

การประเมินความเสี่ยงทางรังสีต่อสุขภาพจากแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนธรรมชาติและน้ำอุปโภคบริโภค  
อำเภอพุนพินและอำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี

Radiological Health Risk Assessment of Radon in Natural Hot Springs and  
Consumption Water in Phunphin and Khian Sa Districts, Surat Thani Province

ณัฐริช ฐิติภรณ์พันธ์, ชโลมา แสงนิล, รักษ์กันท์ เสนทอง, สุรัสวดี นิลกิจ และอภิรักษ์ ฐิติภรณ์พันธ์\*

Nutranich Titipornpun, Chaloomar Sangnil, Rakkan Senthong, Suratsawadee Nilkij and Apinun Titipornpun\*

โรงเรียนสุราษฎร์พิทยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี

Suratpittaya School, Surat Thani

\*Corresponding author e-mail: apinun@srp.ac.th

(Received: March 11, 2026, Revised: May 13, 2026, Accepted: June 20, 2026)

### บทคัดย่อ

เรดอนเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวตามธรรมชาติจากแหล่งกำเนิดที่มีธาตุยูเรเนียมและเรเดียมในชั้นดิน หิน และน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นรอยแตก อย่างบริเวณน้ำพุร้อนตามธรรมชาติ มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพและตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนธรรมชาติและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีจากแก๊สเรดอนในพื้นที่น้ำพุร้อนธรรมชาติเพื่อการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพบริเวณบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมด 33 ตัวอย่าง ประกอบด้วย น้ำพุร้อนธรรมชาติ น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด ผลการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอยู่ที่ระดับ  $37.42 \pm 11.66$  °C ค่า pH เฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $7.21 \pm 0.49$  ค่าเฉลี่ยของสภาพนำไฟฟ้าอยู่ที่ระดับ  $0.08 \pm 0.06$  S/m ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $0.42 \pm 0.30$  g/L ค่าความเค็มเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $0.42 \pm 0.05$  ppt และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $8.12 \pm 0.47$  mg/L สำหรับค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา พบว่า อยู่ในช่วง  $0.15 \pm 0.00$  Bq/L ถึง  $119.47 \pm 24.12$  Bq/L โดยมีค่าเฉลี่ยในภาพรวมอยู่ที่ระดับ  $35.87 \pm 46.98$  Bq/L ซึ่งสูงกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่ม ( $11.1$  Bq/L) กำหนดโดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา แต่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลก ( $100$  Bq/L) นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อน ( $63.93 \pm 48.16$  Bq/L) สูงกว่าในน้ำประปา ( $2.71 \pm 1.03$  Bq/L) และน้ำดื่มบรรจุขวด ( $0.15 \pm 0.00$  Bq/L) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับปริมาณรังสีภูมิหลังในพื้นที่ศึกษานั้น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $3.29 \pm 2.58$  mSv/y สูงกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีภูมิหลังทั่วโลก ( $2.4$  mSv/y) เมื่อนำความเข้มข้นแก๊สเรดอนไปประเมินปริมาณรังสียังผลรายปีโดยรวมที่ได้รับจากการกลืนกินและการสูดดมแก๊สเรดอนในน้ำจากพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ  $97.95 \pm 128.23$   $\mu$ Sv/y นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลต่ออวัยวะภายในพบว่าปริมาณรังสียังผลรายปีที่มีผลต่อกระเพาะอาหารและปอด มีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ  $0.91 \pm 1.18$   $\mu$ Sv/y และ  $10.85 \pm 14.21$   $\mu$ Sv/y ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าระดับอ้างอิงขององค์การอนามัยโลก ( $100$   $\mu$ Sv/y) อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอน จึงควรมีการศึกษาเชิงลึกต่อไป ตลอดจนควรมีการติดตามและเฝ้าระวังอย่าง

ต่อเนื่องในพื้นที่ศึกษาและพื้นที่อื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบระดับความเสี่ยงที่แท้จริงจากแก๊สเรดอน และสร้างความมั่นใจในความปลอดภัยต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยว

**คำสำคัญ:** เรดอน ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี น้ำพุร้อนเค็ม เครื่องวัด RAD7-RAD H<sub>2</sub>O

#### ABSTRACT

Radon is a radioactive element that naturally decays from sources containing uranium and radium in soil, rocks, and groundwater. In particular, fractured areas, such as natural hot springs, can exhibit high radon concentrations. Therefore, this work aimed to investigate the physicochemical characteristics and measure radon concentrations in natural hot spring water and consumption water. Additionally, this study evaluated the annual effective dose from radon exposure in natural hot springs for wellness tourism, specifically at the Tha Sathon Hot Spring in Phunphin District and the Khao Tok Hot Spring in Khian Sa District, Surat Thani Province. A total of 33 samples were analyzed, comprising natural hot spring water, tap water, and bottled drinking water. The results showed that the mean temperature was  $37.42 \pm 11.66$  °C, the mean pH was  $7.21 \pm 0.49$ , the mean electrical conductivity (EC) was  $0.08 \pm 0.06$  S/m, the mean total dissolved solids (TDS) was  $0.42 \pm 0.30$  g/L, the mean salinity was  $0.42 \pm 0.05$  ppt, and the mean dissolved oxygen (DO) was  $8.12 \pm 0.47$  mg/L. The mean radon concentrations in the water within the study area ranged from  $0.15 \pm 0.00$  Bq/L to  $119.47 \pm 24.12$  Bq/L, with an overall average of  $35.87 \pm 46.98$  Bq/L. This overall average exceeded the Maximum Contaminant Level (MCL) for drinking water (11.1 Bq/L) defined by the US EPA but was lower than the WHO reference level (100 Bq/L). Additionally, the average radon concentration in hot springs ( $63.93 \pm 48.16$  Bq/L) was significantly higher than that found in tap water ( $2.71 \pm 1.03$  Bq/L) and bottled drinking water ( $0.15 \pm 0.00$  Bq/L). The average background radiation dose in the study area was  $3.29 \pm 2.58$  mSv/y, which was higher than the global average (2.4 mSv/y). The estimated total annual effective dose from radon ingestion and inhalation in the study area averaged approximately  $97.95 \pm 128.23$   $\mu$ Sv/y. Regarding internal organ effects, the annual effective doses to the stomach and lungs were approximately  $0.91 \pm 1.18$   $\mu$ Sv/y and  $10.85 \pm 14.21$   $\mu$ Sv/y, respectively, which were below the WHO reference level (100  $\mu$ Sv/y). However, as numerous factors influence radon concentrations, further in-depth studies are recommended. Continuous monitoring and surveillance in the study area and other locations should also be conducted to better understand the actual radon risk and to ensure the safety and health of both residents and tourists.

**Keywords:** Radon, annual effective doses, salt hot spring, RAD7-RAD H<sub>2</sub>O

#### บทนำ

แก๊สเรดอน (Rn-222) เป็นแก๊สกัมมันตรังสีที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวอย่างต่อเนื่องตามธรรมชาติของธาตุยูเรเนียม (U-238) ที่เป็นสารตั้งต้น แล้วสลายตัวต่อเป็นทอเรียม (Th-230) และเรเดียม (Ra-226) ตามลำดับ แก๊สชนิดนี้สามารถซึมผ่านชั้นหินและดินชั้นมาจากใต้พื้นดินเพื่อแพร่กระจายไปในอากาศได้ ซึ่งความเข้มข้นในแต่ละบริเวณจะแตกต่างกันไปตามลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้ แก๊สเรดอนยังละลายได้ดีในน้ำใต้ดิน และสามารถปลดปล่อยฟุ้งกระจายออกมาสู่อากาศรอบตัวเราได้เมื่อมีการนำน้ำนั้นมาอุปโภคหรือบริโภค [1] เนื่องจากเรดอนสามารถละลายในน้ำได้ดี ดังนั้นเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นดินและหิน โดยเฉพาะชั้นดินหรือหินที่แตกหรือมีช่องว่างเรดอนสามารถแพร่ออกมาได้ง่ายและจะละลายในน้ำส่งผลให้ความเข้มข้นของเรดอนในน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้น น้ำพุร้อนซึ่งเกิดจากน้ำในชั้นใต้ดินสัมผัสกับความร้อนใต้พิภพถูกแรงดันแทรกออกมาตามรอยแยกของเปลือกโลก เป็นผลให้แก๊สเรดอนบริเวณน้ำพุร้อนมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ความเข้มข้นของเรดอนในน้ำพุร้อนขึ้นอยู่กับความ

เข้มข้นของยูเรเนียมและเรเดียม [2] นอกจากนี้ ยังพบความเข้มข้นของเรดอนสูงในบริเวณน้ำพุร้อนที่อุดมไปด้วยรอยเลื่อน และรอยแตก [3] อย่างไรก็ตาม การบำบัดด้วยการสูดดมเรดอนในน้ำพุร้อนได้มีการดำเนินการในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และ เอเชีย โดยพบว่า การบำบัดแบบเรดอนสปา มีประสิทธิภาพในระยะยาวต่อผู้ป่วยโรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการอาบน้ำเรดอนสามารถก่อให้เกิดผลดีในระยะยาวต่อโรคข้ออักเสบ [4] ผลของเรดอนพบว่า มีมากกว่าผลจากความร้อนประมาณ 2 เท่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการทำงานด้านการต้านอนุมูลอิสระได้รับการเสริมสร้างจากการบำบัดด้วยเรดอนมากกว่าการบำบัดด้วยความร้อน [5] มีการศึกษาผลทางชีวภาพของการบำบัดด้วยเรดอนและความร้อนต่อโรคข้อเสื่อม โดยผลการศึกษาพบว่า การต้านอนุมูลอิสระและการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันได้รับการเสริมสร้างจากการสูดดมเรดอน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการบำบัดด้วยเรดอนมีส่วนช่วยในการป้องกันโรคข้อเสื่อม และมีการสร้างออกซิเจนที่มีความว่องไวในร่างกายในปริมาณที่เหมาะสมหลังการสูดดมเรดอน [6] การบำบัดด้วยเรดอนร่วมกับความร้อนในน้ำพุร้อนช่วยเสริมสร้างการทำงานด้านการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการสร้างคอเลสเตอรอลรวมในร่างกาย [7] มีการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเรดอนในอากาศที่หายใจออกระหว่างและหลังการอาบน้ำในน้ำพุร้อนที่มีความเข้มข้นของเรดอนในน้ำสูงกว่าในอากาศ โดยพบว่า ผลของปริมาณรังสีที่ได้รับจากการสูดดมเรดอนผ่านผิวหนังมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการสูดดมเรดอนและลูกหลานของเรดอน [8] อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้อัตราการแพร่กระจายของแก๊สเรดอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการละลายของเรดอนในน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สเรดอนถูกกำจัดออกจากน้ำนี้ อย่างช้า ๆ ด้วยการแพร่โมเลกุล อัตราส่วนของความเข้มข้นเรดอนในน้ำและอากาศพบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $10^{-4}$  กล่าวคือ ความเข้มข้นเรดอนในน้ำ 10 Bq/L จะสอดคล้องกับความเข้มข้นในอากาศประมาณ 0.001 Bq/L ความเข้มข้นเฉลี่ยของเรดอนในน้ำทั่วโลกมีรายงานอยู่ที่ระดับประมาณ 10 Bq/L [9] เรดอนในน้ำก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสูดดม แก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่อากาศภายในอาคาร ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอด และจากการบริโภคเรดอนที่ละลายในน้ำดื่มโดยตรง ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งกระเพาะอาหาร [10-11] ในสภาพกลางแจ้ง แก๊สเรดอนถูกเจือจางอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นต่ำมาก และโดยทั่วไปไม่ก่อให้เกิดปัญหา ระดับเรดอนเฉลี่ยในอากาศกลางแจ้งอยู่ในช่วงประมาณ 5-15 Bq/m<sup>3</sup>

อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ในอาคารหรือพื้นที่ที่ระบายอากาศได้น้อย โดยเฉพาะในสถานที่ที่ปิดอย่างเหมือง ถ้ำ และโรงงานบำบัดน้ำ มักจะพบระดับเรดอนสูงที่สุด สำหรับในอาคารทั่วไป เช่น บ้าน โรงเรียน หรือ สำนักงาน ปริมาณแก๊สเรดอนอาจแตกต่างกันได้มาก ตั้งแต่ระดับต่ำประมาณ 10 Bq/m<sup>3</sup> ไปจนถึงระดับที่สูงกว่า 10,000 Bq/m<sup>3</sup> ซึ่งด้วยคุณสมบัติของเรดอนที่ไม่มีสีไม่มีกลิ่น จึงมีโอกาสสูงที่ผู้อยู่อาศัย หรือผู้ปฏิบัติงานในอาคารเหล่านี้ จะใช้ชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีเรดอนสะสมอยู่สูงมากโดยไม่รู้ตัว [12] ไม่ว่าเรดอนจะมาจาก น้ำ หรือ อากาศ ล้วนส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ในภายหลังทั้งสิ้น ถ้าไม่ได้ป้องกัน หรือ หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับเรดอน สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; US EPA) รายงานว่า เรดอนเป็นสาเหตุการเสียชีวิตของประชาชนเป็นอันดับหนึ่ง รองลงมาคือ การเมาแล้วขับ การหกล้มภายในบ้าน การจมน้ำ ไฟไหม้บ้าน ตามลำดับ [1] ดังนั้น จึงได้กำหนดระดับปฏิบัติของความเข้มข้นแก๊สเรดอนภายในอาคารให้อยู่ที่ 148 Bq/m<sup>3</sup> ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดน้อย ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) เสนอว่าควรปรับลดระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนภายในอาคารให้ลงมาที่ระดับ 100 Bq/m<sup>3</sup> เพื่อให้มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดให้น้อยที่สุด [13] และได้กำหนดระดับความเข้มข้นสูงสุดของการปนเปื้อนเรดอนสำหรับน้ำดื่ม (Maximum Contaminant Level; MCL) ต้องอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 11.1 Bq/L และระดับความเข้มข้นสูงสุดของการปนเปื้อนเรดอนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (Alternative Maximum Contaminant Level; AMCL) ต้องไม่เกิน 148 Bq/L [14] นอกจากนี้ WHO ได้กำหนดระดับอ้างอิงของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำดื่มไว้ที่ระดับ 100 Bq/L และกำหนดปริมาณรังสีรังสีที่ร่างกายได้รับ

