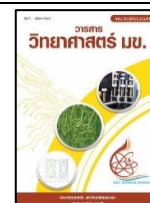




KKU SCIENCE JOURNAL

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

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



การประเมินความปลอดภัยทางรังสีจากเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้ นิวไคลด์กัมมันตรังสีในพื้นที่สาธารณะ

Radiation Safety Assessment of Airborne Particulate Matter Monitoring Devices Using Radioactive Nuclides in Public Areas

กาญจนา สารุพันธ์¹ จิตพันธ์ อินทร์เอียด² และ ปิยนุช เนตรคุณ^{3*}Karnchana Sathupun¹, Jittapan Ineead² and Piyanooch Nedkun^{3*}¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000²กองตรวจสอบทางนิวเคลียร์และรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กรุงเทพมหานคร 10900³ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 47000¹Department of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phranakhon Si Ayutthaya, 13000, Thailand²Nuclear and Radiation Inspection, Division Office of Atoms for Peace, Bangkok, 10900, Thailand³Department of General Science, Faculty of Science and Engineer, Kasetsart University Chulalongkornrajavidyalaya Campus, Sakon Nakhon, 47000, Thailand

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ประเมินผลการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปในบริเวณที่มีการใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศชนิดใช้รังสีบีตา (BAM) ที่ใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสีคาร์บอน-14 (C-14) คริปตอน-85 (Kr-85) และโพรมีเทียม-147 (Pm-147) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีในกระบวนการตรวจวัด โดยทำการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีของอุปกรณ์ที่มีการใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยการวัดปริมาณรังสีในบริเวณที่ทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดฝุ่นละออง อีกทั้งจำลองสถานการณ์ปกติที่วัสดุกัมมันตรังสียังคงอยู่ในสภาพปิดผนึกและสถานการณ์เกิดการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม ผลการประเมินภายใต้สถานการณ์ปกติพบว่า ปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปได้รับจากนิวไคลด์ทั้งสามชนิดอยู่ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดความปลอดภัยพื้นฐานสากล (IAEA GSR Part 3) ในส่วนสถานการณ์เกิดการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสีพบว่า ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปที่มีอายุมากกว่า 2 ปี ได้รับรังสีต่ำกว่าระดับอ้างอิงสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินที่กำหนดโดย IAEA แต่ในเด็กอายุต่ำกว่า 2 ปี พบว่าปริมาณรังสีที่ได้รับจาก C-14 และ Pm-147 คือ 70.30 และ 62.90 มิลลิซีเวิร์ต ซึ่งสูงเกินค่าระดับอ้างอิงสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินที่กำหนดไว้ที่ 50.00 มิลลิซีเวิร์ต ข้อมูลจากการศึกษานี้ใช้สนับสนุนการกำหนดมาตรการเฝ้าระวังและเตรียมความพร้อมด้านความปลอดภัยทางรังสี ตลอดจนเป็นฐานข้อมูลสำหรับการบริหารจัดการและการวางแผนตอบโต้เหตุฉุกเฉินในอนาคต โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)

*Corresponding Author, E-mail: piyanooch.n@ku.th

Received date: 13 July 2025 | Revised date: 18 September 2025 | Accepted date: 29 September 2025

doi: 10.14456/kkuscij.2025.37

ABSTRACT

This study assessed the radiation safety of Beta Attenuation Monitors (BAM) used for measuring airborne particulate matter, which use radioactive nuclides Carbon-14 (C-14), Krypton-85 (Kr-85), and Promethium-147 (Pm-147) as beta-emitting sources. Radiation exposure was assessed by measuring ambient dose levels at monitoring sites and by simulating potential release scenarios. Radiation doses were analyzed for two scenarios: normal operation (radioactive materials with sealed) and accidental environmental release. In normal operation, all three radionuclides resulted in radiation doses for both workers and the public that were below the dose limits set by the International Basic Safety Standards (IAEA GSR Part 3). In an accidental release, estimated doses for workers and members of the public over two years old remained under IAEA emergency exposure reference levels. However, for children under two, C-14 and Pm-147 doses (70.30 and 62.90 millisieverts, respectively) exceeded the 50.00 millisievert IAEA emergency reference level, highlighting particular risk to this group. These results provide key data to inform radiation safety monitoring, preparedness, and emergency response planning by the Office of Atoms for Peace (OAP).

คำสำคัญ: เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองรังสีบีตา วัสดุกัมมันตรังสี การประเมินความปลอดภัยทางรังสี

Keywords: BAM, Radioactive Material, Radiation Safety Assessment

บทนำ

ในปัจจุบันการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองในอากาศเป็นกระบวนการสำคัญในการเฝ้าระวังคุณภาพสิ่งแวดล้อมและประเมินผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองใหญ่และเขตอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงสูงต่อการสะสมของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{2.5}) ซึ่งสามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและเป็นสาเหตุของโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหัวใจ และโรคหลอดเลือดสมอง (Choochuay *et al.*, 2020; Sangkham *et al.*, 2024) การติดตามคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่องและแม่นยำจึงเป็นภารกิจสำคัญของหน่วยงานรัฐและท้องถิ่นทั่วประเทศ

เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองแบบใช้รังสีบีตา หรือ Beta Attenuation Monitor (BAM) (MET ONE Instruments Inc, 2008; Shukla *et al.*, 2022; Riley *et al.*, 2023; Samae *et al.*, 2025) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและถูกนำมาใช้ในสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย โดย BAM ทำงานตามหลักการของการลดทอนรังสีบีตาที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดรังสีผ่านชั้นฝุ่นที่สะสมบนแผ่นกรอง ซึ่งค่าการลดทอนนี้สัมพันธ์กับมวลของฝุ่นที่สะสมอยู่ เครื่อง BAM จึงสามารถให้ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองได้แบบต่อเนื่องและมีความแม่นยำสูง แหล่งกำเนิดรังสีบีตาที่ใช้ในเครื่อง BAM ได้แก่ นิวไคลด์กัมมันตรังสี ได้แก่ คาร์บอน-14 (C-14) คริปทอน-85 (Kr-85) และโพรเมเทียม-147 (Pm-147) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของวัสดุปิดผนึก (sealed source) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนหรือการฟุ้งกระจายของรังสีสู่อากาศโดยรอบ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการออกแบบเพื่อความปลอดภัยสูง แต่การใช้วัสดุกัมมันตรังสีในเครื่องมือวัดก็ยังเป็นประเด็นด้านความปลอดภัยที่ต้องให้ความสนใจอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกรณีที่อาจเกิดการรั่วไหลจากการชำรุดเสียหายหรือใช้งานผิดวิธี ซึ่งอาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานหรือประชาชนที่อยู่ใกล้เคียงได้รับรังสีโดยไม่ตั้งใจ แม้ว่าการใช้งานเครื่อง BAM จะให้ประโยชน์สูงในด้านการตรวจวัดคุณภาพอากาศแต่การใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสีก็อาจสร้างความเสี่ยงต่อสุขภาพหากไม่ได้รับการควบคุมหรือบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งมีการติดตั้งเครื่อง BAM ในหลายจังหวัด ทั้งในกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ อุบลราชธานี และจังหวัดอื่น ๆ ที่อยู่ในโครงการเฝ้าระวัง PM_{2.5} ของกรมควบคุมมลพิษการศึกษา ด้านความปลอดภัย การกำหนดมาตรการควบคุม และการออกแบบแผนการจัดการกรณีฉุกเฉิน

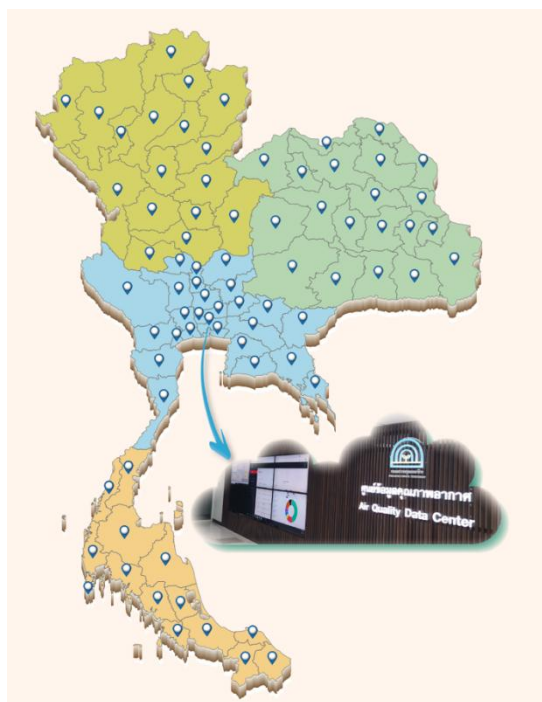
เนื่องจากการได้รับรังสีไอออไนซ์ (ionizing radiation) ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์แตกต่างกันไปตามช่วงอายุ โดยเฉพาะในทารกและเด็กเล็กอายุต่ำกว่า 2 ปี ซึ่งจัดเป็นกลุ่มที่มีความไวต่อรังสีสูงกว่าผู้ใหญ่ สาเหตุสำคัญมาจากการที่อวัยวะและเนื้อเยื่อยังอยู่ในระยะพัฒนา การแบ่งเซลล์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เซลล์มีความไวต่อการถูกทำลายจากรังสี นอกจากนี้ เด็กเล็กยังมีอายุคาดเฉลี่ยยาวนานกว่าผู้ใหญ่ ทำให้ความเสี่ยงต่อการเกิดผลกระทบระยะยาว เช่น การกลายพันธุ์หรือมะเร็ง มีโอกาสแสดงออกได้มากกว่า ทั้งยังมีความแตกต่างทางสรีรวิทยา เช่น อัตราการหายใจและการเผาผลาญที่สูงกว่า รวมถึงการกระจายและการคงอยู่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในร่างกายที่ไม่เหมือนกับผู้ใหญ่ โดยเฉพาะการสะสมในอวัยวะสำคัญหรือกระดูก ในการประเมินขนาดรังสีที่มนุษย์ได้รับ (dose assessment) องค์กรสากล เช่น ICRP และ IAEA ได้พัฒนา Computational Human Phantoms ที่จำลองร่างกายมนุษย์ในช่วงอายุต่าง ๆ ได้แก่ newborn 1-year-old 5-year-old 10-year-old และ adult เพื่อใช้ในการคำนวณขนาดรังสีที่อวัยวะและร่างกายได้รับ (dose conversion factors) ผลการศึกษาพบว่า ทารกและเด็กเล็กมีค่า effective dose ต่อหน่วยการได้รับรังสี (per Bq intake) สูงกว่าผู้ใหญ่หลายเท่า ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการรับรังสีจากนิวไคลด์กัมมันตรังสี Krypton-85 หรือ Carbon-14 เด็กเล็กจะมีค่า Committed Effective Dose (CED) สูงกว่าผู้ใหญ่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันอย่างชัดเจน (Cockerham *et al.*, 1994; Adams *et al.*, 1993; Ellenhorn *et al.*, 1997)

ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังมุ่งเน้นการประเมินปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปอาจได้รับจากการใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศแบบใช้รังสีบีตา (BAM) ซึ่งใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสี ได้แก่ คาร์บอน-14 (C-14) คริปทอน-85 (Kr-85) และโพรมีเทียม-147 (Pm-147) เป็นแหล่งกำเนิดรังสี การประเมินรังสีดำเนินการภายใต้สองสถานการณ์ ได้แก่ สถานการณ์ปกติวัสดุกัมมันตรังสียังคงอยู่ในสภาพปิดผนึกและได้รับการป้องกันตามมาตรฐานและสถานการณ์รั่วไหลมีการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยสมบูรณ์ เพื่อจำลองกรณีเลวร้ายที่สุด เพื่อการดำเนินการมาตรการความปลอดภัยและการเตรียมความพร้อมสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉิน

