บทความวิชาการ

การควบคุมคุณภาพในระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติในเครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัล

Quality Control in Automatic Exposure Control of Digital Radiography

สิรัณยาพงศ์ สุวรรณโอภาส วท.ม. ฉายาเวชศาสตร์, วท.บ รังสีเทคนิค
ธนวิทย์ พิมย์หงส์ วท.ม. ฟิสิกส์การแพทย์, วท.บ รังสีเทคนิค
ยงยุทธ ต๊ะดุก วท.บ. รังสีเทคนิค

Received May 30, 2025; Revised June 27, 2025; Accepted September 12, 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการควบคุมคุณภาพของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติในเครื่องเอกซเรย์ดิจิทัล ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อให้ได้คุณภาพภาพที่เหมาะสมและลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ การควบคุมคุณภาพเพื่อประเมินความถูกต้องและความสม่ำเสมอของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติตามมาตรฐาน American Association of Physicists in Medicine (AAPM, 2024) โดยใช้การทดสอบ 10 ด้าน ได้แก่ การทำซ้ำของระบบ การตอบสนองต่อเวลาต่ำสุด ความไวของระบบ การเลือกค่าความหนาแน่น การเลือกช่องนับวัดสัญญาณ การทำงานร่วมกันของช่องนับวัดสัญญาณ การตั้งค่ากิโลโวลต์ การตั้งค่าตามความหนาของผู้ป่วย การชดเชยขนาดลำรังสี และระบบตั้งเวลา การทดสอบดังกล่าวช่วยให้สามารถตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพระบบการทำงานของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติเพิ่มความปลอดภัยของผู้ป่วย ลดความเสี่ยงจากรังสี และรักษามาตรฐานคุณภาพของภาพรังสีตลอดอายุการใช้งานเครื่องเอกซเรย์

คำสำคัญ: การควบคุมคุณภาพ; ระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ; เครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัล

ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล

Abstract

This academic review article aims to present he Automatic Exposure Control (AEC) system in digital X-ray machines is crucial for optimizing radiation dosage based on organ size and thickness, thereby ensuring high-quality images, minimizing unnecessary radiation exposure, and enhancing diagnostic efficiency. However, the AEC system demands rigorous quality control to guarantee precise and consistent performance, adhering to the 2024 American Association of Physicists in Medicine (AAPM) quality control standards for diagnostic radiology equipment. This involves ten key tests, including: AEC Reproducibility, Minimum response time, AEC Sensitivity, Density selector, Cell selection, Cell balance, kV tracking, Patient thickness tracking, Field of view compensation, and AEC backup timer. These comprehensive tests are vital for effectively monitoring AEC system performance, significantly enhancing patient safety, reducing radiation risks, and maintaining consistent image quality, ultimately ensuring the system operates correctly and safely throughout the X-ray machine's lifespan.

Keywords: Quality Control; Automatic Exposure Control; Digital Radiography

บทนำ

การถ่ายภาพโดยเครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัล นักรังสีการแพทย์จะตั้งค่าปริมาณรังสีที่ใช้ให้เหมาะสมกับอวัยวะที่ต้องการตรวจซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของแต่ละบุคคลส่งผลทำให้ผู้ป่วยอาจจะได้รับปริมาณรังสีที่มากหรือน้อยเกินความจำเป็น ทำให้ภาพถ่ายทางรังสีไม่ได้มาตรฐาน เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้เครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัลจึงมีระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ (Automatic Exposure Control: AEC) ซึ่งเป็นระบบที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยควบคุมปริมาณรังสีที่ออกจากหลอดเอกซเรย์ไปยังแผ่นรับภาพทางรังสีให้มีการใช้ปริมาณรังสีที่เหมาะสมและสม่ำเสมอตามขนาด, ความหนาของอวัยวะ ช่วยให้นักรังสีการแพทย์ลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าปริมาณรังสีที่ไม่เหมาะสมรวมถึงลดเวลาในการปฏิบัติงานแต่ยังคงมาตราฐานคุณภาพของภาพทางรังสีไว้ได้ดี

ระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

ระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติในเครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัล เป็นระบบ feedback control ที่เชื่อมต่อระหว่าง detector กับ X-ray tube ประกอบด้วย

1. ช่องนับวัดสัญญาณ (Cell หรือ Chamber) ซึ่งเป็น Ionization Chamber ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าแผ่นรับภาพทางรังสีในช่องเก็บแผ่นรับภาพทั้งในรูปแบบยืน (Bucky wall stand) และแบบเตียง (Table Bucky) มีอยู่ด้วยกัน 3 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 1 หลักการทำงาน Ionization Chamber เมื่อรังสีเอกซเรย์ออกจากตัวผู้ป่วยผ่านอากาศจะเกิดการแตกตัว (Ionization) ของอะตอมในอากาศผ่านเข้าในช่องนับวัดสัญญาณ (Cell หรือ Chamber) อิเล็กตรอนที่มีคุณสมบัติเป็นประจุลบจะเคลื่อนตัวไปยังตัวรับสัญญาณที่มีคุณสมบัติเป็นประจุ

