



การประมาณค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลสำหรับ ควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสีด้วยวิธีวิเคราะห์และวิธีการสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล

The Estimation Uncertainty Measurement for Personal Dosimetry Use for Dose Audit by Analytical Method and Monte Carlo Simulation Method

พงษ์ปณต รินทตยารธรณ์¹, ธีราพร ปาปะชี² และ วิฑิต ผึ้งกัน^{1*}

Pongphanot Rindhatayathon¹, Theraporn Phapakhee² and Vithit Pungkun^{1*}

¹ กลุ่มมาตรฐานการวัดทางนิวเคลียร์และรังสี กองพัฒนาระบบและมาตรฐานกำกับดูแลความปลอดภัย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

² สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

¹Radiation Metrology Section Regulatory Technical Support Division Office of Atoms for Peace

² Applied physics major, Faculty of Science, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

Received : 9 July 2019

Revised : 6 April 2020

Accepted : 13 July 2020

บทคัดย่อ

การวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลมีความสำคัญในการติดตามการรับรังสีของผู้ปฏิบัติงานทางรังสีหรือการควบคุมคุณภาพของเครื่องฉายรังสี โดยในปัจจุบันได้เลือกใช้ระบบการวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลชนิดกระตุ้นด้วยแสง (Optically Stimulated Luminescence : OSL) ชนิดนาโนดอท (nanoDot) เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบการอ่านค่าแผ่นวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลสำหรับควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แผ่นวัดปริมาณรังสีได้รับการประเมินผลการอ่านปริมาณรังสีที่ 4.35 mGy ของ Cs-137 การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดนี้ประกอบด้วย ความไม่แน่นอนเชิงเดี่ยวของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ การขึ้นกับค่าพลังงานและทิศทางของรังสี การตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น การลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากคุณสมบัติโดยรอบและความชื้น และความแปรปรวนจากรังสีพื้นหลัง ผลกระทบอันเนื่องมาจากแสง ความคลาดเคลื่อนจากการสอบเทียบ โดยพบว่าเมื่อคำนวณรวมจากทุกค่าแก้ ค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้ คือ 4.60 ± 1.42 mGy ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยวิธีการวิเคราะห์ ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองมอนติคาร์โลที่แสดงค่าปริมาณรังสี 4.44 ± 1.32 mGy ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าวิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนทั้งสองวิธีนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : ความไม่แน่นอนในการวัด ; การควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสี ; nanoDot



Abstract

The personal dosimetry measurement is important for monitoring radiation workers or quality control. Present, Optically Simulated Luminescence (OSL), nanoDot dosimeter uses for medical dosimeter, was selected to evaluate the uncertainty for the personal dose system for quality control of Office of Atoms for Peace. The dosimeter was irradiated at 4.35 mSv of Cs-137 and evaluated their uncertainty. The uncertainty was combined from Inhomogeneity of detector sensitivity, Variability of detector reading due to limited sensitivity and background, Variability of detector reading at zero dose, Energy and direction dependence, Non-linearity of response, Fading, dependence ambient temperature and humidity and variation in local natural background, Effects of light, Calibration error, Correction error for reading algorithm. The combination uncertainty result, the reading dose is 4.60 ± 1.42 mGy at a 95% confidence with the analysis method. This is similar to the calculation using the Monte Carlo modeling method that shows the dose is 4.44 ± 1.32 mGy at a 95% confidence level.

Keywords : measurement uncertainty ; dose audit ; nanoDot

บทนำ

ตามข้อแนะนำจากคณะกรรมการระหว่างประเทศ ว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection) ได้แนะนำขีดจำกัดการรับปริมาณรังสีของผู้ปฏิบัติงานที่ 20 mSv ต่อปีและ 5 ปีสะสมย้อนหลังไม่เกิน 100 mSv แต่ปริมาณรังสีที่ได้รับต้องไม่เกิน 50 mSv ในปีหนึ่งๆ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปต้องได้รับปริมาณรังสีไม่เกิน 1 mSv ต่อปี (International Commission on Radiation Protection, 2007) จึงจำเป็นต้องมีหน่วยงานที่เป็นผู้กำกับทางด้านรังสีต้องกำหนดให้มีการบันทึกค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคล เพื่อเป็นการกำกับให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีได้รับความปลอดภัยสูงสุดจากการปฏิบัติงาน ในปัจจุบันประเทศไทยมีการบันทึกค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคลด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยแสง (Optically stimulated luminescence) ซึ่งมีผู้ให้บริการสองหน่วยงาน คือ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ โดยมีสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเป็นผู้กำกับดูแลความปลอดภัยจากใช้ประโยชน์จากนิวเคลียร์และรังสีตามพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 นอกจากประโยชน์ด้านการบันทึกค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคลให้เป็นไปตามคำแนะนำของคณะกรรมการฯ และพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้แผ่นวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลสำหรับการควบคุมคุณภาพของเครื่องฉายรังสีต่างๆ โดยการฉายรังสีตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นอ่านค่าเพื่อประเมินความถูกต้อง

ความหมายของ ความไม่แน่นอนในการวัด นิยามของ International vocabulary of basic and general term in metrology คือ ตัวแปรที่มีส่วนร่วมอยู่ในผลวิเคราะห์ที่บอกถึงลักษณะการกระจายของค่าที่พิจารณาอย่างเป็นเหตุผลของค่าวัดนั้น ฉะนั้นแล้วความไม่แน่นอนในการวัดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลการวิเคราะห์และตัดสินผลการวิเคราะห์กับเกณฑ์ที่กำหนด โดยในปัจจุบันวิธีการกำหนดความไม่แน่นอนในการวัดมี 4 วิธีการ ได้แก่ การประมาณค่าจากตัวแบบ (Modelling approach), การประมาณค่าจากการตรวจสอบของห้องปฏิบัติการ (Single laboratory validation approach), การประมาณค่าจากการตรวจสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (Interlaboratory validation approach) และ การทดสอบความชำนาญ (Proficiency testing) (European Federation of National Associations of, 2007) และการกำหนดค่าความไม่แน่นอนในการวัดนั้น ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานสากลสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบหรือสอบเทียบ ISO/IEC 17025:2017 (International Organization for Standardization, 2017) ซึ่งระบบการวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลมีเป้าหมายที่จะพัฒนาให้อยู่ในระบบมาตรฐานดังกล่าว

วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนจากตัวแบบนั้น เป็นวิธีหนึ่งในการแสวงหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดปริมาณปริมาณหนึ่ง เช่น การคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบแรงไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับดิจิจิตอลมัลติมิเตอร์ ทศนิยมไม่เกิน $4 \frac{1}{2}$ ได้ใช้วิธีการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าความไม่แน่นอนจากผลบวกของแหล่งความไม่แน่นอน 4 ชนิดได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ระบุ ค่าความไม่แน่นอนจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อ ค่าความไม่แน่นอนจากค่าแก้แรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความละเอียดของดิจิจิตอลมิเตอร์ และค่าความไม่แน่นอนจากแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจากใบรับรองการสอบเทียบ ข้อดีสำหรับวิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนจากตัวแบบ คือ การอ้างอิงการประมาณค่าความไม่แน่นอนจากการวัดโดยตรง และสามารถสืบกลับไปยังต้นแหล่งความไม่แน่นอนได้ถูกต้อง ดังนั้นในการประมาณค่าความไม่แน่นอนจึงนิยมเลือกใช้วิธีการดังกล่าวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและการกระจายตัวข้อมูลเพื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการวัดปริมาณต่างๆ

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคลของระบบการวัดรังสีส่วนบุคคลรุ่น microStar จากแผ่นวัดปริมาณรังสีชนิดนาโนดอท ซึ่งเป็นแผ่นวัดปริมาณรังสีขนาดเล็กและสามารถใช้งานได้ง่าย รองรับการผลิตรังสีได้หลากหลาย เพื่อทดสอบคุณภาพการฉายรังสีของเครื่องฉายรังสี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีการประมาณค่าจากตัวแบบ (Modelling approach) และใช้วิธีการวิเคราะห์ (Analysis method) เพื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากตัวแบบ แต่เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์นั้นมันมีข้อจำกัดเรื่องของจำนวนตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ด้วยการสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) เพื่อทดแทนข้อจำกัดของวิธีการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อพัฒนาให้สามารถเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และนำไปสู่การพัฒนากระบวนการวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลเข้าสู่มาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 สำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบหรือสอบเทียบ ที่กำหนดข้อบังคับถึงการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการทดสอบหรือสอบเทียบ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวัดค่าปริมาณรังสีอ้างอิง

การวัดค่าปริมาณรังสีอ้างอิงจะดำเนินการวัดด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออน (Ionization chamber) รุ่น A6 โดยจะตั้งที่ระยะ 1 เมตรจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสี และจัดให้หัววัดอยู่ตรงกลางทั้งในแนวระนาบและแนวระดับ จากนั้นต่อสายนำสัญญาณเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ ดำเนินการฉายรังสี Cs-137 และเก็บค่าประจุ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ จากนั้นคำนวณค่าปริมาณรังสีอ้างอิงในหน่วยของรังสีดูดกลืนในอากาศ (B Scarboro *et al.*, 2015) ตามสมการ

$$D_{air} \approx K_{Air} = qK_{TP} K_{elec} N_k \quad (1)$$

เมื่อ D_{air} คือ ปริมาณรังสีสู่อากาศ K_{air} คือ การถ่ายเทพลังงานให้แก่ตัวกลาง q เป็นจำนวนประจุที่วัดได้จากอิเล็กทรอนิกส์ K_{TP} ค่าแก้ไขสำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ K_{elec} ค่าแก้ไขการแปรผันของอิเล็กทรอนิกส์ และค่าแก้ไขการสอบเทียบของหัววัดรังสีชนิดไอออน (Ionization chamber) รุ่น A6 $N_k = 3.799 \times 10^4$ Gy/C

การฉายรังสีเพื่อบันทึกค่าปริมาณรังสีลงแผ่นวัดปริมาณรังสีและการอ่านค่าปริมาณรังสี

เลือกใช้แผ่นวัดปริมาณรังสีชนิดนาโนดอท (nanoDot[®]) ซึ่งสามารถนำมาอ่านค่าได้กับเครื่องอ่านปริมาณรังสีส่วนบุคคลแบบเคลื่อนย้ายได้ รุ่น microStar การคัดเลือกแผ่นวัดปริมาณรังสีจะนำไปฉายที่ปริมาณรังสีที่ทราบค่าและนำมาอ่านค่า โดยความคาดเคลื่อนต้องไม่เกิน 15% จากค่ามาตรฐาน หลังจากนั้นนำแผ่นที่ผ่านการคัดเลือกไปลบสัญญาณด้วยการฉายแสงสีน้ำเงินและนำไปแบ่งกลุ่มเพื่อฉายรังสีกับต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ในห้องปฏิบัติการการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL) สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ โดยดำเนินการฉายรังสีปริมาณ 4.35 mGy สำหรับการคำนวณหาค่าแก้ไขของความเป็นเนื้อเดียวกับและค่าแก้ไขของการอ่านซ้ำ ฉายปริมาณรังสีปริมาณ 0.2 – 14 mGy เพื่อคำนวณหาค่าแก้ไขสำหรับการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่าง

ดำเนินการฉายรังสีที่ $18 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $45 - 75\text{ \%Rh}$ สำหรับการคำนวณหาค่าแก้อันเนื่องมาจากแสง จะไม่ดำเนินการฉายรังสี แต่จะนำไปฉายกับไฟที่ฟลักซ์ความสว่างประมาณ $1,000\text{ W/m}^2$ ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ควบคุมแสดงโดยใช้ลักซ์มิเตอร์ จากนั้นอ่านค่าปริมาณรังสีด้วยเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสี

แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

สำหรับงานการวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลได้กำหนดแหล่งที่มาของความไม่แน่นอน (Uncertainty source) ของแต่ละประเภทดังนี้ (Kocher, 2000)

