,703 pCi/L) และเกณฑ์การได้รับปริมาณรังสีรายบุคคล (Individual Dose Criterion: IDC) เนื่องจากน้ำดื่มอยู่ที่ระดับ 100 $\mu\text{Sv/y}$ (0.1 mSv/y) [4] มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊ส

เรดอนในน้ำ เช่น ในประเทศเกาหลีใต้ ได้มีวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำใต้ดินเค็มและน้ำพุบนเกาะ Jeju โดยมีค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำใต้ดินเค็มอยู่ในช่วง 0.40-3.77 Bq/L และในน้ำพุอยู่ในช่วง 0.65-20.65 Bq/L สำหรับค่ารังสีที่มีผลต่อปีสำหรับกลุ่มอายุต่าง ๆ ที่เกิดจากการบริโภคน้ำใต้ดินเค็ม มีค่าตั้งแต่ 1.01-9.64 $\mu\text{Sv/y}$ และในน้ำพุร้อน มีค่าอยู่ในช่วง 1.7-52.8 $\mu\text{Sv/y}$ [5] ในภาคตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไนจีเรีย มีการศึกษา พบว่า ค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำใต้ดิน 35.90 ± 38.40 Bq/L [6] นอกจากนั้น ยังมีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำจากพื้นที่ชายฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของคาบสมุทรมาเลเซีย โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ ได้แก่ น้ำใต้ดิน น้ำพุร้อนเค็ม ทะเลสาบ แม่น้ำ น้ำทะเล และน้ำประปา ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนอยู่ในช่วง 0.07 ± 0.12 ถึง 187 ± 12 Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ย 21 ± 12 Bq/L ความเข้มข้นสูงสุด พบในน้ำพุร้อนเค็ม ที่มีค่าเฉลี่ย 99 ± 6 Bq/L ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำสุด พบในน้ำประปา โดยมีค่าเฉลี่ย 1.95 ± 0.61 Bq/L ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำทุกประเภทที่เก็บตัวอย่างนั้นต่ำกว่าค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่กำหนดไว้ที่ 100 Bq/L ค่าปริมาณรังสีที่มีผลจากการสูดดมและการบริโภคน้ำที่มีเรดอน มีค่าเฉลี่ยที่ 4.45 $\mu\text{Sv/y}$ [7] ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยตามแนวทางของ WHO ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 100 $\mu\text{Sv/y}$

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำ ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอน ความเข้มข้นแก๊สเรดอนจากน้ำในพื้นที่ศึกษาสู่ชั้นบรรยากาศ และประเมินปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับต่อปีสำหรับการกิน และการหายใจจากแหล่งน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในบริเวณพื้นที่โดยรอบน้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง เนื่องจากเป็นพื้นที่ซึ่งเปิดให้บริการแก่ประชาชน และยังไม่มีการตรวจวัดค่าดังกล่าว ซึ่งแนวทางนี้สามารถใช้ประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ศึกษาดังกล่าว และสามารถพัฒนาเป็นฐานข้อมูลสารสนเทศให้กับประชาชน และสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวก และง่ายดาย นอกจากนี้ ยังเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม รวมถึงหน่วยงานซึ่งดูแลเรื่องเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ผลการวิจัยนี้ ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำ การควบคุมความเสี่ยงจากมลพิษในสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน

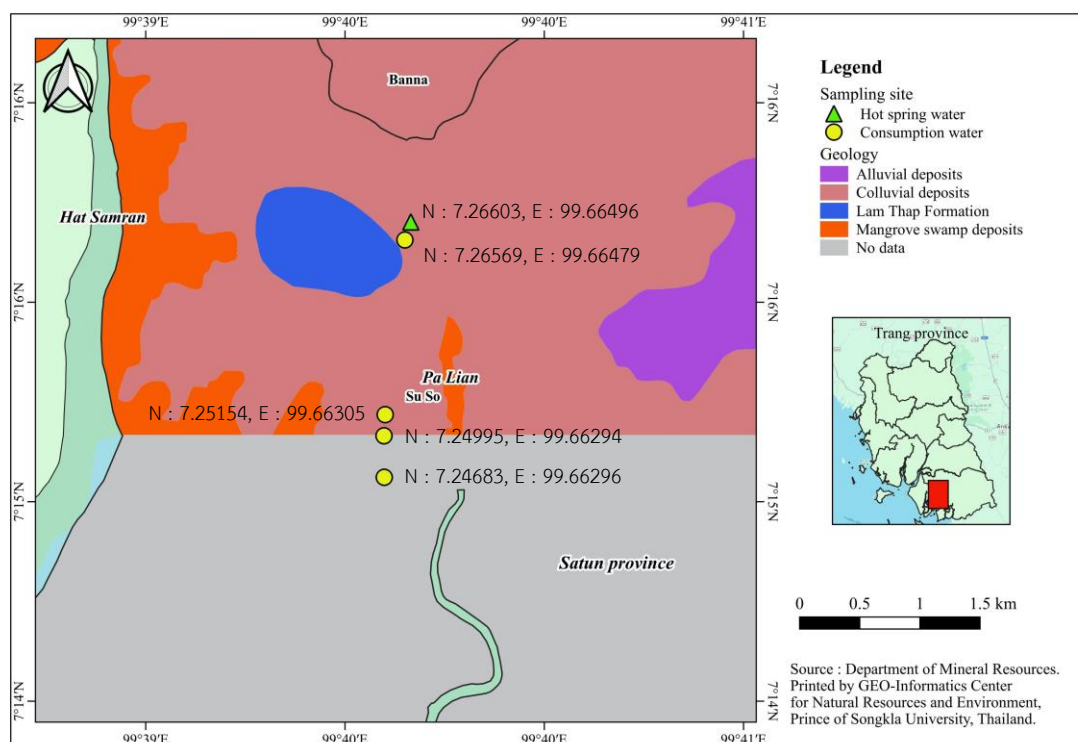
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในบริเวณพื้นที่โดยรอบน้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง
2. ตรวจวัดและวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอน จากน้ำในพื้นที่ศึกษาสู่ชั้นบรรยากาศในน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค
3. ประเมินปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับต่อปี เนื่องจากแก๊สเรดอนสำหรับการกิน การหายใจ และโดยรวม ในพื้นที่ศึกษา

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่บ่อน้ำพุร้อนเค็มควนสระ บ้านท่าคลอง ตั้งอยู่ที่หมู่ที่ 4 ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง ในการเก็บตัวอย่าง แบ่งเป็น การเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำพุร้อนเค็ม โดยเก็บตัวอย่างน้ำ ทั้งหมด 15 ตัวอย่าง ซึ่งมีจำนวน 5 บ่อ บ่อละ 3 จุด และเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในบริเวณพื้นที่โดยรอบน้ำพุร้อนเค็ม โดยเลือกศึกษาจากแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับอุปโภคบริโภคของประชาชนในบริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วย น้ำบาดาล (6 ตัวอย่าง) น้ำประปา (6 ตัวอย่าง) โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 27 ตัวอย่าง และน้ำดื่มบรรจุขวด จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับชุดควบคุมโดยน้ำแต่ละประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยน้ำพุร้อนเค็มเป็นน้ำจากแหล่งกำเนิดใต้ดิน และน้ำที่สูบจากแหล่งกำเนิด