บวกซึ่งบรรจุอยู่ภายในช่องวัดสัญญาณเพื่อนับวัดค่าอิเล็กตรอนที่ได้จากนั้นแปลงเป็นสัญญานไฟฟ้า

ภาพที่ 1 ช่องเก็บแผ่นรับภาพแบบยืน (Bucky wall stand) โดยมีช่องนับวัดสัญญาณจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งขวา, กลาง, และซ้าย ตามลำดับ

ที่มา : สาขารังสีวินิจฉัย ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล

2. Pre-amplifier ทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ออกจาก Chamber

3. Integrator circuit ทำหน้าที่สะสมสัญญาณ

4. Comparator จะทำการเปรียบเทียบ สัญญาณที่สะสมไว้กับค่า reference/density setting ตามที่ตั้งไว้ โดยการปรับ density แต่ละ step จะส่งผลต่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ร้อยละ 15-25 [3] ของค่าปริมาณรังสีปกติดังตารางที่ 1 เมื่อถึงค่าที่กำหนดจะส่งสัญญานต่อไปยัง Switching/Control circuit

ตารางที่ 1 การตั้งค่าตามความหนาแน่น (Density)

ประเภทความหนาแน่น	ตัวแปร
ความหนาแน่นน้อยมาก	**-2**
ความหนาแน่นน้อย	-1
ความหนาปกติ	0
ความหนาแน่นมากกว่าปกติ	+1/+2

5. Switching/Control circuit ทำหน้าที่สั่งหยุดการให้รังสี

6. Back-up timer circuit เป็นวงจรป้องกันความผิดพลาดของ AEC หากเกิดความผิดพลาดเช่นวงจรไม่ตัดการทำงานการให้รังสี ตัว back-up timer จะหยุดการฉายรังสีอัตโนมัติหลังเวลาที่ตั้งไว้ เพื่อป้องกัน overexposure

การควบคุมคุณภาพระบบ AEC

ระบบ AEC เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกเพื่อให้ระบบทำงานได้ตามปกติจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพ โดยเฉพาะเมื่อทำการติดตั้งเครื่องเอกซเรย์ครั้งแรกจะต้องทำการควบคุณภาพและบันทึกไว้เพื่อกำหนดเป็นค่าพื้นฐาน (baseline) สำหรับเปรียบเทียบกับการตรวจสอบคุณภาพในครั้งต่อไป อย่างไรก็ตามการควบคุมคุณภาพระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติไม่ได้อยู่ในหลักเกณฑ์การตรวจสอบประสิทธิภาพประจำปีเครื่องเอกซเรย์ทั่วไปของทางกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข พ.ศ.2568 ดังนั้นเพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่นักรังสีการแพทย์และผู้มาขอรับการบริการทางรังสีวินิจฉัยที่มีการใช้งานระบบ AEC นักฟิสิกส์การแพทย์และนักรังสีการแพทย์ทางรังสีวินิจฉัยจึงมีบทบาทสำคัญ

ในการร่วมกันทดสอบระบบดังกล่าวโดยใช้หลักมาตรฐานการควบคุมคุณภาพเครื่องมือทางรังสีวินิจฉัยของสมาคมฟิสิกส์การแพทย์ของอเมริกา (American Association of Physicists in Medicine: AAPM) ปี ค.ศ. 2024 [3] เพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มั่นใจ และปลอดภัย สามารถให้ค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมและสร้างภาพทางรังสีที่ดีต่อผู้ป่วย โดยมีการทดสอบระบบอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ปฏิบัติให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ภายในหน่วยงาน โดยทั่วไปมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการทำซ้ำของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

การทำซ้ำของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ (AEC -Reproducibility) เป็นการทดสอบเพื่อประเมินระบบ AEC สามารถให้ปริมาณรังสีที่สม่ำเสมอภายใต้สถานการณ์ในการถ่ายเอกซเรย์ในวัตถุชนิดเดียวกัน โดยการทดสอบนี้ตามหลักมาตรฐานการควบคุมคุณภาพเครื่องมือทางรังสีวินิจฉัยของสมาคมฟิสิกส์การแพทย์ของอเมริกา (American Association of Physicists in Medicine: AAPM) [3] ได้มีการแนะนำให้ใช้อุปกรณ์แผ่น PMMA Slab ในการทดสอบ แต่สามารถประยุกต์ใช้แผ่นทองแดง (Copper) ขนาด 2 มิลลิเมตร ตามแนวทางการศึกษาของ Conway BJ และคณะแทนได้[4] ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไป ทำการทดสอบโดยตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC โดยใส่แผ่นกริด (Grid) และปรับลำรังสี (Collimator) ให้แสงไฟ (Light field) ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด จากนั้นติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์ คลุมไม่ให้แสงไฟสามารถเล็ดลอดออกมา ดังรูปที่ 2 จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์ 80 kVp และใช้ AEC ทุกตำแหน่งที่ ค่า mA ที่ตั้งต้องให้ระยะเวลาในการฉายรังสี มากกว่า 10 มิลลิวินาที (ms) และ ค่า Density เท่ากับ 0 จากนั้นฉายเอกซเรย์ภาพในโหมด AEC จำนวน 3 ครั้ง บันทึกค่า mAs และ ค่า EI ในแต่ละครั้งที่ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องเอกซเรย์ (Console)