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบจากการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปจากการใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศชนิดใช้รังสีบีตา ซึ่งมีการใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสี ได้แก่ คาร์บอน-14 (C-14) คริปทอน-85 (Kr-85) และโพรมีเทียม-147 (Pm-147) เป็นแหล่งกำเนิดรังสี (Cember *et al.*, 2009; Obodovskiy, 2019)

การวิจัยได้มีการรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคการประเมินค่าความแรงรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี ซึ่งอยู่ภายในเครื่อง BAM โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมของนิวไคลด์ทั้งสามชนิด เช่น ครึ่งชีวิต ประสิทธิภาพการทำงานของรังสีที่ปล่อยออกมา รูปแบบทางกายภาพ (ของแข็งหรือก๊าซ) และปริมาณความแรงรังสีที่ใช้จริงของเครื่อง BAM ซึ่งในประเทศไทยมีการติดตั้งเครื่อง BAM อยู่หลายจุดด้วยกัน โดยในรูปที่ 1 แสดงเครือข่ายสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ และศูนย์ข้อมูลคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งแสดงตำแหน่งเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศชนิดอื่น ๆ รวมถึงเครื่อง BAM



รูปที่ 1 เครือข่ายสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศและศูนย์ข้อมูลคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ (ส่วนคุณภาพอากาศ กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2567)

โดยวัดปริมาณรังสีแกมมาในอากาศบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่อง BAM ในประเทศไทย ซึ่งจัดทำโดย ปส. จุดที่มีการติดตั้งเครื่อง BAM แบ่งเกณฑ์ แยกตามชนิดของนิวไคลด์ที่ใช้ในเครื่องแต่ละรุ่น ซึ่งแตกต่างกันออกไป จากการสำรวจพบว่าในประเทศไทยมีการใช้เครื่อง BAM ชนิดที่ใช้นิวไคลด์ ได้แก่ C-14 Kr-85 และ Pm-147 เท่านั้น โดยใช้เครื่องวัดสำรวจรังสีแกมมา (Gamma survey meter) ยี่ห้อลัดลัม (Ludlum) รุ่น 19 หัววัดรังสี แบบเรืองแสงวาบชนิด NaI(Tl) detector วัดปริมาณรังสีแกมมาในอากาศและเก็บรวบรวมเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบ

กำหนดสถานการณ์จำลองเพื่อประเมินผลกระทบ แบ่งเป็นสองสถานการณ์ ได้แก่ สถานการณ์ปกติ ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสียังคงอยู่ในสภาพปกติกและมีระบบป้องกันตามมาตรฐาน และสถานการณ์รั่วไหล ซึ่งจำลองเหตุการณ์เลวร้ายที่สุดโดยสมมติให้มีการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม 100% เพื่อประเมินโอกาสเกิดผลกระทบสูงสุด ภายในระยะเวลา 10 นาที ภายใต้สภาพบรรยากาศแบบเสถียร และความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที

ใช้สมมุติฐานในการประเมินผลการได้รับรังสี ดังนี้

1. สถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีอยู่ในสภาพปกติ

1.1 ปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกาย

1.1.1 ผู้ปฏิบัติงานรังสีได้รับรังสีแกมมาสูงสุดที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตร และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 2,000 ชั่วโมงต่อปี

1.1.2 ประชาชนทั่วไปได้รับรังสีแกมมาสูงสุดที่ระยะห่าง 2 เมตรจากวัสดุกัมมันตรังสี และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 8,760 ชั่วโมงต่อปี

1.1.3 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับรังสีปิตาที่ระยะห่างใด ๆ จากวัสดุกัมมันตรังสี

1.2 ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกาย

1.2.1 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับวัสดุกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกายผ่านการกินและการหายใจ

2. สถานการณ์ที่วัดกัมมันตรังสีรั่วไหลฟุ้งกระจาย

2.1 ปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกาย

2.1.1 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับรังสีแกมมาสูงสุด ภายในตู้คอนเทนเนอร์ปิดปริมาตรเท่ากับ 28.8 ลูกบาศก์เมตร และไม่มีระบบถ่ายเทอากาศสู่สิ่งแวดล้อม และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 1 ชั่วโมง

2.1.2 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับรังสีบีตาสูงสุด ภายในตู้คอนเทนเนอร์ปิดปริมาตรเท่ากับ 28.8 ลูกบาศก์เมตร และไม่มีระบบถ่ายเทอากาศสู่สิ่งแวดล้อม และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 1 ชั่วโมง และกำหนดค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (C) ของนิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 และ Pm-147 เท่ากับ 12.85×10^4 3.85×10^7 11.56×10^4 Bq/m³ ตามลำดับ (MET ONE Instruments Inc, 2008)

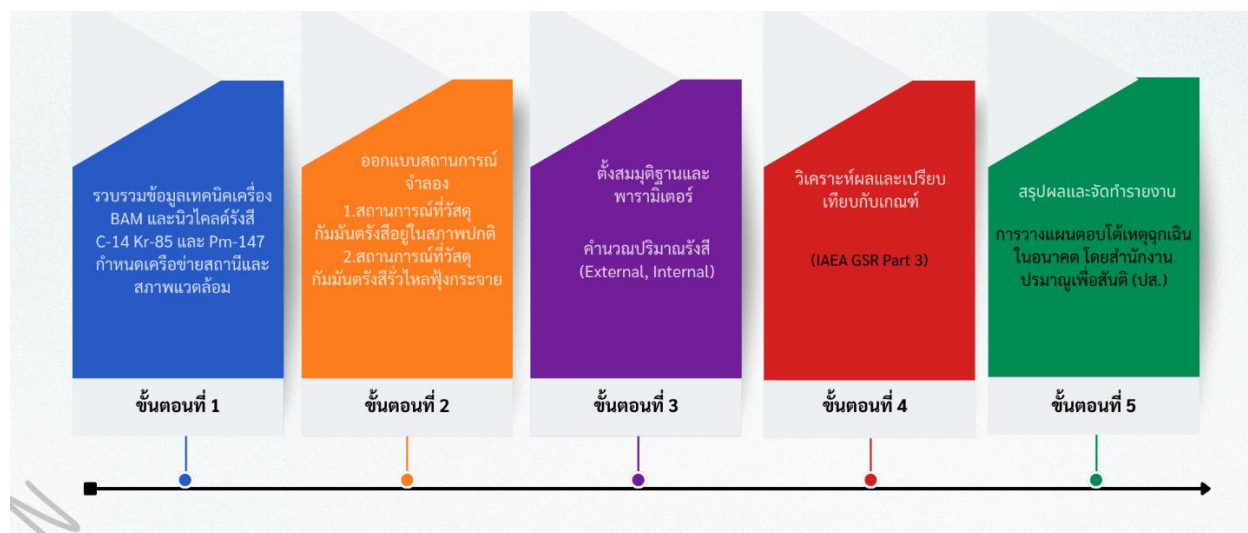
2.2 ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกาย

2.2.1 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีสูงสุดทั้งหมดเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจ และผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับนิวไคลด์รังสี Kr-85 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะเท่ากับ 3.85×10^7 Bq/m³ ในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมง และกำหนดค่าปริมาณรังสียังผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสี 1 Bq (e(g)inh) สูงสุด

2.2.2 ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับนิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 และ Pm-147 เข้าสู่ร่างกายผ่านการกิน

การประเมินค่าขนาดรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปได้รับอ้างอิงเกณฑ์กำกับดูแลของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ได้แก่ ซิตจำกัดปริมาณรังสีประจำปีที่กำหนดไว้ที่ 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปีสำหรับผู้ปฏิบัติงาน และ 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปีสำหรับประชาชนทั่วไป ตลอดจนเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงในสถานการณ์ฉุกเฉิน ซึ่งอยู่ในช่วง 20 - 100 มิลลิซีเวิร์ต ตามที่ระบุไว้ในเอกสาร IAEA GSR Part 3 (IAEA, 2011; IAEA, 2014)

โดยมีแผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการประเมินความปลอดภัยทางรังสี

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากข้อมูลการวัดปริมาณรังสีแกมมาในอากาศบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่อง BAM ในประเทศไทย แบ่งเกณฑ์แยกตามชนิดของนิวไคลด์ที่ใช้ในเครื่องแต่ละรุ่น แสดงข้อมูลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณรังสีแกมมาในอากาศสูงสุดที่ระยะต่าง ๆ

นิวไคลด์รังสี	กัมมันตภาพรังสี (Bq)	$\dot{D}_y$ ($\mu\text{R/hr}$) ระยะสัมผัส	ระยะห่าง 30 ซม.	ระยะห่าง 1 ม.	ระยะห่าง 2 ม.
C-14	$148 \times 10^4 - 370 \times 10^4$	15*	15*	15*	15*
Kr-85	111×10^7	2,900	240	30	15*
Pm-147	333×10^4	15*	15*	15*	15*

* ค่าระดับรังสีแกมมาสูงสุดเท่ากับ 15 ไมโครเรินท์เจนต์/ชั่วโมง เป็นค่าระดับรังสีพื้นหลังในธรรมชาติ (Background radiation; BG) ในบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่อง BAM

1. การประเมินผลการได้รับรังสีในสถานการณ์ต่าง ๆ

การประเมินผลการได้รับรังสี ประกอบด้วยการคำนวณปริมาณรังสีรวมที่ได้รับจากภายนอกร่างกายและภายในร่างกาย และการนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดการได้รับรังสี (dose limit) สูงสุดต่อปีหรือต่อครั้งที่เกิดอุบัติเหตุทางรังสี การใช้งานวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึก (sealed sources) (Delacroix *et al.*, 2002) โดยทั่วไป จะพิจารณาเฉพาะผลการได้รับรังสีจากภายนอกเท่านั้น เนื่องจากวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึกไม่มีโอกาสรั่วไหลฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ แต่หากวัสดุกัมมันตรังสีมีการรั่วไหลฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม จำเป็นต้องพิจารณาผลการได้รับรังสีจากภายนอกและภายในร่างกาย ทั้งนี้ การรั่วไหลฟุ้งกระจายของวัสดุกัมมันตรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ไฟไหม้วัสดุกัมมันตรังสี หรือวัสดุกัมมันตรังสีถูกชนกระแทกด้วยของแข็งอย่างรุนแรงทำให้วัสดุห่อหุ้มปริแตก วัสดุกัมมันตรังสีที่บรรจุอยู่ภายในจึงรั่วไหลฟุ้งกระจายออกมา

1.1 สถานการณ์ที่ 1 วัสดุกัมมันตรังสีสภาพปกติ

ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับจากภายนอกได้จากสมการ

$$D_y = \dot{D}_y \times t \quad (1)$$

โดย D_y คือ ค่าปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

$\dot{D}_y$ คือ ค่าระดับรังสีแกมมาที่วัดได้จากเครื่องสำรวจรังสีแกมมา (Gamma survey meter)

t คือ เวลาที่ได้รับรังสีแกมมา

และการได้รับรังสีที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปมีโอกาสได้รับวัสดุกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกายผ่านการกินหรือการหายใจ ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกายสามารถคำนวณได้จากสมการ (IAEA, 2014)

$$E_{ing,inh} = \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} + \sum_j e(g)_{j,inh} I_{j,inh} \quad (2)$$

โดย $E_{ing,inh}$ คือ ค่าปริมาณรังสียังผลรวม

$e(g)_{j,ing}$ $e(g)_{j,inh}$ คือ ค่าปริมาณรังสียังผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสีหนึ่งหน่วยที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายของนิวไคลด์ รังสีชนิดที่ j ผ่านการกิน (ingestion; ing) และการหายใจ (inhalation; inh) ตามลำดับ

$I_{j,ing}$ $I_{j,inh}$ คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายจากนิวไคลด์ชนิดที่ j ผ่านการกิน (ing) และการหายใจ (inh) ตามลำดับ

