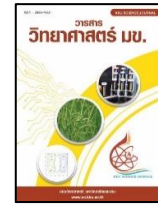




# KKU SCIENCE JOURNAL

Journal Home Page : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>

Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand



## การประเมินสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู จังหวัดไชยบุรีและจังหวัดหลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว Assessment of Radioactive Substance in Soil at Dien Bien Phu Fault Area, Xayaburi and Luang Prabang Provinces, The Lao People's Democratic Republic

พิชชาภา สายกระจำง<sup>1</sup> พวงทิพย์ แก้วทับทิม<sup>1\*</sup> Phuangphachan Vangnopor<sup>2</sup> Sounthone  
Singsoupho<sup>2</sup> Viengthong Xayavong<sup>2</sup> และ Sackxay Sompaserth<sup>2</sup>  
Phitchapha Saikrajang<sup>1</sup>, Pungtip Kaewtuptim<sup>1\*</sup>, Phuangphachan Vangnopor<sup>2</sup>, Sounthone  
Singsoupho<sup>2</sup>, Viengthong Xayavong<sup>2</sup> and Sackxay Sompaserth<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จังหวัดปัตตานี 94000

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแห่งชาติลาว สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว 7322

<sup>1</sup>Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Campus, Pattani,  
94000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, National University of Laos, 7322, The Lao People's Democratic  
Republic

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม (<sup>226</sup>Ra) ทอเรียม (<sup>232</sup>Th) และโพแทสเซียม (<sup>40</sup>K) ในตัวอย่างดิน และเพื่อประเมินความเป็นอันตรายจากสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟูที่พาดผ่านจังหวัดไชยบุรีและจังหวัดหลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยทำการเก็บตัวอย่างดิน จำนวน 10 ตัวอย่าง จากจังหวัดไชยบุรี 8 ตัวอย่าง และจังหวัดหลวงพระบาง 2 ตัวอย่าง วิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี โดยใช้หัววัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) พบว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสี <sup>226</sup>Ra <sup>232</sup>Th และ <sup>40</sup>K มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ  $22.49 \pm 0.25 \text{ Bq.kg}^{-1}$   $12.76 \pm 0.17 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $121.66 \pm 0.73 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่มีค่าเท่ากับ  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$   $30 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $400 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ จากนั้นประเมินความเป็นอันตรายจากสารกัมมันตรังสี พบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $R_{eq}$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $46.38 \pm 0.11 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย ( $H_{ex}$ ) และค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $H_{in}$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.13 \pm 0.01$  และ  $0.18 \pm 0.01$  ตามลำดับ อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $21.39 \pm 0.07 \text{ nGy.h}^{-1}$  รังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.03 \pm 0.003 \text{ mSv.y}^{-1}$  และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.01 \pm 0.002 \text{ mSv.y}^{-1}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์แห่ง

\*Corresponding Author, E-mail: [pungtip.k@psu.ac.th](mailto:pungtip.k@psu.ac.th)

สหประชาชาติ ว่าด้วยผลกระทบของรังสีปริมาณ (UNSCEAR) ที่มีค่าเท่ากับ  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$   $1$   $1$   $55 \text{ nGy.h}^{-1}$   $0.48 \text{ mSv.y}^{-1}$  และ  $0.29 \text{ mSv.y}^{-1}$  ตามลำดับ จากผลการประเมินทั้งหมด พบว่า ประชากรที่อาศัยอยู่ในบริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟูปลอดภัยจากอันตรายที่ได้รับสารกัมมันตรังสี

### ABSTRACT

The purpose of this research is to analyze the specific activity of the natural radioactive nuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  and to assess the hazards from radioactive substances in soil samples in the Dien Bien Phu fault area, which runs through Xayaburi and Luang Prabang in the Lao People's Democratic Republic. Ten soil samples were collected including 8 samples from Xayaburi Province and 2 samples from Luang Prabang Province. Gamma spectrometry analysis was performed using a high-purity Germanium (HPGe) detector. The results of the analysis showed that the nuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  had average specific activity values of  $22.49 \pm 0.25 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ,  $12.76 \pm 0.17 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , and  $121.66 \pm 0.73 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , respectively, which is below the worldwide mean of  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ,  $30 \text{ Bq.kg}^{-1}$  and  $400 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , respectively. After assessing the risks posed by radioactive substances, it was determined that the average radium equivalent activity ( $R_{\text{eq}}$ ) is  $46.38 \pm 0.11 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . The external hazard index ( $H_{\text{ex}}$ ) and the internal hazard index ( $H_{\text{in}}$ ) had an average value of  $0.13 \pm 0.01$  and  $0.18 \pm 0.01$ , respectively. The average Gamma-absorbed dose rate (D) was  $21.39 \pm 0.07 \text{ nGy.h}^{-1}$ . The average annual external effective dose rate (E) was  $0.03 \pm 0.003 \text{ mSv.y}^{-1}$ , and the average excess lifetime cancer risk (ELCR) was  $0.01 \pm 0.002 \text{ mSv.y}^{-1}$ . These values were lower than the standard set by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) with values equal to  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ,  $1$ ,  $1$ ,  $55 \text{ nGy.h}^{-1}$ ,  $0.48 \text{ mSv.y}^{-1}$ , and  $0.29 \text{ mSv.y}^{-1}$ , respectively, Therefore, our data suggested that the soil natural radioactivity in the Dien Bien Phu fault area is in the safe level.

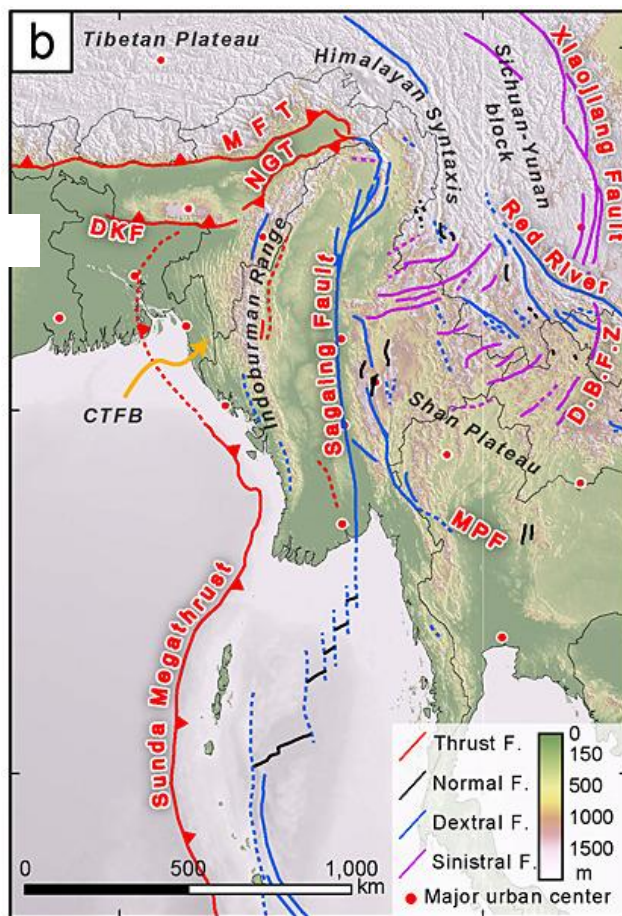
**คำสำคัญ:** นิวไคลด์กัมมันตรังสี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) รอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

**Keywords:** Radionuclide, High Purity Germanium Detector (HPGe), Dien Bien Phu Fault, The Lao People's Democratic Republic