เพื่อให้บริการแก่ประชาชนที่มาใช้บริการ สำหรับน้ำบาดาลเป็นน้ำที่ประชาชนในหมู่บ้านขาดไว้ปล่อยกระจายไปตามบ้านเรือน เพื่อให้ประชาชนในหมู่บ้านใช้อุปโภคบริโภค โดยเปิดใช้เป็นช่วงเวลา ซึ่งใช้แทนน้ำประปาภูมิภาค สำหรับหมู่บ้านที่น้ำประปาภูมิภาคไม่สามารถจ่ายน้ำไปถึงได้ ประชาชนได้ใช้น้ำซึ่งผลิตจากผิวดิน ส่วนน้ำดื่มบรรจุขวด ซึ่งกำหนดให้เป็นชุดควบคุมได้มาจากแหล่งน้ำดื่มที่ผลิตใช้ใน อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง โดยส่วนใหญ่ประชาชนในบริเวณพื้นที่ศึกษาใช้น้ำดื่ม ได้บันทึกพิกัดภูมิศาสตร์ (geographic coordinate system) ของพื้นที่เก็บตัวอย่างแต่ละจุด โดยใช้แอปพลิเคชัน Maps จากนั้น นำข้อมูลมาเขียนแผนที่โดยศูนย์วิจัยสารสนเทศภูมิศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม คือ บริเวณน้ำพุร้อนเค็มควนสระ และสัญลักษณ์วงกลม คือ พื้นที่โดยรอบของแหล่งน้ำพุร้อนเค็มควนสระ



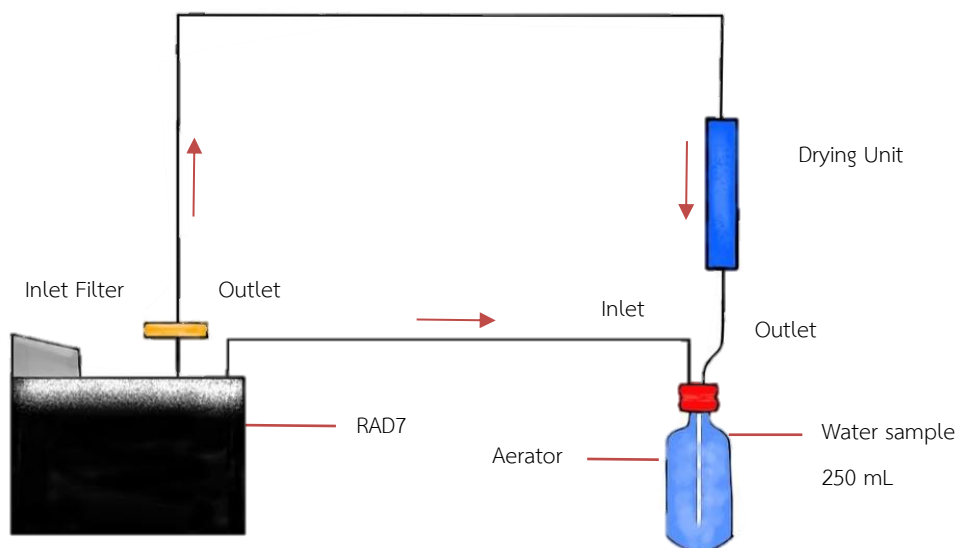
ภาพที่ 1 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่าง โดยมีน้ำในน้ำพุร้อนเค็ม (สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม) และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค (สัญลักษณ์วงกลม) ในบริเวณพื้นที่ศึกษาน้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

การเก็บตัวอย่างน้ำ ทำได้โดยใช้ขวดแก้วสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำที่มีขนาด 250 ml ในการเก็บน้ำจากบ่อน้ำพุร้อนเค็ม ได้เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ส่วนน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคบริเวณโดยรอบน้ำพุร้อนเค็ม ต้องเปิดน้ำทิ้งก่อนประมาณ 5 นาที เพื่อกำจัดน้ำที่ค้างในท่อและสายยาง ซึ่งต้องไม่ให้เกิดฟองอากาศภายในขวด หลังจากนั้น ปิดฝาขวดให้แน่นสนิท และใช้พาราฟิล์มปิดผลิตรอบฝาขวดให้แน่นขึ้นอีกชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้มีอากาศเข้าและออกจากขวด [8] ในขณะที่เก็บตัวอย่างน้ำพุร้อนเค็ม ได้ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำด้วยเทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณรังสีกัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีกัมมันตภาพรังสี ยี่ห้อ Ranger รุ่น CE0197 และในขณะที่เก็บตัวอย่างน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในบริเวณพื้นที่โดยรอบน้ำพุร้อนเค็มนั้น ได้ตรวจวัดปริมาณรังสีกัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีกัมมันตภาพรังสีรุ่นเดียวกัน นอกจากนี้ ค่า pH ค่าสภาพนำไฟฟ้า

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ได้ดำเนินการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องวัดคุณภาพน้ำ HACH รุ่น HQ40D ทั้งนี้ ได้ดำเนินการตรวจวัดปริมาณเหล่านี้ หลังจากตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำเสร็จสิ้นแล้ว

ขั้นตอนการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ

1. เตรียมเครื่องวัดทุกชนิดให้พร้อม เพื่อนำมาใช้งาน โดยเริ่มจากการต่ออุปกรณ์ของวงจรตามระบบการวัดความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำ เครื่องวัด RAD7-RAD H₂O ดังภาพที่ 2
2. เริ่มกระบวนการวัด โดยการไล่ความชื้นภายในเครื่องวัดจากขวดแก้วเปล่าขนาด 250 ml ต่อเข้ากับระบบวัด ดำเนินการเปิดเครื่องวัด และเครื่องพิมพ์ (Printer) ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องวัด เพื่อให้ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีค่าไม่เกิน 10 %
3. ดำเนินการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในตัวอย่างน้ำ โดยเปลี่ยนขวดแก้วเปล่ามาเป็นขวดที่มีตัวอย่างน้ำ แล้วต่อเข้ากับระบบวัด การตรวจวัดในแต่ละตัวอย่าง ระบบดำเนินการวัดประมาณ 20 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการวัด แสดงผลการวัดออกทางเครื่องพิมพ์ ซึ่งมีหน่วยเป็น Bq/m³ อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Capture เพื่อดาวนโหลดข้อมูลความเข้มข้นแก๊สเรดอนจากการวัดของแต่ละตัวอย่างอย่างละเอียด และนำมาวิเคราะห์ผลในขั้นตอนลำดับถัดไป [8]



ภาพที่ 2 ระบบวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำด้วยเครื่องวัด RAD7-RAD H₂O

เมื่อได้ข้อมูลการวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ จากเครื่องวัด RAD7-RAD H₂O หรือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่ตรวจสอบแล้ว หลังจากนั้น นำมาคำนวณย้อนกลับเป็นความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง โดยใช้สมการ (1) [7]

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

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่ตรวจสอบ (Bq/L) C_{Rn} คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง (Bq/L) λ คือ อัตราการสลายตัวของเรดอนมีค่าเท่ากับ 2.1×10^{-6} dps (disintegration per second) [9] และ t เป็นเวลาที่นับย้อนกลับจากเวลาที่ตรวจสอบไปยังเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการกิน (annual effective dose for ingestion, D_{ing}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [10-11]

$$D_{ing} \text{ (Sv/y)} = C_{Rn} \times CF \times C_w \quad (2)$$

เมื่อ CF (effective dose coefficient factor for ingestion) คือ ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเรดอนที่มีผลมาจากการบริโภคน้ำมีค่าเท่ากับ 3.5×10^{-9} Sv/Bq และค่า C_w คือ ปริมาณการบริโภคน้ำ โดยเทียบกับน้ำประปาของประชากรโดยประมาณเท่ากับ 60 L/y [10] ส่วนปริมาณน้ำดื่มต่อปีสำหรับชุดควบคุม (น้ำดื่มบรรจุขวด) ในแต่ละช่วงวัย โดยมีปริมาณน้ำที่บริโภค 730 L/y [11]

ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการหายใจ (annual effective dose for inhalation, D_{inh}) ซึ่งมีหน่วยเป็น Sv/y สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [10-14]

$$D_{inh} \text{ (Sv/y)} = C_{Rn} \times R \times F \times E \times T \quad (3)$$

เมื่อ R คือ อัตราส่วนของแก๊สเรดอนในอากาศต่อเรดอนในน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-4} F คือ ปัจจัยการแปลงรังสีของการสัมผัสแก๊สเรดอน มีค่าเท่ากับ 9×10^{-6} Sv/(hxBq/L) E คือ ปัจจัยความสมดุลภายในอาคารระหว่างแก๊สเรดอนกับผลผลิตการสลาย (decay products) มีค่าเท่ากับ 0.4 และ T เป็นเวลาภายในอาคารต่อปีประมาณ 7000 h/y

ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีโดยรวม (total annual effective dose, D_t) เป็นผลรวมของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากการกิน และการหายใจ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) [15-17]

$$D_t \text{ (Sv/y)} = D_{ing} + D_{inh} \quad (4)$$

ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนจากน้ำสู่บรรยากาศ (Rn -222 activity concentration contributed from water to the atmosphere, C_{atm}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5) [18]

$$C_{atm} \text{ (Bq/m}^3\text{)} = C_{Rn} \times TF \quad (5)$$

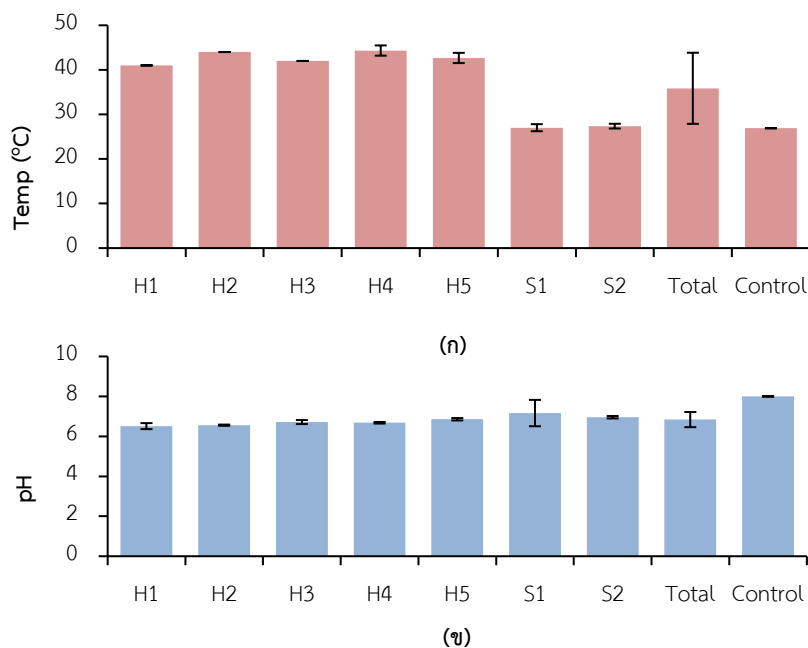
เมื่อ TF คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทแก๊สเรดอนจากน้ำสู่อากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-4}

ในการวิเคราะห์ทางสถิติ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทำได้โดยใช้ independent samples t-test สำหรับ 2 กลุ่ม และ One-way ANOVA สำหรับมากกว่า 2 กลุ่ม โดยต้องตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลก่อนวิเคราะห์ การวิเคราะห์สามารถทำได้ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics 23 ที่มีเวอร์ชันทดลองใช้ฟรี โดยการรายงานผลได้รวมค่านัยสำคัญ (p-value) และการแปลความ

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

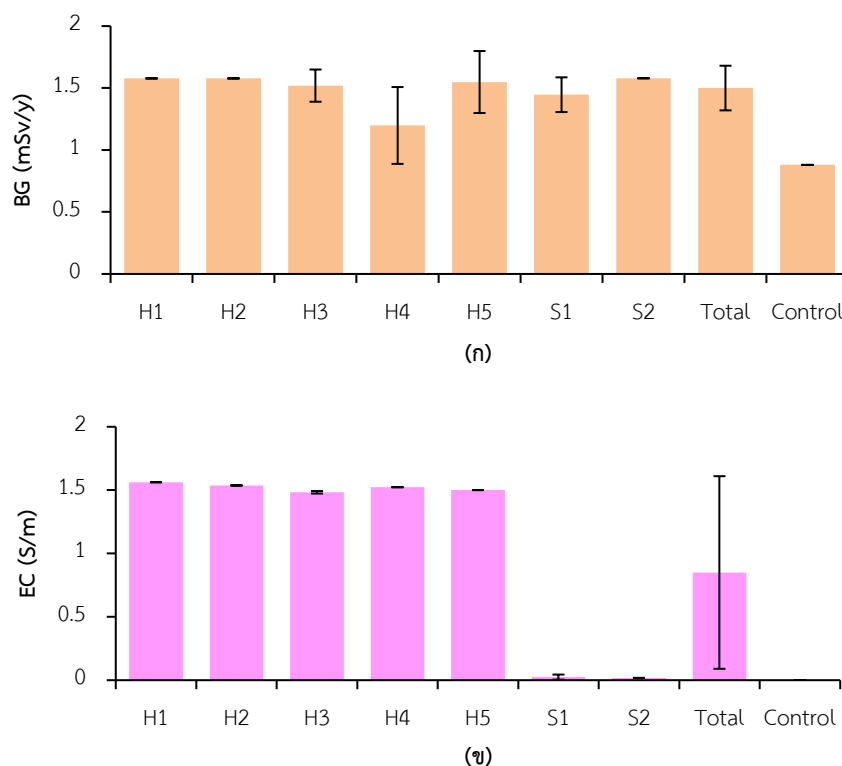
ผลการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของน้ำในบริเวณพื้นที่แหล่งน้ำพุร้อนเค็ม และบริเวณโดยรอบแหล่งน้ำพุร้อนเค็ม ตำบลสุโสะ อำเภอยะหริ่ง จังหวัดตรัง จำแนกแหล่งน้ำออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำพุร้อนเค็ม น้ำประปา และน้ำบาดาล ซึ่งมีจำนวนตัวอย่าง (n) รวมทั้งหมด 27 ตัวอย่าง และน้ำดื่มบรรจุขวด (ชุดควบคุม) จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีปริมาณทางกายภาพของน้ำที่ศึกษาจำนวน 6 ปริมาณ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature, Temp) ค่า pH ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) ค่าความเค็ม (Salinity) และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) นอกจากนี้ ได้ศึกษาปริมาณรังสีภูมิหลัง (Background Radiation, BG) ซึ่งแสดงด้วยค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยมีสัญลักษณ์ ดังนี้ น้ำพุร้อนจากบ่อพัก 1 แทนด้วย H1 น้ำพุร้อนจากบ่อพัก 2 แทนด้วย H2 น้ำพุร้อนจากบ่อแห่งหนึ่ง แทนด้วย H3 น้ำพุร้อนจากบ่อ

พัก 4 แทนด้วย H4 และน้ำพุร้อนจากบ่อแช่ขาย แทนด้วย H5 ส่วนน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ได้แก่ น้ำบาดาล แทนด้วย S1 และ น้ำประปา แทนด้วย S2 นอกจากนี้ Total แทนตัวอย่างน้ำทั้งหมด และ Control แทนชุดควบคุมที่เป็นตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวด



ภาพที่ 3 กราฟแสดง (ก) ค่าอุณหภูมิ และ (ข) ความเป็นกรด-ด่างของน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ

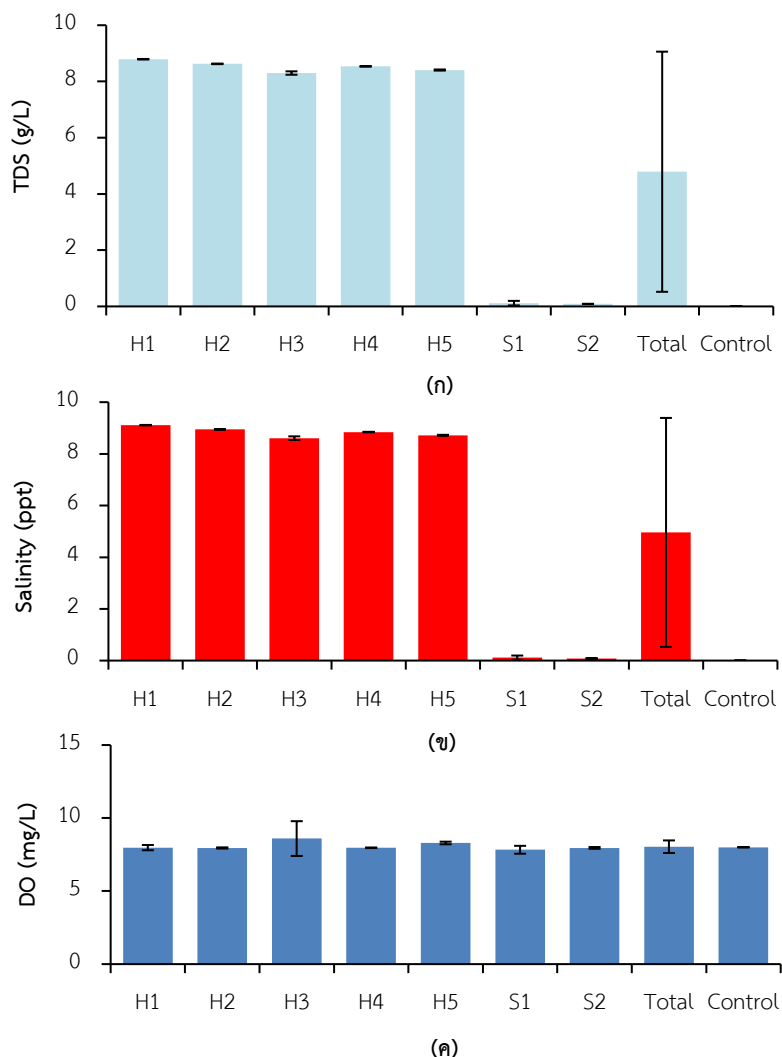
เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง อุณหภูมิของตัวอย่างน้ำ จำนวน 27 ตัวอย่าง พบว่า อุณหภูมิมีค่าต่ำสุดและสูงสุด คือ น้ำบาดาล (S1) และน้ำพุร้อนจากบ่อพัก 4 (H4) อยู่ในระดับ 27.02 ± 0.79 °C และ 44.33 ± 1.15 °C ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 (ก) โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมของตัวอย่างน้ำในพื้นที่ศึกษาอยู่ที่ระดับ 35.86 ± 7.98 °C ในขณะที่ชุดควบคุม มีอุณหภูมิเฉลี่ย 26.90 ± 0.00 °C ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ แต่ละแหล่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p > 0.05$) ดังภาพที่ 3 (ข) แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรวม ทั้งหมดจำนวน 27 ตัวอย่าง พบว่า อยู่ในระดับ 6.84 ± 0.38 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของชุดควบคุม จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 8.00 ± 0.00 พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) ทั้งนี้ อยู่ในช่วงของระดับมาตรฐานน้ำดื่ม (6.5-8.5) [19] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณรังสีภูมิหลัง และสภาพนาไฟฟ้า จำนวน 27 ตัวอย่าง พบว่า ค่าปริมาณรังสีภูมิหลังมีค่าต่ำสุดได้มาจากน้ำพุร้อนจากบ่อพัก 4 (H4) อยู่ในระดับ 1.20 ± 0.3 mSv/y และสูงสุด ได้มาจากน้ำบ่อพัก 1 (H1) น้ำพุร้อนจากบ่อพัก 2 (H2) และน้ำประปา (S2) ที่ระดับ 1.58 ± 0.00 mSv/y ดังภาพที่ 4 (ก) โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีภูมิหลังในพื้นที่ศึกษาอยู่ที่ระดับ 1.50 ± 0.19 mSv/y และค่าเฉลี่ยของชุดควบคุมอยู่ที่ระดับ 0.88 ± 0.00 mSv/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก (2.4 mSv/y) [10] ส่วนค่าสภาพนาไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุด คือ น้ำประปา (S2) และน้ำพุร้อนจากบ่อพัก 1 (H1) อยู่ในระดับ 0.02 ± 0.00 S/m และ 1.56 ± 0.002 S/m ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่าสูงสุดที่พบในน้ำพุร้อนมีค่าสูงกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัย (0.08-0.1 S/m) [20] ดังภาพที่ 4 (ข) นอกจากนี้ พบว่า ค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับ 0.85 ± 0.76 S/m ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยของสภาพนาไฟฟ้าในระดับต่ำ นั่นคือ อยู่ในระดับ 7.91 ± 0.00 mS/cm



ภาพที่ 4 กราฟแสดง (ก) ค่าปริมาณรังสีภูมิหลัง และ (ข) สภาพนำไฟฟ้าของน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ความเค็ม และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ มีค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุด คือ น้ำประปา (S2) และน้ำพุร้อนจากบ่อพัก 1 (H1) อยู่ใน ระดับ 0.09 ± 0.00 g/L และ 8.79 ± 0.01 g/L ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 (ก) เห็นได้ว่าค่าสูงที่สุดในน้ำพุร้อนสูงกว่าระดับ มาตรฐานที่ระดับ (0.5 g/L) [19] โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำรวมอยู่ที่ระดับ 4.79 ± 4.27 g/L ในขณะที่ ชุดควคุม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 0.004 ± 0.000 g/L ส่วนความเค็ม มีค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุด คือ น้ำประปา (S2) และน้ำพุร้อน จากบ่อพัก 1 (H1) อยู่ในระดับ 0.08 ± 0.01 ppt และ 9.11 ± 0.01 ppt ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 (ข) โดยแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA) ซึ่งเห็นได้ว่า น้ำพุร้อนมีความเค็มสูงกว่าระดับมาตรฐานที่ระดับ 0.5 ppt [21] โดยค่าความเค็มเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับ 4.96 ± 4.43 ppt ในขณะที่ชุดควคุมนั้น ไม่สามารถวัดได้ เมื่อพิจารณา ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของน้ำจากแหล่งต่าง ๆ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ 8.04 ± 0.43 mg/L ซึ่งอยู่ในช่วงของระดับมาตรฐาน (5-8 mg/L) [22] และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของชุดควคุม ที่ระดับ 8.00 ± 0.00 mg/L พบว่า ไม่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Independent samples t-test) ดังภาพที่ 5 (ค)

ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำและในอากาศที่ระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ จากพื้นที่ศึกษา จำแนกตาม ประเภทของน้ำ ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 1 โดยระบุค่าต่ำสุด (Min) สูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD) พบว่า C_{Rn} มีค่าระหว่างต่ำสุดถึงสูงสุดอยู่ที่ 15.38 ± 2.83 , 50.58 ± 3.66 และมีค่าเฉลี่ย 33.48 ± 0.58 Bq/L ซึ่ง มีค่าสูงกว่าระดับการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่มที่ระดับ 11.1 Bq/L (300 pCi/L) ซึ่งกำหนดโดย U.S. EPA [20] แต่ต่ำกว่า ระดับอ้างอิงสำหรับน้ำดื่ม (100 Bq/L) ซึ่งแนะนำโดย WHO [4] และ พบว่า C_{atm} มีค่าระหว่างต่ำสุดถึงสูงสุดอยู่ ที่ 1.54 ± 0.28 Bq/m³, 5.06 ± 0.37 Bq/m³ และมีค่าเฉลี่ย 3.35 ± 0.06 Bq/m³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระดับปฏิบัติของแก๊สเรดอน