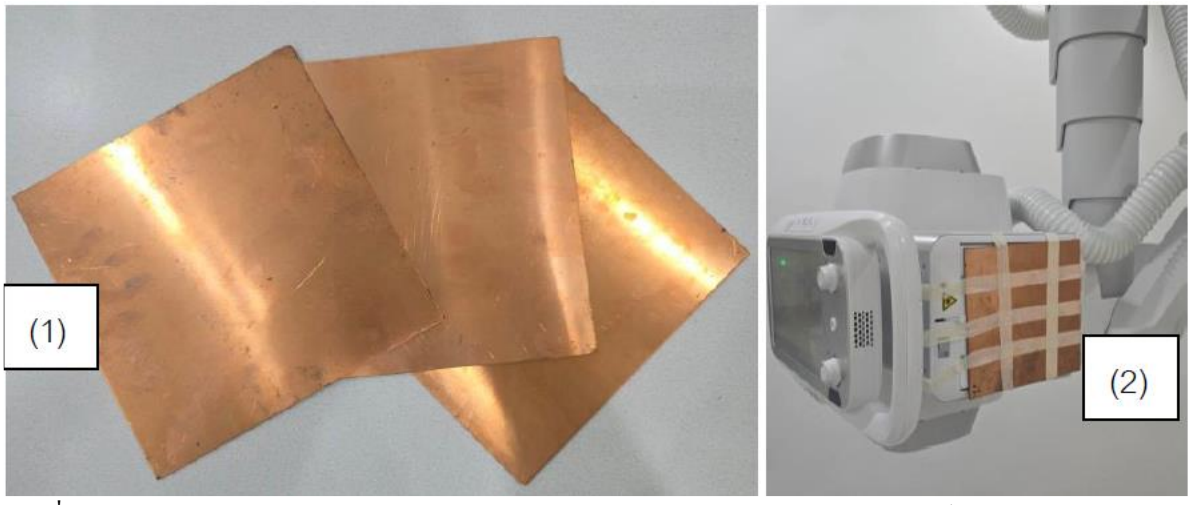
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยการเก็บข้อมูลค่า mAs และค่า EI นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสม่ำเสมอหรือความแปรวนสัมพัทธ์ หากค่า CV ต่ำ แสดงว่าเครื่องมือมีความแม่นยำที่ดี ในทางกลับกันหากค่า CV แสดงว่าเครื่องมือมีความไม่เสถียร สามารถหาค่า CV ได้จากสมการที่ 1

$$\text{Coefficient of Variation: CV} = \left(\frac{Standard\ Deviation\ (SD)}{Mean}\right) x\ 100$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนจะต้องไม่เกินร้อยละ 5 ถ้าหากเกินให้ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง และหากยังคงพบปัญหาเดิม ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการหาวิธีแก้ไขต่อไป

2. การทดสอบเวลาตอบสนองที่ต่ำสุดของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

เวลาตอบสนองที่ต่ำสุดของระบบ(Minimum Response Time) เป็นการทดสอบการทำงานของเวลาตอบสนองที่ต่ำที่สุดและความสามารถในการทำซ้ำอย่าง



ภาพที่ 2 (1) แผ่นทองแดงสำหรับการทดสอบ (2) การติดแผ่นทองแดงไว้บนหน้าหลอดเอกซเรย์
ที่มา : สาขารังสีวินิจฉัย ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล

สม่ำเสมอของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ กล่าวคือ ระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติจะหยุดฉายเอกซเรย์ในเวลาที่สั้นเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพเอกซเรย์ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของการถ่ายภาพเอกซเรย์ช่องท้องในผู้ป่วยที่มีความหนารอบเอวน้อย เวลาที่ใช้ในการฉายเอกซเรย์ซึ่งถูกควบคุมโดย AEC จะให้เวลาในการฉายเอกซเรย์ที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่มีความหนารอบเอวมาก เป็นต้น ทดสอบโดย การตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ ปิดระบบควบคุมลำรังสีอัตโนมัติ (Positive Beam Limitation: PBL) และ เปิด Collimator ให้คลุมแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบ ใส่แผ่นกริด ตั้งค่าพารามิเตอร์ ค่า kVp ที่ต่ำที่สุดที่สามารถเลือกได้ เช่น 50 kVp เป็นต้น เลือก Large Focal Spot และ mA สูงสุดที่สามารถเลือกได้ โดยไม่ใช้ตัวกรองที่อยู่ในหลอดเอกซเรย์ (Added Filtration) เลือกทุกตำแหน่งของช่องนับวัดสัญญาณ และฉายรังสีเอกซเรย์ ทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซเรย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่า mAs และ mA ดังสมการที่ 2