### บทนำ

รอยเลื่อนเดียนเบียนฟู (Dien Bien Phu Fault: DBPF) เป็นรอยเลื่อนที่มีความยาวประมาณ 500 กิโลเมตร โดยทอดยาวจากหมู่บ้านเชียงชัยที่ชายแดนเวียดนาม-จีน ใกล้กับรอยเลื่อนแม่น้ำแดงผ่านไปยัง จ.เลยเจิวและเดียนเบียนในเวียดนามไปยัง จ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว แสดงดังรูปที่ 1 และเป็นหนึ่งในเขตรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวมากที่สุดอินโดจีน (Duong *et al.*, 2006; Koszowska *et al.*, 2007; Lai *et al.*, 2012; Bui *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ข้อมูลของ Roger *et al.* (2014) ยังได้กล่าวว่ารอยเลื่อนได้ขยายไปทางใต้เข้าสู่ประเทศไทย โดยรวมเข้ากับเขตรอยเลื่อนน่าน-อุดรดิตถ์ ของประเทศไทย ในชีวิตประจำวันสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จะได้รับรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติอยู่ตลอดเวลา โดยแหล่งกำเนิดของรังสีอาจมาจากทั้งภายในและนอกโลก สารกัมมันตรังสีมักจะมีอยู่ในดิน น้ำ อากาศ และหิน ซึ่งสารกัมมันตรังสีที่พบจากในดินส่วนใหญ่มาจากเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$ ) ซึ่งอยู่ในอนุกรมยูเรเนียม (Uranium series) และทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) ซึ่งอยู่ในอนุกรมทอเรียม (ประสงค์และคณะ, 2552) นอกจากนี้ ในธรรมชาติยังมีธาตุกัมมันตรังสีที่มีมาตั้งแต่โลกกำเนิดขึ้น คือ โพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) โดยบริเวณรอยเลื่อนมักจะมีชั้นดินหรือหินที่มีการผุพัง และแยกจากกันซึ่งเป็นผล

มาจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในบริเวณรอยเลื่อนจะมีสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ ถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณรอยเลื่อนมีโอกาสที่จะได้รับสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย นั่นก็คือ ก๊าซเรดอน ( $^{222}\text{Rn}$ ) ที่พบอยู่ตามบริเวณรอยเลื่อนซึ่งสลายตัวจากเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ในธรรมชาติ อันเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมะเร็งปอดมากเป็นอันดับสอง รองจากสาเหตุการสูบบุหรี่ (United state environmental protection, 2024) ซึ่งนิวไคลด์ของยูเรเนียม ทอเรียม และทอเรียมของนิวไคลด์เหล่านี้ ยังสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้แม้ได้รับเพียงเล็กน้อย โดยอาจทำให้เกิดโรคปอดหรือกล้ามเนื้อตาย (Findeiß and Schäffer, 2017; Zubair, 2020) หากได้รับรังสีเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดอันตรายทำให้ให้เซลล์แบ่งตัวผิดปกติ หรือทำให้เซลล์ตายได้ และอาจทำให้เกิดมะเร็งได้ในพื้นที่สูง (พวงทิพย์และคณะ, 2564; Ravanat *et al.*, 2014; Botwe *et al.*, 2017)



รูปที่ 1 แสดงแผนที่ธรณีวิทยาของรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู และรอยเลื่อนต่าง ๆ ข้างเคียง (Wang *et al.*, 2014)

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวัดและวิเคราะห์ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดินบริเวณ อ.แก่นท้าว อ.ปากลาย อ.เมืองไชยะ จ.ไชยะบุรี และ อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ซึ่งได้จาก จ.ไชยะบุรี 8 ตัวอย่าง และ จ.หลวงพระบาง 2 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 10 ตัวอย่าง เก็บตัวอย่างดินตามแนวที่รอยเลื่อนเดียนเบียนฟูพาดผ่าน ทั้ง 10 สถานี จะกำหนดเป็นตำแหน่งวางอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวในอนาคต โดยทำการวัดตัวอย่างดินด้วยหัววัดรังสี ชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma spectrometry) และนำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้มาใช้ในการคำนวณค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ โดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์แห่งสหประชาชาติ ว่าด้วยผลกระทบของรังสีปรมาณู (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

Radiation (UNSCEAR, 2000) ได้กำหนดค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $Ra_{eq}$ ) เท่ากับ  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก (H<sub>ex</sub>) เท่ากับ 1 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย (H<sub>in</sub>) เท่ากับ 1 อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) เท่ากับ  $55 \text{ nGy.h}^{-1}$  ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) เท่ากับ  $0.48 \text{ mSv.y}^{-1}$  และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) เท่ากับ  $0.29 \text{ mSv.y}^{-1}$  (UNSCEAR, 2000) เพื่อใช้ประเมินความปลอดภัยจากการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติของผู้คนในบริเวณพื้นที่แนวรอยเลื่อนเดียนเบียนฟูที่พาดผ่าน จ.ไชยบุรีและจ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

## วิธีการดำเนินการวิจัย

ทำการเก็บตัวอย่างดินบริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู จ.ไชยบุรีและจ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว แสดงดังรูปที่ 2 จำนวน 10 ตัวอย่าง ใน อ.แก่นท้าว อ.ปากลาย อ.เมืองไชย จ.ไชยบุรี และ อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง โดยมาจาก จ.ไชยบุรี 8 ตัวอย่าง และ จ.หลวงพระบาง 2 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละสถานีอยู่บนพื้นที่แตกต่างกัน ทั้งอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมหรือพื้นที่ที่มีธรณีวิทยาเป็นเทือกเขาหินแกรนิตแต่ยังคงอยู่ในแนวรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู พร้อมกับบันทึกพิกัดจุดเก็บตัวอย่างที่แน่นอนด้วยเครื่องบอกพิกัดด้วยดาวเทียม (Global positioning system: GPS) แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และอบตัวอย่างซ้ำจนกระทั่งความชื้นคงที่ จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 120 ไมโครเมตร (พวงทิพย์และคณะ, 2564) เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดเท่ากัน แล้วนำตัวอย่างดินผงบรรจุในภาชนะพลาสติกทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สูง 10.2 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากับภาชนะบรรจุสารมาตรฐาน IAEA-375 จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และความสูงของตัวอย่างในกระปุกเท่ากับความสูงของสารมาตรฐาน ปิดผนึกให้สนิท วางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 เดือน เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสีอย่างถาวร (Taskin *et al.*, 2009) ทำการปรับเทียบหัววัดรังสีด้วยสารกัมมันตรังสีมาตรฐานในรูปของแข็งซีเซียม ( $^{137}\text{Cs}$ ) ที่พลังงาน 661.66 keV และโคบอลต์ ( $^{60}\text{Co}$ ) ที่พลังงาน 1,173.23 keV และ 1,332.50 keV ตรวจวัดปริมาณสารกัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน โดยใช้เครื่องวัดรังสีแกมมา หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ใช้เวลาในการวัดรังสีตัวอย่างละ 18,000 วินาที (Yang *et al.*, 2013; Bangotra *et al.*, 2016; Ayodele *et al.*, 2017; Kadhim *et al.*, 2020; Sayyed *et al.*, 2024) วิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ  $^{226}\text{Ra}$  ที่พลังงาน 609.31 keV ซึ่งเป็นพลังงานของ  $^{214}\text{Bi}$  สำหรับ  $^{232}\text{Th}$  วิเคราะห์ที่พลังงาน 911.21 keV ซึ่งเป็นพลังงานของ  $^{228}\text{Ac}$  เนื่องจากนิวไคลด์ดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวให้รังสีแกมมาในธรรมชาติสูง และ  $^{40}\text{K}$  วิเคราะห์ที่พลังงาน 1460.75 keV โดยบันทึกจำนวนนับได้สเปกตรัมรังสีแกมมาจากหัววัด HPGe (Canberra Model GC 1319, USA) และประเมินผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป GenieTM 2000 Basic Spectroscopy Software เพื่อหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  พร้อมวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) โดยใช้สารมาตรฐาน IAEA-375 จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน กรุงเทพมหานคร สำหรับปรับเทียบวิเคราะห์ความเข้มข้นในตัวอย่างดิน (ปิยะและคณะ, 2564; พวงทิพย์และคณะ, 2564) ทำการวัดรังสี ณ ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์ฟิสิกส์ แผนกฟิสิกส์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จากนั้นคำนวณหาค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (C) ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $Ra_{eq}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก (H<sub>ex</sub>) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย (H<sub>in</sub>) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) ที่กำหนดโดย UNSCEAR (2000) คำนวณหาค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติได้ดังสมการต่อไปนี้ (ประสงค์และคณะ, 2552; Sharma *et al.*, 2016; Zubair, 2020; Fathy *et al.*, 2023; Eke *et al.*, 2024; Eyibio *et al.*, 2024; Seow *et al.*, 2024)

ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Specific activity; C)

$$C = \frac{\text{CPS}_{\text{sample}}}{(\% \text{Eff})(m)(\%a)} \quad (1)$$

- เมื่อ C คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดิน ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )  
 %Eff คือ ประสิทธิภาพของการวัดสารรังสีในตัวอย่างดิน ( $\text{cps.Bq}^{-1}$ )  
 cps คือ อัตรานับวัดรังสีต่อเวลาหลังหักลบรังสีภูมิหลัง ( $\text{Peak Area.s}^{-1}$ )  
 m คือ มวลของตัวอย่างดิน (kg)  
 %a คือ อัตราการปลดปล่อยรังสีแกมมา ณ พลังงานนั้น ๆ

ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Radium equivalent activity;  $R_{\text{eq}}$ )

$$R_{\text{eq}} = C_{\text{Ra-226}} + 1.43C_{\text{Th-232}} + 0.07C_{\text{K-40}} \quad (2)$$

- เมื่อ  $R_{\text{eq}}$  คือ ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) ไม่ควรมีค่าเกิน  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$   
 $C_{\text{Ra-226}}$  คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีของเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )  
 $C_{\text{Th-232}}$  คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีของทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )  
 $C_{\text{K-40}}$  คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีของโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )

ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย (External hazard index;  $H_{\text{ex}}$ )

$$H_{\text{ex}} = \frac{C_{\text{Ra-226}}}{370} + \frac{C_{\text{Th-232}}}{259} + \frac{C_{\text{K-40}}}{4810} \quad (3)$$

- เมื่อ  $H_{\text{ex}}$  คือ ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย ไม่ควรมีค่าเกิน 1  
 ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกาย (Internal hazard index ;  $H_{\text{in}}$ )

$$H_{\text{in}} = \frac{C_{\text{Ra-226}}}{185} + \frac{C_{\text{Th-232}}}{259} + \frac{C_{\text{K-40}}}{4810} \quad (4)$$

- เมื่อ  $H_{\text{in}}$  คือ ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายในร่างกาย ไม่ควรมีค่าเกิน 1  
 อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (Gamma-absorbed dose rates; D)

$$D = 0.462C_{\text{Ra-226}} + 0.604C_{\text{Th-232}} + 0.0417C_{\text{K-40}} \quad (5)$$

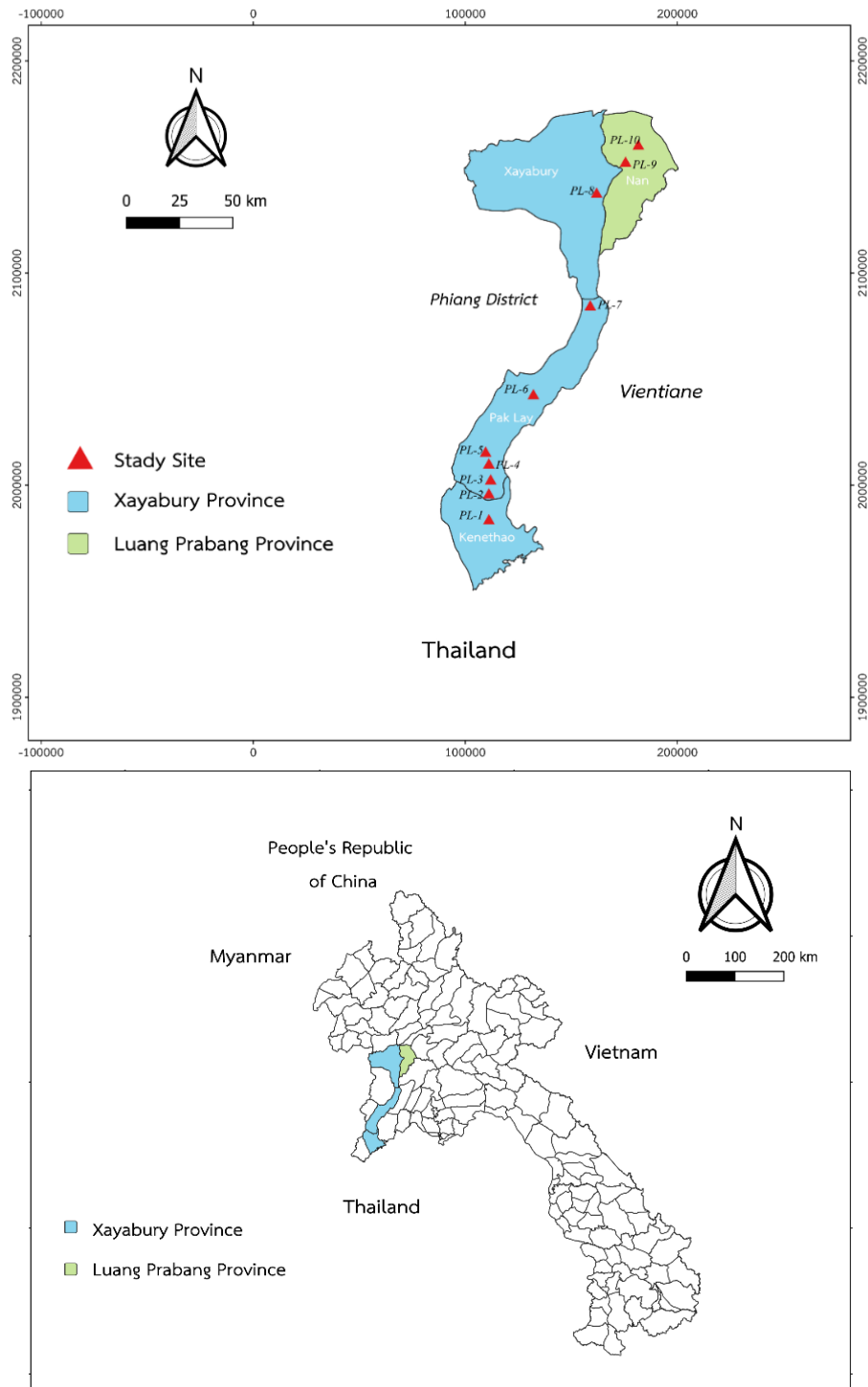
- เมื่อ D คือ อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ ( $\text{nGy.h}^{-1}$ ) มีค่าเฉลี่ยจากทั่วโลกเท่ากับ  $55 \text{ nGy.h}^{-1}$   
 ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (Annual external effective dose rate ; E)