ประเภท A

- ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของความไวของหัววัดค่าปริมาณรังสี (Inhomogeneity of detector sensitivity)
- ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัววัดอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง (Variability of detector reading due to limited sensitivity and background)
- ความแปรปรวนของหัววัดอันเนื่องมาจากการอ่านค่าที่ศูนย์ (Variability of detector reading at zero dose)

ประเภท B

- การขึ้นกับค่าพลังงานและทิศทางของรังสี (Energy and direction dependence)
- การตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity of response)
- การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยรอบและความชื้นและความแปรปรวนจากรังสีพื้นหลัง (Fading, dependence ambient temperature and humidity and variation in local natural background)
- ผลกระทบอันเนื่องมาจากแสง (Effects of light)
- การสั่นสะเทือนเชิงกล (Mechanic shock)
- ค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบ (Calibration error)
- ค่าแก้ความผิดพลาดสำหรับขั้นตอนวิธี (Correction error for reading algorithm)

จากแหล่งความไม่แน่นอน สามารถสร้างตัวแบบเพื่อกำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสีที่วัดได้กับแหล่งความไม่แน่นอนได้ดังนี้

$$D = H_m N_0 K_{in} K_r K_z K_L K_{E,\theta} K_{env} K_{light} K_e \quad (2)$$

เมื่อ D คือ ค่าปริมาณรังสี H_m คือ ค่าปริมาณรังสีที่อ่านค่าได้จากระบบอ่าน N_0 คือ ค่าแก้ความผิดพลาดจากการสอบเทียบ K_{in} คือ ค่าแก้ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี K_r คือ ค่าแก้ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัววัดอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง K_z คือ ค่าแก้ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ $K_{E,\theta}$ คือ ค่าแก้การขึ้นกับค่าพลังงานและทิศทางของรังสี K_L คือ ค่าแก้การตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น K_{env} คือ ค่าแก้การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยรอบและความชื้นและความแปรปรวน

จากรังสีพื้นหลัง K_{light} คือ ค่าแก้ผลกระทบอันเนื่องมาจากแสง K_e คือ ค่าแก้ความผิดพลาดสำหรับขั้นตอนวิธี คือ 3.7675 (Stanford Dosimetry LLC, 2010)

จากสมการที่ (2) เราสามารถลดการพิจารณาหรือรวมค่าแก้อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนบางข้อได้ เช่น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกลดความสนใจการพิจารณาค่าแก้อันเนื่องมาจากผลกระทบการสั่นสะเทือนเชิงกล เนื่องจากเครื่องมือสำหรับอ่านแผ่นวัดปริมาณรังสีนั้นตั้งอยู่ในภายในห้องปฏิบัติการและไม่ได้เคลื่อนย้ายเพื่อออกนอกสถานที่

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีการวิเคราะห์

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีการวิเคราะห์ เริ่มต้นจากการจำแนกแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภท A ที่คำนวณได้ด้วยวิธีการทางสถิติ (International Electrotechnical Commission, 2015) ตามสมการ

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

เมื่อ U_A คือ ค่าความไม่แน่นอนประเภท A, s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับตัวอย่าง n คือ จำนวนตัวอย่าง และความไม่แน่นอนประเภท B ที่ไม่สามารถคำนวณผ่านวิธีการทางสถิติได้ จึงประมาณการจากการสังเกตการกระจายตัวของข้อมูลในรูปแบบต่างๆ (International Electrotechnical Commission *et al.*, 2015) สามารถแบ่งประเภทของการกระจายตัวของข้อมูลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล สำหรับการประเมินค่าความไม่แน่นอนประเภท B

รูปแบบการกระจายตัว	ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน	ระดับความเชื่อมั่น
แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	$a/\sqrt{3}$	ระดับความเชื่อมั่น 100%
แบบสามเหลี่ยม	$a/\sqrt{6}$	ระดับความเชื่อมั่น 100%
แบบปกติ	$a/3$	ระดับความเชื่อมั่น 99.7%

โดย a คือ ค่าครึ่งหนึ่งของช่วงการวัดของแต่ละการกระจายตัวความไม่แน่นอนประเภท B

การคำนวณหาผลของการวัดและค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน เลือกใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์ (Analytical method) โดยเริ่มต้นจากการคำนวณด้วยการทำอนุพันธ์หลายตัวแปร (Partial differential) จากสมการ (2) เพื่อคำนวณหา sensitivity coefficient ของแต่ละตัวแปร

$$c = \partial D = \partial (H_m N_0 K_{in} K_r K_z K_L K_{E,\theta} K_{env} K_{light} K_e)$$

เช่น

$$c_{n_0} = \partial_{n_0} D = k_{in} k_r k_z k_L k_{E,\theta} k_{env} k_{light} k_e$$

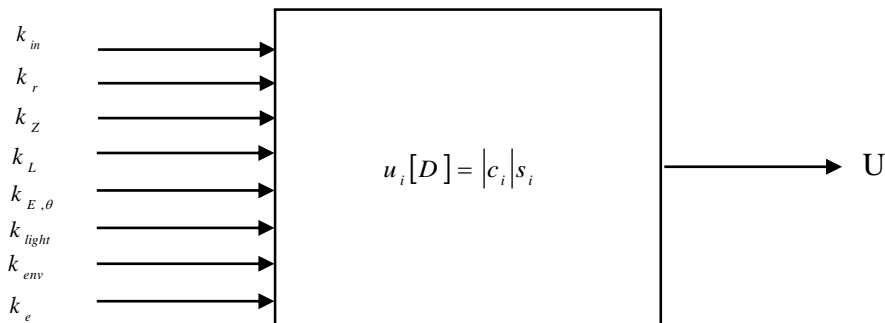
จึงสามารถคำนวณความไม่แน่นอนมาตรฐานจากแต่ละค่าแก้ ตามสมการ

$$u_i[D] = |c_i|s_i \quad (4)$$

ความไม่แน่นอนรวมมาตรฐาน u ของแต่ละค่าแก้จากสมการ (2) จะถูกนำมาคำนวณในรูปของผลบวกของจากแต่ละค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$u[D] = \sqrt{u_i^2[D]} \quad (5)$$

เมื่อ i คือ $k_{in}, k_r, k_z, k_L, k_{E,\theta}, k_{env}, k_{light}, k_e$ โดย k_i คือ standard uncertainty ของแต่ละปริมาณ



