

การประเมินดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย

จุฑามาศ จันทรเจริญ¹, พวงทิพย์ แก้วทับทิม^{1*}, ปิยะ ผ่านศึก¹ และสมชาย กอพนพัฒน์¹

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อประเมินดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ อำเภอดำรงวิทยะ อำเภอปะทิว และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร 28 สถานี แต่ละสถานีแบ่งเป็น 6 ระดับ คือ 0-30 cm รวม 168 ตัวอย่าง วิเคราะห์โดยใช้ระบบแกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง พบว่าค่ากัมมันตรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกายประจำปี (E) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก (H_{ex}) และค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (ELCR) มีค่าเฉลี่ยเป็น 153.76 ± 0.19 Bq/kg, 72.97 ± 0.13 nGy/h, 0.089 ± 0.004 mSv/y, 0.42 ± 0.01 และ 0.31 ± 0.01 mSv/y ตามลำดับ โดยค่ากัมมันตรังสีสมมูลเรเดียม ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกายประจำปี ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก และค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ UNSCEAR ที่ 370 Bq/kg, 0.48 mSv/y, 1 และ 0.29 mSv/y ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในระดับสากลที่ 57 nGy/h ผลการวิจัยสรุปได้ว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในดิน สวนกาแฟ อำเภอดำรงวิทยะ อำเภอปะทิว และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

คำสำคัญ: ดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสี หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ดินปลูกกาแฟ

* ผู้รับผิดชอบบทความ : pungtip.k@psu.ac.th

Assessment of the Risk Index of Radionuclides in Soil Samples from Coffee Plantations in Chumphon Province, Thailand

Chuthamat Chancharoen¹, Pungtip Kaewtubtim^{1*}, Piya Phansuke¹ and Somchai Kopoonput¹

¹ Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University

Abstract

The objective of this study was to assess the radiological risk indices of natural radionuclides in soil samples collected from coffee plantations in Tha Sae, Pathio and Sawi districts of Chumphon Province. A total of 28 stations were selected, each divided into six depth levels (0-30 cm), resulting in 168 samples. The analysis was conducted using gamma spectrometry equipped with a high-purity germanium (HPGe) detector. The measured parameters included radium equivalent activity (Ra_{eq}), absorbed dose rates in air (D), annual external effective dose rate (E), external hazard index (H_{ex}) and excess lifetime cancer risk (ELCR). The average values obtained were 153.76 ± 0.19 Bq/kg, 72.97 ± 0.13 nGy/h, 0.089 ± 0.004 mSv/y, 0.42 ± 0.01 and 0.31 ± 0.01 mSv/y respectively. The values were lower than the UNSCEAR criteria of 370 Bq/kg, 0.48 mSv/y, 1 and 0.29 mSv/y respectively. The air absorption dose rate was within the internationally accepted range of 57 nGy/h. The research results concluded that the amount of radioactive substances contaminated in the soil, coffee plantations, Tha Sae District, Pathio District and Sawi Districts of Chumphon Province, was within the safe limits.

Keywords: Radionuclide risk assessment, High-purity germanium (HPGe) detector, Coffee growing soil

* Corresponding author: pungtip.k@psu.ac.th

1. บทนำ

การประเมินดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในดินมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Nieder et.al., 2018) ด้วยเหตุผลหลายประการ ประการแรกดินเป็นแหล่งกักเก็บนิวไคลด์กัมมันตรังสีหลักของสิ่งแวดล้อม ทำหน้าที่เป็นทั้งที่สะสมและเป็นแหล่งกำเนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งสามารถแพร่กระจายหรือถ่ายโอนไปยังส่วนประกอบอื่นของระบบนิเวศ เช่น นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินถ่ายโอนไปยังส่วนประกอบของพืช เนื่องจากเป็นแหล่งที่รากพืชดูดซับน้ำและแร่ธาตุ (IAEA, 1989; Asaduzzaman et al., 2015) ประการที่สอง ข้อมูลเกี่ยวกับระดับรังสีในดินเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญ ที่ช่วยแยกความแตกต่างระหว่างรังสีที่เกิดจากธรรมชาติ และรังสีที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น จึงสามารถใช้ตรวจสอบและติดตามนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อาจเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประการที่สาม การทำความเข้าใจการกระจายตัวและความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินจึงมีความจำเป็นต่อการประเมินปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับ เนื่องจากโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 84 ของปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับในแต่ละปี มาจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (Feng, et al., 2020) การศึกษาความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินจึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค ซึ่งผู้บริโภคสามารถได้รับสารกัมมันตรังสีผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Asaduzzaman et al., 2014) และการได้รับสารกัมมันตรังสีส่งผลต่อการเกิดโรคมะเร็ง เนื้องอก และเกิดความเสียหายทางพันธุกรรมได้ (IARC, 2012) จากการศึกษาความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเฝ้าระวังคุณภาพสินค้าเกษตร การศึกษางานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่าดินในหลายพื้นที่มีการสะสมของ ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K อยู่ในระดับสูง ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะทางธรณีวิทยาและการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต (UNSCEAR, 2000; Alharbi & Alamoudi, 2017) สำหรับประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดชุมพร พบว่ามีพื้นที่หินแกรนิตไหลทางทิศตะวันตก และพื้นที่อื่น ๆ ของจังหวัดปกคลุมด้วยหินตะกอนและหินแปร (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) นอกจากนี้ Kritsanuwat et al. (2014) ได้ศึกษาการกระจายตัวของธาตุแร่หายาก ทอเรียม และยูเรเนียมในตะกอนทะเลอ่าวไทย ลักษณะธรณีวิทยาเช่นนี้อาจทำให้เกิดการสะสมในนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติในดิน ซึ่งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของพืชผลทางการเกษตรของไทย (Saenboonruang et al., 2018) กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อโลก และประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดชุมพรซึ่งอยู่ในภาคใต้ของประเทศไทย ถือเป็นพื้นที่ปลูกกาแฟที่สำคัญและมีพื้นที่เพาะปลูกขนาดใหญ่ (ชูษณา, 2558) การขยายตัวของอุตสาหกรรมกาแฟในประเทศไทย เติบโตไปในทิศทางเดียวกับเศรษฐกิจโลก (กรมวิชาการเกษตร, ม.ป.ป.) ในการควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ทางเกษตรจากประเทศไทยควรมีการพิจารณาความเสี่ยงจากการปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Materials : NORMs) ที่สะสมอยู่ในดิน (Alharbi & Alamoudi, 2017) สำหรับพื้นที่ปลูกกาแฟในจังหวัดชุมพร มีพื้นที่ปลูกมากที่สุด คือ อำเภอท่าแซะ คิดเป็นร้อยละ 82.30 รองลงมา คือ อำเภอสวี อำเภอปะทิว อำเภอเมืองชุมพร อำเภอพะโต๊ะ อำเภอทุ่งตะโก อำเภอละแม และอำเภอหลังสวน ตามลำดับ (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดชุมพร, 2567)