$$E = D \times 8760 \times 0.2 \times 0.7 \times 10^{-6} \quad (6)$$

- เมื่อ E คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี ( $\text{mSv.y}^{-1}$ ) ไม่ควรมีค่าเกิน  $0.48 \text{ mSv.y}^{-1}$   
 ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (Excess lifetime cancer risk; ELCR)

$$\text{ELCR} = E \times \text{LF} \times \text{RF} \quad (7)$$

- เมื่อ ELCR คือ ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต ( $\text{mSv.y}^{-1}$ ) ไม่ควรมีค่าเกิน  $0.29 \text{ mSv.y}^{-1}$   
 LF คือ อายุขัยเฉลี่ยของมนุษย์ทั่วโลก (ประมาณ 70 ปี) (Eke *et al.*, 2022; Seow *et al.*, 2024)  
 RF คือ ปัจจัยเป็นความเสี่ยงมะเร็งร้ายแรงต่อ Sievert กำหนดเป็น  $0.05 \text{ y}^{-1}$



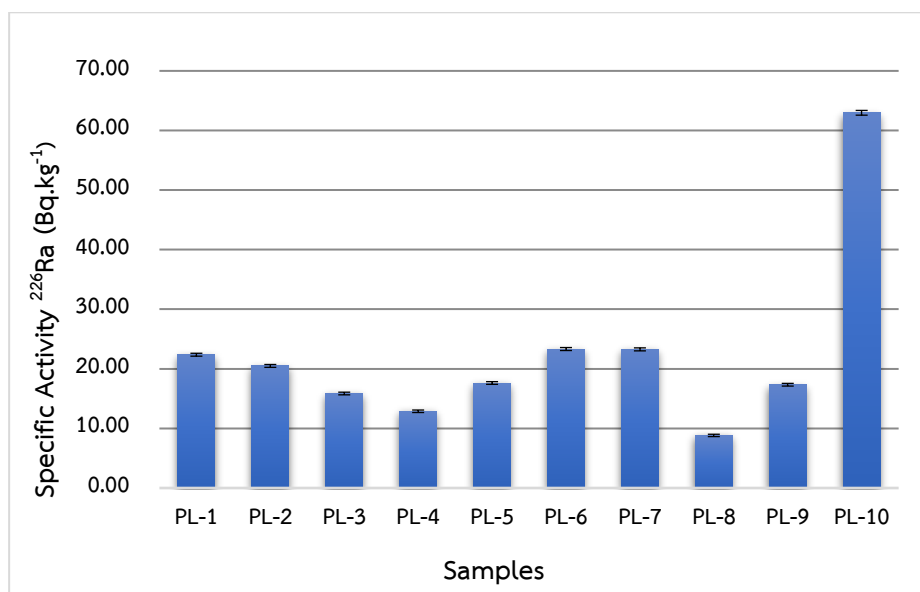
รูปที่ 2 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างดินบริเวณรอยเลื่อนเตียนเบียนฟู ที่พาดผ่าน จ.ไชยะบุรีและจ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

## ผลการวิจัย

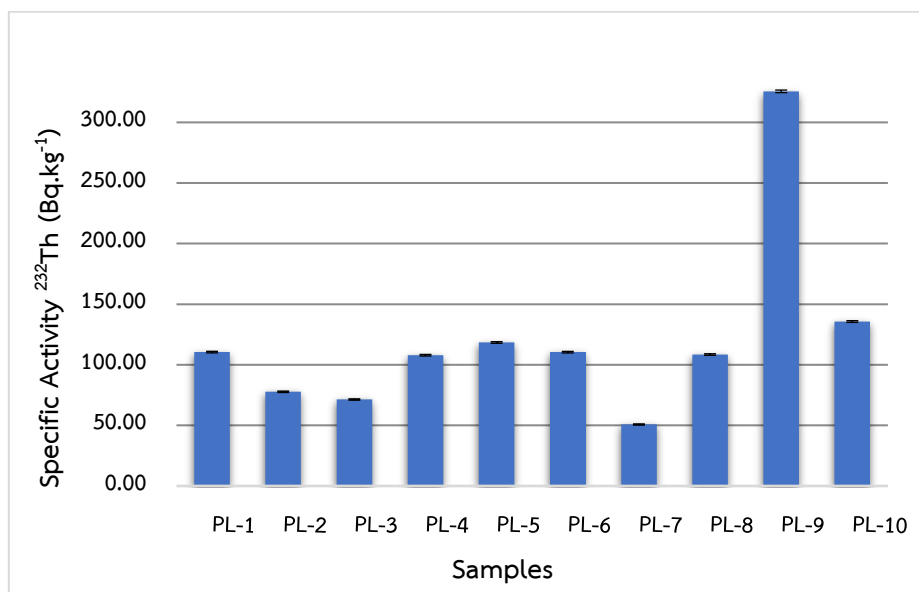
จากการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดินจากบริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ด้วยหัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma spectrometry) จำนวน 10 ตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดินซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

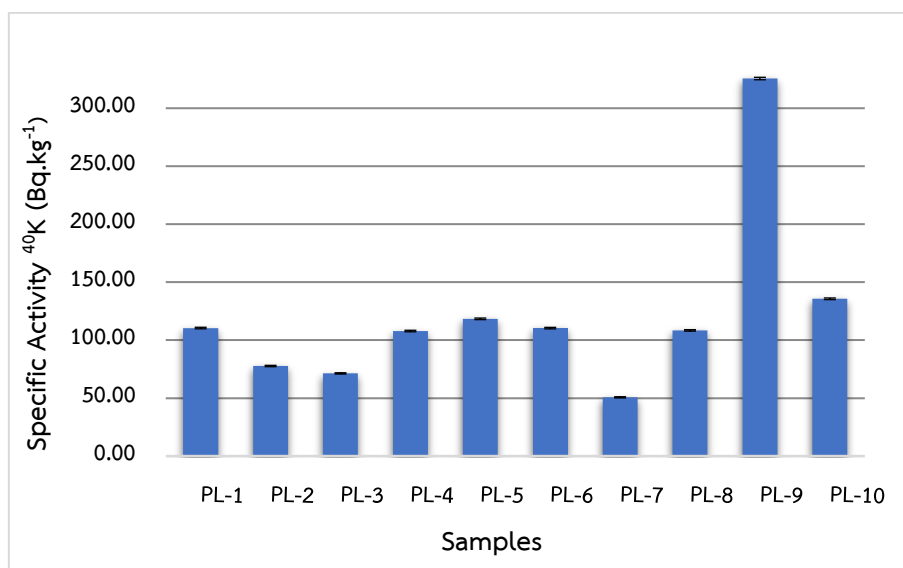
Samples	Station	Specific activity ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
PL-1	ต.ห้วยลอด อ.แก่นท้าว จ.ไชยะบุรี	$22.37 \pm 0.25$	$19.29 \pm 0.18$	$110.46 \pm 0.66$
PL-2	ต.ห้วยเหอ อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$20.49 \pm 0.24$	$8.26 \pm 0.15$	$77.71 \pm 0.57$
PL-3	ต.ปากแล้ง อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$15.86 \pm 0.22$	$3.48 \pm 0.14$	$71.33 \pm 0.55$
PL-4	ต.แก้งสาว อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$12.88 \pm 0.21$	$11.98 \pm 0.16$	$107.88 \pm 0.65$
PL-5	ต.ปากลาย อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$17.62 \pm 0.23$	$16.01 \pm 0.18$	$118.39 \pm 0.67$
PL-6	ต.นาปึง อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$23.32 \pm 0.25$	$12.68 \pm 0.17$	$110.39 \pm 0.66$
PL-7	ต.นาต้า อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี	$23.27 \pm 0.25$	$10.21 \pm 0.16$	$50.72 \pm 0.49$
PL-8	ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี	$8.83 \pm 0.19$	$5.36 \pm 0.15$	$108.43 \pm 0.65$
PL-9	ต.แก้วมณี อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง	$17.33 \pm 0.23$	$8.88 \pm 0.16$	$325.62 \pm 1.05$
PL-10	ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง	$62.97 \pm 0.40$	$32.17 \pm 0.22$	$135.68 \pm 0.71$
Average		$22.49 \pm 0.25$	$12.76 \pm 0.17$	$121.66 \pm 0.73$
Worldwide Mean (UNSCEAR, 2000)		35	30	400