ภาพที่ 1 ภาพแสดงข้อมูลเข้าและข้อมูลขาออกในการสร้างแบบจำลองมอนติคาร์โล

การประเมินค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีการสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล

การสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล(Monte Carlo) เป็นวิธีการจำลองโดยใช้ตัวเลขแบบสุ่ม เพื่อศึกษาคุณลักษณะของระบบที่มีรูปแบบความน่าจะเป็นของการกระจายตัว (Probability distribution function) ตามแสดงไว้ในตารางที่ 1 ภาพที่ 1 แสดงการจำลองระบบโดยวิธีมอนติคาร์โลของระบบการวัดปริมาณรังสีซึ่งได้กำหนดตัวแปรและการกระจายของข้อมูลให้สอดคล้องกับสมการที่ (2) เพื่อเป็นข้อมูลขาเข้า และข้อมูลขาออกเป็นการคำนวณตามผลลัพธ์ของสมการข้างต้น โดยในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนนี้ได้สุ่มจำนวนสำหรับการคำนวณจำนวน 10,000,000 ครั้ง และสร้างกราฟเพื่อสังเกตลักษณะการกระจายตัว ตลอดจนคำนวณค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าตัวเลขขอบเขตช่วงกว้างที่ครอบคลุมระดับความเชื่อมั่น 95%

วิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากแต่ละแหล่งความไม่แน่นอน

- (1) ความไม่แน่นอนเดียวกันของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี (K_m) ความไม่แน่นอนเดียวกันของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี จัดเป็นความไม่แน่นอนประเภท A ขึ้นกับคุณภาพของแต่ละเครื่องที่ผลิตออกจากผู้ผลิต (Hosseini Pooya & Orouji, 2014) วิธีการประเมินความไม่แน่นอนเดียวกันของหัวอ่านปริมาณรังสีนี้สามารถประเมินได้โดยการอ่านแผ่นวัดปริมาณรังสีที่ทราบค่าอย่างแน่ชัด (4.35 mGy) และคำนวณหาประสิทธิภาพค่าแก้พื้นฐาน (Elementary correction coefficient) หรือ μ_a

$$\mu_a = ECC = \frac{\bar{x}}{x_i} \quad (6)$$

เมื่อ x_i คือค่า ปริมาณรังสีที่อ่านได้จากแผ่นวัดปริมาณรังสีแต่ละแผ่น \bar{x} คือค่าปริมาณรังสีเฉลี่ยจากแผ่นวัดปริมาณรังสีแต่ละแผ่น

- (2) ความแปรปรวนการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง (K_r) ค่าแก้จากความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหรือความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านซ้ำ (Hosseini Pooya & Orouji, 2014) จัดเป็นความไม่แน่นอนประเภท A สามารถคำนวณความไม่แน่นอนโดยปรับปรุงจากสมการ (6) โดยการคำนวณสัดส่วนค่าที่อ่านได้แต่ละต่อค่าเฉลี่ยของแผ่นนั้นๆ สำหรับการประเมินความไม่แน่นอนนี้ได้เลือกใช้แผ่นวัดปริมาณรังสีจำนวน 15 แผ่น ที่ผ่านการฉายรังสีที่ 4.35 mGy ด้วย Cs-137
- (3) ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ (K_z) ค่าแก้จากความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์นั้นเกิดจากในทางปฏิบัติแล้ว แผ่นวัดปริมาณรังสีไม่ได้มีค่าศูนย์อย่างแท้จริง แต่จะมีค่าหนึ่งๆที่ใกล้เคียงศูนย์ ประกอบกับความสามารถของหัวอ่านปริมาณรังสีมีข้อจำกัดในการอ่านค่าปริมาณรังสีต่ำสุด (MEYE, 2016) การคำนวณค่าแก้กันเนื่องมาจากความแปรปรวนดังกล่าว จะนำแผ่นวัดรังสีไปอ่านค่าก่อนนำไปใช้วัดปริมาณรังสี จากนั้นนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณรังสี 4.35 mGy ด้วย Cs-137
- (4) การขึ้นกับค่าพลังงานและทิศทางของรังสี ($K_{E,\theta}$) โดยปกติแล้วเครื่องอ่านแผ่นวัดปริมาณรังสีได้รับสอบเทียบที่ค่าพลังงานใดพลังงานหนึ่ง และแต่ละช่วงพลังงานแผ่นวัดปริมาณรังสีมีการตอบสนองต่อรังสีได้ไม่เท่ากัน และในทางปฏิบัติแล้วแผ่นวัดปริมาณรังสีอาจจะถูกฉายรังสีด้วยพลังงานต่างๆ ซึ่งไม่ตรงกับการสอบเทียบของเครื่องอ่านแผ่นวัดปริมาณรังสี

ทิศทางของรังสีมีผลต่อปริมาณรังสีที่แผ่นวัดปริมาณรังสีได้รับ ซึ่งส่งผลให้ค่าแก้การสอบเทียบ (Calibration factor) ของแผ่นวัดปริมาณรังสีเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับมุมอ้างอิง (Kerns, Kry, Sahoo, S Followill, & Ibbott, 2011)

สำหรับการประเมินค่าแก้กันเนื่องจากความไม่แน่นอนนี้ได้เลือกใช้ค่าความไม่แน่นอนตาม IEC TR 62461 (International Electrotechnical Commission, 2015) ตามวิธีการมาตรฐานของ IEC 62387 ซึ่งได้รวมการคำนวณค่าแก้ขึ้นกับพลังงานและค่าแก้ขึ้นกับทิศทางของรังสีรวมกัน (International Electrotechnical Commission, 2012; International Electrotechnical Commission *et al.*, 2015)

- (5) การตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (K_L) ในทางอุดมคติการอ่านค่าปริมาณรังสีจากแผ่นวัดปริมาณรังสีควรจะตอบสนองเป็นเส้นตรง ตั้งแต่ค่าปริมาณในระดับต่ำจนถึงระดับสูง (0.1 mSv ถึง 1 Sv) แต่ในทางปฏิบัติแล้วพบว่าเมื่อถึงค่าปริมาณรังสีหนึ่งๆ การตอบสนองของหัวอ่านจะไม่ตอบสนองเป็นเชิงเส้น เช่น ในบางกรณีการอ่านค่าปริมาณรังสีสูงๆ จะเกิดการตอบสนองสูงเกินไป (Supralinear) หรือถึงจุดอิ่มตัว (Saturation) (IZEWSKA, n.d.) จึงส่งผลให้ผลการอ่านไม่ถูกต้อง