ภาพที่ 5 กราฟแสดง (ก) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (ข) ความเค็ม และ (ค) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

ภายในอาคารที่ 148 Bq/m^3 [20] และต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกของแก๊สเรดอนภายนอกอาคาร ที่ระดับ 15 Bq/m^3 [10] แสดงให้เห็นว่า แก๊สเรดอนในอากาศที่เกิดจากน้ำอยู่ในระดับต่ำ หากเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่น เช่น ดิน หิน หรือวัสดุก่อสร้าง [20]

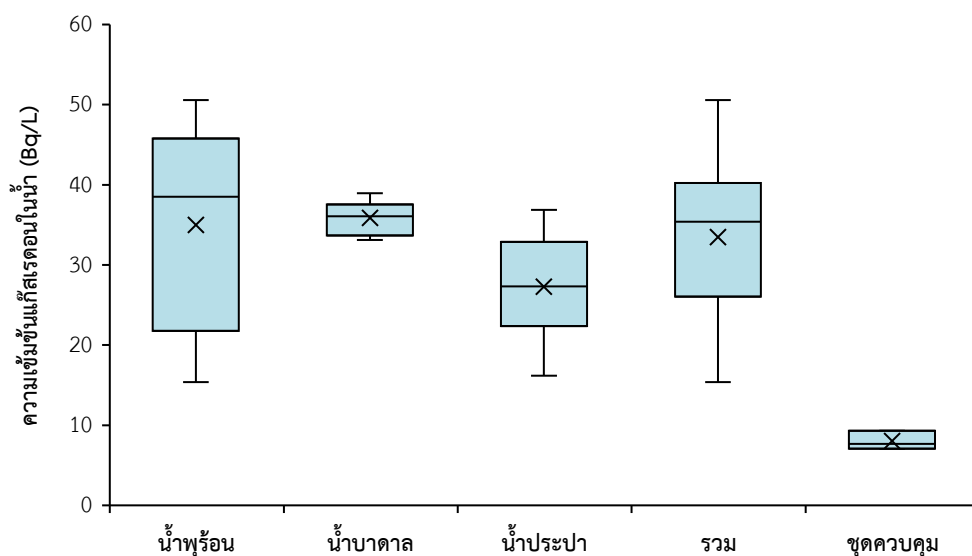
จากการทดสอบการกระจายของข้อมูล (Kolmogorov-Smirnov Normality test, $p > 0.05$) ในตัวอย่างน้ำ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำพุร้อน (15 ตัวอย่าง) น้ำบาดาล (6 ตัวอย่าง) และ น้ำประปา (6 ตัวอย่าง) พบว่า ทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเรดอนในน้ำและเรดอนที่ระเหยสู่บรรยากาศ (ภาพที่ 6 และ 7) ด้วย One-way ANOVA ($p > 0.05$) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างน้ำทั้งสามประเภท อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยรวมของเรดอนในน้ำและเรดอนที่ระเหยสู่บรรยากาศ สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (independent samples t-test, $p < 0.05$)

จากการศึกษาปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีจากแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยน้ำพุร้อน เค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ได้ทำการประเมินค่าการได้รับรังสีผ่านการบริโภคน้ำ (D_{ing}) และทางการหายใจ (D_{inh}) รวมทั้งค่าปริมาณรังสีรวมทั้งหมด (D_t) ผลการศึกษาที่ปรากฏในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลต่อปีจากการบริโภคน้ำอยู่ที่ $7.03 \pm 0.89 \text{ } \mu\text{Sv/y}$ ในขณะที่ค่าจากการหายใจมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $84.37 \pm 10.73 \text{ } \mu\text{Sv/y}$ เมื่อพิจารณา ค่าปริมาณรังสีรวมทั้งหมด พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $92.88 \pm 6.95 \text{ } \mu\text{Sv/y}$

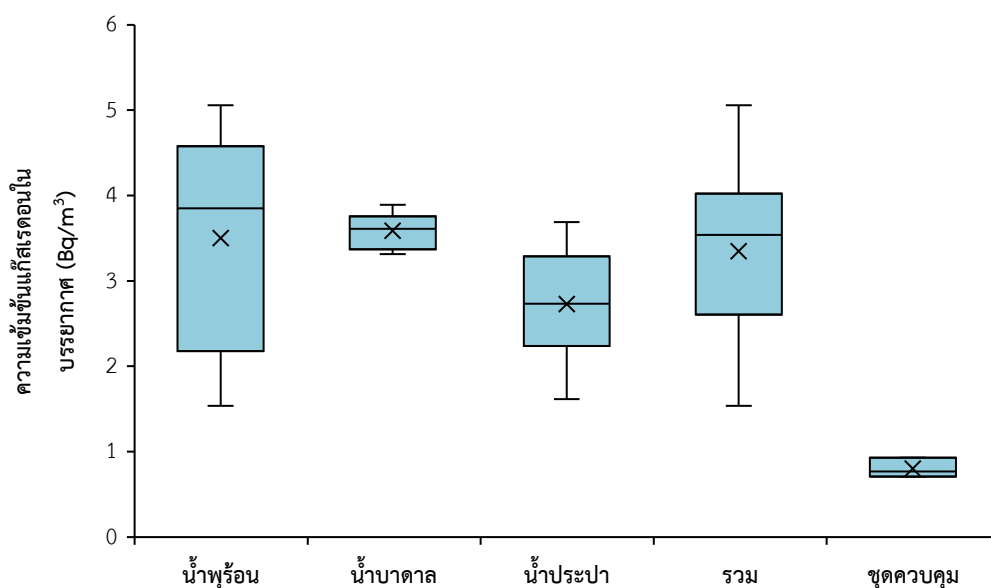
ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ปริมาณรังสีที่ได้รับจากแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำทุกประเภทในพื้นที่ศึกษา มีค่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย เนื่องจากไม่เกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดไว้ที่ระดับ $100 \mu\text{Sv/y}$ [4] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แหล่งน้ำในบริเวณนี้ยังคงมีความปลอดภัยสำหรับการใช้งานทั้งในการบริโภคและการอุปโภค

ตารางที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำและในอากาศที่ระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ จากพื้นที่ศึกษา

ประเภท ของน้ำ	จุดเก็บ ตัวอย่าง	n	C _{Rn} (Bq/L)			C _{atm} (Bq/m ³)		
			Min±SD	Max±SD	Mean±SD	Min±SD	Max±SD	Mean±SD
น้ำพุร้อน เค็ม	H1	3	21.78±1.40	50.58±3.66	36.95±1.18	2.18±0.14	5.06±0.37	3.70±0.12
	H2	3	26.06±2.94	42.08±3.63	34.79±0.35	2.61±0.29	4.21±0.36	3.48±0.03
	H3	3	45.79±3.87	49.04±3.91	47.37±0.02	4.58±0.39	4.90±0.39	4.74±0.00
	H4	3	31.80±3.51	43.69±4.04	38.58±0.27	3.18±0.35	4.37±0.40	3.86±0.03
	H5	3	15.38±2.83	20.55±3.29	17.32±0.25	1.54±0.28	2.05±0.33	1.73±0.03
	รวม	15	15.38±2.83	50.58±3.66	35.00±0.67	1.54±0.28	5.06±0.37	3.50±0.07
น้ำสำหรับ อุปโภค	S1	6	33.13±3.02	38.93±4.05	35.87±0.44	3.31±0.30	3.89±0.41	3.59±0.04
	S2	6	16.17±2.28	36.89±8.79	27.28±0.51	1.62±0.23	3.69±0.38	2.73±0.05
บริโภค	รวม	12	16.17±7.80	38.93±4.05	31.58±0.48	1.62±0.23	3.89±0.41	3.16±0.05
รวมทั้งหมด		27	15.38±2.83	50.58±3.66	33.48±0.58	1.54±0.28	5.06±0.37	3.35±0.06
ชุดควบคุม		3	7.10±2.40	9.30±2.70	8.03±1.14	0.71±0.24	0.93±0.27	0.80±0.11
ระดับอ้างอิง		11.1 Bq/L [20]			15 Bq/m ³ [10]			
		100 Bq/L [4]						