$$\text{เวลาในการฉาย (วินาที)} = \left(\frac{mAs}{mA}\right)$$

จากนั้นเพิ่มค่า kVp ครั้งละ 10 kVp และบันทึกเวลาไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพบว่าเวลาที่ใช้ไม่ลดลง เมื่อได้ค่า kVp สุดท้ายที่เวลาไม่ลดลงแล้วให้ทำการฉายรังสีเอกซเรย์ซ้ำอีก 2 ครั้งรวมเป็น 3 ครั้ง นำเวลาทั้ง3ค่ามาคำนวณหา Coefficient of Variation (CV) ของเวลาในการฉายรังสีเอกซเรย์ที่ kVp สุดท้าย หาก CV มากกว่า 0.05 ให้ปรับลดค่า kVp ลง 10 kVp แล้วฉายเอกซเรย์อีก 3 ครั้ง ปรับลดค่า kVp ลงและทำซ้ำต่อไปเรื่อย ๆ จนสามารถได้ค่า CV น้อยกว่า 0.05

เพราะฉะนั้นค่าเวลาในการฉายที่สั้นที่สุดจะมีค่า CV น้อยกว่า 0.05 คือเวลาตอบสนองที่ต่ำสุดของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีชนิดแบบ High-frequency หรือ 12-phase

โดยที่เวลาตอบสนองต่ำสุดควรไม่เกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 มิลลิวินาที (ms) หากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทำการทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังคงพบปัญหาเดิม ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการหาวิธีแก้ไขต่อไป

3. การทดสอบความไวของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

ความไวของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ (AEC Sensitivity) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติสามารถให้ปริมาณรังสีปรับเทียบไว้อย่างเหมาะสมแก่แผ่นรับภาพ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นช่องนับวัดสัญญาณที่มีการใช้งานมากที่สุดคือตำแหน่งช่องนับวัดสัญญาณตรงกลางโดยใช้ค่า Exposure Index (EI) เป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องเอกซเรย์ใช้บ่งบอกถึงปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนแผ่นรับภาพของเครื่องเอกซเรย์ ทั้งนี้แต่ละบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดและมีวิธีการคำนวณค่า EI ที่แตกต่างกัน

การทดสอบโดยการตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC ใส่แผ่นกริดและปรับลำรังสีให้แสงไฟให้ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์คลุมมิให้แสงไฟเล็ดลอดออกมา ตั้งค่าพารามิเตอร์ AEC ตำแหน่งช่องนับวัดสัญญาณตำแหน่งช่องตรงกลาง ค่า kVp ที่ใช้งานเป็นประจำ เช่น 80 kVp และ ค่า Density เท่ากับ 0 เป็นต้น ฉายเอกซเรย์ภาพและบันทึกค่า mAs, EI และ ค่า Deviation Index (DI)

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยตรวจสอบค่า EI ที่บันทึกได้จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่า Target EI ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่า EI ที่กำหนดมาจากโรงงาน และค่า DI ควรมีค่าใกล้เคียงกับ 0

4. การทดสอบการเลือกค่าความหนาแน่นในระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

การเลือกค่าความหนาแน่น (Density Selector) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบการเลือกค่าความหนาแน่น สามารถปรับค่า mAs หรือเวลาในการฉายเอกซเรย์ (Exposure time) ได้อย่างเหมาะสม ทดสอบโดยตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC โดยใส่แผ่นกริด (Grid) และปรับลำรังสี (Collimator) ให้แสงไฟ (Light field) ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์ คลุมมิให้แสงไฟสามารถเล็ดลอดออกมา เลือกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในทางคลินิกประจำเป็น เช่น 80 kVp โดยเลือกค่า mA ที่ให้ค่าเวลาในการฉายมากกว่า 10 มิลลิวินาที (ms) โดยเลือก AEC ตำแหน่งช่องวัดสัญญาณตรงกลาง เลือกค่า Density ที่ต่ำที่สุด และฉายเอกซเรย์บันทึกค่า mAs และ เวลาในการฉาย จากนั้นทดสอบโดยเลือกค่า Density ต่างๆ ฉายเอกซเรย์ และบันทึกค่า mAs และ เวลาในการฉาย

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ mAs และ เวลาในการฉาย ของแต่ละค่า Density ที่เลือกเปรียบเทียบกับค่า mAs และเวลาในการฉายรังสี ของค่าความหนาแน่นปกติ (Normal หรือ 0) โดยการเปลี่ยนแปลงควรอยู่ในระหว่างช่วงร้อย

ละ 15-25 หากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทำการทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาเดิมอีกให้ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการหาวิธีแก้ไขต่อไป

5. การทดสอบการเลือกช่องนับวัดสัญญาณของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