รายปี ได้มีการกำหนดระดับอ้างอิงซึ่งเป็นค่ามาตรฐานความปลอดภัยไว้ นั่นคือ ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปี สำหรับการหายใจและการบริโภคน้ำที่มีแก๊สเรดอน ได้ถูกกำหนดไว้ที่ระดับ  $100 \mu\text{Sv/y}$  [15] ซึ่งหมายความว่า หากร่างกายได้รับเกินจากปริมาณนี้จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อร่างกายทั้งต่อเซลล์ปกติ เนื่องจากการหายใจเอาแก๊สเรดอนที่ละลายตัวจากน้ำ และเซลล์กระเพาะอาหาร เนื่องจากการบริโภคน้ำที่ปนเปื้อนแก๊สเรดอน การตรวจวัดเรดอนในน้ำพุร้อนได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานานในหลายภูมิภาคทั่วโลก ตัวอย่างเช่นในพื้นที่ชายฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของคาบสมุทรมาเลเซีย พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนเค็มมีค่าเฉลี่ย  $99 \pm 6 \text{ Bq/L}$  [16] และในพื้นที่ภาคใต้ของไทย เช่น น้ำพุร้อนเค็มควนสระ ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง พบว่า มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนเฉลี่ย อยู่ที่ระดับ  $35.00 \pm 0.67 \text{ Bq/L}$  [17] น้ำพุร้อนเค็ม อ.คลองท่อม จ.กระบี่ พบว่าอยู่ที่ระดับ  $18.64 \pm 0.96 \text{ Bq/L}$  ในขณะที่น้ำพุร้อนเค็ม อ.ท่าม่วง จ.สุราษฎร์ธานี มีค่าสูงถึง  $8,507.48 \pm 1.06 \text{ Bq/L}$  [18] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเคมีกายภาพกับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ [19-23] เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำเนื่องจากปริมาณทางเคมีกายภาพ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำมีความผันแปรตลอดเวลาด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นฤดูกาล ความดันบรรยากาศ หรือลักษณะทางธรณีวิทยา ดังนั้นการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อติดตาม ฝ้าระวัง และหาแนวทางป้องกันภัยจากเรดอน [1] โดยเฉพาะในแหล่งน้ำพุร้อนแม้ว่าได้มีการศึกษาในหลายพื้นที่ แต่ยังไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยทั่วโลกยังให้ความสนใจ ด้วยเหตุผลคล้าย ๆ กัน คือ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความปลอดภัยของประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยวที่มาใช้บริการในแหล่งน้ำพุร้อน ไม่ว่าจะเป็นการสปา การอาบน้ำหรือแช่ ตลอดจนการอุปโภคบริโภคน้ำ ในพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีแหล่งน้ำพุร้อนหลายแห่งที่ได้รับความนิยมจากประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ โดยเฉพาะในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา ซึ่งเป็นแหล่งที่ให้บริการอาบน้ำหรือแช่ในแหล่งน้ำพุร้อนในระบบเปิดที่เป็นน้ำจืด แต่อย่างไรก็ตามในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกเป็นที่ตั้งของสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 4 สุราษฎร์ธานี กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช และมีบ่อน้ำร้อนน้ำพุร้อนในรอบ ๆ บริเวณอาคารของหน่วยงาน เช่นเดียวกับในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน มีธารน้ำร้อนอยู่รอบ ๆ พื้นที่ และใกล้กับธารน้ำร้อนจะมีรีสอร์ทสำหรับนักท่องเที่ยว ซึ่งทั้งสองพื้นที่มีโอกาสที่เรดอนจะฟุ้งกระจายและสะสมในอาคารได้

ดังนั้น การศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพ ตรวจวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อน และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ตลอดจนประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายจะได้รับรายปีจากการกลืนกินและการสูดดม ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา จึงมีความสำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นของระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในพื้นที่ศึกษาและปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายจะได้รับรายปีเพื่อประมาณว่าอยู่ในระดับสูงหรือต่ำกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเชิงลึกต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำพุร้อนธรรมชาติ และน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา และบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี
2. ตรวจวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนธรรมชาติและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา
3. ประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีเนื่องจากแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนธรรมชาติและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา

## การดำเนินงานวิจัย

### 1. พื้นที่ศึกษา

บ่อน้ำร้อนบ้านเขาตอก อำเภอเคียนซา และ บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน เป็นพื้นที่แหล่งน้ำพุร้อนที่เป็นที่นิยมของประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยว จัดเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงสุขภาพของจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยแต่ละพื้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้

### ลักษณะทั่วไปของบ่อน้ำร้อนรัตนโกสัย (ท่าสะทอน)

บ่อน้ำร้อนรัตนโกสัย หรือ ที่นิยมเรียกกัน คือ บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน ตั้งอยู่หมู่ที่ 6 ตำบลท่าสะทอน อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี ประกอบด้วย บ่อน้ำพุร้อนทั้งที่เป็นบ่อกำเนิดน้ำพุร้อน จำนวน 2 บ่อ โดยบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนถูกกันบริเวณไว้ โดยได้ต่อท่อไปยังบ่ออาบพื้นคอนกรีต มีบ่ออาบพื้นคอนกรีตที่มีหลังคากระเบื้อง สำหรับให้บริการประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยว จำนวน 3 บ่อ และบ่อพักที่ต่อท่อน้ำตรงมาจากบ่อกำเนิด จำนวน 2 บ่อใช้สำหรับแช่เท้า ในงานวิจัยนี้ได้สุ่มตัวอย่างน้ำพุร้อนอาบ จำนวน 1 บ่อ บ่อพัก จำนวน 1 บ่อ และบ่อกำเนิดจำนวน 1 บ่อ โดยแต่ละบ่อมีรายละเอียดดังนี้

1) บ่ออาบน้ำพุร้อนพื้นคอนกรีตปูกระเบื้อง ตั้งอยู่ภายในอาคารโปร่ง มีหลังคากระเบื้อง ลักษณะเป็นสระน้ำร้อนคอนกรีตที่ปูพื้นด้วยกระเบื้องปูพื้น โดยน้ำพุร้อนถูกปล่อยมาจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนที่เป็นบ่อแบบเปิด โดยประชาชนที่มาใช้บริการสามารถลงไปอาบและแช่ได้ เนื่องจากมีอุณหภูมิของน้ำไม่สูงมากนัก ประมาณ 38-40 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง TS1 ดังภาพที่ 1 (ก)

2) บ่อพักน้ำพุร้อนพื้นหิน ตั้งอยู่ภายในอาคารโปร่ง มีหลังคากระเบื้อง และน้ำพุร้อนจะถูกปล่อยมาจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนแหล่งเดียวกับบ่อที่ 1 แต่อยู่ใกล้บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนมากกว่า บ่อนี้ประชาชนส่วนใหญ่ใช้แช่เท้า ไม่ลงไปอาบหรือแช่ทั้งตัว เนื่องจากอุณหภูมิค่อนข้างสูง ประมาณ 45-48 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง TS2 ดังภาพที่ 1 (ข)

3) บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนพื้นดินและหิน ขนาดใหญ่อยู่กลางแจ้ง มีความกว้างประมาณ 3 เมตร บ่อนี้มีท่อระบบเปิดปล่อยน้ำให้ไหลไปยังบ่ออาบที่ 1 และ 2 โดยอยู่ห่างจากบ่ออาบ TS1 และบ่อพัก TS2 ประมาณ 50 เมตร และ 25 เมตร ตามลำดับ โดยบ่อกำเนิดนี้มีอุณหภูมิสูง ประมาณ 60-63 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง TS3 ดังภาพที่ 1 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี (ก) บ่ออาบน้ำพุร้อนท่าสะทอน

TS1 (ข) บ่อพักน้ำพุร้อนท่าสะทอน TS2 (ค) บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนท่าสะทอน TS3

### ลักษณะทั่วไปของบ่อน้ำร้อนเขาตอก

บ่อน้ำร้อนเขาตอก ตั้งอยู่ภายในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าหนองทุ่งทอง หมู่ที่ 2 ตำบลเขาตอก อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี ภายในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่านี้มีน้ำพุร้อนธรรมชาติ ที่เรียกกันว่า น้ำพุร้อนบ้านเขาตอก ซึ่งปัจจุบันมีนักท่องเที่ยวมาใช้บริการเป็นจำนวนมาก บ่อน้ำพุร้อนบ้านเขาตอก มีบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนจำนวน 5 บ่อ โดยแต่ละบ่อล้วนมี

อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส น้ำมีคุณภาพน้ำดีใส ไม่มีกลิ่น เกิดอุทกโคลงบางตอก และมีการก่อสร้างบ่ออาบน้ำร้อนคอนกรีตที่ปูพื้นด้วยกระเบื้อง สำหรับอาบและแช่ โดยเป็นบ่อเปิดที่ไม่มีหลังคา ในงานวิจัยนี้ได้สุ่มตัวอย่างน้ำพุร้อนจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนและบ่ออาบน้ำพุร้อนคอนกรีต อย่างละ 1 บ่อ และ บ่อกำเนิดสำหรับอาบพื้นเป็นดินปนหินจำนวน 1 บ่อ โดยเลือกบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนที่มีท่อส่งน้ำร้อนไปยังบ่ออาบน้ำร้อนคอนกรีตที่อยู่ใกล้กัน โดยแต่ละบ่อมีรายละเอียด ดังนี้

1) บ่ออาบน้ำพุร้อนพื้นคอนกรีต เป็นบ่ออาบน้ำร้อนที่เปิดโล่งไม่มีหลังคา น้ำพุร้อนถูกปล่อยมาจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนขนาดใหญ่ ซึ่งอยู่ห่างไปประมาณ 5 เมตร ประชาชนสามารถอาบและแช่ได้ อุณหภูมิประมาณ 40-41 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง KT1 ดังภาพที่ 2 (ก)

2) บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนขนาดใหญ่ เป็นบ่อกำเนิดที่มีลักษณะเป็นแอ่งน้ำมีความกว้างประมาณ 1 เมตร ความยาวประมาณ 3 เมตร ซึ่งปล่อยน้ำพุร้อนลงไปยังบ่ออาบน้ำพุร้อนบ่อที่ 1 โดยบ่อนี้ยังไม่ให้บริการแช่ หรืออาบน้ำร้อนแต่อย่างใด เนื่องจากอุณหภูมิร้อนจัดประมาณ 50-51 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง KT2 ดังภาพที่ 2 (ข)

3) บ่อกำเนิด บ่อนี้มีโหนดหินกลางแหล่งน้ำ และมีตาน้ำพุพุ่งออกมาจากโหนดหิน บ่อกว้างประมาณ 1.5 เมตร โดยรอบโหนดหิน โดยมีขอบบ่อคอนกรีตสูงประมาณ 2 ฟุต สำหรับใช้ต้กอบเท่านั้น อุณหภูมิประมาณ 38-40 องศาเซลเซียส ใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่าง KT3 ดังภาพที่ 2 (ค)



(ก)



(ข)



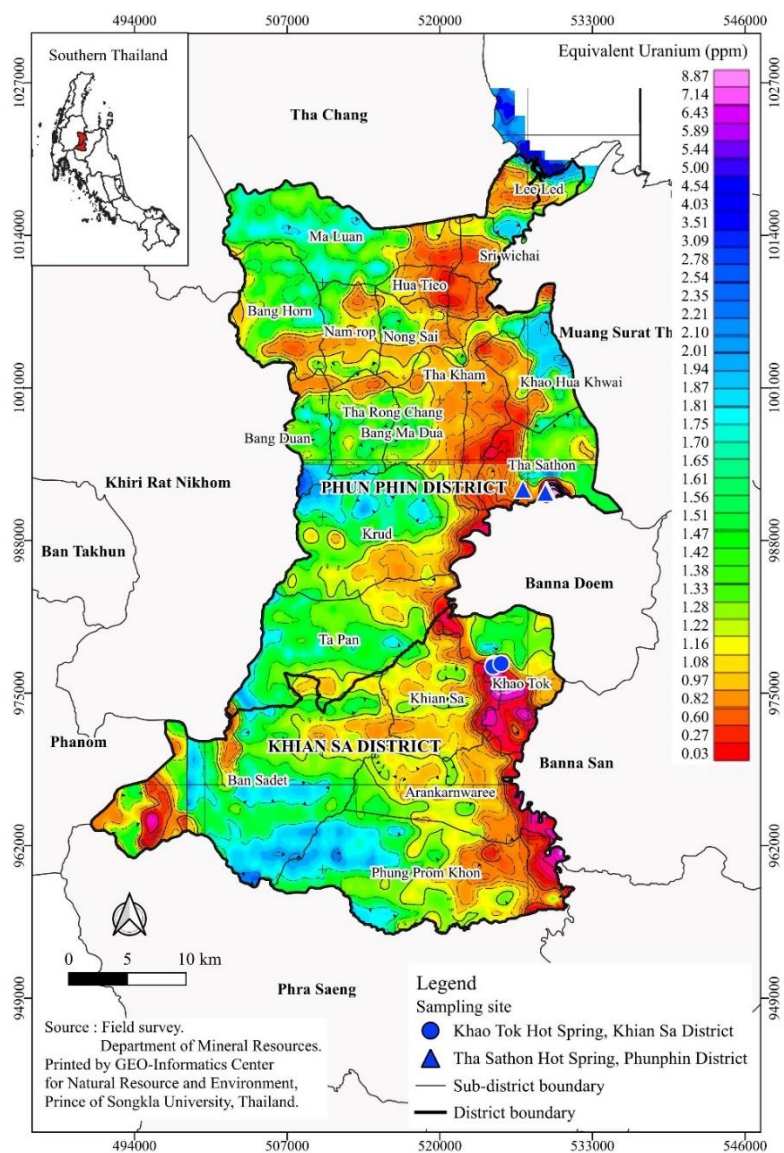
(ค)