ภาพที่ 6 ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค

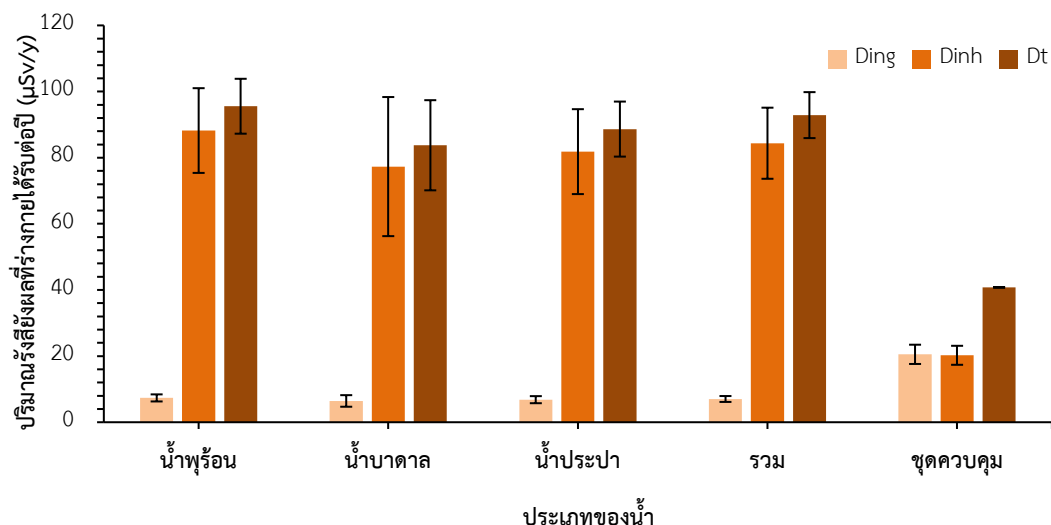


ภาพที่ 7 ความเข้มข้นเรดอนที่ระเหยสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 2 ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการกินและการหายใจแก๊สเรดอนที่ปนเปื้อนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

จุดเก็บตัวอย่าง (n)	ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี ($\mu\text{Sv/y}$)		
	D_{ing}	D_{inh}	D_t
H1 (3)	7.76 $\pm$ 3.04	93.12 $\pm$ 36.45	100.88 $\pm$ 23.63
H2 (3)	7.31 $\pm$ 1.70	87.68 $\pm$ 20.43	94.99 $\pm$ 13.24
H3 (3)	9.95 $\pm$ 0.34	119.37 $\pm$ 4.10	129.32 $\pm$ 2.66
H4 (3)	8.10 $\pm$ 1.28	97.21 $\pm$ 15.42	105.31 $\pm$ 9.99
H5 (3)	3.64 $\pm$ 0.59	43.65 $\pm$ 7.10	47.28 $\pm$ 4.60
รวม (15)	7.35 $\pm$ 1.07	88.21 $\pm$ 12.81	95.56 $\pm$ 8.30
S1 (6)	6.44 $\pm$ 1.75	77.31 $\pm$ 21.03	83.76 $\pm$ 13.63
S2 (6)	6.82 $\pm$ 1.07	81.83 $\pm$ 12.84	88.65 $\pm$ 8.32
รวม (12)	1.40 $\pm$ 0.48	79.57 $\pm$ 5.79	10.98 $\pm$ 3.75
รวมทั้งหมด (27)	Min	3.64 $\pm$ 0.59	43.65 $\pm$ 7.10
	Max	9.95 $\pm$ 0.34	119.37 $\pm$ 4.10
	Mean	7.03 $\pm$ 0.89	84.37 $\pm$ 10.73
ชุดควบคุม (3)	Mean	20.53 $\pm$ 2.91	20.24 $\pm$ 2.87
			40.77 $\pm$ 0.03

ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสียังผลต่อปีจากแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา ซึ่งแสดงในภาพที่ 8 พบข้อสรุปที่น่าสนใจ ดังนี้ จากการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มตัวอย่างน้ำทั้งสามประเภท ได้แก่ น้ำพุร้อนเค็ม น้ำบาดาล และน้ำประปา ด้วยวิธีทางสถิติ One-way ANOVA (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณรังสีรวมที่ได้รับ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมด้วยการทดสอบ Independent samples t-test พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 8 ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีสำหรับการกินและการหายใจแก๊สเรดอนที่ปนเปื้อนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่า แม้แหล่งน้ำแต่ละประเภทในพื้นที่ศึกษาจะให้ปริมาณรังสีจากเรดอนในระดับใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับมาตรฐานควบคุมแล้ว กลับพบว่า มีความแตกต่างที่สำคัญ ซึ่งอาจสะท้อนถึงลักษณะทางธรณีวิทยาเฉพาะพื้นที่ที่มีผลต่อการสะสมของเรดอนในแหล่งน้ำเหล่านี้

เมื่อศึกษางานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่ได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำพุร้อนเค็ม และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคที่มีลักษณะในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นแหล่งน้ำพุร้อนเค็ม ที่มีการพุพุ่งของหินแข็งและหินร่วน ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรดอนสู่ชั้นบรรยากาศได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นที่บริเวณน้ำพุร้อนเค็มควนสระในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้ น้ำประปาจัดเป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดสำหรับน้ำใช้ในครัวเรือน ส่วนน้ำบาดาลและน้ำพุร้อนเค็มเป็นน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการบำบัด เห็นได้ว่า น้ำพุร้อนเค็ม มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงกว่าน้ำประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงที่สุดพบในประเทศไทยบริเวณน้ำพุร้อนเค็มอำเภอท่าฉาง จังหวัดสุราษฎร์ธานี อยู่ในระดับ 8507.48 ± 1.06 Bq/L [33] รองลงมา คือ เมือง Naples ประเทศอิตาลี โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ± 0.1 Bq/L ถึง 1146 ± 57 Bq/L และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 152 Bq/L [32] ซึ่งสูงกว่างานวิจัยนี้ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 35.00 ± 0.67 Bq/L ส่วนน้ำบาดาลที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 35.87 ± 0.44 Bq/L ซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่อยู่บริเวณใกล้แหล่งน้ำพุร้อนเค็ม เห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับน้ำบาดาลที่ตรวจพบทางตอนใต้ของประเทศไนจีเรีย มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 35.90 ± 38.40 Bq/L ซึ่งเป็นพื้นที่นี้มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่สูงและมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ เนื่องจากเกิดรอยเลื่อนของพื้นดินช่วยให้แก๊สเรดอนที่สะสมอยู่ในชั้นหินลึกสามารถแทรกซึมขึ้นมาสู่พื้นผิวดิน [6] และในงานวิจัยนี้ พบความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในระดับใกล้เคียงกับแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลจากแหล่งน้ำพุที่เมือง Klodzko Valley ประเทศโปแลนด์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 35.3 ถึง 272.0 Bq/L [28] อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำบาดาลบริเวณแหล่งเหมืองแร่ อำเภอบ้านนาสาร และ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด เมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ซึ่งอยู่ที่ระดับ 45.90 ± 6.35 Bq/L [26] และค่าต่ำสุดพบที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 0.95 Bq/L [14] นอกจากนี้ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประปาในพื้นที่อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง ประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 27.28 ± 0.51 Bq/L มีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่บริเวณแหล่งเหมืองแร่ อำเภอบ้านนาสาร และ อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี อยู่ในระดับ 26.36 ± 5.28 Bq/L [26]