สำหรับการประเมินความไม่แน่นอนของการตอบสนองเชิงเส้นนี้ เลือกใช้แผ่นวัดปริมาณรังสีฉายรังสีที่ 5 mGy สำหรับเป็นปริมาณรังสีอ้างอิง และฉายรังสีแผ่นวัดรังสีตั้งแต่ 0.2 – 14 mGy จากนั้นวิเคราะห์หัดด้วย

การคำนวณค่าการตอบสนอง (R) ทดสอบการกระจายตัวแบบปกติด้วย Z-Distribution จากนั้นคำนวณแนวโน้มความเป็นเชิงเส้นของค่าการตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- (6) การลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยรอบและความชื้น และความแปรปรวนอันเนื่องจากรังสีพื้นหลัง (K_{env}) โดยปกติแล้วอุณหภูมิ ความชื้น และรังสีพื้นหลังส่งผลต่อการอ่านค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคลผิดพลาด

สำหรับการประเมินค่าแก้อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนนี้ ได้เลือกใช้ค่าประมาณที่ดีที่สุด และความไม่แน่นอนมาตรฐานตาม IEC TR 62461 (International Electrotechnical Commission, 2015)

- (7) ผลกระทบอันเนื่องมาจากแสง (K_{light}) เนื่องจากแผ่นวัดรังสีที่ใช้สำหรับอ่านค่ากับระบบการอ่านค่าปริมาณรังสีนั้น ได้อาศัยกระบวนการการกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในผลึกสำหรับการวัดปริมาณรังสีให้ไปค้างอยู่ที่ระดับชั้นพลังงานกักขังชั่วคราว (Metastate trap) อิเล็กตรอนอาจรับพลังงานจากแสงในธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การอ่านค่าปริมาณรังสีจากแผ่นวัดปริมาณรังสีมีความคลาดเคลื่อน

สำหรับการประเมินค่าแก้อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนนี้ ได้แบ่งกลุ่มของแผ่นวัดปริมาณรังสีออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะนำไปเก็บไว้ในที่มืดที่แสงไม่สามารถส่องถึง และอีกกลุ่มถูกนำไปเก็บไว้ในที่มีแสงสว่าง 1000 W/m^2 เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นนำมาอ่านค่าปริมาณรังสี

- (8) ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากปริมาณรังสีในแผ่นวัดปริมาณรังสี (N_0) ค่าแก้อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนนี้ขึ้นกับความไม่แน่นอนรวมของระบบการฉายปริมาณรังสี (Hosseini Pooya & Orouji, 2014) ซึ่งการฉายรังสีครั้งนี้ได้ฉายรังสีจากห้องปฏิบัติการการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ โดยมีค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) 6% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัย

- (1) การวัดปริมาณรังสีอ้างอิงสำหรับการวัดอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rate in the air) ได้ดำเนินการวัด ณ วันที่ 5 เมษายน 2561 ตารางที่ 2 ได้แสดงค่าเฉลี่ยของประจุ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้นเฉลี่ย พร้อมทั้งค่าแก้อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ความดันไปยังอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน หลังจากนั้นดำเนินการฉายแผ่นวัดปริมาณรังสีที่ 5 mGy สำหรับเป็นชุดแผ่นรังสีอ้างอิง

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรและค่าของแต่ละตัวแปรสำหรับการคำนวณอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศซึ่งนำมาเป็นปริมาณรังสีอ้างอิง

ปริมาณประจุเฉลี่ย (pC)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (kPa)	ค่าแก้อุณหภูมิและความดัน	อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศต่อชั่วโมง (mGy/hr)
12,057	19.01	100.544	1.0043	27.60

- (2) การอ่านค่าปริมาณรังสีจากแผ่นวัดปริมาณรังสีชนิดนาโนคอต ค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จากแผ่นวัดปริมาณรังสีชนิดนาโนคอต สามารถอ่านค่าได้เฉลี่ย 1.240 mGy มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.025 และค่าความไม่แน่นอนที่ 0.005 สังเกตได้ว่าค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้นั้นค่อนข้างต่ำกว่าปริมาณรังสีจริงที่ฉายให้แก่แผ่นวัดปริมาณรังสีมาก เนื่องจากขั้นตอนวิธีในการอ่านค่าปริมาณรังสีนั้นได้คำนวณมาจากระดับพลังงาน 80 keV ของโฟตอน จึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าได้ถูกต้องเมื่ออ่านจากระดับพลังงานโฟตอนอื่น จึงจำเป็นต้องใช้ค่าแก้ความผิดพลาดสำหรับขั้นตอนวิธี แก้ไขให้ถูกต้อง ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4
- (3) ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี (K_{in}) การประเมินค่าแก้ขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสีได้ คำนวณจากการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนต่อปริมาณรังสีที่อ่าน ค่าเฉลี่ยของค่าแก้ขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหัววัดปริมาณรังสี คือ 1.000 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.020 และความไม่แน่นอน คือ 0.004 โดยมีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ แสดงถึงในทางปฏิบัติแล้วหัวอ่านปริมาณรังสีไม่สามารถอ่านค่าปริมาณรังสีที่เท่ากันได้ค่าเท่ากัน อันเนื่องมาจากขีดความสามารถของหัวอ่าน
- (4) ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง (K_r) การคำนวณหาค่าแก้ของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง ได้เลือกแผ่นวัดปริมาณรังสีจากชุดที่ประเมินความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันจำนวน 15 แผ่น ดำเนินการอ่านค่าแผ่นละ 10 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยจากการอ่าน 1.187 mGy ค่าแก้ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัววัดอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง คือ 1.000 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.010 และความไม่แน่นอน คือ 0.003 โดยมีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ โดยปกติแล้วค่าการอ่านซ้ำจะได้ค่าต่ำกว่าการอ่านครั้งแรกเสมอ เนื่องจากการหายไปของสัญญาณเมื่อมีการอ่านค่าจากแผ่นวัดปริมาณรังสีซ้ำ
- (5) ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ (K_z) การคำนวณหาค่าแก้ของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ ได้นำค่าศูนย์ที่อ่านได้ก่อนนำแผ่นวัดปริมาณรังสีไปใช้วัดปริมาณรังสี โดยค่าแก้สำหรับความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความไม่แน่นอน คือ 0.986 , 0.002 และ 2.24×10^{-4} ตามลำดับ โดยความไม่แน่นอนมีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ
- (6) การตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (K_L) การประเมินความไม่แน่นอนของการตอบสนองเชิงเส้นของระบบอ่านค่าปริมาณรังสีส่วนบุคคลนี้ ได้ดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน IEC 62387 ตารางที่ 3 ได้แสดงค่าปริมาณรังสี ปริมาณรังสีเฉลี่ยที่อ่านค่าได้ อัตราส่วนของการตอบสนอง (R) และค่าความไม่แน่นอนรวมระหว่างชุดอ้างอิงและชุดวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และจากการคำนวณค่าการตอบสนองอ้างอิง $R_{ref} = 0.282$