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อมูลเชิงลึกที่ชัดเจนเกี่ยวกับการประเมินระดับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในพื้นที่เพาะปลูก โดยเฉพาะในจังหวัดชุมพร ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีความสำคัญอย่างสูงในการประเมินระดับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในพื้นที่ปลูกกาแฟ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเฝ้าระวังความปลอดภัยจากสารกัมมันตรังสีของสินค้าทางการเกษตร ด้วยเหตุนี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการประเมินดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินที่ปลูกกาแฟ อำเภอท่าแซะ อำเภอปะทิว และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร

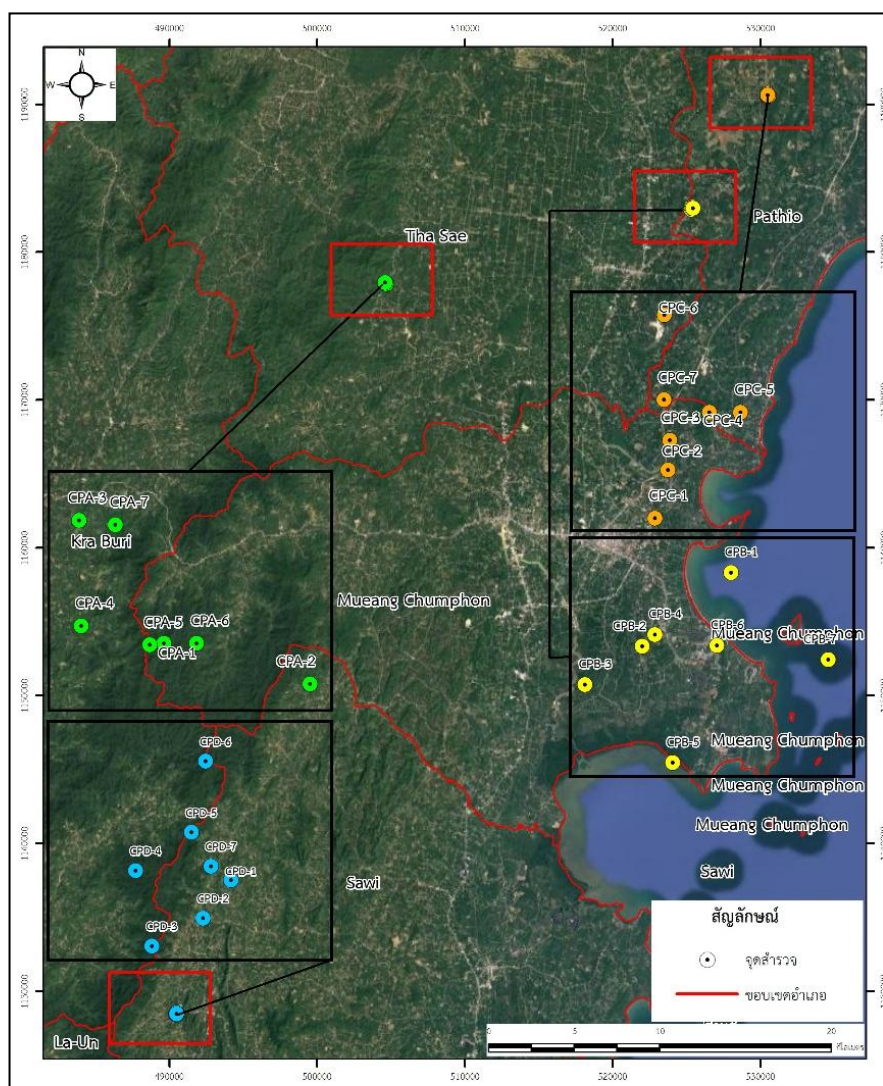
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร
- 2.2 เพื่อประเมินการได้รับรังสีของคนในชุมชนที่ปลูกกาแฟในแต่ละบริเวณ จังหวัดชุมพร

3. วิธีดำเนินการวิจัย

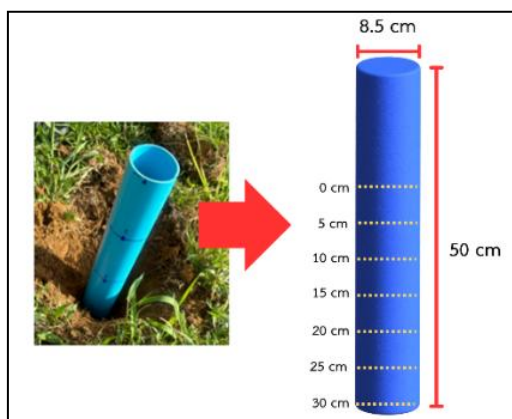
3.1 วิธีเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน

พื้นที่ทำการศึกษา ประกอบด้วยสวนกาแฟจำนวน 4 สวน ได้แก่ กาแฟสวน A ตั้งอยู่ที่ ตำบลรับร่อ อำเภอท่าชะงะ, กาแฟสวน B ตั้งอยู่ที่ ตำบลทะเลทรัพย์ อำเภอปะทิว, กาแฟสวน C ตั้งอยู่ที่ ตำบล ชุมโค อำเภอปะทิว และกาแฟสวน D ตั้งอยู่ที่ ตำบลเขาทะลุ อำเภอสวี จังหวัดชุมพร ประเทศไทย