รูปที่ 3 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$  ในตัวอย่างดิน



รูปที่ 4 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{232}\text{Th}$  ในตัวอย่างดิน



รูปที่ 5 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{40}\text{K}$  ในตัวอย่างดิน

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 3 - 5 เมื่อพิจารณาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดินบริเวณรอยเลื่อนเตียนเปียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว พบว่ามีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง และ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี โดยมีค่าเท่ากับ  $62.97 \pm 0.40 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $8.83 \pm 0.19 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง และ PL-3 ต.ปากแล้ง อ.ปากกลาย จ.ไชยะบุรี โดยมีค่าเท่ากับ  $32.17 \pm 0.22 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $3.48 \pm 0.14 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ และค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ PL-9 ต.แก้วมณี อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง และ PL-7 ต.นาต้า อ.ปากกลาย จ.ไชยะบุรี โดยมีค่าเท่ากับ  $325.62 \pm 1.05 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $50.72 \pm 0.49 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ



โดยพบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $22.49 \pm 0.25 \text{ Bq.kg}^{-1}$   $12.76 \pm 0.17 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $121.66 \pm 0.73 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกตามที่ UNSCEAR (2000) กำหนด ซึ่งเท่ากับ  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$   $30 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $400 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ แต่หากพิจารณาแต่ละสถานี จะพบว่า ณ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) และทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) สูงกว่าค่าเฉลี่ยโลกตามที่ UNSCEAR (2000) กำหนด สาเหตุเกิดจากลักษณะทางธรณีวิทยา โดยบริเวณดังกล่าวมีลักษณะธรณีวิทยาเป็นเทือกเขาหินแกรนิต ด้วยเหตุนี้ทำให้ปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) มีปริมาณสูง (Kaewtubtim *et al.*, 2021) และพบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ที่ PL-9 ต.แก้วมณี อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยทั่วโลก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการทำเกษตรกรรม เช่น การทำนา การปลูกมันสำปะหลัง ทำให้มีการใช้ปุ๋ยในพื้นที่เพาะปลูกพื้นที่บริเวณนี้จึงมีความเข้มข้นของโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) มากกว่า เมื่อเทียบกับบริเวณอื่นที่ไม่ได้มีการทำเกษตรกรรม (Eyrolle *et al.*, 2024)

จากนั้นนำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) มาคำนวณหาค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $Ra_{eq}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย ( $H_{ex}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $H_{in}$ ) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานจาก UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $Ra_{eq}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย ( $H_{ex}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $H_{in}$ ) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) ในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

Samples	$Ra_{eq}$ ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )	$H_{ex}$	$H_{in}$	D ( $\text{nGy.h}^{-1}$ )	E ( $\text{mSv.y}^{-1}$ )	ELCR ( $\text{mSv.y}^{-1}$ )
PL-1	$58.47 \pm 0.11$	$0.16 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.01$	$26.54 \pm 0.08$	$0.03 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.002$
PL-2	$38.28 \pm 0.09$	$0.10 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.01$	$17.65 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.001$
PL-3	$26.33 \pm 0.07$	$0.07 \pm 0.00$	$0.11 \pm 0.01$	$12.37 \pm 0.06$	$0.02 \pm 0.002$	$0.01 \pm 0.001$
PL-4	$38.31 \pm 0.09$	$0.10 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.01$	$17.64 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.001$
PL-5	$49.63 \pm 0.10$	$0.13 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$	$22.69 \pm 0.08$	$0.03 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.002$
PL-6	$49.96 \pm 0.10$	$0.13 \pm 0.01$	$0.20 \pm 0.01$	$22.98 \pm 0.08$	$0.03 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.002$
PL-7	$41.78 \pm 0.09$	$0.11 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$	$19.00 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.001$
PL-8	$24.84 \pm 0.07$	$0.07 \pm 0.00$	$0.09 \pm 0.01$	$11.80 \pm 0.06$	$0.01 \pm 0.002$	$0.00 \pm 0.001$
PL-9	$55.11 \pm 0.11$	$0.15 \pm 0.01$	$0.20 \pm 0.01$	$26.84 \pm 0.08$	$0.03 \pm 0.003$	$0.01 \pm 0.002$
PL-10	$119.42 \pm 0.16$	$0.32 \pm 0.01$	$0.49 \pm 0.01$	$54.08 \pm 0.11$	$0.07 \pm 0.004$	$0.02 \pm 0.002$
<b>Average</b>	<b><math>46.38 \pm 0.11</math></b>	<b><math>0.13 \pm 0.01</math></b>	<b><math>0.18 \pm 0.01</math></b>	<b><math>21.39 \pm 0.07</math></b>	<b><math>0.03 \pm 0.003</math></b>	<b><math>0.01 \pm 0.002</math></b>
<b>UNSCEAR (2000)</b>	<b>370</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>55</b>	<b>0.48</b>	<b>0.29</b>

จากตารางที่ 2 ซึ่งได้มาจากการนำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) มาใช้คำนวณ พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $46.38 \pm 0.11 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$  โดยมีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง และ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $119.42 \pm 0.16 \text{ Bq.kg}^{-1}$  และ  $24.84 \pm 0.07 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ

ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย ( $H_{\text{ex}}$ ) และค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $H_{\text{in}}$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.13 \pm 0.01$  และ  $0.18 \pm 0.01$  ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ที่มีค่าไม่เกิน 1 โดย  $H_{\text{ex}}$  และ  $H_{\text{in}}$  มีค่าสูงสุดที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.32 \pm 0.01$  และ  $0.49 \pm 0.01$  ตามลำดับ โดย  $H_{\text{ex}}$  มีค่าต่ำสุดที่ PL-3 ต.ปากแล้ง อ.ปากลาย จ.ไชยะบุรี และ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.07 \pm 0.00$  และ  $H_{\text{in}}$  มีค่าต่ำสุดที่ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.09 \pm 0.01$

อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $21.39 \pm 0.07 \text{ nGy.h}^{-1}$  ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $55 \text{ nGy.h}^{-1}$  โดยมีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง และ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $54.08 \pm 0.11 \text{ nGy.h}^{-1}$  และ  $11.80 \pm 0.06 \text{ nGy.h}^{-1}$  ตามลำดับ โดยอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง มีค่าสูงสุดและยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาว่าบริเวณดังกล่าวมีลักษณะธรณีวิทยาเป็นเทือกเขาหินแกรนิต ทำให้บริเวณแนววางตัวของหินแกรนิต มีอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) สูงกว่าบริเวณอื่น (Kaewtubtim *et al.*, 2021) ส่วนปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.03 \pm 0.003 \text{ mSv.y}^{-1}$  ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.48 \text{ mSv.y}^{-1}$  โดยมีค่าสูงสุดที่ PL-10 ต.ปองดอง อ.เมืองน่าน จ.หลวงพระบาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.07 \pm 0.004 \text{ mSv.y}^{-1}$  และมีค่าต่ำสุดที่ PL-8 ต.ตาแล้ง อ.ไชยะ จ.ไชยะบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.01 \pm 0.002 \text{ mSv.y}^{-1}$

และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.01 \pm 0.002 \text{ mSv.y}^{-1}$  โดยพบว่าทุกตำแหน่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ UNSCEAR (2000) กำหนด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.29 \text{ mSv.y}^{-1}$  ทำให้ทราบว่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

## วิจารณ์ผลการวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟูและบริเวณประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

Samples	Specific activity ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
รอยเลื่อนเดียนเบียนฟู จ.ไชยะบุรีและจ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว	$22.49 \pm 0.25$	$12.76 \pm 0.17$	$121.66 \pm 0.73$
จ.สะหวันนะเขต ประเทศลาว (Bui <i>et al.</i> , 2020)	$22.4 \pm 2.1$	$30.8 \pm 2.9$	$211.6 \pm 16.5$
รอยเลื่อนเดียนเบียนฟู เมืองเดียนเบียน ประเทศเวียดนาม (Huy <i>et al.</i> , 2012)	45.17	45.17	45.17
ชายฝั่งทางตอนเหนือของประเทศเวียดนาม (Nhon <i>et al.</i> , 2024)	35.1	35.1	35.1

ตารางที่ 3 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟูและบริเวณประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก (ต่อ)

Samples	Specific activity (Bq.kg <sup>-1</sup> )		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
เหมืองแร่ยูเรเนียมทางตอนใต้ของสาธารณรัฐประชาชนจีน (Li, 2024)	360 ± 351	360 ± 351	360 ± 351
เมืองหยางเจียง สาธารณรัฐประชาชนจีน (Yang <i>et al.</i> , 2024)	66	109	211
เมือง Sijua Dhanbad ประเทศอินเดีย (Zubair, 2020)	60.30	64.50	481.0
เมือง Jaintiapur ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบังคลาเทศ (Dina <i>et al.</i> , 2022)	47 ± 6	64 ± 5	762 ± 40
พื้นที่ทางตอนเหนือของประเทศไทย (Tsamos <i>et al.</i> , 2024)	25.7	33.8	470
เมือง Novi Sad สาธารณรัฐเซอร์เบีย (Janković <i>et al.</i> , 2023)	33.9	36.7	513.8
เมืองริโอแกรนด์โดนอร์ตี ประเทศบราซิล (Malanca <i>et al.</i> , 1996)	29.2 ± 19.5	47.8 ± 37.3	704 ± 437
เมือง Oromia ประเทศเอธิโอเปีย (Yachiso <i>et al.</i> , 2024)	33.05 ± 0.72	13.7 ± 0.51	220.18 ± 0.61
Worldwide Mean (UNSCEAR, 2000)	35	30	400

จากตารางที่ 3 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน บริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $22.49 \pm 0.25$   $12.76 \pm 0.17$  และ  $121.66 \pm 0.73$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของพื้นที่บริเวณทวีปเอเชียหลายพื้นที่ เช่น จ.สະหวันนะเขต สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $22.4 \pm 2.1$   $30.8 \pm 2.9$  และ  $211.6 \pm 16.5$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Bui *et al.*, 2020) พื้นที่เมืองเดียนเบียน ประเทศเวียดนาม มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $45.17$   $63.52$  และ  $427.89$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Huy *et al.*, 2012) พื้นที่ชายฝั่งทางตอนเหนือของประเทศเวียดนาม มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $35.1$   $56.1$  และ  $567$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Nhon *et al.*, 2024) พื้นที่เหมืองแร่ยูเรเนียมทางตอนใต้ของสาธารณรัฐประชาชนจีน มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $360 \pm 351$   $130 \pm 98$  และ  $983 \pm 382$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Li, 2024) พื้นที่เมืองหยางเจียง สาธารณรัฐประชาชนจีน มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $66$   $109$  และ  $211$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Yang *et al.*, 2024) พื้นที่เมือง Sijua Dhanbad ประเทศอินเดีย มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $60.30$   $64.50$  และ  $481.0$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Zubair, 2020) พื้นที่เมือง Jaintiapur ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบังคลาเทศ มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $47 \pm 6$   $64 \pm 5$  และ  $762 \pm 40$  Bq.kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ (Dina *et al.*, 2022) นอกจากนี้ทวีปเอเชียแล้วยังมี

ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในพื้นที่บริเวณทวีปยุโรป ทวีปอเมริกา และทวีปแอฟริกาอีกด้วย เช่น พื้นที่ทางตอนเหนือของประเทศไทย มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ 25.7 33.8 และ 470  $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ (Tsamos *et al.*, 2024) พื้นที่เมือง Novi Sad สาธารณรัฐเซอร์เบีย มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ 33.9 36.7 และ 513.8  $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ (Janković *et al.*, 2023) พื้นที่ในเมืองริโอแกรนด์โดนอร์ตี ประเทศบราซิล มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $29.2 \pm 19.5$   $47.8 \pm 37.3$  และ  $704 \pm 437$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ (Malanca *et al.*, 1996) พื้นที่เมือง Oromia ประเทศเอธิโอเปีย มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ  $33.05 \pm 0.72$   $13.7 \pm 0.51$  และ  $220.18 \pm 0.61$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ (Yachiso *et al.*, 2024) และยังมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $^{226}\text{Ra}$   $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  เท่ากับ 35 30 และ 400  $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000)

นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) ดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก ร่างกาย ( $\text{H}_{\text{ex}}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $\text{H}_{\text{in}}$ ) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) ในตัวอย่างดินบริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินในทางตอนเหนือของประเทศไทย (Tsamos *et al.*, 2024) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินของเมือง Sijua Dhanbad ประเทศอินเดีย (Zubair, 2020) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินของเขต Swabi, KPK ประเทศปากีสถาน (Azeem *et al.*, 2024) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินของเขตปกครองท้องถิ่น Muya รัฐไนเจอร์ ประเทศไนจีเรีย (Suleiman, 2024) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินจากแม่น้ำ Kersang ประเทศมาเลเซีย (Ismail *et al.*, 2024) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินในเมือง Isparta ประเทศตุรกี (Uyanik, 2023) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินในเมืองกาฐมาณฑุ ประเทศเนปาล (Upadhyay *et al.*, 2024) ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินจากสถาบันรังสีวิทยาและวิทยาศาสตร์การแพทย์ Dongnam สาธารณรัฐเกาหลี (เกาหลีใต้) (Lee *et al.*, 2023) และต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย UNSCEAR (2000)