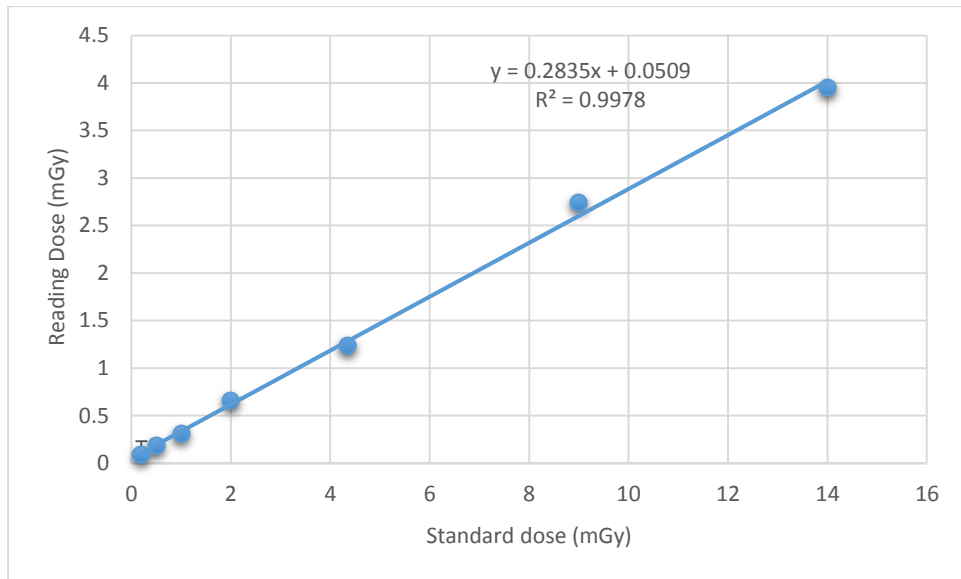
ตารางที่ 3 แสดงปริมาณรังสีที่อ่านได้จากแผ่นชุดอ้างอิงและแผ่นชุดวัด ค่าการตอบสนอง และค่าความไม่แน่นอนในการวัดรวม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการกระจายตัวแบบ t-distribution (International Electrotechnical Commission *et al.*, 2015) โดย \bar{R} คือ ค่าเฉลี่ยของการตอบสนองที่อ่านค่าได้ และ คือ $U_{R,com}$ ค่าความไม่แน่นอนของค่าเฉลี่ย

ประเภท	ปริมาณรังสี H_m (mGy)	ปริมาณรังสีเฉลี่ยที่ อ่านค่าได้ H_i (mGy)	$\bar{R} = \frac{\bar{H}_i}{H_m}$	$U_{R,com}$ at 95% confidence
ชุดอ้างอิง	5	1.412	0.282	-
	0.2	0.094	0.471	0.138
	0.5	0.186	0.373	0.061
	1	0.308	0.308	0.037
ชุดวัด	2	0.656	0.328	0.017
	4.35	1.230	0.282	0.009
	9	2.738	0.304	0.004
	14	3.947	0.282	0.003

จากตารางที่ 3 สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีมาตรฐานและปริมาณรังสีที่เครื่องอ่านสามารถอ่านค่าได้หลังแก้ด้วยค่าแก้ไขสำหรับขั้นตอนวิธี โดยได้แสดงผลไว้ตามภาพที่ 2 และสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นได้

$$y = 0.2835x + 0.0509 \quad (7)$$

และคำนวณค่าแก้ขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนของการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (K_L) คือ 1.0000 และ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ 0.010 ตามลำดับ ค่าจุดตัดแกนตั้งหมายถึงลิมิตต่ำสุดของปริมาณรังสีที่เครื่องอ่านปริมาณรังสีสามารถอ่านได้ที่ 0.051 mGy



ภาพที่ 2 แสดงการค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จริงหลังปรับแก้กับค่าแก้อันเนื่องมาจากขั้นตอนวิธีการอ่านค่าปริมาณรังสี (Reading dose) ต่อค่าปริมาณรังสีมาตรฐาน (Standard dose)

(7) ผลกระทบอันเนื่องมาจากแสง (K_{light})

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการอ่านค่าปริมาณรังสีสองกลุ่ม กลุ่มที่อยู่ที่มีด(กลุ่มที่ 1) และกลุ่มที่อยู่ทีสว่าง (กลุ่มที่ 2)