การเลือกช่องนับวัดสัญญาณ (Cell or Chamber Selection) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าช่องนับวัดสัญญาณที่เลือกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม เป็นช่องนับวัดสัญญาณเดียวกันที่ส่งผลต่อปริมาณรังสีจากการตั้งค่า mAs ที่เลือกใช้จากช่องนับวัดสัญญาณดังกล่าว ทดสอบโดยตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC โดยใส่แผ่นกริด (Grid) และปรับลำรังสี (Collimator) ให้แสงไฟ (Light field) ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ตั้งค่า kVp ที่ต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ ยกตัวอย่างเช่น 50 kVp เป็นต้น เลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ฉายรังสีโดยไม่ใช้แผ่นกรองใด ๆ บันทึกค่า mAs (กรณีที่ไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ) จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมขนาดใหญ่ที่สามารถปิดช่องนับสัญญาญได้ทั้งหมด หนา 2 มิลลิเมตร ปิดช่องนับวัดสัญญาณทั้ง 3 ช่อง เลือกช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด แล้วถ่ายภาพเอกซเรย์ บันทึกค่า mAs (กรณีที่ปิดแผ่นอะลูมิเนียม) โดยค่า mAs จากการนำแผ่นอะลูมิเนียมมาปิดควรจะมากกว่าประมาณ 2 เท่าของค่า mAs ที่ไม่ได้นำแผ่นอะลูมิเนียมมาปิด

จากนั้นทดสอบช่องนับวัดสัญญาณในแต่ละช่องโดย ใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดเฉพาะช่องนับวัดสัญญาณด้านซ้าย เลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณเฉพาะด้านซ้าย แล้วฉายเอกซเรย์ และบันทึกค่า mAs โดยค่า mAs ที่ได้ต้องใกล้เคียงกับค่า mAs ในแบบกรณีปิดแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นยกเลิกการเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณด้านซ้าย และเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณช่องตรงกลางและด้านขวา (โดยที่ยังคงมีแผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดช่องนับวัดสัญญาณด้านซ้ายอยู่) ฉายเอกซเรย์และบันทึกค่า mAs โดยที่ค่า mAs จะต้องใกล้เคียงค่า mAs ในแบบกรณีไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ

ทำซ้ำโดยเปลี่ยนทดสอบช่องนับวัดสัญญาณเป็นช่องกลาง ใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดเฉพาะช่องนับวัดสัญญาณช่องกลาง เลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณเฉพาะช่องกลาง แล้วฉายเอกซเรย์ และบันทึกค่า mAs โดยค่า mAs ที่ได้ต้องใกล้เคียงกับค่า mAs ในแบบกรณีปิดแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นยกเลิกการเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณตรงกลาง และเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณด้านซ้ายและด้านขวา (โดยที่ยังคงมีแผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดช่องนับวัดสัญญาณตรงกลางอยู่) ฉายเอกซเรย์และบันทึกค่า mAs โดยที่ค่า mAs จะต้องใกล้เคียงค่า mAs ในแบบกรณีไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ

ทำซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนทดสอบช่องนับวัดสัญญาณเป็นด้านขวา ใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดเฉพาะช่องนับวัดสัญญาณด้านขวา เลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณเฉพาะด้านขวา แล้วฉายเอกซเรย์ และบันทึกค่า mAs โดยค่า mAs ที่ได้ต้องใกล้เคียงกับค่า mAs แบบในกรณีปิดแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นยกเลิกการเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณด้านขวา และเลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณตรงกลางและด้านซ้าย

(โดยที่ยังคงมีแผ่นอะลูมิเนียมขนาดประมาณ 10×10 ซม. หนา 2 มม. ปิดช่องนับวัดสัญญาณด้านขวาอยู่) ฉายเอกซเรย์และบันทึกค่า mAs โดยที่ค่า mAs จะต้องใกล้เคียงค่า mAs แบบในกรณีไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดย เมื่อมีการทดสอบระบบ AEC โดยปิดช่องนับวัดสัญญาณที่ถูกเลือก ค่า mAs ที่ได้จะต้องใกล้กับค่า mAs แบบในกรณีปิดแผ่นอะลูมิเนียม ในทำนองเดียวกัน เมื่อทดสอบระบบ AEC โดยไม่ปิดช่องนับวัดสัญญาณที่ถูกเลือก ค่า mAs ที่ได้จะต้องใกล้กับค่า mAs แบบกรณีที่ไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ ซึ่ง “ค่าใกล้เคียง” ในกรณีหมายถึง ค่า mAs ที่ได้ ต้องอยู่ภายในไม่เกินร้อยละ 30 ของช่วงความแตกต่างระหว่างค่า mAs กรณีไม่ปิดแผ่นกรองใด ๆ และ กรณีที่ปิดแผ่นอะลูมิเนียม พบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทำการทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาเดิมอีกให้ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการหาวิธีแก้ไขต่อไป

6. การทดสอบการทำงานและการทำงานร่วมกันของช่องนับวัดสัญญาณในระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