**ภาพที่ 2** ลักษณะทั่วไปของบ่อน้ำร้อนเขาดอก อำเภอกะเนียง จังหวัดสุราษฎร์ธานี (ก) บ่ออาบน้ำพุร้อนเขาดอก

KT1 (ข) บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนเขาดอก KT2 (ค) บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนเขาดอก KT3

ระดับแก๊สเรดอนในพื้นที่ที่มีค่าสูงหรือต่ำนั้น ส่วนหนึ่งได้รับอิทธิพลมาจากความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียมซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ โดยเฉพาะปริมาณที่พบในระดับผิวดิน จากภาพที่ 3 คือ แผนที่แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินในพื้นที่ศึกษา ได้ระบุตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างน้ำไว้ 2 บริเวณหลัก ๆ โดยใช้เครื่องหมายแสดงพิกัดที่แตกต่างกันคือสัญลักษณ์สามเหลี่ยม แทนจุดเก็บตัวอย่างจำนวน 5 จุด (รวม 15 ตัวอย่าง) ในพื้นที่รอบบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนท่าสะท้อน อำเภอบ้านนา และสัญลักษณ์วงกลม แทนจุดเก็บตัวอย่างจำนวน 5 จุด (รวม 15 ตัวอย่าง) ในพื้นที่รอบบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนเขาดอก อำเภอกะเนียง จังหวัดสุราษฎร์ธานี เมื่อพิจารณาตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างบนแผนที่ จะเห็นได้ชัดเจนว่า จุดเหล่านี้ตั้งอยู่บนพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เป็นโหนดสีม่วงจนถึงสีชมพูเข้ม ซึ่งตามแถบมาตรวัดด้านขวาข้างขึ้นข้างลงเป็นบริเวณที่มีความ

เข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินในระดับสูง ทั้งนี้ บริเวณบ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา มีค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินสูงกว่าพื้นที่ของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีปริมาณยูเรเนียมหนาแน่นเช่นนี้ ถือเป็นปัจจัยเสี่ยงโดยตรงที่ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในพื้นที่นั้น ๆ พลอยสูงตามไปด้วย [24] อย่างไรก็ตาม นอกจากปริมาณยูเรเนียมที่ผิวดินแล้ว ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติก็มีส่วนสำคัญ เนื่องจากน้ำพุร้อนเกิดจากการที่น้ำในชั้นใต้ดินได้รับความร้อนได้พิภพแล้วถูกแรงดันขับเคลื่อนให้แทรกตัวขึ้นมาตามรอยแยกและช่องว่างของเปลือกโลก แก๊สเรดอนที่เกิดจากการสลายตัวและสะสมอยู่ใต้ดินลึกจึงสามารถฟุ้งกระจายออกมาตามรอยแตกของชั้นดินและหินเหล่านี้ได้อย่างง่ายดาย แล้วเข้าไปละลายปนเปื้อนอยู่ในกระแส น้ำพุร้อน [2] ด้วยเหตุนี้ บริเวณแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติในพื้นที่ศึกษาจึงมีโอกาสสูงมากที่จะตรวจพบความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำในปริมาณที่สูง



ภาพที่ 3 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างและความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดิน ในพื้นที่บริเวณแหล่งน้ำพุร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำพุร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี

**2. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำ**

การเก็บตัวอย่างน้ำสุ่มเก็บให้ครอบคลุมประเภทน้ำดิบและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษา รวมทั้งหมด 33 ตัวอย่าง เพื่อประโยชน์ในการประเมินและเปรียบเทียบความเสี่ยงต่อสุขภาพ โดยจำแนกสัญลักษณ์และรายละเอียดตามประเภทของน้ำดังนี้:

2.1 กลุ่มน้ำพุร้อนธรรมชาติ (รวม 18 ตัวอย่าง):

พื้นที่ท่าสะท้อน สุ่มเก็บจากบ่ออาบ บ่อพัก และบ่อกำเนิด แทนด้วยสัญลักษณ์ TS1, TS2, และ TS3 ตามลำดับ

พื้นที่เขาตอก สุ่มเก็บจากบ่ออาบ และบ่อกำเนิด 2 ลักษณะ แทนด้วยสัญลักษณ์ KT1, KT2, และ KT3 ตามลำดับ

2.2 กลุ่มน้ำประปาระบบผิวดิน (รวม 12 ตัวอย่าง): เก็บจากบ้านเรือนและจุดบริการนักท่องเที่ยว พื้นที่ละ 6 ตัวอย่าง

พื้นที่ท่าสะท้อน: จุดบริการนักท่องเที่ยวแทนด้วย TS4 และบ้านเรือนใกล้เคียงแทนด้วย TS5

พื้นที่เขาตอก: จุดบริการนักท่องเที่ยวแทนด้วย KT4 และบ้านเรือนใกล้เคียงแทนด้วย KT5

2.3 กลุ่มน้ำดื่มบรรจุขวด (รวม 3 ตัวอย่าง): ผลิตจากแหล่งน้ำประปาประปาผิวดินภายในพื้นที่ศึกษา ใช้เป็นชุดควบคุมแทนด้วยสัญลักษณ์ BW

พิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ลักษณะของจุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	ประเภทของน้ำ	สัญลักษณ์ แทนจุดเก็บตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง (n)	พิกัดทางภูมิศาสตร์ (องศา)		ลักษณะของแหล่งน้ำ
				N	E	
บ่อน้ำร้อน ท่าสะท้อน	น้ำพุร้อน ธรรมชาติ	TS1	3	8.97652	99.26460	บ่ออาบ/แช่ คอนกรีต
		TS2	3	8.97642	99.26435	บ่อพัก คอนกรีต
		TS3	3	8.97631	99.26448	บ่อกำเนิด ดินปนหิน
	น้ำประปา	TS4	3	8.97489	99.26371	ระบบน้ำผิวดิน
		TS5	3	8.97745	99.24640	
บ่อน้ำร้อน เขาตอก	น้ำพุร้อน ธรรมชาติ	KT1	3	8.84299	99.22378	บ่ออาบ/แช่ คอนกรีต
		KT2	3	8.84258	99.22352	บ่อกำเนิด ดินปนหิน
		KT3	3	8.84225	99.22367	บ่อกำเนิด ดินปนหิน
	น้ำประปา	KT4	3	8.84082	99.22309	ระบบน้ำผิวดิน
		KT5	3	8.84303	99.22934	
	น้ำดื่มบรรจุขวด	BW	3	-	-	-
		รวม	33			

ขั้นตอนการเก็บและการเตรียมตัวอย่างน้ำ มีดังนี้

1. วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำดิบและน้ำอุปโภคบริโภค

การเก็บตัวอย่างน้ำพุร้อน: จัดเตรียมขวดแก้วสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำโดยเฉพาะของเครื่องวัดเรดอน RAD7 ขนาดปริมาตร 250 ml จากนั้น ใช้คีมหนีบปากขวดจุ่มลงไปเก็บน้ำใต้ผิวน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร หรือ

กึ่งกลางความลึกของแหล่งน้ำ เมื่อน้ำเต็มขวดให้ปิดฝาให้แน่นสนิทตั้งแต่ขวดยังอยู่ใต้ผิวน้ำ แล้วนำขึ้นมาเช็ดฝาให้แห้งก่อนใช้แผ่นพาราฟิล์ม (parafilm) พันปิดผนึกรอบฝาขวดอีกชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้มีอากาศเข้าและออกจากขวดอย่างเด็ดขาด

การเก็บตัวอย่างน้ำประปา: ทำการเปิดน้ำทิ้งเป็นเวลา 5 นาที เพื่อระบายน้ำที่ตกค้างอยู่ในสายยางออกให้หมด จากนั้น จึงเก็บน้ำให้เต็มขวดและปิดฝาให้แน่นสนิทได้น้ำโดยไม่ให้เกิดฟองอากาศภายในขวด ซึ่งใช้กรรมวิธีปิดผนึกด้วยแผ่นพาราฟิล์มเช่นเดียวกับการเก็บน้ำพุร้อนในงานวิจัย [26]

## 2. การบันทึกข้อมูลภาคสนาม

ขวดตัวอย่างทุกใบต้องปิดฉลากสติ๊กเกอร์ข้างขวดเพื่อบันทึกวัน-เวลา และรหัสสัญลักษณ์ของสถานที่เก็บอย่างชัดเจน พร้อมทั้งดำเนินการเก็บข้อมูลสิ่งแวดล้อม ณ จุดเก็บตัวอย่างทุกจุด ดังนี้:

วัดพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยแอปพลิเคชัน Google Earth เพื่อแสดงตำแหน่งในตารางที่ 1

วัดอุณหภูมิของน้ำด้วยเทอร์โมมิเตอร์

วัดปริมาณรังสีภูมิหลัง (Background, BG) ด้วยเครื่อง Survey Meter ยี่ห้อ Ranger รุ่น CE0197 โดยบันทึกค่าในหน่วยไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง ( $\mu\text{Sv/h}$ ) แล้วจึงแปลงค่าให้เป็นหน่วยมิลลิซีเวิร์ตต่อปี (mSv/y) สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรังสีตามธรรมชาติของโลก

## 3. ข้อจำกัดและการนำตัวอย่างส่งตรวจในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากกระบวนการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำมีข้อจำกัดภาคสนามหลายประการ ได้แก่ ขั้นตอนการติดตั้งระบบวัดที่ต้องใช้อุปกรณ์เสริมจำนวนมาก ความจำเป็นในการใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งไม่เอื้ออำนวยในพื้นที่ศึกษา ตลอดจนระยะเวลาในการเตรียมหัววัดและการอ่านค่าที่ต้องใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 45 นาที ถึง 1 ชั่วโมง ต่อหนึ่งตัวอย่าง คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำทั้งหมดกลับมาตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนภายในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเรดอน RAD7 Electronic radon detector จะต้องดำเนินการให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 3-4 วัน นับจากเวลาที่เก็บตัวอย่าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของแก๊สเรดอน (Rn-222) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตอยู่ที่ 3.82 วัน

### 3. ขั้นตอนการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ

1) ในการเตรียมอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแก๊สเรดอนในน้ำ เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบเครื่องวัดชนิด RAD7 ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้นใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศยี่ห้อ LABOPORT รุ่น N86 ดูดอากาศออกจากสายยางทุกเส้นเพื่อกำจัดความชื้นที่ตกค้างอยู่ภายใน แล้วจึงทำการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันตามวงจรระบบวัดที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้งานเครื่อง RAD7 โดยตรง

ทั้งนี้ กระบวนการตรวจวัดและวิเคราะห์แก๊สเรดอนทั้งหมดได้ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด พร้อมทั้งมีการปรับตั้งค่าตัวเครื่องอย่างสม่ำเสมอเพื่อรับประกันความแม่นยำของผลลัพธ์ ในส่วนของการปรับแก้ระบบ (calibration) จะใช้น้ำปราศจากเรดอนที่ผ่านการกำจัดไอออน (deionized water) เป็นสารมาตรฐาน เพื่อลดผลกระทบจากรังสีภูมิหลังที่อาจหลงเหลือจากตัวอย่างก่อนหน้า ยิ่งไปกว่านั้น ก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละครั้ง จะต้องเปิดระบบไล่อากาศออก (purge) เพื่อควบคุมและรักษาความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบให้ต่ำกว่า 10 % ตลอดกระบวนการทดลอง [26]

สำหรับเครื่องวัด RAD7 ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพสูงโดยมีขีดจำกัดล่างของการตรวจวัด (Minimum Detectable Activity: MDA) หรือ ความเข้มข้นต่ำสุดของเรดอนในน้ำที่ตัวเครื่องสามารถตรวจจับได้ อยู่ที่ประมาณ 0.1-1 pCi/L (หรือเทียบเท่าประมาณ 0.004-0.037 Bq/L)

2) เริ่มต้นระบบวัดด้วยการไล่ความชื้นออกจากระบบ โดยใช้ขวดเปล่าสำหรับเก็บตัวอย่างขนาด 250 ml ซึ่งผ่านการอบแห้ง ต่อเข้ากับระบบวัด แล้วดำเนินการเปิดเครื่อง RAD7 และเครื่องพริ้นเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่อง RAD7 เริ่มไล่

ความชื้นในภายในเครื่องวัดประมาณ 5 นาที โดยกดเลือกโหมด Purge เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีค่าต่ำกว่า 10 % หากพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ยังสูงอยู่ ให้ดำเนินการไล่ความชื้นอีกจนกว่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดต่ำลง