ทั้งนี้ ค่า $e(g)_{j,inh}$ แปรผันตามความเร็วในการดูดกลืนของปอด ซึ่งมี 4 ระดับ ได้แก่ เร็วมาก (very fast absorption; V) เร็ว (fast absorption; F) ปานกลาง (moderate absorption; M) และช้า (slow absorption; S) และแปรผันไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาควัสดุกัมมันตรังสีที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่ปอด ซึ่งมีขนาด 1 ไมครอน และ 5 ไมครอน นอกจากนี้ค่า $e(g)_{j,ing}$ และ $e(g)_{j,inh}$ ยังแปรผันตามอายุของประชาชนที่ได้รับรังสี และค่า Gut transfer factor (f_1) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณสารที่ผ่านเข้าไปในระบบของไหลในร่างกาย ค่า $e(g)_{j,ing}$ และ $e(g)_{j,inh}$ ของนิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 และ Pm-147

การประเมินผลการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปในสถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีอยู่ในสภาพปกติ โดยใช้สมมติฐานในการประเมินผลการได้รับรังสี ดังนี้

1. ปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกาย

- ผู้ปฏิบัติงานรังสีได้รับรังสีแกมมาสูงสุดที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตร และใช้เวลารับรังสี 2,000 ชั่วโมงต่อปี
- ประชาชนทั่วไปได้รับรังสีแกมมาสูงสุดที่ระยะห่าง 2 เมตร และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 8,760 ชั่วโมงต่อปี
- ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับรังสีบีตาที่ระยะห่างใด ๆ จากวัสดุกัมมันตรังสี

2. ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกาย ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับวัสดุกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกายผ่านการกิน ($I_{j,ing} = 0$ Bq) และการหายใจ ($I_{j,inh} = 0$ Bq) ทำให้ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกายจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ ($e(g)_{j,ing}I_{j,ing} = 0$ Sv และ $e(g)_{j,inh}I_{j,inh} = 0$ Sv โดยที่ j คือ นิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 หรือ Pm-147)

ค่าปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับภายนอกร่างกาย ($\dot{D}_y$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 และปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกายซึ่งคำนวณจากสมการที่ 2 มีค่าแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าปริมาณรังสีรวมที่ได้รับภายนอกร่างกายและภายในร่างกาย

นิวไคลด์รังสี	$\dot{D}_y$ (μ R/hr)	$\dot{D}_y^*$ (mSv)	$E_{ing,inh}$ (mSv)	ปริมาณรังสีรวม (mSv)	ผลการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณรังสี รวมกับค่าขีดจำกัดการได้รับรังสี
ผู้ปฏิบัติงานรังสี					
C-14	15	0	0	0	$0 < 20$ ต่ำกว่า
Kr-85	240	4.5	0	4.5	$4.5 < 20$ ต่ำกว่า
Pm-147	15	0	0	0	$0 < 20$ ต่ำกว่า
ประชาชนทั่วไป					
C-14	15	0	0	0	$0 < 1$ ต่ำกว่า
Kr-85	15	0	0	0	$0 < 1$ ต่ำกว่า
Pm-147	15	0	0	0	$0 < 1$ ต่ำกว่า

* ค่าระดับรังสีแกมมาสุทธิ ($\dot{D}_y^*$) ได้จากการนำค่าระดับรังสี ($\dot{D}_y$) ลบด้วยค่าระดับรังสีพื้นหลังในธรรมชาติ ($BG = 15\mu$ R/hr) ในบริเวณที่ติดตั้งเครื่อง BAM

จากตารางที่ 1 พบว่าในช่วงระยะเวลา 1 ปี ผู้ปฏิบัติงานรังสีได้รับรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสี Kr-85 สูงสุดเท่ากับ 4.5 มิลลิซีเวิร์ต เมื่อประเมินการได้รับรังสีที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตรจากวัสดุกัมมันตรังสี ในขณะที่ประชาชนทั่วไปไม่ได้รับรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสี Kr-85 เมื่อประเมินการได้รับรังสีที่ระยะห่าง 2 เมตรห่างจากวัสดุกัมมันตรังสี เนื่องจากโดยปกติแล้วประชาชนทั่วไปไม่สามารถเข้าใกล้วัสดุกัมมันตรังสีได้เลย สำหรับนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 ซึ่งแผ่เฉพาะรังสีบีตานั้น ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับรังสีบีตาที่แผ่ออกมาจากวัสดุกัมมันตรังสี

ในสถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีอยู่ในสภาพปกติ ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับรังสีจากนิวไคลด์รังสี Kr-85 C-14 และ Pm-147 ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดการได้รับรังสีจากการประเมินการได้รับรังสีตามสภาพการใช้งานจริง

1.2 สถานการณ์ที่ 2 วัสดุกัมมันตรังสีรั่วไหลฟุ้งกระจาย

การประเมินผลการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปในสถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีรั่วไหลฟุ้งกระจาย โดยใช้สมมุติฐานในการประเมินผลการได้รับรังสี ดังนี้

1. ปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกาย ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับรังสีแกมมาสูงสุดและรังสีบีตาสูงสุด ภายในตู้คอนเทนเนอร์ปิดปริมาตรเท่ากับ 28.8 ลูกบาศก์เมตร และไม่มีการระบายอากาศสู่สิ่งแวดล้อม และใช้เวลารับรังสีเท่ากับ 1 ชั่วโมง

2. ปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกาย

- ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีสูงสุดทั้งหมดเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจ และผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปได้รับนิวไคลด์รังสี Kr-85 ในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมง และกำหนดค่าปริมาณรังสียังผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสี 1 Bq ($e(g)_{inh}$) สูงสุด

- ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปไม่ได้รับนิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 และ Pm-147 เข้าสู่ร่างกายผ่านการกิน