## สรุปผลการวิจัย

จากการประเมินกัมมันตภาพรังสีบริเวณรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู ที่พาดผ่าน จ.ไชยะบุรีและจ.หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ด้วยหัววัดรังสีชนิดเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) เพื่อหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรเดียม ( $^{226}\text{Ra}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในตัวอย่างดิน รวมทั้งหมด 10 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าเฉลี่ยเป็น  $22.49 \pm 0.25$   $12.76 \pm 0.17$  และ  $121.66 \pm 0.73$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  ตามลำดับ และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก ร่างกาย ( $\text{H}_{\text{ex}}$ ) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายในร่างกาย ( $\text{H}_{\text{in}}$ ) อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (E) และความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต (ELCR) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $46.38 \pm 0.11$   $0.13 \pm 0.01$   $0.18 \pm 0.01$   $21.39 \pm 0.07$   $\text{nGy.h}^{-1}$   $0.03 \pm 0.003$   $\text{mSv.y}^{-1}$  และ  $0.01 \pm 0.002$   $\text{mSv.y}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ UNSCEAR กำหนด (UNSCEAR, 2000) แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ทำการศึกษามีความเสี่ยงจากการได้รับรังสี อันอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ยังบริเวณนี้ อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาและเก็บตัวอย่างในจังหวัดอื่น ๆ เพิ่มเติม ให้ครอบคลุมพื้นที่ตามแนวรอยเลื่อนเดียนเบียนฟู เพื่อประเมินและป้องกันความเสี่ยงจากการได้รับรังสีในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแห่งชาติลาว สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวที่ช่วยเก็บตัวอย่างวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารมาตรฐานดิน IAEA-375 และขอขอบคุณหน่วยวิจัยรังสีประยุกต์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์รังสี

## เอกสารอ้างอิง

- ประสงค์ เกษราคุณ, หทัยชนก อุทัยขวัญแก้ว, เจนจิรา งามเพียร และอุดร ยังช่วย. (2552). การประเมินค่ากัมมันตรังสีในดินบริเวณจังหวัดตรัง. ใน: การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 11. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, กรุงเทพฯ. ES02-2-ES02-7.
- ปิยะ ผ่านศึก, สุนารี บดีพงศ์ และมุบารัค เล็กเกลี้ยง. (2564). การประเมินนิวไคลด์กัมมันตรังสี ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) ในดินบริเวณเทือกเขาหินแกรนิตอำเภอเกาะพะงัน จังหวัดสุราษฎร์ธานี. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports 24(1): 14 - 22.
- พวงทิพย์ แก้วทับทิม, ปิยะ ผ่านศึก, มุบารัค เล็กเกลี้ยง และสถาพร เรืองรุ่ง. (2564). วิเคราะห์ปริมาณ Ra-226, K-40 และ Th-232 ในตะกอนดินจากแม่น้ำ และลำคลอง จังหวัดสุราษฎร์ธานี. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 26(3): 1762 - 1776.
- Ayodele, A., Arogunjo, A., Ajisafe, J. and Arije, O. (2017). Health detriment associated with exposure to natural radioactivity from the soil of Ondo and Ekiti States South Western, Nigeria. Physical Science International Journal 14(4): 1 - 11.
- Azeem, U., Younis, H., Ullah, N., Mehboob, K., Ajaz, M., Ali, M., Hidayat, A. and Muhammad, W. (2024). Radionuclide concentrations in agricultural soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in district Swabi, KPK, Pakistan. Nuclear Engineering and Technology 56(1): 207 - 215.
- Bangotra, P., Mehra, R., Kaur, K. and Jakhu, R. (2016). Study of natural radioactivity ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazards. Radiation Protection Dosimetry 171(2): 277 - 281. doi:10.1093/rpd/ncw074.
- Botwe, B.O., Schirone, A., Delbono, I., Barsanti, M., Delfanti, R., Kelderman, P., Nyarko, E. and Lens, P.N. (2017). Radioactivity concentrations and their radiological significance in sediments of the Tema Harbour (Greater Accra, Ghana). Journal of Radiation Research and Applied Sciences 10(1): 63 - 71.
- Bui, H.B., Ngo, X.T., Khuong, T.H., Golonka, J., Nguyen, T.D., Song, Y., Itaya, T. and Yagi, K. (2017). Episodes of brittle deformation within the Dien Bien Phu Fault zone, Vietnam: Evidence from K-Ar age dating of authigenic illite. Tectonophysics 695: 53 - 63.
- Bui, V.L., Leuangtakoun, S., Bui, T.H., Vu, T.K.D., Le, T.N., Thang, D.D., Singsoupho, S. and Tran, H.N. (2020). Natural radioactivity and radiological hazards in soil samples in Savannakhet province, Laos. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 323(1): 303 - 315.
- Dina, N.T., Das, S.C., Kabir, M.Z., Rasul, M.G., Deeba, F., Rajib, M., Islam, M.S., Hayder, M.A. and Ali, M.I. (2022). Natural radioactivity and its radiological implications from soils and rocks in Jaintiapur area, North-east Bangladesh. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 331(11): 4457 - 4468.

- Duong, C.C., Yun, H.S. and Cho, J.M. (2006). GPS measurements of horizontal deformation across the Lai Chau-Dien Bien (Dien Bien Phu) fault, in Northwest of Vietnam, 2002-2004. *Earth, planets and space* 58(5): 523 - 528.
- Eke, B.C., Ukwuihe, U.M. and Akomolafe, I.R. (2022). Evaluation of activity concentration of natural radionuclides and lifetime cancer risk in soil samples at two tertiary institutions in Owerri, Imo State, Nigeria. *International Journal of Radiation Research* 20(3): 671 - 678.
- Eke, B.C., Akomolafe, I.R., Ukwuihe, U.M. and Onyenegecha, C.P. (2024). Assessment of Radiation Hazard Indices Due to Natural Radionuclides in Soil Samples from Imo State University, Owerri, Nigeria. *Environmental Health Insights* 18: 1 - 11. doi: 10.1177/11786302231224581.
- Eyibio, I.K., Essiett, A.A., Atat, J., Essien, I.E., Essiett, U.A., Inam, E.J. and Bede, M.C. (2024). Activity concentration, transfer factor and radiological health risk assessment of natural radionuclides in soil and maize in oil producing areas in Akwa Ibom state, Nigeria. *Nigeria, World Journal of Advanced Science and Technology* 5: 1 - 10.
- Eyrolle, F., Morereau, A., Zebracki, M., Gouin, V.N., Lepage, H., Vismes, D.A., Meyer, A., Pelletier-Montarges, E., Chabaux, F., Coynel, A., Debret, M., Giner, F., Grosbois, C., Gurriaran, R., Mourier, D. and Lestel, L. (2024). Anthropogenic legacy of potassium-40 in French large rivers reconstructed from sediment cores. *Science of The Total Environment* 954: 176479.
- Fathy, D., Zakaly, H.M.H., Lasheen, E.S.R., Elsaman, R., Alarifi, S.S., Sami, M., Awad, H.A. and Ene, A. (2023). Assessing geochemical and natural radioactivity impacts of Hamadat phosphatic mine through radiological indices. *PLoS ONE* 18(8): e0287422.
- Findeiß, M. and Schäffer, A. (2017). Fate and environmental impact of thorium residues during rare earth processing. *Journal of Sustainable Metallurgy* 3(1): 179 - 189.
- Huy, N.Q., Hien, P.D., Luyen, T.V., Hoang, D.V., Hiep, H.T., Quang, N.H., Long, N.Q., Nhan, D.D., Binh, N.T., Hai, P.S. and Ngo, N.T. (2012). Natural radioactivity and external dose assessment of surface soils in Vietnam. *Radiation protection dosimetry* 151(3): 522 - 531.
- Ismail, N.I., Jaafar, M.Z., Hashim, M.M.A., Nik Ariffin, N.A., Zaharullil, N.A. and Wan Mohd Zain, W.Z. (2024). NORMs Spatial Distribution and Radiological Risk Assessment in the Soil of The Kesang River Basin, Malaysia. *Malaysian Journal of Soil Science* 28: 172 - 185.
- Janković, M., Jelić, I., Rajačić, M., Krneta Nikolić, J., Vukanac, I., Dimović, S., Sarap, N. and Šljivić-Ivanović, M. (2023). Distribution of Natural Radionuclides and <sup>137</sup>Cs in Urban Soil Samples from the City of Novi Sad, Serbia-Radiological Risk Assessment. *Toxics* 11(4): 345.
- Kadhim, T.M., Alkufi, A.A. and Alhous, S.F. (2020). Measurement of the natural radiological activity of soil samples of some general education schools in Al-Qadisiyah Governorate. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 928(7): 072026. doi: 10.1088/1757-899X/928/7/072026.
- Kaewtubtim, P., Youngchuay, U. and Lakkiang, M. (2021). Natural Radionuclides in Medicinal Plants and Forages from a Granite Mountain area, Phangan Island, Surathani Province. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports* 24(2): 31 - 37.