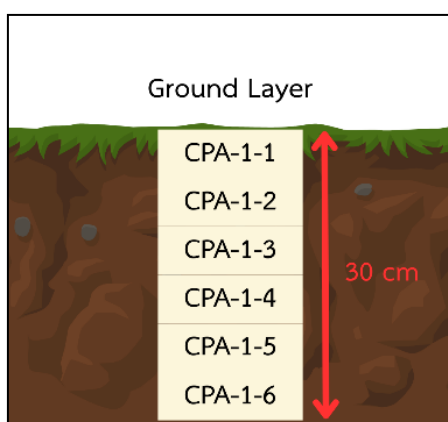
ภาพที่ 1 แผนที่สวนกาแฟจำนวน 4 สวน จังหวัดชุมพร ประเทศไทย

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินแบบแบ่งชั้น (Stratified Random Sampling) จากบริเวณสวนกาแฟ จำนวน 4 สวน (A, B, C, และ D) ดังภาพที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างสวนละ 7 สถานี ด้วยอุปกรณ์ชุดเจาะตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 cm ยาว 50 cm ดังภาพที่ 2 จากนั้น กำหนดรหัสตัวอย่างดินแต่ละสถานีดังนี้ ได้แก่ ตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ A รหัส CPA-1 ถึง CPA-7, ตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ B รหัส CPB-1 ถึง CPB-7, ตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ C รหัส CPC-1 ถึง CPC-7 และตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ D รหัส CPD-1 ถึง CPD-7



ภาพที่ 2 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดิน

ทำการเจาะดินให้มีระดับความลึก 30 cm จากนั้นดึงอุปกรณ์เจาะดินขึ้นมาวางในแนวราบกับพื้น แล้วแบ่งดินตามระดับความลึก ให้มีความหนาช่วงละ 5 cm จะได้ดินที่ ระดับ 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-25 cm และ 25-30 cm รวม 6 ตัวอย่างต่อสถานี เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความเข้มข้นสารกัมมันตรังสีกับความลึก จากนั้นนำตัวอย่างใส่ถุงซิปล็อค แล้วเขียนรหัสแต่ละตัวอย่างติดไว้บนถุงซิปล็อค (ตัวอย่างดินสวนกาแฟ A สถานีที่ 1 ตั้งรหัสเป็น CPA-1-1, CPA-1-2, CPA-1-3, CPA-1-4, CPA-1-5 และ CPA-1-6 เรียงลำดับจากบนลงล่าง) ดังภาพที่ 3 ได้ตัวอย่างดินจากสวนที่ปลูกกาแฟ จำนวน 4 สวน 28 สถานี รวมตัวอย่างทั้งหมด 168 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3 แสดงการเก็บตัวอย่างดิน

นำตัวอย่างดินมากำจัดสิ่งปนเปื้อน แล้วนำไปตากจนดินตัวอย่างแห้ง จากนั้นนำดินตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และอบตัวอย่างซ้ำจนกระทั่งความชื้นคงที่ แล้วนำดินตัวอย่างที่แห้งมาบดให้เป็นผงด้วยโม่ร่อนตัวอย่าง จากนั้นนำดินผงมาร่อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 120 μm เพื่อให้ตัวอย่างดินผงมีขนาดเท่ากัน แล้วนำตัวอย่างดินผงมาบรรจุในภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอก ขนาดผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm สูง 10.2 cm ซึ่งมีขนาดเท่ากับภาชนะบรรจุสารมาตรฐานดิน IAEA-375 จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน กทม. ปิดฝากระปุกให้สนิทโดยใช้เทปพันสายไฟพันรอบรอยต่อระหว่างฝากับตัวกระปุกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วันเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสีอย่างถาวร (Taskin, et al., 2009)

3.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติเรเดียม-226 (Ra-226), ทอเรียม-232 (Th-232) และ โพแทสเซียม-40 (K-40) ในดินจากสวนกาแฟ 4 สวน ของอำเภอปะทิว อำเภอท่าแซะ และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาวัดหาค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ด้วยหัววัดเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) เป็นระยะเวลา 18,000 วินาที (Owoade, et al., 2019) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 (Cs-137) และโคบอลต์-60 (Co-60) ในการปรับเทียบพลังงานของเครื่องมือ และใช้สารมาตรฐานดิน IAEA-375 จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน กทม. ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ โดยวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ Ra-226 ที่พลังงาน 609.31 keV ซึ่งเป็นพลังงานของบิสมัท-214 (Bi-214) สำหรับ Th-232 วิเคราะห์ที่พลังงาน 911.21 keV ซึ่งเป็นพลังงานของแอกทิเนียม-228 (Ac-228) เนื่องจากนิวไคลด์ดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวให้รังสีแกมมาในธรรมชาติสูง และ K-40 วิเคราะห์ที่พลังงาน 1460.75 keV (สระและคณะ, 2567) โดยบันทึกจำนวนนับได้สเปกตรัมรังสีแกมมา ประเมินผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป GenieTM 2000 Basic Spectroscopy Software เพื่อหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226, Th-232 และ K-40 ดังสมการที่ (1) หาค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ดังสมการที่ (2) และคำนวณค่าความคาดเคลื่อนที่เกิดจากการสุ่มตัวอย่าง ดังสมการที่ (3)

$$A_x = \frac{N_s}{E_{ff} \times P_y \times T \times M_s} \quad (1)$$

เมื่อ A_x คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ ในตัวอย่างดิน (Bq/kg), N_s คือ อัตรานับสุทธิ (พื้นที่ใต้พีค/เวลาที่ใช้วัด), E_{ff} คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี, P_y คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีรังสีแกมมาออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี, T คือ เวลาที่นับวัด (s), M_s คือ มวลของตัวอย่างดินที่ทำการวัดรังสี (kg) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเสี่ยง

$$\%E_{ff} = \frac{\text{cps}}{(\%a)(A_t)} \quad (2)$$

เมื่อ $\%E_{ff}$ คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี, cps คือ จำนวนครั้งที่มีการตรวจจับรังสี, $\%a$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของรังสีแกมมาที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม, A_t คือ ความเข้มข้นที่วัดได้

$$\text{Error} = Z_{\alpha/2} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