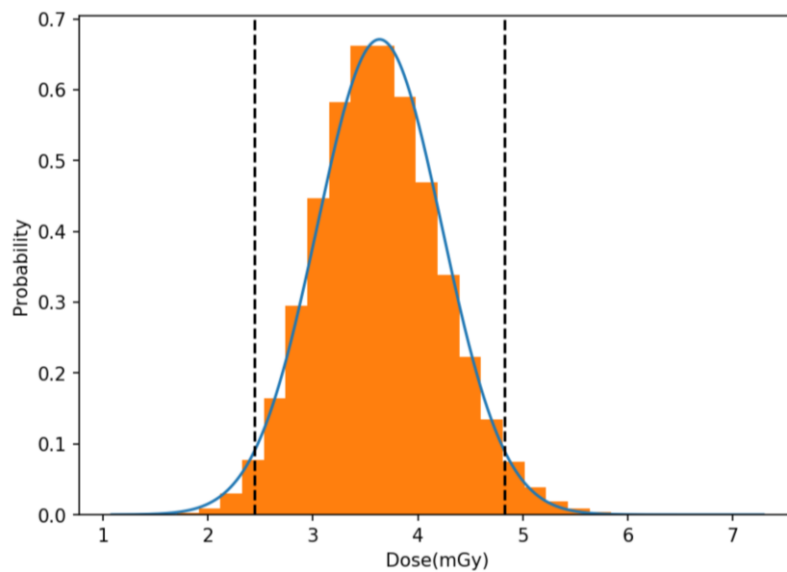
แผ่นที่	กลุ่มที่ 1 (mGy)	กลุ่มที่ 2 (mGy)
1	0.065	0.069
2	0.067	0.070
3	0.072	0.077
4	0.090	0.092
ค่าเฉลี่ย (mGy)	0.074	0.077

ตารางที่ 4 แสดงค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้หลังจากเก็บแผ่นวัดปริมาณรังสีไว้ในที่มีดและเก็บไว้ในพื้นที่ที่มีความสว่าง $1,000 \text{ W/m}^2$ พบว่าค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จะแตกต่างกัน 0.003 mGy และค่าแก้อันเนื่องมาจากแสง คือ 0.999 โดยเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ 4.35 mGy

การคำนวณผลรวมของแหล่งความไม่แน่นอนได้คำนวณตามวิธีมาตรฐาน IEC TR 62461:2015 และ ISO/ASTM 51707:2015 โดยใช้สมการที่ (5) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ภาพที่ 3 แสดงผลลัพธ์การคำนวณค่าจากสมการที่ (2) ด้วยวิธีสร้างแบบจำลองมอนติ คาร์โล โดยการสุ่มตัวอย่างสำหรับการคำนวณจำนวน $10,000,000$ ครั้ง โดยได้ใช้ตัวแปรเริ่มต้นเพื่อคำนวณจากสมการที่ (2) จากภาพจะเห็น

ว่าได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของปริมาณรังสีที่คำนวณ มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ (เส้นสีฟ้า) ที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงสุดที่ช่วง 3.25 mGy ถึง 4.25 mGy มีค่าเฉลี่ย 4.44 mGy มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.66 mGy สำหรับเส้นประสีดำ ได้แสดงช่วงระดับความเชื่อมั่น 2σ หรือประมาณ 95% ดังนั้นจะสามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนจากการคำนวณที่ 1.32 mGy ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งต่างจากการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีได้ 4.60 mGy ที่มีค่าความไม่แน่นอนจากการคำนวณที่ 1.42 mGy ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นสามารถแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีนั้นคำนวณได้ในระดับใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3 แสดงผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดปริมาณรังสีด้วยการสร้างแบบจำลองมอนติ คาร์โล ที่จำนวนตัวอย่าง 10,000,000 ครั้ง พบว่าได้ค่าเฉลี่ยที่ 4.44 mGy ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.66 mGy

วิจารณ์ผลการวิจัย

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลสำหรับการควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสี ประกอบด้วยค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวของความไวของหัวอ่านปริมาณรังสี ความแปรปรวนของการอ่านค่าปริมาณรังสีของหัวอ่านอันเนื่องมาจากความไวที่จำกัดและรังสีพื้นหลัง ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการอ่านค่าศูนย์ ได้คำนวณด้วยวิธีการทางสถิติ การขึ้นกับค่าพลังงานและทิศทางของรังสี การลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยรอบและความชื้นและความแปรปรวนจากรังสีพื้นหลัง ได้อ้างอิงค่ามาจากวิธีการมาตรฐานตาม IEC TR 62461



ตารางที่ 5 แสดงรายการความไม่แน่นอนของปริมาณรังสีที่อ่านค่าได้ 4.60 mGy สอดคล้องกับค่าจริงที่ 4.35 mGy ด้วยวิธีการวิเคราะห์

ปริมาณ	ค่าประมาณที่ดีที่สุด	ความไม่แน่นอนมาตรฐานสมบูรณ์	ประเภทของความไม่แน่นอน	รูปแบบการกระจายตัว	ระดับความมั่นใจ (%)	ค่าสัมประสิทธิ์	ผลลัพธ์(mGy)
K_{in}	1.000	0.004	A	Normal	68.27	3.72	0.016
K_r	1.000	0.001	A	Normal	68.27	3.72	0.003
K_z	0.986	0.000	A	Normal	68.27	3.78	0.001
K_L	1.000	0.010	B	Normal	99.7	4.61	0.312
$K_{E,\theta}$	1.000	0.133	B	Normal	99.7	3.72	0.479
K_{env}	1.000	0.041	B	Rectangular	100	3.72	0.152
K_{light}	0.999	0.033	B	Normal	99.7	3.73	0.124
N_0	1.000	0.002	B	Rectangular	100	3.72	0.006
K_e	3.768	0.071	B	Rectangular	100	0.99	0.070
H_m	1.240 mGy	0.025					0.025
D	4.60 mGy	± 0.71 mGy (15.39%)	Combined				4.60 ± 1.42 mGy (relative 0.308 k = 2)

อ่านค่าปริมาณรังสีจากแผ่นวัดปริมาณรังสีที่ทราบค่า จำนวน 20 แผ่น พบว่าเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสีสามารถอ่านค่าได้เฉลี่ย 1.240340 mGy เมื่อนำมาคำนวณรวมกับค่าแก้ชดเชยเนื่องจากความไม่แน่นอนของทุกปริมาณแล้ว ค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้เฉลี่ย คือ 4.60 mGy มีความไม่แน่นอน ± 1.42 mGy (30.77%) ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% สอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองมอนติ คาร์โล ที่ค่าปริมาณรังสีที่อ่านเฉลี่ย คือ 4.44 mGy มีความไม่แน่นอน ± 1.32 mGy (32.96%) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สรุปผลการวิจัย