3) ในการเริ่มตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สเรดอน ได้ทำการเปลี่ยนจากขวดอบแห้งใบเปล่ามาเป็นขวดที่บรรจุตัวอย่างน้ำที่ต้องการทดสอบ จากนั้น เลือกคำสั่งไปที่โหมดทดสอบ (Test) เพื่อให้ระบบเริ่มทำงานและรอจนกว่ากระบวนการวัดจะเสร็จสิ้น โดยตัวเครื่องมีขั้นตอนการวัดตัวอย่างน้ำแต่ละขวดทั้งหมด 4 รอบ รอบละ 5 นาทีต่อเนื่องกัน เมื่อเครื่องทำงานเสร็จสิ้นสมบูรณ์ หน้าจอจะแสดงข้อความว่า "Goodnight" พร้อมทั้งส่งพิมพ์ค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำออกมาทั้งหมด 4 ค่า รวมถึงคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ให้ทันทีในหน่วยเบ็กเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร ( $Bq/m^3$ ) นอกจากนี้ ข้อมูลการตรวจวัดทั้งหมดได้ถูกบันทึกและจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของตัวเครื่องโดยอัตโนมัติ ซึ่งผู้วิจัยสามารถเชื่อมต่อเครื่องวัดเข้ากับคอมพิวเตอร์ แล้วใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ "CAPTURE" ในการดึงข้อมูลผลการวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำออกมา เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติในขั้นตอนต่อไป

4) เมื่อตรวจวัดแก๊สเรดอนเสร็จสิ้น นำตัวอย่างน้ำไปตรวจวัดปริมาณทางเคมีกายภาพของน้ำพุร้อนด้วยเครื่องวัดคุณภาพน้ำ ยี่ห้อ HACH รุ่น HQ40D โดยวัดปริมาณต่างๆ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) สภาพนำไฟฟ้า (Electric Conductivity, EC) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solid, TDS) ค่าความเค็ม (Salinity) และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)

#### 4. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อน

ข้อมูลความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำที่วัดได้จากเครื่อง RAD7 จะแสดงผลในหน่วยเบ็กเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร ( $Bq/m^3$ ) คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปเบ็กเคอเรลต่อลิตร ( $Bq/L$ ) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานและระดับอ้างอิงความปลอดภัย โดยกำหนดให้  $1 \text{ kBq}/m^3$  มีค่าเท่ากับ  $1 \text{ Bq}/L$  (หรือใช้วิธีหารด้วย 1,000)

นอกจากนี้ เนื่องจากแก๊สเรดอนมีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลา ทำให้เวลาในขณะที่ตรวจวัดจริงอาจล่วงเลยไปจากวันและเวลาที่เก็บตัวอย่างภาคสนาม ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำผลการวัดจากแต่ละพื้นที่มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันได้อย่างแม่นยำ จึงต้องนำค่าความเข้มข้นที่อ่านได้มาปรับเทียบย้อนกลับ (decay correction) ให้เป็นค่าความเข้มข้น ณ วันที่เก็บตัวอย่างจริง โดยคำนวณผ่านสมการที่ (1) และสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่บรรยากาศ ( $C_{atm}$ ) ได้จากสมการที่ (2)

$$C_R = \frac{C}{e^{-\lambda t}} \quad (1)$$

$$C_{atm} (Bq/m^3) = C_R \times TF \quad (2)$$

เมื่อตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (1) และ (2) มีความหมายดังนี้:

$C_R$  คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ณ เวลาที่เก็บตัวอย่างจริง มีหน่วยเป็นเบ็กเคอเรลต่อลิตร ( $Bq/L$ ) หรือเทียบเท่ากับ  $kBq/m^3$

$C$  คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ณ เวลาที่ตรวจวัด มีหน่วยเป็นเบ็กเคอเรลต่อลิตร ( $Bq/L$ )

$\lambda$  คือ อัตราการสลายตัวของเรดอนมีค่าเท่ากับ  $2.1 \times 10^{-6} \text{ 1/s}$  [28] และ  $t$  เป็นเวลาที่นับย้อนกลับจากเวลาที่ตรวจวัดไปยังเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

$t$  คือ ระยะเวลาที่นับย้อนกลับจากเวลาที่ตรวจวัดไปยังเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

เมื่อ  $C_{atm}$  มีหน่วยเป็นเบ็กเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร ( $kBq/m^3$ )

TF (Transfer Coefficient) คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทแก๊สเรดอนจากน้ำสู่อากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $10^{-4}$

**5. การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปี**

การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับการกลืนกิน (Annual effective dose for ingestion,  $D_{ing}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [25, 28]

$$D_{ing} \text{ (Sv/y)} = C_R \times CF \times C_w \quad (3)$$

โดย CF (Effective dose coefficient factor for ingestion) คือ ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเรดอนที่มีผลมาจากการบริโภคน้ำมีค่าเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-9}$  (Sv/Bq) และ  $C_w$  (Weighted estimate of consumption) แทนค่าประมาณการใช้น้ำที่ถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 60 ลิตรต่อปี (L/y) ใช้สำหรับน้ำประปา [9, 28] และในน้ำพุร้อน [29] ส่วนในน้ำดื่มบรรจุขวด เลือกใช้ค่า 730 L/y [25, 28]

การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับการสูดดม (Annual effective dose for inhalation,  $D_{inh}$ ) แก๊สเรดอนที่ฟุ้งกระจายจากน้ำสู่อากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [25, 28, 30]

$$D_{inh} \text{ (Sv/y)} = C_R \times TF \times F \times E \times T \quad (4)$$

เมื่อ F คือ ปัจจัยการแปลงรังสีของการสัมผัสแก๊สเรดอน เท่ากับ  $9 \times 10^{-6}$  Sv/(hxBq/L)

E คือ ปัจจัยความสมดุลภายในอาคารระหว่างแก๊สเรดอนกับลูกหลาน เท่ากับ 0.4

T คือ เวลาภายในอาคารรายปี มีค่าประมาณ 7,000 ชั่วโมงต่อปี (7,000 h/y)

การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีโดยรวมจากการกลืนกินและสูดดม (Total annual effective dose,  $D_T$ ) เป็นผลรวมของปริมาณรังสียังผลที่ได้รับรายปีจากการกลืนกินน้ำที่ปนเปื้อนแก๊สเรดอนและการสูดดมแก๊สเรดอนที่สลายตัวจากน้ำสู่อากาศ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6) [31]

$$D_T \text{ (Sv/y)} = D_{ing} + D_{inh} \quad (6)$$

การประเมินปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับกระเพาะอาหารและปอด (Annual effective dose for stomach,  $D_S$  and lungs,  $D_L$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ [32]

$$D_S \text{ (mSv/y)} = D_{ing} \times W_T \quad (7)$$

$$D_L \text{ (mSv/y)} = D_{inh} \times W_T \quad (8)$$

เมื่อ  $W_T$  (Tissue weighting factor) คือ ปัจจัยถ่วงน้ำหนักเนื้อเยื่อ (tissue weighting factor) เป็นค่าที่บอกความไวต่อรังสีของอวัยวะแต่ละส่วน มีค่าเท่ากับ 0.12 สำหรับกระเพาะอาหาร และปอด [33]

**6. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล**

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย

1) สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) เพื่อใช้อธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูล ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

2) สถิติสำหรับทดสอบสมมติฐาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม วิเคราะห์ด้วย Independent samples t-test สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มากกว่า 2 กลุ่ม วิเคราะห์ด้วย One-way ANOVA สำหรับข้อมูลแจกแจงปกติ (normal distribution)

3) สถิติทดสอบการกระจายของข้อมูลแบบ Shapiro-Wilk Normality Test สำหรับกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กน้อยกว่า 50 ตัวอย่าง

โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ MS-Excel และ IBM SPSS Statistics เวอร์ชันสำหรับทดลองใช้ฟรี

**ผลการวิจัย**

**1. ลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำในพื้นที่ศึกษา**

การตรวจวัดลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน ตำบลท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำร้อนเขาตอก ตำบลเขาตอก อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี จำแนกแหล่งน้ำออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำพุร้อนธรรมชาติ ประกอบด้วยบ่อน้ำเกิด บ่อน้ำพัก และบ่อน้ำอาบ 2) น้ำประปา 3) น้ำดื่มบรรจุขวด ซึ่งมีจำนวนตัวอย่าง (n) รวมตัวอย่างน้ำพุร้อนทั้งหมด 18 ตัวอย่าง น้ำประปา จำนวน 12 ตัวอย่าง และน้ำดื่มบรรจุขวด จำนวน 3 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 33 ตัวอย่าง โดยศึกษาปริมาณทางเคมีกายภาพของน้ำจำนวน 6 ปริมาณ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature, T) ค่า pH สภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) ค่าความเค็ม (Salinity) และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ซึ่งแสดงด้วยค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ได้ผลดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำในพื้นที่ศึกษา

กลุ่มตัวอย่าง	n	ลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำในพื้นที่ศึกษา					
		T (°C)	pH	EC (S/m)	TDS (g/L)	Salinity (ppt)	DO (mg/L)
TS1	3	40.00±1.00	7.38±0.15	0.16±0.00	0.78±0.00	0.78±0.00	8.30±0.18
TS2	3	45.00±0.00	6.97±0.05	0.15±0.00	0.77±0.00	0.77±0.01	8.38±0.06
TS3	3	63.00±0.00	6.85±0.09	0.15±0.00	0.76±0.00	0.77±0.00	8.49±0.06
TS4	3	28.00±0.00	7.73±0.25	0.02±0.00	0.08±0.01	0.09±0.01	7.90±0.22
TS5	3	27.33±0.58	6.89±0.13	0.02±0.00	0.07±0.01	0.08±0.01	7.68±0.67
รวม	15	40.67±13.55	7.16±0.38	0.10±0.07	0.49±0.35	0.50±0.35	8.15±0.42
KT1	3	39.00±0.00	6.94±0.03	0.12±0.00	0.60±0.00	0.60±0.00	8.49±0.03
KT2	3	51.00±0.00	6.77±0.42	0.12±0.00	0.59±0.00	0.60±0.01	8.34±0.07
KT3	3	38.33±0.58	6.48±0.11	0.12±0.00	0.59±0.00	0.59±0.00	8.43±0.06
KT4	3	27.33±0.58	7.67±0.03	0.03±0.00	0.17±0.01	0.16±0.01	7.64±0.04
KT5	3	27.67±0.58	7.62±0.17	0.02±0.00	0.15±0.01	0.16±0.01	7.29±0.60
รวม	15	36.67±9.05	7.10±0.52	0.08±0.05	0.42±0.22	0.42±0.22	8.04±0.55
BW	3	25.00±0.00	8.00±0.02	0.01±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	8.38±0.00
รวมทั้งหมด	33	37.42±11.66	7.21±0.49	0.08±0.06	0.42±0.30	0.42±0.05	8.12±0.47
ระดับอ้างอิง		23-32	5-9	ไม่เกิน 0.15	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	ไม่ต่ำกว่า 6

จากตารางที่ 2 เมื่อนำข้อมูลปริมาณทางเคมีกายภาพของแต่ละกลุ่มตัวอย่างไปทดสอบการกระจายของข้อมูลพบว่า ข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงแบบปกติ (Shapiro-Wilk Normality Test,  $p > 0.05$ ) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำ พบว่า อุณหภูมิของน้ำพุร้อนจากบ่อน้ำเกิดในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน (TS3) มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่

ระดับ  $63.00 \pm 0.00$  °C รองลงมา คือ บ่อกำเนิดของบ่อน้ำร้อนเขาตอก (KT2) อยู่ที่ระดับ  $51.00 \pm 0.00$  °C และบ่อพักของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน (TS2) ที่ระดับ  $45.00 \pm 0.00$  °C ส่วนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิจากบ่ออาบของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน (TS1) ซึ่งประชาชนนิยมไปใช้บริการอาบและแช่เท้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับบ่ออื่น ๆ พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $40.00 \pm 1.00$  °C โดยค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมিরะหว่าง 2 อำเภอ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยน้ำพุร้อนจากบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อยู่ที่ระดับ  $49.33 \pm 10.49$  °C สูงกว่าค่าเฉลี่ยของบ่อน้ำร้อนเขาตอก อยู่ที่ระดับ  $42.78 \pm 6.18$  °C โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) และอุณหภูมิเฉลี่ยรวมของน้ำพุร้อนทั้งสองพื้นที่ อยู่ที่ระดับ  $46.06 \pm 9.01$  °C จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำพุร้อนจะสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำผิวดินในธรรมชาติทั่วไป ซึ่งอยู่ในช่วง 23-32 °C [34] ส่วนอุณหภูมิของน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวดอยู่ในช่วง  $25.00 \pm 0.00$  °C ถึง  $28.00 \pm 0.00$  °C