เมื่อ, $Z_{\alpha/2}$ คือ ค่าคงที่จากตารางแจกแจงปกติที่ 95% confidence level จะได้ $Z_{0.025} = 1.96$, σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n คือ ขนาดตัวอย่าง

3.3 การประเมินดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

วิเคราะห์ค่าดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับความเป็นอันตรายจากการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ในตัวอย่างดินทุกระดับจากสวนกาแฟ 4 สวน อำเภอปะทิว อำเภอท่าแซะ และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร โดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์การสหประชาชาติเกี่ยวกับผลของรังสี (UNSCEAR, 2000) ได้กำหนดเกณฑ์ไว้ดังนี้

3.3.1 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Radium equivalent activity, Ra_{eq}) เป็นผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักของค่านิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีของทั้ง 3 ไอโซโทป ที่มีการศึกษาพบว่า Ra-226 มีนิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีที่ 1 Bq/kg จะให้ปริมาณค่านิว

โคลด์กัมมันตภาพรังสีเทียบเท่าของนิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีของ Th-232 ที่ 1.43 Bq/kg และค่านิวไคลด์กัมมันตภาพรังสีของ K-40 ที่ 0.077 Ba/kg (Júnior, et al., 2021, pp. 100-121; Agbalagba & Onoja, 2011, pp. 667-671 & Singh et al., 2005, pp. 431-439) ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม และ Ra_{eq} มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการ (4)

$$Ra_{eq} = A_{Ra-226} + 1.43A_{Th-232} + 0.07A_{K-40} \quad (4)$$

เมื่อ Ra_{eq} คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม มีหน่วยเป็น Bq/kg, A_{Ra-226} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Ra-226 มีหน่วยเป็น Bq/kg, A_{Th-232} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Th-232 มีหน่วยเป็น Bq/kg และ A_{K-40} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ K-40 มีหน่วยเป็น Bq/kg

3.3.2 ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rates in air, D) เป็นค่าความเข้มรังสีแกมมาในอากาศ ซึ่งเป็นรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มาจากพื้นโลกที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน โดยมีค่า 0.462, 0.604 และ 0.0417 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแปลงค่ากัมมันตภาพจำเพาะ เป็นอัตราปริมาณรังสีที่ดูดกลืนอากาศ ของ Ra-226, Th-232 และ K-40 ตามลำดับ สำหรับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$D = 0.461A_{Ra-226} + 0.604A_{Th-232} + 0.0417A_{K-40} \quad (5)$$

เมื่อ D คือ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ มีหน่วยเป็น nGy/h, A_{Ra-226} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Ra-226 มีหน่วยเป็น Bq/kg, A_{Th-232} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Th-232 มีหน่วยเป็น Bq/kg และ A_{K-40} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ K-40 มีหน่วยเป็น Bq/kg

3.3.3 ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (Annual external effective dose rate, E) เป็นปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปี สามารถคำนวณได้จากการแปลงค่าความสัมพันธ์จากค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) เป็นปริมาณรังสียังผลที่บุคคลทั่วไปได้รับหรือใช้เวลาออกอากาศบ้านเรือนประมาณ 20% ของเวลาทั้งหมดใน 1 ปี ซึ่งไม่ควรเกิน 0.48 mSv/y (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการ (6)

$$E = D \times 8,760 (h \cdot y^{-1}) \times 0.2 \times 0.7 \times 10^{-6} \quad (6)$$

เมื่อ E คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี มีหน่วยเป็น mSv/y, D คือ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ มีหน่วยเป็น nGy/h, 8,760 คือ ค่าปริมาณที่ได้รับรังสีรายปี มีหน่วยเป็น h/y, 0.2 คือ ค่าประมาณการอยู่ภายนอกบ้านเรือนของมนุษย์ 20% ของเวลาทั้งหมด และ 0.7 คือ ค่าแฟกเตอร์จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศมีหน่วยเป็น Sv/Gy

3.3.4 ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอก (External hazard index, H_{ex}) คือ ค่าปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีที่อยู่ในธรรมชาติ โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ร่างกายได้รับส่วนใหญ่จะเป็นกัมมันตภาพรังสีแกมมา เพราะรังสีแกมมามีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีอื่น ๆ ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี (H_{ex}) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวเรา เมื่อ ค่า $H_{ex} < 1$ (UNSCEAR, 2000) แสดงว่าปริมาณดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอกมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ ถ้า $H_{ex} = 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 1.5 mGy/y และถ้า $H_{ex} > 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับอันตรายจากภายนอก หมายความว่าสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวเราไม่ควรนำมาใช้ในการดำเนินชีวิตหรือควรหลีกเลี่ยง (Agbalagba & Onoja,

2011; Lolila & Mazunga, 2023; UNSCEAR, 2000) ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย (External hazard index; H_{ex}) คำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra-226}}{370} + \frac{A_{Th-232}}{259} + \frac{A_{K-40}}{4810} \quad (7)$$

เมื่อ H_{ex} คือ ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย, A_{Ra-226} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Ra-226 มีหน่วยเป็น Bq/kg, A_{Th-232} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ Th-232 มีหน่วยเป็น Bq/kg และ A_{K-40} คือ ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ K-40 มีหน่วยเป็น Bq/kg