อย่างไรก็ตาม ระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนของแหล่งน้ำทั้ง 3 ประเภทจากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) ที่กำหนดโดย U. S. EPA [20] แต่มีค่าต่ำกว่าระดับอ้างอิง (100 Bq/L) ซึ่งกำหนดโดย WHO [4] ดังนั้น อาจเป็นไปได้ว่า แหล่งน้ำในพื้นที่ที่อยู่ใกล้เคียงกับแหล่งน้ำพุร้อนเค็ม หรือ มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวดินส่งผลให้มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประเภทต่าง ๆ กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของน้ำ	ประเทศ	พื้นที่ศึกษา	ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ (Bq/L)	อ้างอิง
น้ำประปา	Iraq	Baghdad	8.06±2.30	[23]
	China	Jiaozuo	0.21±0.14	[24]
	Bangladesh	Dhaka	1.54±0.38	[25]
	ไทย	อ.บ้านนาสารและ อ.เวียงสระ จ.สุราษฎร์ธานี	15.77 ถึง 34.58 (26.36±5.28)	[26]
	ไทย	สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อ.องครักษ์ จ.นครนายก	0.10 ถึง 2.89 (0.51±0.55)	[27]
	ไทย	อ.ปะเหลียน จ.ตรัง	27.28±0.51	งานวิจัยนี้
น้ำบาดาล	Poland	Klodzko Valley	35.30 ถึง 272.00	[28]
	Nigeria	Southwestern	35.90±38.40	[6]
	Nigeria	Agbabu	30.2±6.70	[29]
	ไทย	อ.บ้านนาสารและ อ.เวียงสระ จ.สุราษฎร์ธานี	35.48 ถึง 53.79 (45.90±6.35)	[26]
	ไทย	อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม และ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี	0.05 ถึง 2.51 (0.95)	[14]
	ไทย	อ.ปะเหลียน จ.ตรัง	35.87±0.44	งานวิจัยนี้
น้ำพุร้อนเค็ม	Pakistan	Himalayan	5.56 ถึง 10.16	[30]
	Indonesia	West Java	2.60 ถึง 3.10	[18]
	Iran	Kerman	11.015	[31]
	Italy	Naples	0.1 ± 0.1 ถึง 1146 ± 57 (152)	[32]
	ไทย	อ.คลองท่อม จ.กระบี่ อ.ท่าฉาง จ.สุราษฎร์ธานี	18.64 ± 0.96 (ต่ำสุด) 8507.48 ± 1.06 (สูงสุด)	[33]
	ไทย	อ.ปะเหลียน จ.ตรัง	35.00±0.67	งานวิจัยนี้

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในแหล่งน้ำบริเวณน้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง ซึ่งประกอบด้วยน้ำพุร้อนเค็ม 15 ตัวอย่าง น้ำบาดาลและน้ำประปาอย่างละ 6 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 27 ตัวอย่าง พบผลลัพธ์ที่น่าสนใจ ดังนี้

ด้านคุณภาพน้ำทางกายภาพ: ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำอยู่ในระดับต่อไปนี้ อุณหภูมิ 35.9 ± 7.98 °C ค่า pH 6.84 ± 0.38 ความนำไฟฟ้า 0.85 ± 0.760 S/m ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด 4.79 ± 4.27 g/L ความเค็ม 4.96 ± 4.43 ppt และออกซิเจนละลายน้ำ 8.04 ± 0.43 mg/L โดยส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นค่าความนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งละลายน้ำ ความเค็ม และออกซิเจนละลายน้ำในบางจุดที่สูงเกินมาตรฐานน้ำดื่ม โดยเฉพาะน้ำพุร้อนจากบ่อพักที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูงถึง 8.79 ± 0.01 g/L ซึ่งเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่ม (3 g/L) เนื่องจากเป็นน้ำจากแหล่งธรรมชาติโดยตรง

ด้านความเข้มข้นของแก๊สเรดอน: ความเข้มข้นเฉลี่ยของแก๊สเรดอนในน้ำอยู่ที่ 33.48 ± 10.11 Bq/L สูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่มของ U.S. EPA (11.1 Bq/L) และสูงกว่ากลุ่มควบคุม (น้ำดื่มบรรจุขวด) ที่มีค่า 8.03 ± 1.14 Bq/L อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ระเหยสู่บรรยากาศมีค่าเฉลี่ย 3.35 ± 0.06 Bq/L ซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุม (0.80 ± 0.11 Bq/L) อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ด้านปริมาณรังสีที่ได้รับ: การประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปี พบว่า ค่าเฉลี่ยจากการบริโภคน้ำอยู่ที่ 7.03 ± 0.89 μ Sv/y จากการหายใจ 84.37 ± 10.73 μ Sv/y และรวมทั้งสองทาง 92.88 ± 6.95 μ Sv/y ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานความปลอดภัยของ WHO (100 μ Sv/y) ในขณะที่กลุ่มควบคุมมีค่ารวม 40.77 ± 0.03 μ Sv/y ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ปริมาณรังสีภูมิหลัง: พื้นที่ศึกษามีปริมาณรังสีภูมิหลังเฉลี่ย 1.50 ± 0.19 mSv/y ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก (2.4 mSv/y)

ผลการศึกษาสะท้อนว่า แม้แหล่งน้ำในพื้นที่ศึกษาที่มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนสูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม แต่ปริมาณรังสีที่ได้รับยังอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยเมื่อเทียบกับมาตรฐานสากล

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า แหล่งน้ำในพื้นที่น้ำพุร้อนควนสระ จังหวัดตรัง มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนสูงเกินมาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนด จึงสมควรมีการดำเนินงานต่อเนื่องในหลายด้านเพื่อความปลอดภัยของชุมชน

ประการแรก ควรขยายขอบเขตการศึกษาให้ครอบคลุมมากขึ้น โดยทำการสำรวจปริมาณเรดอนในทุกสภาพแวดล้อม ทั้งในแหล่งน้ำ ดิน หิน และอากาศภายในอาคารบ้านเรือน โดยเฉพาะบริเวณรอบบ่อน้ำพุร้อนและพื้นที่อื่น ๆ ทั่วจังหวัดตรัง การศึกษานี้จะช่วยให้เห็นภาพการกระจายตัวของเรดอนอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ควรมีการทดลองนำน้ำบาดาลและน้ำประปาในพื้นที่มาผ่านกระบวนการบำบัดแบบเดียวกับน้ำดื่มบรรจุขวด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณเรดอน

ประการที่สอง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาควรถูกนำมาจัดทำเป็นฐานข้อมูลรังสีของพื้นที่ ซึ่งจะประโยชน์อย่างมากในการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของประชาชน ทั้งนี้ ควรมีการเผยแพร่ความรู้ที่ถูกต้องแก่ประชาชนในพื้นที่เกี่ยวกับอันตรายจากแก๊สเรดอน พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการป้องกัน เช่น วิธีการระบายอากาศในบ้านเพื่อลดการสะสมของเรดอน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมะเร็งปอด