การทำงานและการทำงานร่วมกันของช่องนับวัดสัญญาณ (Cell or Chamber Balance) เป็นการทดสอบการทำงานของช่องนับวัดสัญญาณและการทำงานร่วมกันของช่องนับวัดสัญญาณในแต่ละตำแหน่งว่าสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ปริมาณรังสีไปยังแผ่นรับภาพในระดับที่เหมาะสม ทดสอบโดยการตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นรับภาพใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC ดึงแผ่น กริดออก (หากไม่สามารถถอดแผ่นกริดได้ ก็ทดสอบโดยมีแผ่นกริด) และปรับลำรังสีให้แสงไฟให้ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์คลุมมิให้แสงไฟสามารถเล็ดลอดออกมา ตั้งค่าพารามิเตอร์ 70 kVp และเลือกช่องวัดสัญญาณตำแหน่งช่องตรงกลาง ค่า Density เท่ากับ 0 ฉายเอกซเรย์ภาพในโหมด AEC บันทึกค่า mAs ที่แสดงอยู่บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องเอกซเรย์ จากนั้นทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนและเลือกช่องวัดสัญญาณในตำแหน่งอื่น ๆ รวมถึงเลือกช่องวัดสัญญาณแบบทำงานร่วมกันเพื่อทดสอบการทำงานให้ครบทุกรูปแบบที่สามารถเลือกได้ (ดังรูปที่ 5) ได้แก่ ซ้าย, กลาง, ขวา, ซ้ายและกลาง, ซ้ายและขวา, กลางและขวา, และเลือกช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด เป็นต้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ kVp และ Density เดิม และ บันทึกค่า mAs ในแต่ละครั้ง

วิเคราะห์การทดสอบโดยคำนวณและบันทึกค่าเบี่ยงเบนเชิงส่วน (Fractional Deviation) ของค่า mAs ในช่องวัดสัญญาณในตำแหน่งต่าง ๆ เทียบกับค่า mAs ของช่องวัดสัญญาณในตำแหน่งตรงกลาง ดังสมการที่ 2 โดยค่าความแตกต่างต้องไม่เกินร้อยละ 15 ของค่า mAs ของช่องวัดสัญญาณในตำแหน่งตรงกลาง หากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทำการทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาเดิมให้ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการหาวิธีแก้ไขต่อไป

7. การทดสอบการตั้งค่ากิโลโวลต์ในระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

การตั้งค่ากิโลโวลต์ในระบบ (Tube Voltage Tracking: kV Tracking) เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ สามารถควบคุมค่าปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนแผ่นรับภาพได้

อย่างเหมาะสมตลอดช่วงค่า kVp ต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจทางคลินิก ทดสอบโดยการตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC ใส่แผ่นกริดและปรับลำรังสีให้แสงไฟให้ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์คลุมมิให้แสงไฟเล็ดลอดออกมา ตั้งค่าพารามิเตอร์ AEC ตำแหน่งช่องนับวัดสัญญาณตำแหน่งช่องตรงกลางและค่า kVp ที่ใช้งานเป็นประจำ เช่น 80 kVp เป็นต้น และ ค่า Density เท่ากับ 0 ฉายเอกซเรย์ภาพและบันทึกค่า EI จากนั้นทดสอบซ้ำโดยการเปลี่ยนค่า kVp อื่น ๆ ที่มีการใช้งานอยู่เป็นประจำ ยกตัวอย่างเช่น 100 และ 120 kVp เป็นต้น ฉายเอกซเรย์ภาพ และบันทึกค่า EI

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยหาค่าเฉลี่ยรวมของ EI ที่บันทึกจากปรับค่า kVp ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่า EI ที่บันทึกได้ในแต่ละครั้งโดยมีค่าความแตกต่างไม่เกินร้อยละ 25 ของค่าเฉลี่ย EI รวม การทดสอบหากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาอีกให้ให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

8. การทดสอบการตั้งค่าระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติตามขนาดความหนาของผู้ป่วย

การตั้งค่าตามขนาดความหนาของผู้ป่วย (Patient Thickness Tracking) เป็นการทดสอบระบบ AEC เพื่อตรวจว่าสามารถควบคุมค่าปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนแผ่นรับภาพเมื่อมีการฉายเอกซเรย์ในผู้ป่วยที่มีความหนาแตกต่างกัน ทดสอบโดยตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC ใส่แผ่นกริดและปรับลำรังสีให้แสงไฟให้ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณตำแหน่งหน้าหลอดเอกซเรย์ คลุมมิให้แสงไฟสามารถเล็ดลอดออกมา เลือกค่า kVp ที่ใช้งานเป็นประจำ ยกตัวอย่างเช่น 80 kVp และ ช่องวัดสัญญาณตำแหน่งช่องตรงกลาง ค่า Density เท่ากับ 0 ฉายเอกซเรย์ภาพและบันทึกค่า EI จากนั้นทดสอบซ้ำอีกครั้งโดยติดแผ่นทองแดงเพิ่มขนาดความหนาทองแดงเป็น 3 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ และบันทึกค่า EI

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยหาค่าเฉลี่ยรวมของ EI ที่บันทึกได้จากปรับเปลี่ยนขนาดความหนาของแผ่นทองแดงเปรียบเทียบกับค่า EI ที่บันทึกได้ในแต่ละครั้งโดยมีค่าความแตกต่างไม่เกินร้อยละ 25 ของค่าเฉลี่ย EI รวม หากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาอีกให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

9. การทดสอบการชดเชยขนาดลำรังสีในระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