3.3.5 ผลการประเมินค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (Excess Lifetime Cancer Risk, ELCR) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินโอกาสของบุคคลในการเกิดโรคมะเร็งอันเนื่องมาจากการได้รับสารก่อมะเร็งจากสิ่งแวดล้อม โดยสารก่อมะเร็งเหล่านี้อาจมาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น มลพิษทางอากาศ สารเคมีในอาหาร สารปนเปื้อนในน้ำและดิน รังสีที่ก่อให้เกิดไอออนไนซ์ และสารเคมีอุตสาหกรรม การคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงนี้สามารถคาดการณ์ความเสี่ยง และกำหนดมาตรการป้องกันได้ (EPA, 1999) สำหรับความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งตลอดชีวิต ซึ่งเฉลี่ยจากทั่วโลก มีค่าเท่ากับ 0.29 mSv/y (UNSCEAR, 2000) คำนวณได้จากสมการที่ (8)

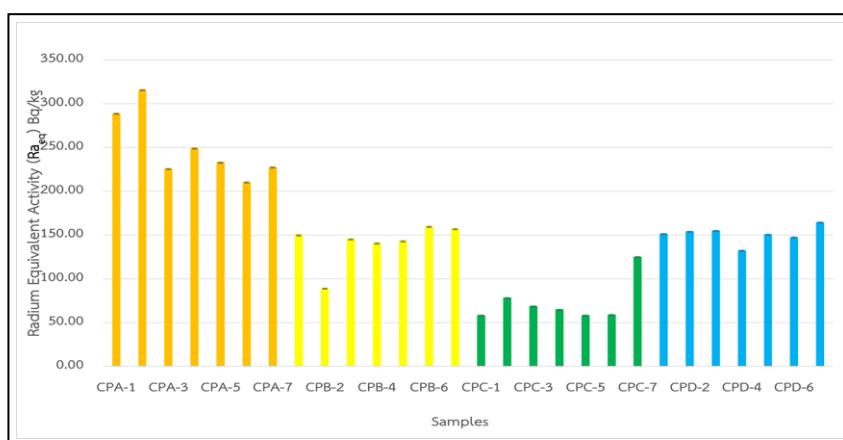
$$ELCR = E \times LF \times RF \quad (8)$$

เมื่อ E คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี มีหน่วยเป็น mSv/y, LF คือ อายุขัยเฉลี่ยของมนุษย์ (70 ปี) และ RF คือ ปัจจัยเสี่ยงเป็นความเสี่ยงมะเร็งร้ายแรงต่อ Sievert กำหนดเป็น 0.05 โดย (International Commission on Radiological Protection [ICRP], 2007)

4. ผลการวิจัย

ประเมินดัชนีความเสี่ยง (D, E, ELCR, H_{ex} และ Ra_{eq}) จากนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินที่ใช้ปลูกกาแฟ อำเภอนาทม และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร

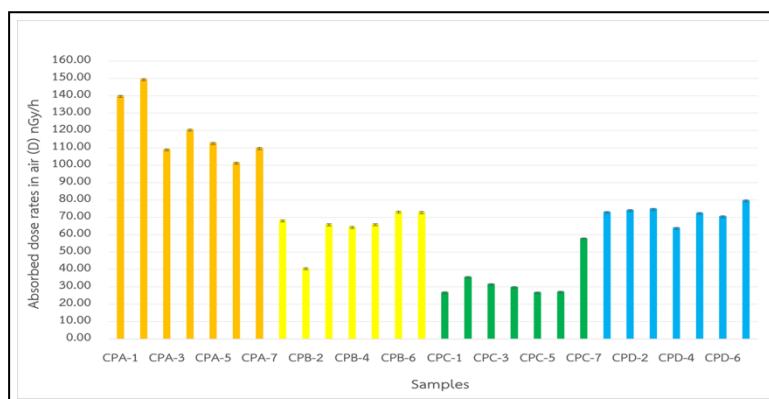
1. ผลการประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Radium equivalent activity, Ra_{eq}) ในตัวอย่างดินของแต่ละสถานี



ภาพที่ 4 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq})

จากภาพที่ 4 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 58.40 ± 0.12 ถึง 315.82 ± 0.26 Bq/kg เฉลี่ย 153.76 ± 0.19 Bq/kg โดยค่า Ra_{eq} ในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟที่อำเภอท่าชะม๊ะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสวนอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณสวนดังกล่าวเป็นหินแกรนิต โดยสถานี CPA-2 มีค่า Ra_{eq} สูงสุด อย่างไรก็ตาม พบว่าค่า Ra_{eq} ในทุกสถานีนี้น้อยกว่าเกณฑ์ คือ 370 Bq/kg ที่ UNSCEAR (2000) กำหนด

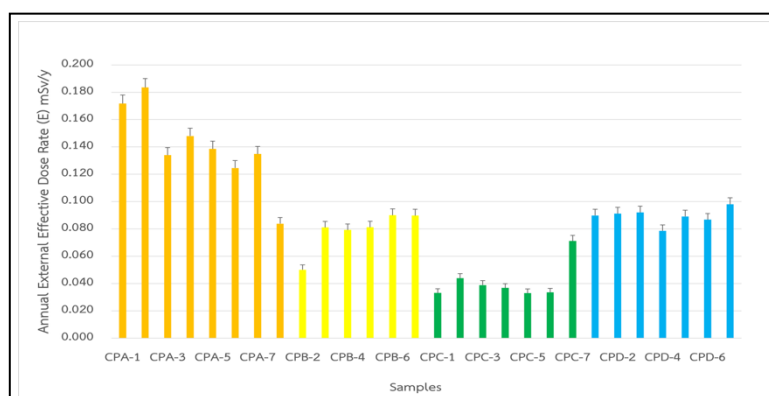
2. ผลการประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rates in air, D) ในตัวอย่างดินของแต่ละสถานี



ภาพที่ 5 ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D)

จากภาพที่ 5 ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าอยู่ในช่วง 26.88 ± 0.08 ถึง 149.67 ± 0.18 nGy/h เฉลี่ย 72.97 ± 0.13 nGy/h โดยค่า D ในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ อำเภอท่าชะม๊ะ มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสวนอื่น ๆ โดยค่า D ที่สถานี CPA-2 มีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ค่า D ในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟ ที่ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว และอำเภอสวี มีค่าสูงกว่าค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนเฉลี่ยจากทั่วโลก คือมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เป็นหินแกรนิต ในขณะที่ค่า D ในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟที่ตำบลทะเลทรัพย์ อำเภอปะทิว มีค่าต่ำกว่า 57 nGy/h เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นที่ราบ ลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นดินตะกอน