ค่า pH เฉลี่ยของน้ำพุร้อนแต่ละบ่อ อยู่ในช่วง  $6.48 \pm 0.11$  ถึง  $7.38 \pm 0.15$  ส่วนค่าเฉลี่ย pH ของน้ำประปาอยู่ในช่วง  $6.89 \pm 0.13$  ถึง  $7.73 \pm 0.25$  ค่าเฉลี่ย pH รวมของตัวอย่างน้ำทั้งหมด อยู่ที่ระดับ  $7.21 \pm 0.49$  จะเห็นได้ว่าค่า pH ของตัวอย่างน้ำทั้งหมดอยู่ในช่วง 5-9 ตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับน้ำผิวดิน [35] ส่วนค่า pH ในน้ำดื่มบรรจุขวดที่เป็นชุดควบคุม อยู่ที่ระดับ  $8.00 \pm 0.02$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่ม ที่ระดับ 6.5-8.5 [15] ส่วนค่าเฉลี่ยของสภาพนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำพุร้อนอยู่ในช่วง  $0.12 \pm 0.00$  S/m ถึง  $0.16 \pm 0.00$  S/m โดยค่าเฉลี่ย EC ของน้ำพุร้อนแต่ละกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) และพบว่าค่า EC ของน้ำพุร้อนจากบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อยู่ที่ระดับ  $0.15 \pm 0.00$  S/m สูงกว่าค่าเฉลี่ยที่ตรวจพบจากบ่อน้ำร้อนเขาตอกซึ่งอยู่ที่ระดับ  $0.12 \pm 0.00$  S/m โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) ค่า EC ของน้ำพุร้อนมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $0.14 \pm 0.02$  S/m ในน้ำประปามีค่า EC อยู่ในช่วง  $0.02 \pm 0.00$  S/m ถึง  $0.03 \pm 0.00$  S/m ส่วนน้ำดื่มบรรจุขวดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $0.01 \pm 0.00$  S/m แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของ EC ในน้ำพุร้อนสูงกว่าน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) ค่าเฉลี่ยของ EC โดยรวมของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $0.08 \pm 0.06$  S/m ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำจืด กำหนดไว้ไม่เกิน 0.15 S/m [15]

เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด (TDS) ในน้ำพุร้อนพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง  $0.59 \pm 0.00$  g/L ถึง  $0.78 \pm 0.00$  g/L โดยค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TDS ในน้ำพุร้อนระหว่าง 2 พื้นที่ พบว่า บ่อน้ำร้อนท่าสะทอนอยู่ที่ระดับ  $0.77 \pm 0.01$  g/L สูงกว่าค่าเฉลี่ยของบ่อน้ำร้อนเขาตอก ซึ่งอยู่ที่ระดับ  $0.59 \pm 0.01$  g/L ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของน้ำพุร้อน อยู่ที่ระดับ  $0.68 \pm 0.09$  g/L เห็นได้ว่าค่า TDS ของน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษาทั้งพื้นที่ที่มีค่าสูงกว่าระดับมาตรฐานน้ำดื่ม ซึ่งไม่ควรเกิน 0.5 g/L แต่อยู่ในระดับที่ไม่เกิน 3 g/L ของน้ำผิวดิน [36] ส่วนน้ำประปามีค่า TDS อยู่ในช่วง  $0.07 \pm 0.01$  g/L ถึง  $0.17 \pm 0.01$  g/L และน้ำดื่มบรรจุขวดอยู่ที่ระดับ  $0.03 \pm 0.00$  g/L ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำดื่ม ทำนองเดียวกันกับค่าความเค็ม (Salinity) พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเค็มในน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $0.77 \pm 0.01$  ppt ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของบ่อน้ำร้อนเขาตอก ซึ่งอยู่ที่ระดับ  $0.60 \pm 0.01$  ppt (Tukey HSD,  $p < 0.05$ ) และมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของน้ำพุร้อนอยู่ที่ระดับ  $0.69 \pm 0.09$  ppt ซึ่งสูงกว่าระดับมาตรฐานน้ำดื่ม ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 0.5 ppt [37] แต่ต่ำกว่าระดับน้ำผิวดิน (น้ำจืด) ไม่เกิน 1 ppt ส่วนค่าเฉลี่ยความเค็มของน้ำประปา อยู่ในช่วง  $0.08 \pm 0.01$  ppt ถึง  $0.16 \pm 0.01$  ppt และน้ำดื่มบรรจุขวดมีค่าเฉลี่ย  $0.03 \pm 0.00$  ppt โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด  $0.42 \pm 0.05$  ppt ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำดื่ม

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ของน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอนและบ่อน้ำร้อนเขาตอก มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ระดับ ที่ระดับ  $8.39 \pm 0.13$  mg/L และ  $8.42 \pm 0.08$  mg/L ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ย DO ในน้ำพุร้อนของแต่ละ

ละกลุ่มตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p > 0.05$ ) มีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $8.41 \pm 0.10$  mg/L ทั้งนี้ค่า DO ของทุกกลุ่มตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินที่ระดับไม่ต่ำกว่า 6 mg/L [35] ส่วนค่าเฉลี่ย DO ของน้ำประปา อยู่ในช่วง  $7.29 \pm 0.60$  mg/L ถึง  $7.90 \pm 0.22$  mg/L และในน้ำดื่มบรรจุขวดอยู่ที่ระดับ  $8.38 \pm 0.00$  mg/L ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มที่ระดับ 5-8 mg/L [38]

## 2. ระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

ผลการวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำ ( $C_R$ ) ในพื้นที่ท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ ค่าประมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่ชั้นบรรยากาศ ( $C_{atm}$ ) และปริมาณรังสีภูมิหลัง (BG) ณ จุดเก็บตัวอย่างทุกจุดในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างรวมทั้งหมด 33 ตัวอย่าง ( $n = 33$ ) พร้อมทั้งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง ได้แสดงในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังตารางที่ 3

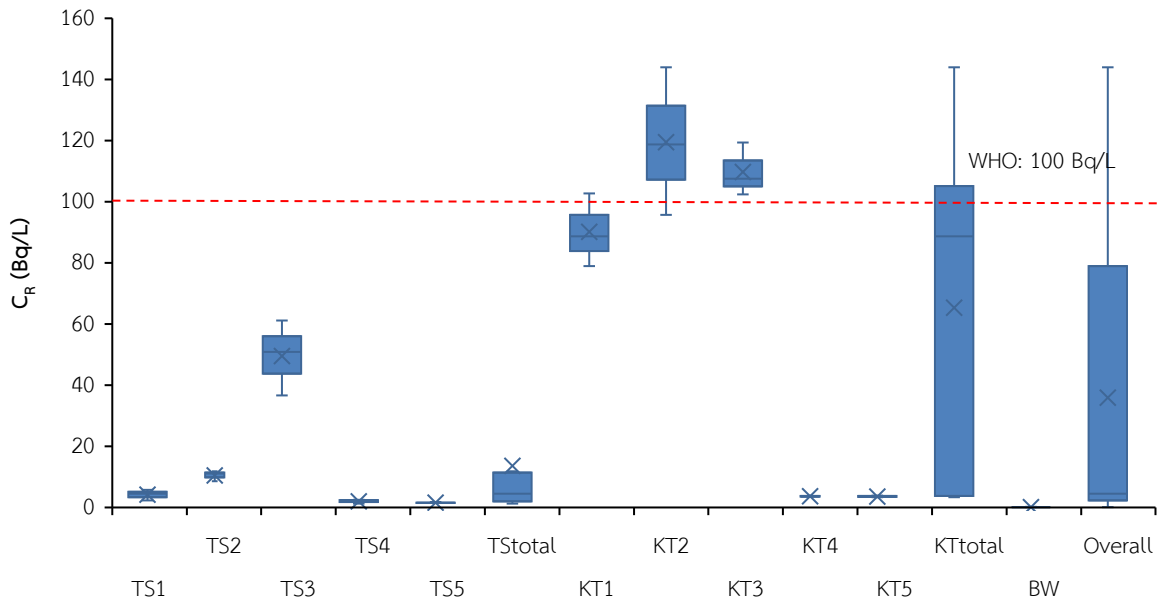
**ตารางที่ 3** ระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำ ค่าประมาณในชั้นบรรยากาศ และปริมาณรังสีภูมิหลังในพื้นที่ศึกษา

กลุ่มตัวอย่าง	n	$C_R$ (Bq/L)	$C_{atm}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	BG (mSv/y)
TS1	3	$4.18 \pm 1.46$	$0.42 \pm 0.18$	$1.67 \pm 0.00$
TS2	3	$10.49 \pm 1.68$	$1.05 \pm 0.17$	$1.75 \pm 0.00$
TS3	3	$49.56 \pm 12.27$	$4.96 \pm 1.23$	$7.19 \pm 0.00$
TS4	3	$2.01 \pm 0.65$	$0.20 \pm 0.06$	$1.61 \pm 0.05$
TS5	3	$1.55 \pm 0.16$	$0.16 \pm 0.02$	$0.96 \pm 0.09$
ค่าเฉลี่ยรวม ท่าสะท้อน	15	$13.56 \pm 19.51$	$1.36 \pm 1.95$	$2.64 \pm 2.37$
KT1	3	$90.11 \pm 11.95$	$9.01 \pm 1.20$	$3.77 \pm 0.00$
KT2	3	$119.47 \pm 24.12$	$11.95 \pm 2.41$	$7.98 \pm 0.00$
KT3	3	$109.76 \pm 8.71$	$10.98 \pm 0.87$	$6.49 \pm 0.00$
KT4	3	$3.68 \pm 0.21$	$0.37 \pm 0.02$	$2.51 \pm 0.05$
KT5	3	$3.60 \pm 0.26$	$0.36 \pm 0.03$	$1.26 \pm 0.05$
ค่าเฉลี่ยรวม เขาตอก	15	$65.32 \pm 54.11$	$6.53 \pm 5.41$	$4.40 \pm 2.58$
BW	3	$0.15 \pm 0.00$	$0.01 \pm 0.00$	-
ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด	33	$35.87 \pm 46.98$	$3.59 \pm 4.70$	$3.29 \pm 2.58$
ระดับอ้างอิง	ค่า MCL:	11.1 Bq/L	15 Bq/m <sup>3</sup>	2.4 mSv/y
	ค่า AMCL:	148 Bq/L	ค่าเฉลี่ยทั่วโลก	ค่าเฉลี่ยทั่วโลก

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนต่ำสุดอยู่ที่ระดับ  $0.15 \pm 0.00$  Bq/L ตรวจพบในน้ำดื่มบรรจุขวด และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ระดับ  $119.47 \pm 24.12$  Bq/L ตรวจพบที่บ่อน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก (KT2) และมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $35.87 \pm 46.98$  Bq/L ซึ่งสูงกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนแก๊สเรดอนในน้ำดื่ม (MCL) ที่ระดับ 11.1 Bq/L ซึ่งกำหนดโดย US EPA [14] แต่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม (100 Bq/L) ซึ่งแนะนำโดย WHO [15] และต่ำกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (AMCL) ที่ระดับ 148 Bq/L [14]

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 3 ไปเขียนแผนภาพกล่อง (Boxplot) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ได้ผลดังภาพที่ 4 ทั้งนี้ จากการทดสอบความสอดคล้องทางสถิติด้วยวิธี Shapiro-Wilk Normality Test พบว่า ข้อมูลของทุกกลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) และ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างน้ำทั้งหมดด้วยสถิติ One-way ANOVA พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p < 0.05$ ) โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นแก๊สเรดอนระหว่างสองพื้นที่ศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนของบ่อน้ำร้อนเขาตอกอยู่ที่ระดับ  $65.32 \pm 54.11$  Bq/L ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอนที่ระดับ  $13.56 \pm 19.51$  Bq/L อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



ภาพที่ 4 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำของกลุ่มตัวอย่างในพื้นที่ศึกษา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำระหว่างบ่ออาบ/แช่ และบ่อพัก ซึ่งเป็นบ่อคอนกรีตกับบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนธรรมชาติ พบว่า บ่ออาบ/แช่ TS1 และบ่อพัก TS2 ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $4.18 \pm 1.46$  Bq/L และ  $10.49 \pm 1.68$  Bq/L ตามลำดับ ในขณะที่บ่ออาบ/แช่ KT1 ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก ซึ่งเป็นบ่อคอนกรีต เช่นเดียวกัน แต่พบว่า มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสูงที่ระดับ  $90.11 \pm 11.95$  Bq/L ซึ่งสูงกว่าบ่ออาบ/แช่ TS1 และ TS2 ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนซึ่งเป็นบ่อธรรมชาติที่เป็นบ่อดินปนหิน พบว่า ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก บ่อกำเนิด KT2 และ KT3 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $119.47 \pm 24.12$  Bq/L และ  $109.76 \pm 8.71$  Bq/L ตามลำดับ และสูงกว่าบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน TS3 โดยพบที่ระดับ  $49.56 \pm 12.27$  Bq/L อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) เห็นได้ว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนจากบ่ออาบคอนกรีต มีความเข้มข้นแก๊สเรดอนต่ำกว่าน้ำจากบ่อกำเนิดน้ำพุร้อนธรรมชาติที่เกิดจากรอยแยกของพื้นพิภพ อาจส่งผลให้แก๊สเรดอนที่ฟุ้งกระจายออกมาได้สูง [3]