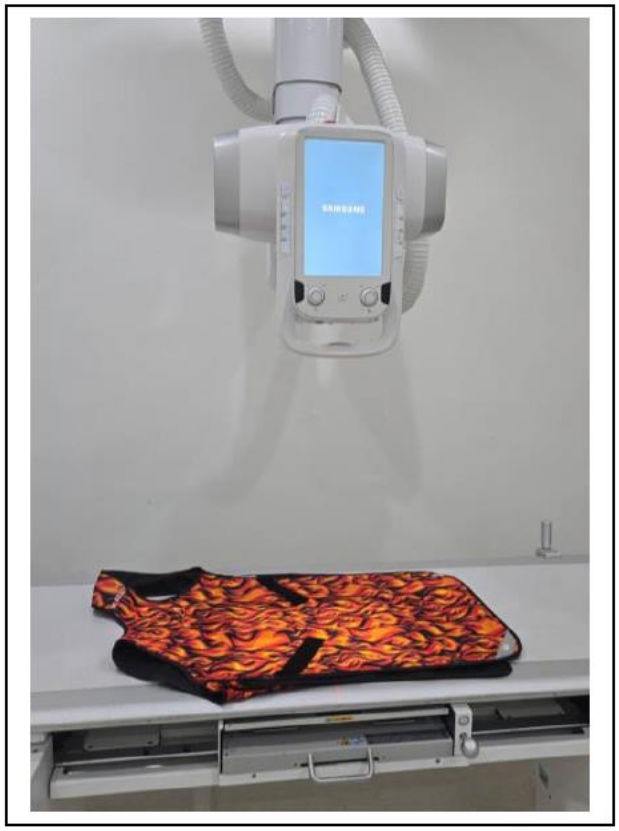
การชดเชยขนาดลำรังสี (Field of View Compensation) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติสามารถยังคงความสม่ำเสมอของการฉายเอกซเรย์ได้อย่างถูกต้อง เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของลำรังสี (Light Field) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเอกซเรย์ ทดสอบโดยตั้งหลอดเอกซเรย์ให้อยู่ในระยะ SID ที่ใช้งานประจำและอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นรับภาพที่วางอยู่ในที่เก็บแผ่นใต้เตียงหรือแบบยืนของเครื่องเอกซเรย์ที่ต้องการทดสอบระบบ AEC โดยใส่แผ่

นกริด (Grid) และปรับลำรังสี (Collimator) ให้แสงไฟ (Light field) ครอบคลุมแผ่นรับภาพและช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมด ติดแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์ คลุมมิให้แสงไฟสามารถเล็ดลอดออกมา ตั้งค่า 80 kVp เลือกใช้ช่องนับวัดสัญญาณตำแหน่งตรงกลาง และ ปรับขนาดลำรังสีที่ 12x12 นิ้ว และฉายเอกซเรย์ภาพ บันทึกค่า mAs จากนั้นเพิ่มขนาดลำรังสี เป็น 14x14 นิ้ว และ 17x17 นิ้ว และ ฉายเอกซเรย์ตามลำดับ บันทึกค่า mAs ที่ได้

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยค่า mAs ที่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 10 ของขนาดลำรังสีที่เปลี่ยนแปลงหากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาอีกให้แจ้งช่างประจำเครื่องเพื่อการแก้ไข

10. การทดสอบระบบตั้งเวลาของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ

ระบบตั้งเวลาของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ (AEC Backup timer) เป็นการทดสอบการทำงานของระบบการตั้งเวลาของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติว่าสามารถหยุดการฉายเอกซเรย์ที่การตั้งค่าที่เหมาะสมของการตั้งเวลา กล่าวคือ ในกรณีที่ระบบการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติเกิดขัดข้อง ในระหว่างการฉายเอกซเรย์ เครื่องเอกซเรย์จะต้องหยุดการฉายเอกซเรย์ในค่าปริมาณรังสีที่กำหนดไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่มากเกินไปและป้องกันความร้อนที่จะเกิดขึ้นในหลอดเอกซเรย์หรือในกรณีที่ต้องฉายเอกซเรย์ในผู้ป่วยที่มีความหนามาก ทดสอบโดยปรับขนาดของลำรังสี (Collimator) ให้แคบที่สุด จากนั้นเปิดแสงไฟ (Alignment Light) แล้วนำแผ่นทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตร ปิดหน้าที่บริเวณหน้าหลอดเอกซเรย์ วางเสื้อตะกั่วกันรังสีคลุมช่องนับวัดสัญญาณดังภาพที่ 3 ตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ 60 kVp , เลือก Large Focal Size, ช่องนับวัดสัญญาณช่องตรงกลาง, Density เท่ากับ 0, ถ้าสามารถตั้งค่า Backup mAs หรือ Backup time ได้ ให้เลือกค่าที่มากที่สุด และ ฉายเอกซเรย์ บันทึกค่า mAs และ เวลา ที่ใช้ในการฉายรังสี หากดูพบว่าว่า ยังไม่ถึง backup time เช่น ไม่มีเสียงเตือน หรือไม่มีการรีเซ็ตระบบ ให้ทำซ้ำโดย ลดค่า kV ลงอีก หรือ เพิ่มความหนาของแผ่นทองแดงที่ปิด