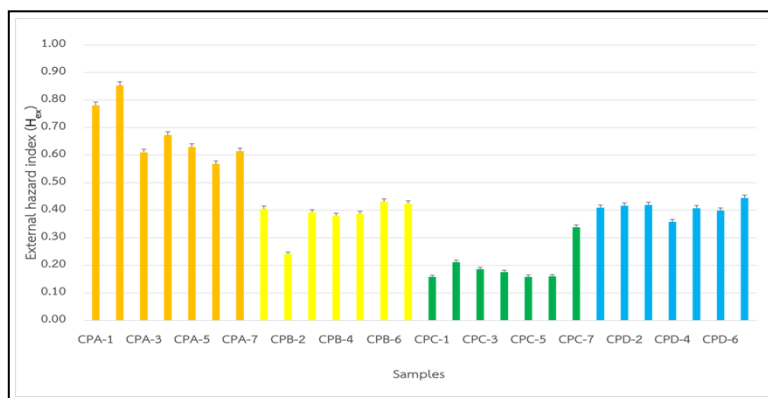
3. ผลการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (Annual external effective dose rate, E) ในตัวอย่างดินของแต่ละสถานี



ภาพที่ 6 ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E)

จากภาพที่ 6 ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 ± 0.003 ถึง 0.18 ± 0.006 mSv/y เฉลี่ย 0.089 ± 0.004 mSv/y โดยค่า E โดยค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) ทุกสถานีมีค่าต่ำเกณฑ์ คือ 0.48 mSv/y (UNSCEAR, 2000)

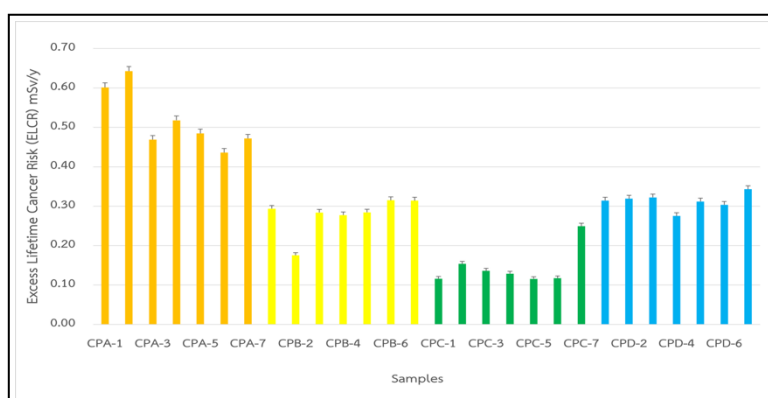
4. ผลการประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอก (External hazard index, H_{ex}) ในตัวอย่างดินของแต่ละสถานี



ภาพที่ 7 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก (H_{ex})

จากภาพที่ 7 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก (H_{ex}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.16 ± 0.01 ถึง 0.85 ± 0.01 เฉลี่ย 0.42 ± 0.01 โดยค่า H_{ex} ในตัวอย่างดินจากสวนกาแฟที่อำเภอท่าแซะมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสวนอื่น ๆ มีค่าสูงสุดที่สถานี CPA-2 และในสวนเดียวกันค่า H_{ex} จะมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกทุกสถานีมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่ง หากค่า $H_{ex} < 1$ แสดงว่าปริมาณ ดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอกอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย (Agbalagba & Onoja, 2011; Lolila & Mazunga, 2023; UNSCEAR, 2000)

5. ผลการประเมินค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (Excess Lifetime Cancer Risk, ELCR) ในตัวอย่างดินของแต่ละสถานี



ภาพที่ 8 ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (ELCR)

จากภาพที่ 8 ค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (ELCR) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.12 ± 0.01 ถึง 0.64 ± 0.01 mSv/y เฉลี่ย 0.31 ± 0.01 mSv/y โดยค่า ELCR ในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ อำเภอท่าแซะ มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสวนอื่น ๆ เช่นเดียวกับค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม, ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ, ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกประจำปี

และค่าดัชนีวัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย โดยมีค่าสูงสุดที่สถานี CPA-2 ทั้งนี้ พบว่าค่า ELCR หลายสถานีมีค่า ELCR สูงกว่าค่าเกณฑ์คือ 0.29 mSv/y (UNSCEAR, 2000)

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีความเสี่ยงเฉลี่ยของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน เทียบกับผลการศึกษาทั้งใน และต่างประเทศ

Mathematical model	Radionuclide Risk Index					Reference
	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	E (mSv/y)	H _{ex}	ELCR (mSv/y)	
Chumphon, Thailand	153.76 ± 0.19	72.97 ± 0.13	0.089 ± 0.004	0.42 ± 0.01	0.31 ± 0.01	Present Study
Global mean	370	57	0.48	1	0.29	(UNSCEAR, 1988, 1993, 2000)
Ethiopia	172.0 ± 4.6	76.3 ± 2.0	-	0.46	-	(Ashebir et al., 2021)
Turkey	-	-	-	0.0064	0.139	(Keser et al., 2011)
Tamil Nadu, India	181.7 ± 91.5	82.5 ± 39.7	0.13 ± 0.15	0.48 ± 0.24	-	(Hameed, et al., 2014)
Upper Egypt	639.47	290.08	-	0.52	-	(Ahmed, & El-Aradi, 2005)
Qatar	47	22	0.027	0.125	0.096	(Ahmad et al., 2019)
Owerri, Nigeria	59.62	26.86	0.132	0.16	0.14	(Eke et al., 2024)
Chumphon	303.91 ± 24.93	150.63 ± 12.32	0.18 ± 0.02	0.82 ± 0.07	0.69 ± 0.06	(Chauymanee et al., 2013)
OAP Data	512.90 ± 6.50	231.81 ± 2.97	0.28 ± 0.02	1.39 ± 0.02	-	(OAP, 2002)