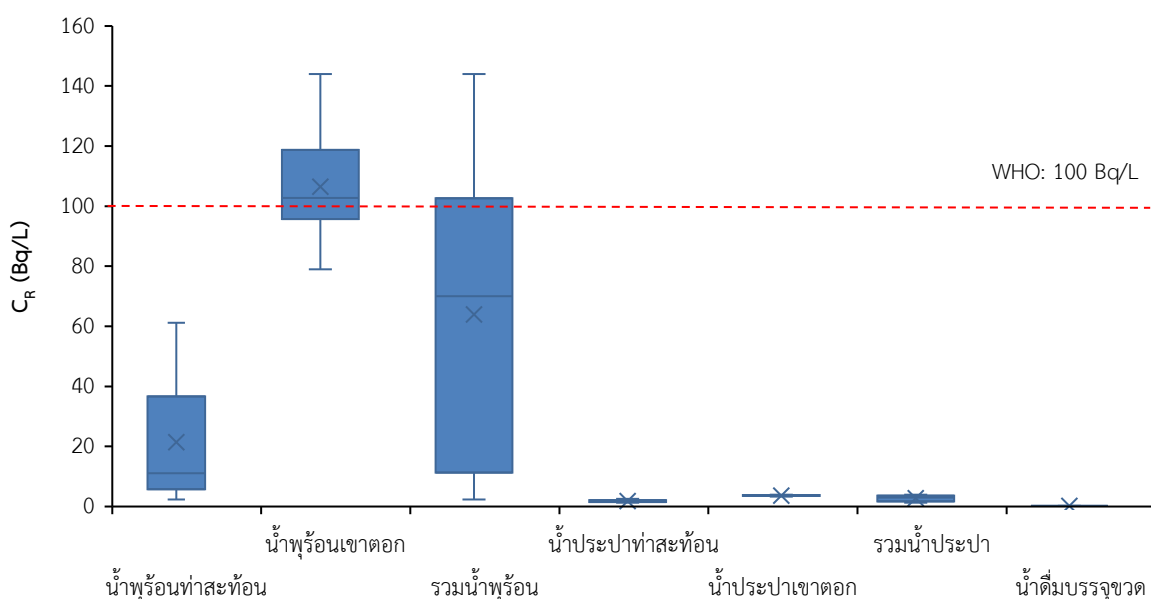
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนระหว่าง 2 พื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก อยู่ที่ระดับ  $106.45 \pm 19.18$  Bq/L สูงกว่าค่าเฉลี่ยของบ่อน้ำร้อนท่าสะทอนที่ระดับ  $21.41 \pm 22.19$  Bq/L โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนกับระดับอ้างอิงความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม พบว่า มีเฉพาะค่าเฉลี่ยน้ำพุร้อนจากบ่อกำเนิดในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก KT2 และ KT3 เท่านั้นที่สูงกว่าระดับอ้างอิงความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่มที่แนะนำโดย WHO ที่ระดับ 100 Bq/L [15] อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม ยังต่ำกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (AMCL) ที่ระดับ 148 Bq/L [14]

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาระยะทางจากบ่อกำเนิดไปบ่อพัก พบว่า บ่อที่อยู่ใกล้บ่อกำเนิดมีความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงกว่าบ่อที่อยู่ไกล ดังจะเห็นได้จากบ่ออาบ/แช่ TS1 และบ่อพัก TS2 ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอนอยู่ห่างจากจากบ่อกำเนิดเป็นระยะทาง 50 เมตร และ 25 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่บ่ออาบในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก KT1 อยู่ห่างจากบ่อกำเนิดเพียง 5 เมตร ดังนั้น ระยะทางอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนจากบ่อ KT1 ( $90.11 \pm 11.95$  Bq/L) สูงกว่าจากบ่อ TS2 ( $10.49 \pm 1.68$  Bq/L) และ TS1 ( $4.18 \pm 1.46$  Bq/L) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประปาซึ่งผลิตจากน้ำผิวดินทั้งสองพื้นที่ โดยในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน TS4 และ TS5 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $2.01 \pm 0.65$  Bq/L และ  $1.55 \pm 0.16$  Bq/L ตามลำดับ ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก KT4 และ KT5 อยู่ที่ระดับ  $3.68 \pm 0.21$  Bq/L และ  $3.60 \pm 0.26$  Bq/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำประปาระหว่างกลุ่มตัวอย่างทั้ง 4 กลุ่ม พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p > 0.05$ )

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำต่างชนิดกันระหว่างน้ำพุร้อน น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด ได้ผลแสดงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลดังแผนภาพกล่องในภาพที่ 5 ทั้งนี้ จากการทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นด้วยวิธี Shapiro-Wilk Normality Test พบว่า ข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงแบบปกติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างด้วยสถิติ One-way ANOVA พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p < 0.05$ )

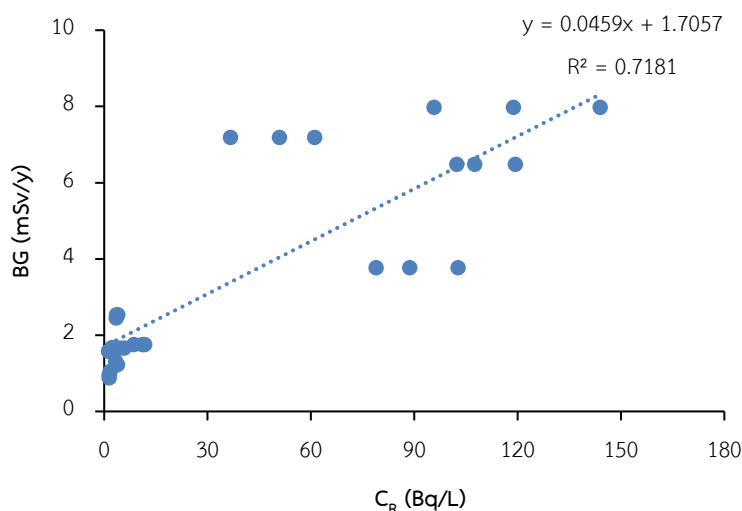
จากการทดสอบรายคู่ด้วยวิธี Tukey HDS พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับ  $63.93 \pm 48.16$  Bq/L ซึ่งสูงกว่าน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของน้ำประปาในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนค่าเฉลี่ยรวมของน้ำประปาทั้งสองพื้นที่ ( $2.71 \pm 1.03$  Bq/L) และน้ำดื่มบรรจุขวด ( $0.15 \pm 0.00$  Bq/L) มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ยิ่งไปกว่านั้น จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสากล พบว่า ไม่มีกลุ่มตัวอย่างน้ำประปาใดที่มีค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำสูงกว่าระดับอ้างอิงความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม (100 Bq/L) ที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p > 0.05$ )



ภาพที่ 5 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อน น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่ชั้นบรรยากาศ ( $C_{atm}$ ) ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำพุร้อนธรรมชาติสู่ชั้นบรรยากาศในพื้นที่ศึกษาเป็นทำนองเดียวกันกับความเข้มข้นแก๊สเรดอน กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยสูงสุดตรวจพบที่บ่อกำเนิดเขาตอก KT2 ที่ระดับ  $11.95 \pm 2.41 \text{ Bq/m}^3$  ในขณะที่ค่าเฉลี่ยต่ำสุดเป็นน้ำดื่มบรรจุขวดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ  $0.01 \pm 0.00 \text{ Bq/m}^3$  นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย  $C_{atm}$  ระหว่าง 2 พื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยรวมของพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก อยู่ที่ระดับ  $6.53 \pm 5.41 \text{ Bq/m}^3$  มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยรวมของพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน ที่ระดับ  $1.36 \pm 1.95 \text{ Bq/m}^3$  ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) ส่วนในน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด พบว่า ค่าเฉลี่ยของ  $C_{atm}$  อยู่ในช่วง  $0.15 \pm 0.00 \text{ Bq/m}^3$  ถึง  $3.68 \pm 0.21 \text{ Bq/m}^3$  ซึ่งพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p > 0.05$ ) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $3.59 \pm 4.70 \text{ Bq/m}^3$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกของแก๊สเรดอนภายนอกอาคารซึ่งอยู่ที่ระดับ  $15 \text{ Bq/m}^3$  [28] แสดงให้เห็นว่าแก๊สเรดอนในอากาศที่ปลดปล่อยจากน้ำอยู่ในระดับต่ำเนื่องจากเรดอนเป็นแก๊สเมื่ออยู่ในระบบเปิด สามารถฟุ้งกระจายไปได้ง่ายกว่าอยู่ในน้ำ ดิน หิน หรือภายในอาคาร [12]

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณรังสีภูมิหลัง (Background; BG) ในพื้นที่ศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีภูมิหลังระหว่างกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ ) ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีภูมิหลังรายปีบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ระดับ  $7.98 \pm 0.00 \text{ mSv/y}$  ตรวจพบที่บ่อกำเนิดน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก KT2 เช่นเดียวกับที่ตรวจพบความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงสุด นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างพื้นที่ 2 พื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของ BG ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก อยู่ที่ระดับ  $4.40 \pm 2.58 \text{ mSv/y}$  มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน ที่ระดับ  $2.64 \pm 2.37 \text{ mSv/y}$  ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) โดยมีค่าเฉลี่ย BG รวมทั้งหมดอยู่ที่ระดับ  $3.29 \pm 2.58 \text{ mSv/y}$  ซึ่งสูงกว่าปริมาณรังสีภูมิหลังเฉลี่ยทั่วโลก ที่ระดับ  $2.4 \text{ mSv/y}$  [28] เมื่อนำข้อมูลปริมาณรังสีภูมิหลังไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ได้ผลดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณรังสีภูมิหลังกับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

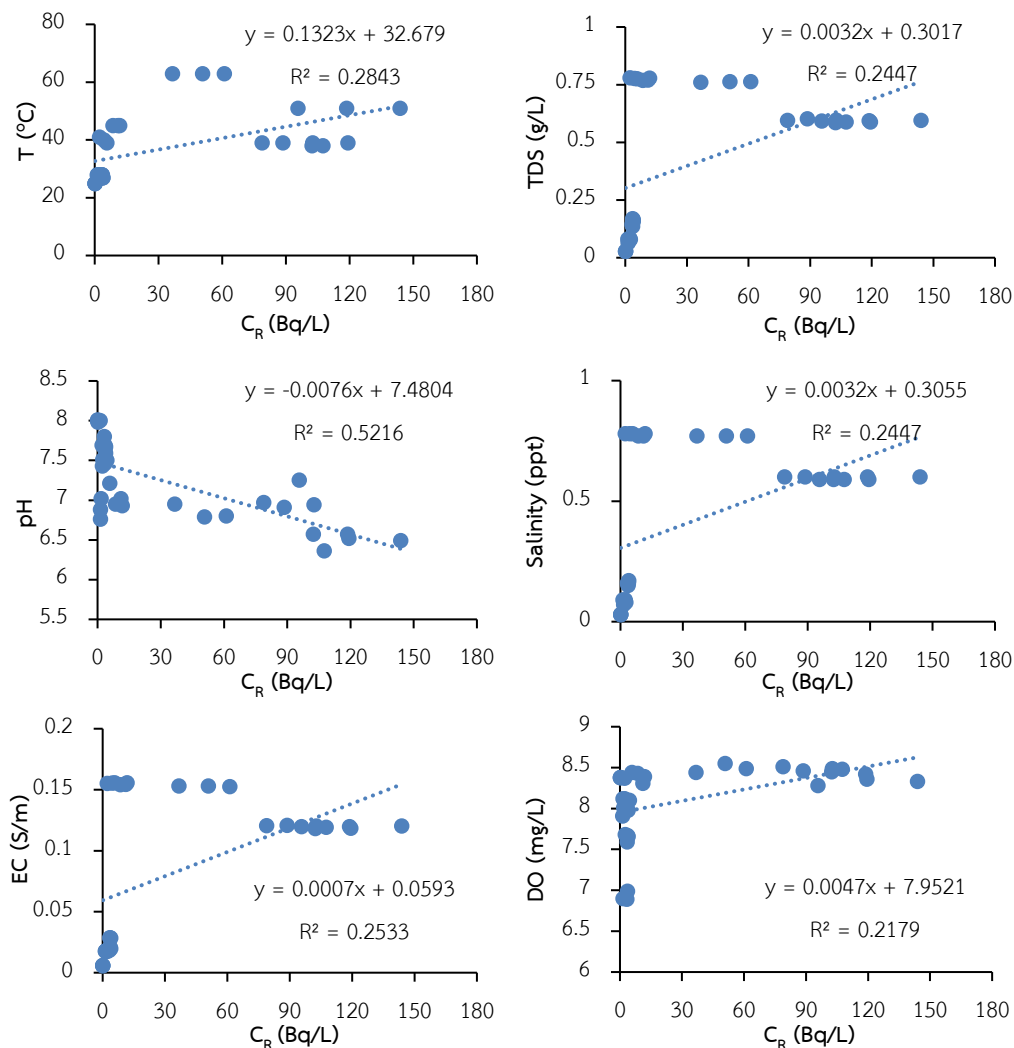
จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีภูมิหลังมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอน พบว่ามีค่า  $R^2 = 0.718$  และมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Regression statistics,  $p < 0.05$ ) นอกจากนี้พบว่า เส้นกราฟมีความชันเป็นบวก แสดงว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนและปริมาณรังสีภูมิหลังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อมีความเข้มข้นแก๊สเรดอนเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีภูมิหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน หากพิจารณาความเข้มข้นแก๊สเรดอนและ

ปริมาณรังสีกัมมันตรังสีในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกมีความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนและปริมาณรังสีกัมมันตรังสีสูงกว่าในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดิน (ภาพที่ 3) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอน [2, 24] ในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา มีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินสูงกว่าพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน จึงอาจมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ความเข้มข้นแก๊สเรดอนและปริมาณรังสีกัมมันตรังสีในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกมีค่าสูงกว่าบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางเคมีกายภาพของน้ำกับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ

เมื่อนำปริมาณทางเคมีกายภาพของน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ (T) ค่า pH สภาพนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (TDS) ค่าความเค็ม (Salinity) และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา ( $C_R$ ) ได้ผลดังภาพที่ 7 พบว่า มีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.2-0.5 โดยมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Regression statistics,  $p < 0.05$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระดับต่ำถึงปานกลาง แสดงว่าปริมาณทางเคมีกายภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊สเรดอนน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [19–23]

ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทั่วไปหากอุณหภูมิสูง แก๊สเรดอนจะลดลง แต่กรณีน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกลับพบเรดอนสูง เพราะบริเวณน้ำพุร้อนอุดมไปด้วยรอยเลื่อนและรอยแตกที่มีผลต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอน [3] ส่วนเรดอนเป็นแก๊สเฉื่อย ค่า