ภาพที่ 3 การวางเสื้อตะกั่วให้ครอบคลุมช่องนับวัดสัญญาณทั้งหมดสำหรับการทดสอบเครื่องตั้งเวลาของระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติ
ที่มา : สาขารังสีวินิจฉัย ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล

วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยที่ระบบเครื่องเอกซเรย์ควรสิ้นสุดการฉายเอกซเรย์เมื่อถึงค่า mAs ที่ตั้งไว้และจะต้องมีสัญญาณแจ้งเตือน รวมถึงต้องมีการรีเซ็ตด้วยตนเอง ก่อนที่จะทำการฉายเอกซเรย์ด้วยระบบ AEC ต่อไปได้ หากพบปัญหาจากผลการทดสอบให้ทดสอบอีกครั้ง แต่หากยังพบปัญหาอีกให้แจ้งบริษัทผู้ดูแลเครื่องเพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

สรุป

การควบคุมคุณภาพระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติในเครื่องเอกซเรย์ทั่วไประบบดิจิทัล เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ AEC เพื่อมั่นใจว่าระบบสามารถให้ปริมาณรังสีตามการตั้งค่าพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธภาพ, ถูกต้อง และ แม่นยำ, ระบบมาความพร้อมใช้งานตามหลักมาตรฐานการควบคุมคุณภาพเครื่องมือทางรังสีวินิจฉัยของสมาคมฟิสิกส์การแพทย์ของอเมริกา (AAPM) ปี ค.ศ. 2024 เพื่อให้ได้ภาพทางรังสีมีคุณภาพ ลดการให้ปริมาณรังสีเกินความจำเป็นและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ป่วยผู้มาขอรับบริการ

ข้อแนะนำ

การทดสอบการควบคุมคุณภาพระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัตินั้นเพื่อให้มั่นใจว่าผลการทดสอบถูกต้องและแม่นยำ ควรทำการทดสอบคุณภาพเครื่องเอกซเรย์ก่อนทำการทดสอบหรือทดสอบภายหลังตรวจสอบเครื่องเอกซเรย์ประจำปี เพื่อยืนยันว่าเครื่องเอกซเรย์อยู่ในมาตรฐานและสามารถแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมการฉายปริมาณรังสีอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบคุณภาพของระบบ AEC ประจำปี เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลและตรวจหาความผิดปกติของระบบ AEC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการทดสอบคุณภาพประจำปี ควรตั้งค่าพารามิเตอร์และใช้อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแบบเดียวกันทุกครั้งเพื่อให้สามารถติดตามแนวโน้มของประสิทธิภาพระบบ AEC ได้อย่างแม่นยำ ระบุความเปลี่ยนแปลงหรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เนิ่น ๆ และทำให้มั่นใจในคุณภาพและความแม่นยำของภาพทางรังสีที่ได้จากระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. Automatic exposure control [อินเทอร์เน็ต]. 2559 [เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://radiologykey.com/automatic-exposure-control/
2. Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM Jr, Boone JM. **The essential physics of medical imaging**. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2021
3. American Association of Physicists in Medicine Task Group 150. **Acceptance Testing and Quality Control of Digital Radiographic Imaging Systems. AAPM Report No. 150**. Alexandria, VA: American Association of Physicists in Medicine; 2024. ISBN: 978-1-936366-20-0.
4. Conway BJ, Duff JE, Fewell TR, Jennings RJ, Rothenberg LN, Fleischman RC. **A patient-equivalent attenuation phantom for estimating patient exposures from automatic exposure controlled x-ray examinations of the abdomen**

and lumbo-sacral spine. Med Phys. 1990 May-Jun;17(3):448–53.

5. International Atomic Energy Agency. **Handbook of basic quality control tests for diagnostic radiology**. IAEA Human Health Series No. 47. Vienna: IAEA; 2023.
6. Lagdimi M. **Automatic Exposure Control (AEC) in Radiography** [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2568]. เข้าถึงจาก: https://www.linkedin.com/pulse/automatic-exposure-control-aec-radiography-mehdi-lagdimi/
7. Papp J. **Quality management in the imaging sciences**. 6th ed. St. Louis: Elsevier; 2018
8. Radiology Key. **Automatic exposure control** [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2568]. เข้าถึงจาก: https://radiologykey.com/automatic-exposure-control/
9. Radiopaedia. **ระบบควบคุมการเปิดรับแสงอัตโนมัติ.** Radiopaedia.org. สืบค้นจาก https://radiopaedia.org/articles/automatic-exposure-control
10. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. **มาตรฐานคุณภาพเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทางการแพทย์** [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2568]. เข้าถึงจาก: https://webapp1.dmsc.moph.go.th/petitionxray/web3/download/QualityStandardofMedicalDiagnosticX-rayMachines66.pdf
11. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. **มาตรฐานคุณภาพของเครื่องเอกซเรย์ทางการแพทย์** [อินเตอร์เน็ต].2562 [เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2568]. แหล่งข้อมูล: https://webapp1.dmsc.moph.go.th/petitionxray/web3/download/QualityStandardofMedicalDiagnosticX-rayMachines62.pdf