ผลการศึกษาค่าดัชนีความเสี่ยงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร พบว่า ค่ากัมมันตรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) มีค่าเฉลี่ย 153.76 ± 0.19 Bq/kg ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับประเทศเอธิโอเปีย, ประเทศอินเดีย, ประเทศอียิปต์ตอนเหนือ, จังหวัดชุมพร, ค่าอ้างอิงระดับชาติ และค่าเฉลี่ยโลกที่ 370 Bq/kg (Ahmed & El-Aradi, 2005; Ashebir et al., 2021; Chauymanee et al., 2013; Hameed et al., 2014; OAP, 2002; UNSCEAR, 2000) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับประเทศไนจีเรีย และประเทศกาตาร์ (Ahmad et al., 2019; Eke et al., 2024) ค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) ในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร เฉลี่ย 72.97 ± 0.13 nGy/h มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับประเทศเอธิโอเปีย, ประเทศอินเดีย, ประเทศอียิปต์ตอนเหนือ, จังหวัดชุมพร, ค่าอ้างอิงระดับชาติ (Ahmed & El-Aradi, 2005; Ashebir et al., 2021; Chauymanee et al., 2013; Hameed et al., 2014; OAP, 2002) แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับประเทศไนจีเรีย, ประเทศกาตาร์ และค่าเฉลี่ยโลกที่ 57 nGy/h (Ahmad et al., 2019; Eke et al., 2024; UNSCEAR, 2000) ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกายประจำปี (E) ในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร เฉลี่ย 0.089 ± 0.004 mSv/y มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับประเทศอินเดีย, ประเทศไนจีเรีย, จังหวัดชุมพร, ค่าอ้างอิงระดับชาติ และค่าเฉลี่ยโลกที่ 0.48 mSv/y (Chauymanee et al., 2013; Eke et al., 2024; Hameed et al., 2014; OAP, 2002; UNSCEAR, 2000) แต่มีค่าสูงกว่าที่รายงานในประเทศกาตาร์ (Ahmad et al., 2019) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ในตัวอย่างดิน จากสวนกาแฟ จังหวัดชุมพร เฉลี่ย 0.42 ± 0.01 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับรายงานในประเทศเอธิโอเปีย, ประเทศอินเดีย, ประเทศอียิปต์ตอนเหนือ, จังหวัด

ชุมพร, ค่าอ้างอิงระดับชาติ และค่าเฉลี่ยโลกที่ 1 (Ahmed & El-Aradi, 2005; Ashebir et al., 2021; Chauymanee et al., 2013; Hameed et al., 2014; OAP, 2002; UNSCEAR, 2000) แต่มีค่าสูงกว่าประเทศตุรกี, ประเทศไนจีเรีย และประเทศกาตาร์ (Ahmad et al., 2019; Eke et al., 2024; Keser et al., 2011) และค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (ELCR) เฉลี่ย 0.31 ± 0.01 mSv/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับจังหวัดชุมพร (Chauymanee et al., 2013) แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับประเทศตุรกี, ประเทศกาตาร์ และประเทศไนจีเรีย (Ahmad et al., 2019; Eke et al., 2024; Keser et al., 2011) แต่มีค่าเทียบเคียงกับค่าเฉลี่ยโลกที่ 0.29 mSv/y (UNSCEAR, 2000)

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงของ กัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) มีค่าเฉลี่ย 153.76 ± 0.19 Bq/kg อัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าเฉลี่ย 72.97 ± 0.13 mSv/y ค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) มีค่าเฉลี่ย 0.42 ± 0.01 ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) มีค่าเฉลี่ย 0.089 ± 0.004 mSv/y และค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (ELCR) ในพื้นที่ที่ศึกษามีค่าเฉลี่ย 0.31 ± 0.01 mSv/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์กรสหประชาชาติเกี่ยวกับผลของรังสีปรมาณู (UNSCEAR, 2000) ผลการวิจัยสรุปได้ว่าดินจากสวนกาแฟอำเภอท่าแซะ อำเภอปะทิว และอำเภอสวี จังหวัดชุมพร มีปริมาณสารกัมมันตรังสีอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย อย่างไรก็ตาม บ้านเรือนบริเวณพื้นที่ศึกษาควรมีการเปิดปิดให้อากาศถ่ายเทสม่ำเสมอเพื่อลดการสะสมของแก๊สเรดอนในที่อยู่อาศัย

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเสี่ยงโดยเฉพาะค่า D และ ELCR ในตัวอย่างดิน จากอำเภอท่าแซะ อำเภอสวี และอำเภอปะทิว มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นควรวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านของสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ (NORMs) จากดินสู่เมล็ดกาแฟในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2550). *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดชุมพร*. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไอเดีย สแควร์.
- กรมวิชาการเกษตร. (ม.ป.ป.). *ยกระดับอัตลักษณ์กาแฟไทยด้วยนวัตกรรมกาแฟ สู่ตลาดสากล*. สำนักพิมพ์การ์นตี.
- คณะกรรมการความปลอดภัยทางรังสี ศูนย์ความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2564). *คู่มือความปลอดภัยในการทำงานด้านรังสี*. <https://www.shecu.chula.ac.th/data/boards/120/manual-radiation-safety.pdf>
- ชูชนา เมฆโหรา. (2558). กาแฟเพื่อสุขภาพ. *วารสารอาหาร*, 45(4), 15–18.
- สระเรา นียมเดชา, รุ่งศักดิ์ สุวรรณกลาง, และพรธิภา ตั้งตระกูล. (2567). *การวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมด้วยระบบวัดแกมมาสเปกโตรเมตรี*. <https://www.oap.go.th/wp-content/uploads/2024/04/3-คู่มือการวิเคราะห์นิวไคลด์รังสีในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม.pdf>
- สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดชุมพร. (2567). *ข้อมูลเพื่อการวางแผนพัฒนาการเกษตรรายสินค้า ปี 2567*. สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. <https://www.opsmoac.go.th/chumphon-performance-preview-461591791830>
- Agbalagba, E. O., & Onoja, R. A. (2011). Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(7), 667–671. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.03.002>