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเคมีกายภาพกับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ

pH จึงมีผลน้อยหรือไม่มีผลเลย และเนื่องจากเรดอนไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ค่า TDS, Salinity และ EC จึงไม่สัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอน [22–23] สำหรับค่า DO ของน้ำในพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ จึงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในระดับต่ำ

#### 4. ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีเนื่องจากแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

เมื่อนำค่าความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำมาประเมินปริมาณรังสียังผลที่ได้รับรายปีเนื่องจากแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อน ซึ่งมีการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับรายปีสำหรับการกลืนกิน ( $D_{ing}$ ) ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากการสูดดม ( $D_{inh}$ ) ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับโดยรวมจากการกลืนกินและสูดดม ( $D_T$ ) ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับรายปีสำหรับกระเพาะอาหาร ( $D_G$ ) และปอด ( $D_L$ ) ในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติในพื้นที่ศึกษา ได้ผลดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับการกลืนกินและการสูดดม ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับโดยรวมจากการกลืนกินและสูดดม ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับกระเพาะอาหาร และปอด ระหว่างกลุ่มตัวอย่าง พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (One-way ANOVA,  $p < 0.05$ )

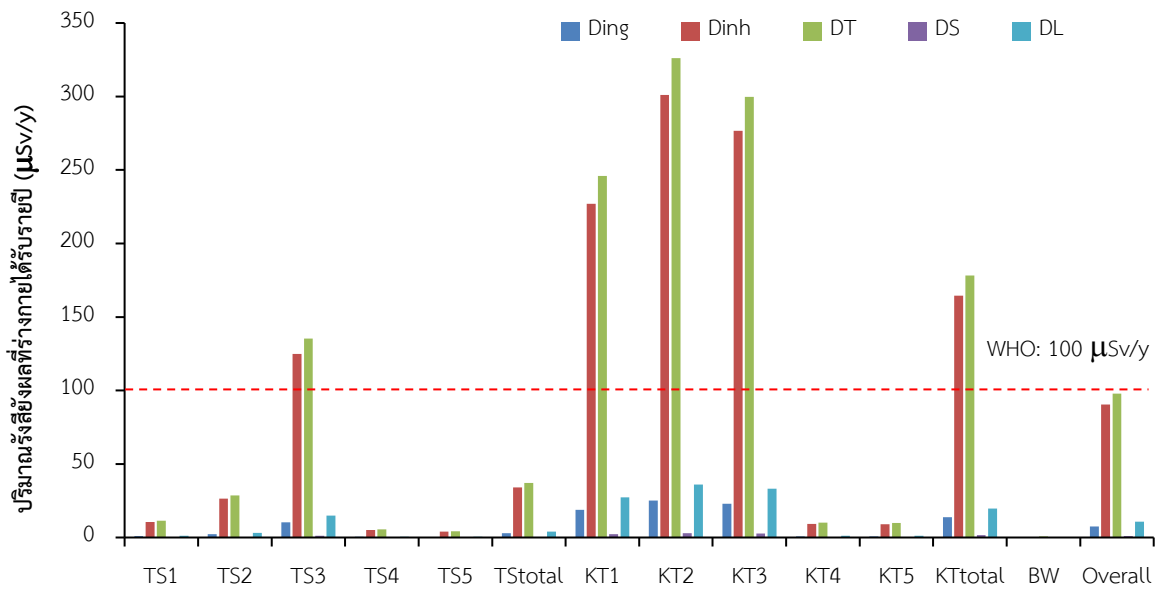
ตารางที่ 4 ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีเนื่องจากแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

กลุ่มตัวอย่าง	n	$D_{ing} (\mu\text{Sv/y})$	$D_{inh} (\mu\text{Sv/y})$	$D_T (\mu\text{Sv/y})$	$D_G (\mu\text{Sv/y})$	$D_L (\mu\text{Sv/y})$
TS1	3	0.88±0.37	10.55±4.44	11.42±4.81	0.11±0.04	1.27±0.53
TS2	3	2.20±0.35	26.43±4.23	28.63±4.59	0.26±0.04	3.17±0.51
TS3	3	10.41±2.58	124.90±30.93	135.31±33.51	1.25±0.31	14.99±3.71
TS4	3	0.42±0.14	5.07±1.63	5.49±1.77	0.05±0.02	0.61±0.20
TS5	3	0.33±0.03	3.91±0.40	4.23±0.44	0.04±0.00	0.47±0.05
ค่าเฉลี่ยรวม ท่าสะท้อน	15	2.85±4.10	34.17±49.16	37.02±53.26	0.34±0.49	4.10±5.90
KT1	3	18.92±2.51	227.07±30.12	245.99±32.63	2.27±0.30	27.25±3.61
KT2	3	25.09±5.06	301.07±60.78	326.16±65.84	3.01±0.61	36.13±7.29
KT3	3	23.05±1.83	276.61±21.94	299.66±23.77	2.77±0.22	33.19±2.63
KT4	3	0.77±0.04	9.26±0.52	10.04±0.56	0.09±0.01	1.11±0.06
KT5	3	0.76±0.06	9.06±0.66	9.81±0.72	0.09±0.01	1.09±0.08
ค่าเฉลี่ยรวม เขาตอก	15	13.72±11.36	164.61±136.37	178.33±147.73	1.65±1.36	19.75±16.36
BW	3	0.38±0.01	0.37±0.01	0.75±0.01	0.05±0.00	0.04±0.00
ค่าเฉลี่ยรวม ทั้งหมด	33	7.56±9.84	90.39±118.39	97.95±128.23	0.91±1.18	10.85±14.21
ระดับอ้างอิง				100 $\mu\text{Sv/y}$		

เมื่อนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสียังผลจากตารางที่ 4 ไปเขียนแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบดังภาพที่ 8 จะพบว่าค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณรังสียังผลรายปีที่ได้รับจากการกลืนกิน ( $D_{ing}$ ) รวมถึงปริมาณรังสียังผลรายปีที่มีผลต่อกระเพาะอาหาร ( $D_G$ ) และปอด ( $D_L$ ) ของตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ น้ำพุร้อน น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยที่องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 100  $\mu\text{Sv/y}$  [15]

ในขณะที่ปริมาณรังสียังผลรายปีจากการสูดดม ( $D_{inh}$ ) และปริมาณรังสียังผลรวม ( $D_T$ ) ของน้ำพุร้อนจากบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน (TS3) รวมถึงน้ำพุร้อนทุกกลุ่มตัวอย่างในพื้นที่เขาตอก (KT1, KT2 และ KT3) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิงขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดไว้ไม่เกิน  $100 \mu\text{Sv/y}$

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ  $D_{inh}$  และ  $D_T$  ในน้ำพุร้อนระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่า พื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Tukey HDS,  $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ สำหรับกลุ่มน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด พบว่ามีค่า  $D_{inh}$  และ  $D_T$  ต่ำกว่า  $100 \mu\text{Sv/y}$  อย่างชัดเจน และไม่มีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Tukey HDS,  $p > 0.05$ )



**ภาพที่ 8** ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีเนื่องจากการสัมผัสแก๊สเรดอนในน้ำในพื้นที่ศึกษา

เมื่อพิจารณาปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับรายปีสำหรับกระเพาะอาหาร ( $D_g$ ) และปอด ( $D_l$ ) เห็นได้ว่าปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับต่อปอดสูงกว่าต่อกระเพาะอาหาร เป็นการยืนยันได้ว่าโอกาสที่จะได้รับความเสี่ยงจากแก๊สเรดอนที่ปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากการกลืนกินมีน้อยกว่าจากการสูดดมแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่อากาศ หรือ สรุปได้ว่า ปริมาณรังสียังผลจากการสูดดมแก๊สเรดอนสูงกว่าปริมาณที่ได้รับจากการกลืนกิน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ WHO [12]

จากการประเมินดังกล่าว แม้ว่าผลได้แสดงให้เห็นว่า หากนำน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษาไปใช้ภายในอาคาร อาจจะเป็นความเสี่ยงที่แก๊สเรดอนจะปลดปล่อยจากน้ำสู่อากาศแล้ว ทำให้ผู้ที่อยู่อาศัยภายในอาคารมีโอกาสที่จะสูดดมแก๊สเรดอนและอาจเป็นอันตรายต่อปอดได้ แต่อย่างไรก็ตามผลดังกล่าว เป็นเพียงการประมาณค่าตามทฤษฎีโดยทั่วไป เพื่อให้ได้ข้อมูลเบื้องต้น ทั้งนี้ในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่ใช้สำหรับอาบและแช่น้ำพุร้อนเป็นระบบเปิด ไม่ได้กักเก็บน้ำไว้ในอาคารเพื่ออาบหรือแช่แต่อย่างใด ดังนั้น ความเสี่ยงในการรับเรดอนจากการสูดดมอาจลดลง แต่หากในอนาคตมีการพัฒนาเป็นห้องสพาน้ำพุร้อน อาจมีความเสี่ยงที่จะได้รับแก๊สเรดอนจากการหายใจสูงกว่าในระบบเปิด [39] นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสามารถนำไปต่อยอดการตรวจวัดแก๊สเรดอนในอากาศภายในอาคารบ้านเรือนบริเวณโดยรอบแหล่งน้ำพุร้อน โดยเฉพาะในอาคารสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 4 สุราษฎร์ธานี ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณบ่อน้ำร้อนเขาตอก และอาคารที่พักในรีสอร์ทในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน เพื่อให้ได้ข้อมูลความเข้มข้นแก๊สเรดอนภายในอาคารอย่างแท้จริงต่อไป

นอกจากนี้ ในหลายประเทศทั่วโลกยังมีการรายงานผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในน้ำประเภทต่าง ๆ ทั้งน้ำพุร้อน น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด ในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติ โดยมีตัวอย่างข้อมูลสรุปดังแสดงในตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อน

ประเภทของน้ำ	ประเทศ	พื้นที่ศึกษา	ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ (Bq/L)	อ้างอิง
น้ำพุร้อนจืด	เวเนซุเอลา	Northern Venezuela	255 - 576	[40]
	จอร์แดน	Shounah Al-Shamalyah, Abu Dhablah, Hammamat Ma'in, Hammamat Zara, Jordanian Hamma	4.53 ± 0.75	[41]
	ปากีสถาน	Dhirkot Azad Kashmir, Sub-Himalayan District	0.28 - 30.25	[25]
	อินโดนีเซีย	West Java	1 - 31	[42]
	มาเลเซีย	Southwest Coastal Region of Peninsular Malaysia	99 ± 6	[16]
	ไทย	อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี	95-154	[43]
	ไทย	อ.เคียนซา และอ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี	63.93 ± 48.16	งานวิจัยนี้
	น้ำพุร้อนเค็ม	อิตาลี	Ischia island	7 - 98
ไทย		อ.ปะเหลียน จ.ตรัง	35.00 ± 0.67	[17]
ไทย		อ.ท่าฉาง จ.สุราษฎร์ธานี	8,507.48 ± 1.06	[18]
ไทย		อ.คลองท่อม จ.กระบี่	18.64 ± 0.96	[18]
น้ำประปา	เวเนซุเอลา	Northern Venezuela	0.1 - 47.4	[40]
	มาเลเซีย	Southwest Coastal Region of Peninsular Malaysia	1.95 ± 0.61	[16]
	ไทย	อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี	2 - 9	[43]
	ไทย	อ.ปะเหลียน จ.ตรัง	16.17±2.28	[17]
	ไทย	อ.เคียนซา และอ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี	2.71±1.03	งานวิจัยนี้
	น้ำดื่มบรรจุขวด	ปากีสถาน	Dhirkot Azad Kashmir, Sub-Himalayan District	0.99 ± 0.1 ถึง 2.36 ± 1.1
อินโดนีเซีย		West Java	0.3 ± 0.1	[42]
ไทย		อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี	0.2	[43]
ไทย		อ.เคียนซา และ อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี	0.15 ± 0.00	งานวิจัยนี้

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนเค็ม อำเภอท่าฉาง จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแก๊สเรดอนสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ อยู่ที่ระดับ 8,507.48±1.06 Bq/L [18] รองลงมา คือ น้ำพุร้อนเค็มในบริเวณเกาะ Ischia ประเทศอิตาลี ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 98 Bq/L [44] ส่วนในน้ำพุร้อนจืด พบว่า บริเวณทางตอนเหนือของเวเนซุเอลา มีค่าสูง

อยู่ในช่วง 255 – 576 Bq/L [40] นอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าระดับ MCL (11.1 Bq/L) ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด ที่อยู่ในพื้นที่บริเวณแหล่งน้ำพุร้อนมีค่าสูงกว่าระดับ MCL

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำ ตรวจวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ และประเมินปริมาณรังสีรังสีผลที่ร่างกายได้รับรายปี ในตัวอย่างน้ำพุร้อน น้ำประปา และน้ำดื่มบรรจุขวด ในพื้นที่บริเวณบ่อน้ำร้อนท่าสะทอน อำเภอพุนพิน และบ่อน้ำร้อนเขาตอก อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 33 ตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่าปริมาณทางเคมีกายภาพ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ pH สภาพนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าความเค็ม และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าเฉลี่ยในภาพรวมถือว่าอยู่ในระดับมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำและค่าความเค็มโดยรวมมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่ม

จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนมีค่าสูงกว่าน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด นอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษามีค่าสูงกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) กำหนดโดย US EPA และพบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกมีค่าสูงกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่ม (11.1 Bq/L) และสูงกว่าในพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน แต่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่มที่แนะนำโดย WHO (100 Bq/L) และต่ำกว่าระดับสูงสุดของการปนเปื้อนในน้ำดื่มแบบทางเลือก (148 Bq/L) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกซึ่งมีค่าสูงกว่าพื้นที่บ่อน้ำร้อนท่าสะทอน เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากน้ำสู่ชั้นบรรยากาศ พบว่า มีค่าเฉลี่ยรวมต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกของแก๊สเรดอนภายนอกอาคาร ( $15 \text{ Bq/m}^3$ ) แต่พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีภูมิหลังในพื้นที่ศึกษาสูงกว่าปริมาณรังสีภูมิหลังเฉลี่ยทั่วโลก ( $2.4 \text{ mSv/y}$ ) ดังนั้น เพื่อลดความเสี่ยงจากการสัมผัสเรดอนจากแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติในพื้นที่ศึกษา ให้ใช้เวลาในพื้นที่แหล่งน้ำพุร้อนให้น้อยที่สุด เพื่อลดการสูดดมแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากแหล่งน้ำพุร้อนสู่อากาศ ควรเลือกใช้บริการบ่อน้ำพุร้อนที่ไกลจากบ่อน้ำพุร้อนธรรมชาติ หรือพักผ่อนบริเวณที่อยู่ห่างจากบ่อน้ำพุร้อน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สเรดอนและปริมาณรังสีภูมิหลังพบว่า มีความสัมพันธ์กันในทางบวก กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีภูมิหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณทางเคมีกายภาพมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในระดับต่ำ

เมื่อประเมินปริมาณรังสีรังสีผลที่ร่างกายได้รับรายปีพบว่าในน้ำพุร้อนในพื้นที่บ่อน้ำร้อนเขาตอกมีค่า  $D_{inh}$  และ  $D_T$  สูงกว่าระดับอ้างอิงความปลอดภัยของ WHO ( $100 \mu\text{Sv/y}$ ) ในขณะที่ค่า  $D_{ing}$ ,  $D_S$  และ  $D_L$  ในน้ำทุกประเภทมีค่าต่ำกว่า  $100 \mu\text{Sv/y}$  นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณรังสีรังสีผลรายปีที่ได้รับจากการสูดดมมีค่าสูงกว่าการกลืนกิน ส่งผลให้ปริมาณรังสีรังสีผลสำหรับปอดมีค่าสูงกว่ากระเพาะอาหาร แต่เนื่องจากในพื้นที่ศึกษาบ่อน้ำพุร้อนเป็นระบบเปิด เรดอนมีโอกาสฟุ้งกระจายสู่ชั้นบรรยากาศ อาจทำให้ความเสี่ยงจากปริมาณรังสีรังสีผลที่ร่างกายได้รับจริง ๆ ต่ำกว่าค่าที่ประเมินได้จากงานวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบริเวณบ่อน้ำพุร้อนทั้งสองพื้นที่ที่อยู่ใกล้ที่พักอาศัยทั้งสองพื้นที่ จึงมีโอกาสที่เรดอนจะฟุ้งกระจายและสะสมในอาคารได้ และในอนาคตหากมีการพัฒนาเป็นห้องสปาน้ำพุร้อนหรือการผลิตเป็นน้ำดื่มบรรจุขวด สามารถนำผลการประเมินความเสี่ยงจากการกลืนกินและการสูดดมไปใช้เป็นแนวทางได้ นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นแก๊สเรดอนในน้ำ ดังนั้น ผลการวิจัยนี้จึงถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีประโยชน์ในการศึกษาเชิงลึก เพื่อประเมินความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงของแก๊สเรดอนในน้ำเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ต่อไป

## ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาความเข้มข้นของแก๊สเรดอนทั้งในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค ในดิน ในหิน และในอากาศภายในอาคารโดยรอบพื้นที่ศึกษา และแหล่งน้ำพุร้อนในพื้นที่อื่น ๆ นอกจากนี้ ควรศึกษาถึงปัจจัยทางด้านธรณี โครงสร้างของชั้นหินและรอยแยก เวลาที่น้ำสัมผัสหิน อัตราการไหล ระดับน้ำใต้ดิน การผสมน้ำจากแหล่งอื่น ฤดูกาลและสภาพอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ ในการประเมินปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับรายปี อาจมีการสร้างแบบจำลองการรับสัมผัสที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานจริงของนักท่องเที่ยวและประชาชนในพื้นที่มากขึ้น แทนการใช้ตัวแปรในทฤษฎี เพื่อประเมินความเสี่ยงในทุกมิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากแก๊สเรดอนในสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง นอกจากนี้ สามารถนำมาให้ความรู้แก่ประชาชนในบริเวณพื้นที่ศึกษา และช่วยสร้างความมั่นใจในความปลอดภัยต่อสุขภาพของนักท่องเที่ยวและชุมชน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] US EPA (United States Environmental Protection Agency), (2025, December 28), A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon, [Online]. Available: [https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/2016\\_a\\_citizens\\_guide\\_to\\_radon.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/2016_a_citizens_guide_to_radon.pdf).
- [2] S. Nazir, S. Simnani, B. K. Sahoo, R. Mishra, T. Sharma and S. Masood, "Monitoring geothermal springs and groundwater of Pir Panjal, Jammu and Kashmir, for radon contamination," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 326, pp. 1915-1923, 2020.
- [3] S. Wang, C. Ye, J. Liu, P. Lin, K. Liu, P. Dong, Y. Sun, Y. Liu, L. Wang and G. Wang, "Natural radioactivity of geothermal water in Beijing, China," *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, vol. 314, pp. 1547-1555, 2017.
- [4] A. Franke, L. Reiner, H. G. Pratzel, T. Franke and K. L. Resch, "Long-term efficacy of radon spa therapy in rheumatoid arthritis—a randomized, sham-controlled study and follow-up," *Rheumatology*, vol. 39, pp. 894-902, 2000.
- [5] K. Yamaoka, T. Mifune, S. Kojima, S. Mori, K. Shibuya, Y. Tanizaki and K. Sugita, "Basic study on the radon effects and the thermal effects in radon therapy," *International Congress Series*, vol. 1236, pp. 75-79, 2002.
- [6] K. Yamaoka, F. Mitsunobu, K. Hanamoto, S. Mori, Y. Tanizaki and K. Sugita, "Study on biological effects of radon and thermal therapy on osteoarthritis," *The Journal of Pain*, vol. 5, no. 1, pp. 20-25, 2004.
- [7] K. Yamaoka, F. Mitsunobu, K. Hanamoto, K. Hanamoto, K. Shibuya, S. Mori, Y. Tanizaki and K. Sugita, "Biochemical comparison between radon effects and thermal effects on humans in radon hot spring therapy," *Journal of Radiation Research*, vol. 45, pp. 83-88, 2004.
- [8] A. Sakoda, Y. Ishimori and J. Tschiersch, "Evaluation of the intake of radon through skin from thermal water," *Journal of Radiation Research*, vol. 57, no. 4, pp. 336-342, 2016.
- [9] *Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly, Annex A: Exposure from Natural Sources of Radiation)*, UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), New York: United Nations Publication, 1993.

- [10] W. A. Mills, "Risk assessment and control management of radon in drinking water," in *Radon, Radium and Uranium in Drinking Water*, C. R. Cothorn and P. A. Rebers, (Eds.), USA: Lewis Publishers, 1990.
- [11] *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*, NASR (National Academy of Sciences Report), Washington: National Academy Press, 1999.
- [12] WHO (World Health Organization), (2025, December 28), Radon, [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [13] *WHO handbook on indoor radon: A public health perspective*, WHO, Geneva: WHO Press, 2009.
- [14] *National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides, Proposed Rule*, US EPA, 40 CFR Part 141, 142, vol. 56, no. 138, 1991.
- [15] WHO, (2025, December 14), Guidelines for Drinking-water Quality: radiological aspects, [Online]. Available: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/GDWQ2004web.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf).
- [16] N. F. Ismail, S. Hashim, M. S. M. Sanusi, A. T. Abdul 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.
- [17] กนกวรรณ อินแฉล้ม, ณิชารีย์ วังขุนพรหม, อาริสสา จันตุต, อรณัฐ อารัง, อาริยา ศรีรักษา, ฟ้าจรี อามิง, กชกร เพ็งศรี และกนกกานต์ ฐิติภรณ์พันธ์, "การประเมินปริมาณรังสียังผลรายปีที่ได้รับจากแก๊สเรดอนปนเปื้อนในน้ำพุร้อนเค็มและน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในพื้นที่น้ำพุร้อนเค็มควนสระ อำเภอยะหริ่ง จังหวัดตรัง ภาคใต้ของประเทศไทย," *วารสารฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป*, ปีที่ 9, ฉ. 1, น. 20-36, 2568.
- [18] 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.
- [19] V. Atyotha, P. Sola, A. Suksawad and I. Sittitanadol, "Radon concentration measurement and effective dose assessment in tap water of tourist locations from Khao Kho, Phetchabun Province, Thailand," *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 3-11, 2026.
- [20] R. W. Qadir, N. Asaad, K. W. Qadir, S. T. Ahmad and H. Y. Abdullah, "Relationship between radon concentration and physicochemical parameters in groundwater of Erbil city, Iraq," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 61-69, 2021.
- [21] H. Idriss, I. Salih and A. Sam, "Study of radon in ground water and physicochemical parameters in Khartoum state," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 274, no. 1, pp. 333-338, 2011.
- [22] M. C. Srilatha, D. R. Rangaswamy and J. Sannappa, "Studies on concentration of radon and physicochemical parameters in ground water around Ramanagara and Tumkur districts, Karnataka, India," *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, vol. 2, no. 4, pp. 641-660, 2014.

- [23] S. R. Nagabhushana, Sunilkumar, S. Suresh, J. Sannappa and E. Srinivasa, "Study on activity of radium, radon and physicochemical parameters in ground water and their health hazards around Tumkur industrial area," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 323, no. 3, pp. 1393–1403, 2020.
- [24] J. S. Duval, "Indoor radon prediction using gamma-ray spectrometric data" *EOS, Transactions American Geophysical Union*, vol. 70, pp. 496-502, 1988.
- [25] 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.
- [26] *RAD H<sub>2</sub>O Radon in Water Accessory for the RAD7: User manual*, DurrIDGE Company Inc., Billerica, MA, 2020.
- [27] I. Opoku-Ntim, A. B. Andam, T. T. Akiti, J. J. Flectcher and V. Roca, "Annual effective dose of radon in groundwater samples for different age groups in Obuasi and Offinso in the Ashanti Region, Ghana," *Environmental Research Communications*, vol. 1, 2019.
- [28] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), *Sources and effects of ionizing radiation, Report to the general assembly*, New York: United Nations, 2000.
- [29] E. Tabar and H. Yakut, "Radon measurements in water samples from the thermal springs of Yalova basin, Turkey," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 299, no. 1, pp. 311-319, 2014.
- [30] 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.
- [31] O. M. Michael, A. T. Benjamin, E. O. Emmanuel, I. A. Kolawole, S. B. Naheem, I. S. Danladi, O. K. Kingsley 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.
- [32] M. Kumar, P. Kumara, A. Agrawalb and B. K. Sahooc, "Radon concentration measurement and effective dose assessment in drinking groundwater for the adult population in the surrounding area of a thermal power plant," *Journal of Water and Health*, vol. 20, no. 3, pp. 551-559, 2022.
- [33] *ICRP Recommendations (ICRP Publication 60)*, International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP, vol. 21, no. 1–3, Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [34] พนิดตา ต๊ะแดง, "การประเมินคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินด้วยดัชนีคุณภาพน้ำและดัชนีมลพิษทางน้ำ," วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2566.
- [35] ค่าคะแนนรวมของคุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์ (การคำนวณค่า WQI แบบใหม่), กรมควบคุมมลพิษ, ส่วนแหล่งน้ำจืด สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 2558.
- [36] ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ พ.ศ. 2563, กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, กรุงเทพฯ, 2563.
- [37] ศิลาจุฑา ดำรงศิริ, "น้ำดื่ม เค็มได้แค่ไหน," *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 25, ฉ. 1, 2564.

- [38] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, “ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537),” *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่มที่ 111, ตอนที่ 16, น. 217-275, 24 กุมภาพันธ์ 2537.
- [39] R. Botha, R. T. Newman and P. P. Maleka, “Radon levels measured at a touristic thermal spa resort in Montagu (South Africa) and associated effective doses,” *Health Physics*, vol. 111, no. 3, pp. 281-289, 2016.
- [40] A. D. Horvath, L. O. Bohus, F. Urbani, G. Marx, A. Piroth and E. D. Greaves, “Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 7, pp. 127–133, 2000.
- [41] M. Alqadi, M. Al-Rousan, H. Al-Khateeb and F. Alzoubi, “Concentration of radon and physicochemical parameters in hot spring water,” *Jordan International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 105, no. 14, pp. 3341–3353, 2025.
- [42] E. D. Nugraha, M. Hosoda, J. Mellawati, U. Untara, I. Rosianna, Y. Tamakuma, O. B. Modibo, C. Kranrod, K. Kusdiana and S. Tokonami, “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.
- [43] P. Sola, K. Srisuksawad, S. Loaharojanaphand, A. O-Manee, V. Permnamtip, P. Issarapan an L. Thummagarun, “Radon concentration in air, hot spring water, and bottled mineral water in one hot spring area in Thailand,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 297, no. 2, pp. 183–187, 2013.
- [44] M. Pugliese, M. Quarto and V. Roca, “Radon concentrations in air and water in the thermal spas of Ischia Island,” *Indoor and Built Environment*, vol. 23, no. 6, pp. 823-827, 2014.