ประการสุดท้าย งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเรดอนกับเหตุการณ์แผ่นดินไหว เนื่องจากมีทฤษฎีที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเรดอนในน้ำใต้ดินอาจเป็นสัญญาณบ่งชี้การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก การศึกษาดังกล่าวอาจนำไปสู่การพัฒนาาระบบเตือนภัยแผ่นดินไหวแบบล่วงหน้าได้

การดำเนินงานทั้งหมดนี้จะช่วยสร้างความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับสถานการณ์เรดอนในพื้นที่ สร้างระบบเฝ้าระวังที่มีประสิทธิภาพ และที่สำคัญที่สุด คือ ช่วยปกป้องสุขภาพของประชาชนให้ปลอดภัยจากอันตรายของกัมมันตภาพรังสีในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

- [1] National Cancer Institute, (2024), Cancer Causes and Prevention, [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention>.
- [2] *A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon*, United States Environmental Protection Agency, EPA 402-K-12-002, 2016.
- [3] IAEA, (2023), What is Radon and How are We Exposed to it, [Online]. Available: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radon-and-how-are-we-exposed-to-it>.
- [4] WHO, *Guidelines for Drinking-water Quality*, vol. 1, Recommendations, 4th ed. Geneva: World Health Organization Press, 2011.
- [5] C. H. Han, J. W. Hong and H. J. Im, "A study of ^{222}Rn concentration of salty underground water and spring water in Jeju Korea," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 330, pp. 563-569, 2021.
- [6] Y. Ajiboye, M. O. Isinkaye, G. O. Badmus, O. T. Faloye and V. Atoiki, "Pilot groundwater radon mapping and the assessment of health risk from heavy metals in drinking water of southwest Nigeria," *Heliyon*, vol. 8, no. 2, 2022.
- [7] N. F. Ismail, S. Hashim, M. S. M. Sanusi, A. T. A. Rahman and D. A. Bradley, "Radon levels of water sources in the Southwest Coastal Region of Peninsular Malaysia," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, 2021, 6842.
- [8] Durrige Company Inc, (2020), *RAD H₂O Radon in Water Accessory for the RAD7: User Manual*, [Online]. Available: https://durrige.com/documentation/RAD_H2O_Manual.pdf
- [9] M. J. McPherson, *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Chapman & Hall, 1993.
- [10] UNSCEAR, (2000), Sources and Effects of Ionizing Radiation, [Online]. Available: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html#:~:text=Sources%20of%20ionizing%20radiation,92%2D1%2D142238%2D8
- [11] A. Sajid, M. Anjum, H. Younis, M. Salouci, K. Mehboob and A. H. Ismail, "Assessment of radon concentration and health hazards in natural spring water of a Sub-Himalayan District," *Atmosphere*, vol. 15, no. 8, 2024.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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, no. 1, 2019.
- [15] M. M. Orosun, T. B. Ajibola, F. C. Akinyose, O. Osanyinlusi, O. D. Afolayan and M. O. Mahmud, "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.
- [16] O. M. Michael, A. T. Benjamin, E. O. Emmanuel, I. A. Kolawole, S. B. Naheem, I. S. Danladi, O. K. King-sley and A. A. Daniel, "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.
- [17] 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.
- [18] E. D. Nugraha, M. Hosoda, J. Mellawati, U. Untara, I. Rosianna, Y. Tamakuma, O. B. Modibo, C. Kranrod, K. Kusdiana and S. Tolonami, "Radon activity concentrations in natural hot spring water: Dose assessment and health perspective," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 3, 2021.
- [19] กรมอนามัย, *เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้*. กรุงเทพฯ: กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2563.
- [20] Federal Register, (1999), National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides, Final Rule, [Online]. Available: <https://www.federalregister.gov/documents/2000/12/07/00-30421/national-primary-drinking-water-regulations-radionuclides-final-rule>
- [21] ศิลาจุฑา ดำรงศิริ, "น้ำดื่ม เค็มได้แค่ไหน," *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, 2564.
- [22] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, "ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)," *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 111, ตอนที่ 16 ง, น. 217-275, 2537.
- [23] N. B. Najia, R. M. Yas, W. Z. Majeed, M. A. Saeed, R. W. Abdul Fadi and A. H. Al-Mashhadani, "Radon concentrations assessment in tap water for different areas in Baghdad city using Rad7," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2372, no. 1, 2021.
- [24] X. Feng, Q. Han, M. Wang, P. Mao, A. Sun, C. Zhang, C. Chen and M. Wang, (2021), "²²²Rn radioactivity in urban waters of fault zone in China: dose rate and risk assessment," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 330, pp. 883-890, 2021.

- [25] M. S. Alam, M. M. Mahfuz Siraz, A. M. Jubair, S. C. Das, D. A. Bradley, M. U. Khandaker, S. Tokonami, A. Shelley and S. Yeasmin, "A study on measuring the ^{222}Rn in the Buriganga River and tap water of the megacity Dhaka," *Plos One*, vol. 18, no. 5, 2023.
- [26] ภัทรสุดา รอดประไพ, ศุภธินี เอียดสิทธิรักษ์, ศุภสุดา แยมแสง, ปาริชาติ ศรีนิล, นภัสวรรณ เมืองจันทร์, อภิสรา ศรีขวัญแก้ว, สุมิตร จิรังนิมิตสกุล, กชกร เพ็งศรี และกนกกานต์ ฐิติภรณ์พันธ์, "การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีเนื่องจากเรดอนในแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคในพื้นที่เหมืองแร่พรวุฒิและเขาน้ำพันธุ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ภาคใต้ของประเทศไทย," *วารสารฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป*, ปีที่ 8, ฉ. 2, น. 59-79, 2567.
- [27] P. Sola, U. Youngchuay, S. Kongsri and A. Kongtana, "Investigation of radon level in air and tap water of workplaces at Thailand Institute of Nuclear Technology, Thailand," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 860, no. 1, 2017.
- [28] T. A. Przylibski, S. Staśko and E. Domin, "Radon groundwater in a radon-prone area: possible uses and problems: an example from SW part of Kłodzko Valley, Sudetes, SW Poland," *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 44, no. 12, pp. 4539-4555, 2022.
- [29] E. B. Faweya, T. Adewumi, Y. Ajiboye, H. T. Akande and H. A. Rasheed, "Radon concentration in groundwater and soil gas radon in Agbabu Bituminous Deposit Area: mapping, GR potential and health risks assessments," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, vol. 45, pp. 1115-1126, 2021.
- [30] A. Sajid, M. Anjum, H. Younis, M. Salouci, K. Mehboob and A. H. Ismail, "Assessment of radon concentration and health hazards in natural spring water of a Sub-Himalayan District," *Atmosphere*, vol. 15, no. 8, 2024.
- [31] P. Mehnati, V. Doostmohammadi and A. Jomehzadeh, "Determination of Rn-222 concentration and annual effective dose of inhalation in the vicinity of hot springs in Kerman province, southeastern Iran," *International Journal of Radiation Research*, vol. 20, no. 1, pp. 211-216, 2020.
- [32] R. S. Iovine, M. Piochi, R. Avino, E. Cuoco, C. Minopoli, A. Santi, S. Caliro, A. Piersanti and G. Galli, "Radon (^{222}Rn) levels in thermal waters of the geothermally active Campi Flegrei volcanic caldera (Southern Italy): A framework study using a RAD7 radon detector," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 431, 2022.
- [33] W. Ngansom, D. Rodphothong, T. Itthipoonthanakorn, S. Niyomdecha, H. Dürrast and M. Yongprawat, "Hydrogeological environments and radon activities of saline geothermal hot spring sites located along eastern and western coastlines of southern Thailand," *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 253, 2023.
- [34] กระทรวงอุตสาหกรรม, "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560," *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 134, ตอนพิเศษ 153 ง, น. 11-15, 2560.