- Koszowska, E., Wolska, A., Zuchiewicz, W., Cuong, N. Q. and Pécskay, Z. (2007). Crustal contamination of Late Neogene basalts in the Dien Bien Phu Basin, NW Vietnam: Some insights from petrological and geochronological studies. *Journal of Asian Earth Sciences* 29(1): 1 - 17.
- Lai, K.Y., Chen, Y.G. and Lâm, D.Đ. (2012). Pliocene-to-present morphotectonics of the Dien Bien Phu fault in northwest Vietnam. *Geomorphology* 173: 52 - 68.
- Lee, J., Kim, H., Kye, Y.U., Lee, D.Y., Jo, W.S., Lee, C.G., Kim, J.K., Baek, J.H. and Kang, Y.R. (2023). Activity concentrations and radiological hazard assessments of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples obtained from the Dongnam Institute of Radiological & Medical Science, Korea. *Nuclear Engineering and Technology* 55(7): 2388 - 2394.
- Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q., Xiao, E., Xia, F., Zheng, G. and Xiao, T. (2024). Geochemical Distribution and Environmental Risks of Radionuclides in Soils and Sediments Runoff of a Uranium Mining Area in South China. *Toxics* 12(1): 95. doi: 10.3390/toxics12010095.
- Malanca, A., Gaidolfi, L., Pessina, V. and Dallara, G. (1996). Distribution of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  in soils of Rio Grande do Norte (Brazil). *Journal of environmental radioactivity* 30(1): 55 - 67.
- Nhon, D.H., Sieu, L.N., Hai, P.S., Thanh, T.D., Loan, B.T.T., Ve, N.D., Vuong, B.V., Luu, N.T.M., Long, T.H., Chien, H.T. and The, N.D. (2024). Assessment of the level and risk of radioactive hazards in coastal sediments in northern Vietnam. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 1 - 25.
- Ravanat, J.L., Breton, J., Douki, T., Gasparutto, D., Grand, A., Rachidi, W. and Sauvaigo, S. (2014). Radiation-mediated formation of complex damage to DNA: a chemical aspect overview. *The British journal of radiology* 87(1035): 20130715.
- Roger, F., Jolivet, M., Maluski, H., Respaut, J.P., Münch, P., Paquette, J.L., Van, T.V. and Van, V.N. (2014). Emplacement and cooling of the Dien Bien Phu granitic complex: implications for the tectonic evolution of the Dien Bien Phu Fault (Truong Son Belt, NW Vietnam). *Gondwana Research* 26(2): 785 - 801.
- Sayyed, M.I., Maria, Z.M., Hussein, Z.A., Najam, L.A., Namq, B.F., Wais, T.Y., Mostafa, M.Y.A. and Mansour, H. (2024). Radiological hazard assessment of soil from Kasik oil refinery, Nineveh, Iraq. *Nuclear Engineering and Technology* 56(11): 4782 - 4790.
- Seow, S.Q., Mohan Viswanathan, P. and Dodge-Wan, D. (2024). Distribution of natural radioactivity in different geological formations and their environmental risk assessment in Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research* 1 - 17.
- Sharma, N., Singh, J., Esakki, S.C. and Tripathi, R.M. (2016). A study of the natural radioactivity and radon exhalation rate in some cements used in India and its radiological significance. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 9(1): 47 - 56.
- Suleiman, I.K. (2024). Assessment of Naturally Occurring Radionuclide in Soil Samples from Kutayi Mining Sites in Muya Local Government Area, Niger State, Nigeria. *Nigerian Journal of Theoretical and Environmental Physics* 2(2): 29 - 39.

- Taskin, H., Karavus, M.E.L.D.A., Ay, P., Topuzoglu, A.H.M.E.T., Hidiroglu, S.E.Y.H.A.N. and Karahan, G. (2009). Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey. *Journal of environmental radioactivity* 100(1): 49 - 53.
- Tsamos, P., Stefanou, S. and Noli, F. (2024). Assessment of distribution of heavy metals and radionuclides in soil and plants nearby an oil refinery in northern Greece. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9: 100593.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), and Annex, B. (2000). Exposures from natural radiation sources. *Cosmic rays* 9(11).
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- United State Environmental Protection Agency. (2024). Health Risk of Radon. Source: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>. Retrieved from 18 February 2024.
- Upadhyay, D.R., Koirala, G., Shah, B.R., Tajudin, S.M. and Khanal, R. (2024). Assessing radioactive contaminants in Kathmandu soils: measurement and risk analysis. *Environmental Monitoring and Assessment* 196(2): 190.
- Uyanik, N.A. (2023). An alternative approach for the excess lifetime cancer risk and prediction of radiological parameters. *Open Chemistry* 21(1): 20220359.
- Wang, Y., Sieh, K., Tun, S.T., Lai, K.Y. and Myint, T. (2014). Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(4): 3767 - 3822.
- Yachiso, G.T., Chaubey, A.K. and Turi, B. (2023). Transfer factor of radionuclides from soil to cereal crops around gold mining and evaluation of corresponding radiological hazard levels Oromia, Ethiopia. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 1 - 17.
- Yang, B., Pang, C., Tuo, F., Zhou, Q. and Li, Z. (2024). Radioactivity and elemental oxidation composition in soil from Yangjiang, a high background natural radiation area, China. *Journal of Environmental Radioactivity* 276: 107447.
- Yang, G., Lu, X., Zhao, C. and Li, N. (2013). Natural radioactivity in building materials used in Changzhi, China. *Radiation protection dosimetry* 155(4): 512 - 516.
- Zubair, M. (2020). Measurement of natural radioactivity in several sandy-loamy soil samples from Sijua, Dhanbad, India. *Heliyon* 6(3): e03430.