- Ahmad, A. Y., Al-Ghouti, M. A., AlSadig, I., & Dieyeh, M. A. (2019). Vertical distribution and radiological risk assessment of Cs-137 and natural radionuclides in soil samples. *Scientific Reports*, 9, Article 12481. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48500-x>
- Ahmed, N. K., & El-Aradi, A. G. M. (2005). Natural radioactivity in farm soil and phosphate fertilizer and its environmental implications in Qena governorate, Upper Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84(1), 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.04.007>
- Alharbi, W. R., & Alamoudi, Z. M. (2017). Radiological hazard of coffee to humans: A comparative study of Arabian and Turkish coffees. *African Journal of Agricultural Research*, 12(5), 327–341. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12031>
- Asaduzzaman, K., Khandaker, M. U., Amin, Y. M., & Mahat, R. (2014). Soil-to-root vegetable transfer factors for ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, and ⁸⁸Y in Malaysia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 135, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.04.009>
- Asaduzzaman, K., Khandaker, M. U., Amin, Y. M., & Mahat, R. (2015). Uptake and distribution of natural radioactivity in rice from soil in north and west part of peninsular Malaysia for the estimation of ingestion dose to man. *Annals of Nuclear Energy*, 76, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.036>
- Ashebir, N. C., Goshu, B. S., & Mengistu, E. (2021). Assessment of Natural Radioactivity in Soil Samples and Tea Leaves at Gumero Tea Farm, Ethiopia. *Romanian Journal of Biophysics*. 32(2), 103-119.
- Chauymanee, G., Kessaratikoon, P., Boonkrongcheep, R., Benjakul, S. & Youngchaury, U. (2013). Specific Activity and Radioactive Contour Map of Anthropogenic Radionuclide (Cs-137) in Surface Soil Samples from Chumphon Province, Thailand. *Advanced Materials Research*. 770, 108-111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.770.108>
- Eke, B.C., Akomolafe, I.R., Ukwuik, U.M. & Onyenegecha, C.P. (2024). Assesment of Radiation Hazard Indices Due to Natural Radionuclides in Soil Samples from Imo State University, Owerri, Nigeria. *Environmental Health Insight*, 18(1), 1-11. <https://doi.org/10.1177/11786302231224581>
- Environmental Protection Agency (EPA). (1999). National Emission Standard for Hazardous Air Pollutants; National Emission Standards for Radon Emissions from Phosphogypsum Stacks. *Federal Register*, 64(20), 5574-5580.
- Feng, W., Zhang, Y., Li, Y., Wang, P., Zhu, C., Shi, L., Hou, X., & Qie, X. (2020). Spatial distribution, risk assessment and influence factors of terrestrial gamma radiation dose in China. *Journal of Environmental Radioactivity*. 222, 106325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106325>
- Goshu, B. S. & Ashebir, N. C. (2024). Estimation of annual effective radiation dose and cancer risk due to tea consumption. *Romanian Journal of Biophysics*, 34(2), 73-85. <https://www.doi.org/10.59277/RJB.2024.2.02>

- Hameed, P. S., Pillai, G. S., & Mathiyarasu, R. (2014). A study on the impact of phosphate fertilizers on the radioactivity profile of cultivated soils in Srirangam (Tamil Nadu, India). *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 7(4), 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.08.011>
- International Agency for Research on Cancer. (2012). *IARC monographs on evaluation of carcinogenic risks to humans: Volume 100D, Radiation* (ISBN 978-92-832-1321-5). International Agency for Research on Cancer. <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Radiation-2012>
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICPR Publication 103). *Annals of the ICPR*, 37(2-4), 1-332. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
- Júnior, J. A. dos S., Araújo, E. E. de N., Fernández, Z. H., Amaral, R. dos S., Nascimento, J. M. do S. & Milán, M. O. (2021). Measurement of natural radioactivity and radium equivalent activity for pottery making clay samples in Paraíba and Rio Grande do Norte – Brazil. *Environmental Advances*, 6, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100121>
- Keser, R., Görür, F. K., Akcay, N., & Okumuşoğlu, N. T. (2011). Radionuclide concentration in tea, cabbage, orange, kiwi and soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Rize, Turkey. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 91(6), 987-991. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4259>
- Kritsanuwat, R., Sahoo, S. K., Fukushi, M., & Chanyotha, S. (2015). Distribution of rare earth elements, thorium and uranium in Gulf of Thailand's sediments. *Environmental Earth Sciences*. 73, 3361-3374. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3624-8>
- Lolila, F. & Mazunga, M. S. (2023). Measurements of natural radioactivity and evaluation of radiation hazard indices in soils around the Manyoni uranium deposit in Tanzania. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(1), 100524. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100524>
- Nieder, R., Bendi, D. K., & Reich, F. X. (2018). Health Risks Associated with Radionuclides in Soil Materials. *Soil Component and Human Health*, 451-501. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>
- Office of Atoms for Peace. (2002). OAP 1994-2002 annual reports. Office of Atoms for Peace.
- Owoade, L. R., Oyeyemi, S. M., Lawal, F. A., Adeyemo, A. J., Adamoh, N. O., & Adebawale, F. M. (2019). Assessing naturally occurring radionuclides in soil of Egbeda Local Government for a baseline data of Oyo State, Nigeria. *Radiation Protection and Environment*. 42(3), 90-95. https://doi.org/10.4103/rpe.RPE_14_19
- Singh, S., Rani, A. & Mahajan, R. K. (2005). Ra-226, Th-232 and K-40 analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *Radiation Measurements*, 39, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.09.003>

- Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidioglu, S. & Karahan, G. (2009). Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(1), 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.10.012>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1988). *Sources and effects of Radiation*, Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, USA.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1993). *Sources and effects of Radiation*, Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, USA.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes*. Retrieved from https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2010). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes. Volume I: sources (Corrigendum)*. Retrieved from https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I-CORR.pdf