การได้รับรังสีบีตาภายนอกร่างกาย เนื่องจากวัสดุกัมมันตรังสีมีการรั่วไหลฟุ้งกระจาย สามารถคำนวณได้จากสมการ (Radiation and Nuclear Safety Authority, 2007)

$$D_\beta = 2.45 \times 10^{-7} \times C \times \bar{E} \times e^{-(\mu_{\beta,t} \times 0.007)} \times W_R \times t \quad (3)$$

โดย D_β คือ ค่าปริมาณรังสีบีตาที่ได้รับในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

C คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของนิวไคลด์รังสีที่ตรวจวัดได้ในอากาศ

$\bar{E}$ คือ ค่าพลังงานเฉลี่ยของรังสีบีตา

$\mu_{\beta,t}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีบีตาของผิวหนัง ($\mu_{\beta,t} = 18.6(E_m - 0.036)^{-1.37}$ เมื่อ E_m คือ ค่าพลังงานสูงสุดของรังสีบีตา)

W_R คือ ค่าปรับเทียบตามชนิดรังสี (Radiation weighting factor) สำหรับรังสีบีตาทุกค่าพลังงานมีค่าเท่ากับ 1

t คือ เวลาที่ได้รับรังสีบีตา และใช้เวลาการได้รับรังสีเช่นเดียวกับการได้รับรังสีแกมมา

การคำนวณปริมาณรังสีที่ได้รับภายนอกร่างกายของผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปจึงต้องพิจารณาทั้งการได้รับรังสีบีตาและรังสีแกมมา จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ 3 แสดงได้ดังตารางที่ 3

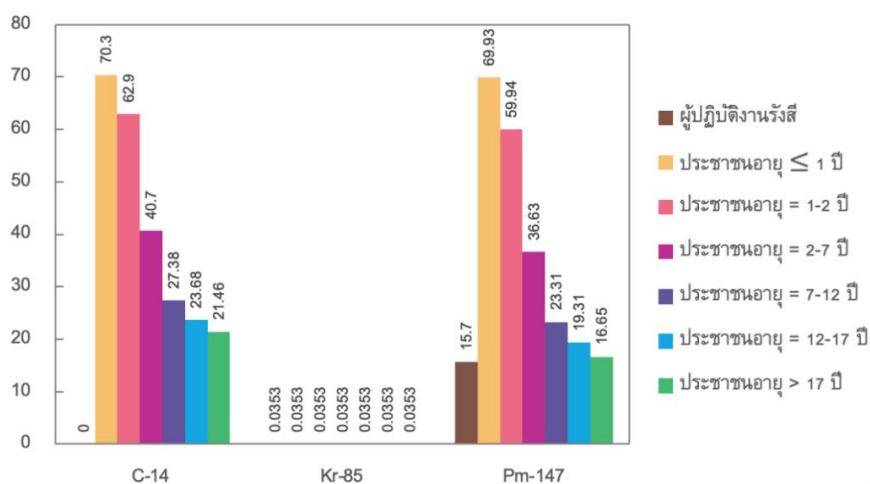
ตารางที่ 3 ปริมาณรังสีแกมมาและรังสีบีตาที่ได้รับภายนอกร่างกาย

นิวไคลด์รังสี	$\dot{D}_y$ ($\mu\text{R/hr}$)	D_y (mSv)	D_β^* (mSv)
ผู้ปฏิบัติงานรังสี			
C-14	15	0	1.51×10^{-4}
Kr-85	240	2.25×10^{-3}	1.84
Pm-147	15	0	4.90×10^{-4}
ประชาชนทั่วไป			
C-14	15	0	1.51×10^{-4}
Kr-85	240	2.25×10^{-3}	1.84
Pm-147	15	0	4.90×10^{-4}

* กำหนดค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (C) ของ $C_{C-14} = 12.85 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ $C_{Kr-85} = 3.85 \times 10^7 \text{ Bq/m}^3$ และ $C_{Pm-147} = 11.56 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ (MET ONE Instruments Inc, 2008)

เมื่อวัสดุกัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลฟุ้งกระจายภายในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมงผู้ปฏิบัติงานรังสี และประชาชนทั่วไปไม่ได้รับรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 แต่ได้รับรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสี Kr-85 (2.25×10^{-3}) ซึ่งถือว่ามีความน้อยมาก ในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไปยังได้รับรังสีบีตาจากนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 แต่ยังคงถือว่ามีความน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณรังสีบีตาที่ได้รับจาก Kr-85 (1.84 มิลลิซีเวิร์ต)

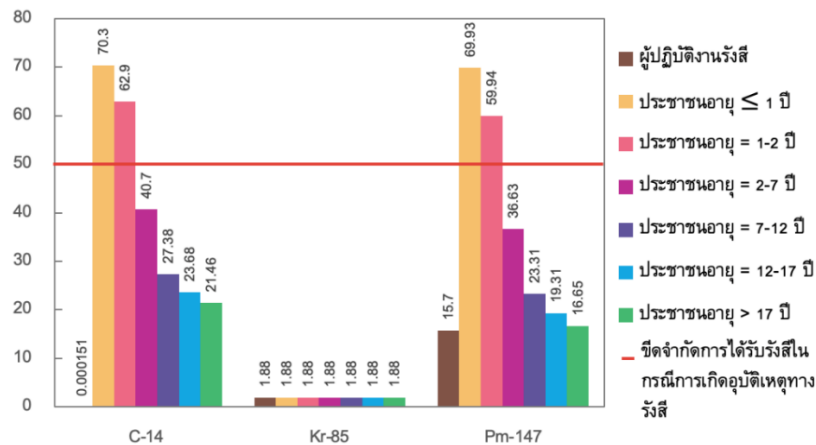
สถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีรั่วไหลฟุ้งกระจายออกจากวัสดุห่อหุ้ม ผู้ปฏิบัติงานรังสีและประชาชนทั่วไป ไม่ได้รับรังสีจากนิวไคลด์รังสีเข้าสู่ร่างกายผ่านการกิน ($I_{j,ing} = 0 \text{ Bq}$) แต่จะได้รับนิวไคลด์รังสีเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจ ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกาย ได้จากสมการที่ 2 และแสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟปริมาณรังสีที่ได้รับภายในร่างกายผ่านการกินและการหายใจที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 3 พบว่า ผู้ปฏิบัติงานรังสีได้รับรังสีผ่านการหายใจจากนิวไคลด์รังสี Pm-147 สูงกว่า Kr-85 และไม่ได้รับรังสีผ่านการหายใจจากนิวไคลด์รังสี C-14 ในขณะที่ประชาชนทั่วไปได้รับรังสีผ่านการหายใจจากนิวไคลด์รังสี C-14 สูงกว่า Pm-147 และ Kr-85 ตามลำดับ โดยประชาชนทั่วไปที่มีอายุน้อยจะได้รับรังสีมากกว่าประชาชนทั่วไปที่มีอายุมาก เมื่อพิจารณาว่าได้รับกัมมันตภาพรังสีในปริมาณที่เท่ากัน