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบวัดปริมาณรังสีส่วนบุคคลสำหรับการควบคุมคุณภาพเครื่องฉายรังสี สามารถประเมินได้ด้วย 2 วิธี คือวิธีการวิเคราะห์ ที่กระทำโดยวิเคราะห์จากแต่ละค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การสมมุติรูปแบบการกระจายตัวของความน่าจะเป็น และขั้นตอนการกำหนดค่าความไว (Sensitivity) และวิธีการวิธีการสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล โดยสุ่มค่าระหว่างค่าต่ำสุดสูงสุดของแต่ละปริมาณ จำนวน 10,000,000 ครั้ง พบว่าทั้งสองวิธีสามารถประเมินค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าปริมาณรังสีได้ใกล้เคียงกัน และมีความไม่แน่นอนที่ใกล้เคียงกันที่ระดับความเชื่อมั่นเดียวกัน ซึ่งการประมาณความไม่แน่นอนจากทั้งสองวิธีนี้ สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนได้ครอบคลุมทุกแหล่งความไม่แน่นอน จึงเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบวัดปริมาณรังสีของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และเพิ่มความเชื่อมั่นในการตรวจสอบคุณภาพการฉายรังสีของเครื่องฉายรังสี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้การสนับสนุนของโครงการพัฒนาและยกระดับมาตรฐานการวัดปริมาณรังสีในระดับปฐมนิเทศ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

เอกสารอ้างอิง

B Scarboro, S., Cody, D., Alvarez, P., Followill, D., Court, L., Stingo, F., ... Kry, S. (2015). Characterization of the nanoDot OSLD dosimeter in CT. *Medical Physics*. <https://doi.org/10.1118/1.4914398>

Bell, S. (n.d.). Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2), 41.

European Federation of National Associations of. (2007). *Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation* (No. 1/2007) (p. 62). EUROLAB Technical Secretariat - EUROLAB 1 rue Gaston Boissier 75724 PARIS Cedex 15 France: European Federation of National Associations of Measurement.

Hosseini Pooya, S., & Orouji, T. (2014). Evaluation of Effective Sources in Uncertainty Measurements of Personal Dosimetry by a Harshaw TLD System. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*, 4(2), 43–48.



International Commission on Radiation Protection. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *103*, 37, 334.

International Electrotechnical Commission. (2012). *Radiation protection instrumentation--passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation = Instrumentation pour la radioprotection--systèmes dosimétriques intégrés passifs pour la surveillance de l'individu et de l'environnement des rayonnements photoniques et bêta*. Geneva: International Electrotechnical Commission.

International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC TR 62461:2015 Radiation protection instrumentation—Determination of uncertainty in measurement (2.0)*.

International Electrotechnical Commission, International Electrotechnical Commission, Technical Committee 45, International Electrotechnical Commission, & Subcommittee 45B. (2015). *Radiation protection instrumentation: determination of uncertainty in measurement*.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Retrieved April 2019,1 from <https://www.iso.org/standard/66912.html>

Izewska, J. (n.d.). Radiation Dosimeters, Radiation Oncology Physics Handbook. (pp 71-99). Vienna: International Atomic Energy Agency

Kerns, J., Kry, S., Sahoo, N., S Followill, D., & Ibbott, G. (2011). Angular dependence of the nanoDot OSL dosimeter. *Medical Physics*, 38, 3955–3962. <https://doi.org/10.1118/1.3596533>

Kocher, D. C. (2000). ASSESSMENT OF OCCUPATIONAL EXPOSURE DUE TO EXTERNAL SOURCES OF RADIATION: *Health Physics*, 78(5), 567–568. <https://doi.org/10.1097/00004032-200005000-00019>

MEYE, P. O. (2016, July). *INTERCOMPARISON OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF OSLDs AND TLDs USED FOR INDIVIDUAL MONITORING*. UNIVERSITY OF GHANA, GHANA.

Stanford Dosimetry LLC. (2010). *Whole Body Dose Algorithm for the Landauer Inlight OSLN MOD2 NVLAP* (p. 44).



ภาคผนวก

ภาษาโปรแกรมสำหรับการคำนวณค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีสร้างตัวแบบมอนติคาร์โล ด้วยภาษาไพทอน
(Python programming)

```
import numpy.random as random
from scipy import stats as stats
import matplotlib.pyplot as plt

#Measurement
Measure = 10000000 #M measurement
X_mean_normal = {'H_m':1.24,'k_in':1.00,'k_r':1.00,'k_z':0.99,'k_L':0.81,'k_E':1.00,'k_light':0.99}
Ux_normal = {'H_m':0.0246,'k_in':0.0044,'k_r':0.0007,'k_z':0.0002,'k_L':0.0677,'k_E':0.1333,'k_light':0.0333}
X_mean_rec = {'N0':1.00,'k_e':3.77}
Ux_rec = {'N0':0.0017,'k_e':0.0709}
X_mean_tri = {'k_env':1.00}
Ux_tri = {'k_env':0.0408}

#for generate random number
Xrn = {}
Xrr = {}
Xtr = {}

for k in X_mean_normal:
    Xrn[k] = random.normal(X_mean_normal[k],Ux_normal[k],Measure)

for j in X_mean_rec:
    Xrr[j] = random.uniform(X_mean_rec[j]-Ux_rec[j],X_mean_rec[j]+Ux_rec[j],Measure)

for i in X_mean_tri:
    Xtr[i] = random.triangular(X_mean_tri[i]-Ux_tri[i],X_mean_tri[i],X_mean_tri[i]+Ux_tri[i],Measure)

#Calculate dose
y = Xrn['H_m']*Xrr['N0']*Xrn['k_in']*Xrn['k_r']*Xrn['k_z']*Xrn['k_L']*Xrn['k_E']*Xtr['k_env']*Xrn['k_light']*Xrr['k_e']
y.sort()
```



```
#MonteCarlo Calculation  
mean = y.mean()  
stdev = y.std()  
skew = stats.skew(y)  
cover_low = y.mean() - 2*y.std()  
cover_above = y.mean() + 2*y.std()
```