จากตารางที่ 2 และ รูปที่ 3 ปริมาณรังสีรวมที่ได้รับภายนอกร่างกายและภายในร่างกายและการเปรียบเทียบปริมาณรังสีรวมกับค่าขีดจำกัดการได้รับรังสีแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟค่าปริมาณรังสีรวมที่ได้รับภายนอกร่างกายและภายในร่างกาย

จากรูปที่ 4 พบว่า สถานการณ์ที่วัสดุกัมมันตรังสีรั่วไหลฟุ้งกระจาย ผู้ปฏิบัติงานรังสี และประชาชนทั่วไปได้รับรังสีจากนิวไคลด์รังสี C-14 Kr-85 และ Pm-147 ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดการได้รับรังสีของการเกิดอุบัติเหตุทางรังสี ยกเว้นประชาชนทั่วไปที่มีอายุต่ำกว่า 2 ปี จะได้รับรังสีจากนิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 สูงกว่าค่าขีดจำกัดการได้รับรังสี

2. การประเมินความมั่นคงทางรังสี

การประเมินความมั่นคงสถานที่ติดตั้งเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้รังสีบีตา ต้องคำนวณค่า A/D สำหรับนิวไคลด์รังสีแต่ละชนิดเพื่อกำหนดกลุ่มให้กับวัสดุกัมมันตรังสี แล้วจึงกำหนดระดับความมั่นคงให้กับสถานที่ติดตั้งใช้งาน

2.1 การหาค่า A/D

ค่า A/D เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดกลุ่มวัสดุกัมมันตรังสี ได้จากการนำค่ากัมมันตภาพรังสี (A) ของวัสดุกัมมันตรังสีหารด้วยค่าความอันตราย (D) ของนิวไคลด์รังสี ค่า A/D คำนวณได้จากสมการ

$$A/D = \frac{A_i}{D_i} \quad (4)$$

โดย A_i คือ ค่ากัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์รังสีชนิดที่ i

D_i คือ ค่าความอันตรายของนิวไคลด์รังสีชนิดที่ i

ค่า A/D คำนวณได้จากสมการที่ 4 และค่าความอันตราย (D) ของนิวไคลด์รังสีแต่ละชนิด (IAEA, 2012; IAEA, 2014) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า A/D และกลุ่มวัสดุกัมมันตรังสี

นิวไคลด์รังสี	กัมมันตภาพรังสี (A) (TBq)	D (TBq)	A/D	กลุ่มวัสดุกัมมันตรังสี
C-14	$148 \times 10^{-8} - 370 \times 10^{-8}$	50	$29.6 \times 10^{-9} - 74 \times 10^{-9}$	< 5 ($A <$ ค่ายกเว้น)
Kr-85	111×10^{-5}	40	27.75×10^{-6}	5 ($A/D < 0.01$ และ $A >$ ค่ายกเว้น)
Pm-147	333×10^{-8}	30	111×10^{-9}	< 5 ($A <$ ค่ายกเว้น)

จากตารางที่ 5 พบว่านิวไคลด์รังสี C-14 และ Pm-147 ไม่สามารถกำหนดกลุ่มวัสดุกัมมันตรังสีได้ เนื่องจากมีค่ากัมมันตภาพรังสีต่ำกว่าค่ายกเว้น (exempt value) และสำหรับนิวไคลด์รังสี Kr-85 เป็นวัสดุกัมมันตรังสีกลุ่มที่ 5 ได้เนื่องจากมีค่า $A/D < 0.01$ และมีค่ากัมมันตภาพรังสีสูงกว่าค่ายกเว้น

2.2 การกำหนดความมั่นคงสถานที่ติดตั้งใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศ

จากตารางที่ 5 สามารถนำมากำหนดระดับการรักษาความมั่นคงทางรังสีให้กับสถานที่ติดตั้งใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้รังสีปีตา ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับความมั่นคงสถานที่ติดตั้งใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้รังสีปีตา

นิวไคลด์รังสี	กลุ่มวัสดุกัมมันตรังสี	ระดับความมั่นคง
C-14	< 5 ($A < \text{ค่ายกเว้น}$)	ไม่มี (ไม่ต้องมีมาตรการรักษาความมั่นคง)
Kr-85	5 ($A/D < 0.01$ และ $A > \text{ค่ายกเว้น}$)	มี (ประยุกต์ใช้มาตรการความปลอดภัยทางรังสีจาก IAEA Safety Series No. GSR Part 3)
Pm-147	< 5 ($A < \text{ค่ายกเว้น}$)	ไม่มี (ไม่ต้องมีมาตรการรักษาความมั่นคง)

จากตารางที่ 5 พบว่า นิวไคลด์รังสีทั้งสามชนิดที่ติดตั้งใช้งานภายในเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้รังสีปีตา ไม่สามารถกำหนดระดับความมั่นคงใด ๆ ได้ ดังนั้น ไม่จำเป็นต้องกำหนดมาตรการรักษาความมั่นคงให้กับสถานที่ติดตั้งใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ใช้รังสีปีตา แต่สำหรับเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศที่ติดตั้งใช้งานนิวไคลด์รังสี Kr-85 อาจต้องนำมาตรการความปลอดภัยทางรังสีมาประยุกต์ใช้งาน

สรุปผลการวิจัย

การประเมินผลการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปอาจได้รับจากการใช้งานเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศชนิดใช้รังสีปีตา ในสภาวะปกติที่วัสดุกัมมันตรังสียังคงอยู่ในสภาพปิดผนึก และกรณีเกิดการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม ผลการประเมินภายใต้สภาวะปกติพบว่า ปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปได้รับจากนิวไคลด์ทั้งสามชนิดอยู่ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดความปลอดภัยพื้นฐานสากล (IAEA GSR Part 3) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปีสำหรับผู้ปฏิบัติงาน และ 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปีสำหรับประชาชนทั่วไป ในกรณีเกิดการรั่วไหลของวัสดุกัมมันตรังสี การประเมินพบว่า ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปที่มีอายุเกิน 2 ปี ยังคงได้รับรังสีต่ำกว่าระดับอ้างอิงสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินที่กำหนดโดย IAEA ซึ่งอยู่ในช่วง 20 - 100 มิลลิซีเวิร์ต อย่างไรก็ตาม สำหรับเด็กอายุต่ำกว่า 2 ปี พบว่าปริมาณรังสีที่ได้รับจาก C-14 และ Pm-147 อาจสูงถึง 70.30 มิลลิซีเวิร์ต และ 62.90 มิลลิซีเวิร์ต ตามลำดับ ซึ่งเกินค่าระดับอ้างอิงสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินที่กำหนดไว้ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทดลองนี้ใช้สนับสนุนการกำหนดมาตรการเฝ้าระวังและเตรียมความพร้อมด้านความปลอดภัยทางรังสี ตลอดจนเป็นฐานข้อมูลสำหรับการบริหารจัดการและการวางแผนตอบโต้เหตุฉุกเฉินในอนาคต โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) เป็นอย่างยิ่ง ที่ได้ให้คำปรึกษา ออกสำรวจ แหล่งข้อมูล เอกสารอ้างอิง ตลอดจนการสนับสนุนด้านวิชาการในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของผลงาน

เอกสารอ้างอิง

- ส่วนคุณภาพอากาศ กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2567). คู่มือแนวทางการคัดเลือกพื้นที่ติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: บริษัท สโตร์ครีเอทีฟแฮร์ส จำกัด.
- Adams, G.E. and Wilson, A. (1993). *Radiation Toxicology in General and Applied Toxicology*. New York: M. Stockton Press. 1397 - 1415.
- Cember, H. and Johnson, T.E. (2009). *Introduction to Health Physics*. (4th ed). New York: McGraw-Hill.
- ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Deelaman, W., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Palakun, J. and Cao, J. (2020). Impacts of PM_{2.5} sources on variations in particulate chemical compounds in ambient air of Bangkok, Thailand. *Atmospheric Pollution Research* 11(9): 1657 - 1667. doi: 10.1016/j.apr.2020.06.030.
- Cockerham, L.G., Mickley, A.G., Walden, T.L. and Stuart, B.O. (1994). Ionizing radiation. In: *Principle and Method of Toxicology*. (3rd ed). A.W. Hayes, Ed. New York: Raven Press. 447 - 496.
- Delacroix, D., Guerre, J. P., Leblanc, P. and Hickman, C. (2002). *Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook 2002*. (2nd ed). Ashford: Nuclear Technology Publishing. 1 - 168.
- Ellenhorn, M.J., Schonwald, S., Ordog, G. and Wasserberger, J. (1997). *Ellenhorn's medical toxicology: Diagnosis and treatment of human poisoning*. (2nd ed). Bangkok: Williams & Wilkins. 1682 – 1723.
- IAEA. (2011). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim)*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2012). *Exemption from Regulatory Control of Goods Containing Small Amounts of Radioactive Material, IAEA-TECDOC-1697*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3*. Vienna: IAEA.
- MET ONE Instruments Inc. (2008). *BAM-1020 Particulate Monitor Operation Manual*. Oregon: MET ONE.
- Obodovskiy, I. (2019). *Radiation: Fundamentals, Applications, Risks and Safety*. (1st ed). Elsevier. 259 - 273.
- Radiation and Nuclear Safety Authority. (2007). *Calculation of the Dose Caused by Internal Radiation, Guide ST 7.3*. Helsinki: STUK.
- Riley, M.L., Chambers, S.D. and Williams, A.G. (2023). Inter-Comparison of Radon Measurements from a Commercial Beta-Attenuation Monitor and ANSTO Dual Flow Loop Monitor. *Atmosphere* 14(9): 1333. doi: 10.3390/atmos14091333
- Samae, H., Suriyawong, P., Yawootti, A., Phairuang, W. and Sampattagul, S. (2025). Precision and Accuracy Analysis of PM_{2.5} Light-Scattering Sensor: Field and Laboratory Experiments. *Atmosphere* 16(1): 76. doi: 10.3390/atmos16010076.
- Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S.P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, Md. A. and Sakunkoo, P. (2024). An update on adverse health effects from exposure to PM_{2.5}. *Environmental Advances* 18: 100603. doi: 10.1016/j.envadv.2024.100603.

- Schweizer, D., Cisneros, R. and Shaw, G. (2016). A comparative analysis of temporary and permanent beta attenuation monitors: The importance of understanding data and equipment limitations when creating PM2.5 air quality health advisories, *Atmospheric Pollution Research* 7(5): 865 - 875. doi: 10.1016/j.apr.2016.02.003.
- Shukla, K. and Aggarwal, S.G. (2022). A Technical Overview on Beta-Attenuation Method for the Monitoring of Particulate Matter in Ambient Air. *Aerosol and Air Quality Research* 22(12): 220195. doi: 10.4209/aaqr.220195.
- Thiagarajah, J.R. and Verkman, A.S. (2012). *Physiology of the Gastrointestinal Tract*. (5th ed). Academic Press. 1757 - 1780.
- U.S. Department of Health, Education, and Welfare. (1970). *Radiological Health Handbook*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office.

