Original Article Songklanagarind Medical Journal

การประเมินคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ

Evaluation of Dosimetic Characteristics of Electronic Portal Imaging Device (EPID) for Flattening Filter Free (FFF) Beams

ธัชพงศ์ จันทร์โทน, วท.ม.[1], แสงอุทิศ ทองสวัสดิ์, วท.ม.[2], นิพนธ์ สายโย, วท.ม.[2], นันทวัฒน์ อู่ดี, วศ.ด.[1]*
Thadpong Chanton, M.Sc.[1], Sangutid Thongsawad, M.Sc.[2], Nipon Saiyo, M.Sc.[2], Nuntawat Udee, D.Eng.[1]*

[1]ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 ประเทศไทย
[2]งานรังสีรักษา โรงพยาบาลจุฬาภรณ์ วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์ เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 ประเทศไทย
[1]Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Naresuan University, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.
[2]Radiation Oncology Unit, Chulabhorn Hospital, HRH Princess Chulabhorn College of Medical Science, Chulabhorn Royal Academy, Laksi, Bangkok 10210, Thailand.
*E-mail: nuntawatu@nu.ac.th
Songkla Med J 2017;35(4):361-371

บทคัดย่อ:

วัตถุประสงค์: เพื่อประเมินคุณสมบัติของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ต่อการวัดปริมาณรังสีด้วยการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบของรังสีโฟตอนพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์

วัสดุและวิธีการ: การประเมินคุณสมบัติของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย การทดสอบการตอบสนองต่อระยะทาง ภาวะอิ่มตัวของการวัดสัญญาณ ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าปริมาณรังสี และการตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสีขนาดต่าง ๆ

ผลการศึกษา: พบว่าระยะ 150 และ 180 เซนติเมตร ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำเป็นระยะที่อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เหมาะสมสำหรับวัดรังสีพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณการวัดในทุกอัตราการให้ปริมาณรังสีเท่ากับ

รับต้นฉบับวันที่ 26 พฤษภาคม 2560 รับลงตีพิมพ์วันที่ 7 พฤศจิกายน 2560

±1.35 และ ±1.64 แคลลิเบชั่นยูนิต ตามลำดับ ผลการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าปริมาณรังสีพบว่าการตอบสนองต่อการวัดรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเชิงเส้นตรงทั้งสองระดับพลังงานและผลการทดสอบการตอบสนองของรังสีกับขนาดพื้นที่ลำรังสีพบว่ารังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบมีการตอบสนองต่างกันกับรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุด คือ ร้อยละ 5.50 และ 6.78 ที่ระดับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์

สรุป: อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการวัดปริมาณรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ และการเพิ่มระยะทางที่เหมาะสมช่วยลดการอิ่มตัวของการนับวัดได้

คำสำคัญ: การฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ, อัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา, อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์

Abstract:

Objective: To evaluatethe dosimetric characteristics of electronics portal imaging device (EPID) for 6 and 10 megavoltage (MV) of flattening filter-free (FFF) beams.

Material and Method: The EPID characteristicsfor FFF beams have been evaluated as follows; saturation with source-detector-distance (SDD), saturation with dose rate, dose linearity response with monitor unit (MU), and the scatterd radiation with field size.

Results: The saturation of signal was not occurred at 150 cm and 180 cm SDD for 6 and 10 MV of FFF beams, respectively. When the signals were measured with optimal SSD according to vendor suggestion (150 cm and 180 cm), the standard deviation for all dose rate were ±1.35 and ±1.64 CU for 6 and 10 MV of FFF beams,respectively. The dose linearity response showed that EPID has a good linearity response between signals and MU forthe both of 6 and 10 MV of FFF beams. The results of scatterd radiation with field size were found that FFF beams have different respose from flattening filter (FF) beams with the highest differences of 5.50% and 6.78% for 6 and 10 MV of FFF beams, respectively.

Conclusion: EPID has a good characteristic for FFF beams, and an extended SSD can be used to reduce the satured signal effects in FFF beams.

Keywords: dose rate, electronic portal imaging device, flattening filter-free beams

บทนำ

อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ (electronic portal imaging device; EPID) เป็นอุปกรณ์สร้างภาพทางรังสีของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน (linear accelerator; LINAC) ทำหน้าที่ตรวจสอบตำแหน่งการฉายรังสีเพื่อให้สามารถจัดตำแหน่งของผู้ป่วยให้ถูกต้องก่อนฉายรังสีจริงเพื่อป้องกันความผิดพลาดของการฉายรังสีไม่ตรงเป้าหมาย และช่วยทำให้ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับมีความถูกต้องมากขึ้น คุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยความละเอียดในการวัดสัญญาณสูง (spatial resolution) ความสามารถในการอ่านค่าได้ทันที (fast read out) และการวัดสัญญาณมีลักษณะเชิงเส้นตรง (linear response) จึงมีการนำอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการวัดรังสีในกระบวนการประกันคุณภาพก่อนการรักษามากขึ้น ปัจจุบันอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาให้สามารถวัดค่าปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องเร่งอนุภาคได้ ทำให้มีการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้ในการประกันคุณภาพก่อนการรักษามากขึ้นเพื่อให้การรักษาผู้ป่วยมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยเฉพาะการฉายรังสีด้วยเทคนิคขั้นสูง (advanced radiation therapy techniques)[1,2] อย่างไรก็ตามอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์

มีข้อจำกัดกรณีฉายรังสีด้วยอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา (dose rate) สูง โดยเฉพาะการฉายรังสีเทคนิคการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ (flattening filter free; FFF) เช่น เทคนิคการฉายรังสีแบบปรับความเข้ม (intensity modulated radiation therapy; IMRT) การฉายรังสีแบบปรับความเข้มเชิงปริมาตร (volumetric modulated radiation therapy; VMAT) การฉายรังสีแบบศัลยกรรม (stereotactic radio-surgery; SRS) และการฉายรังสีร่วมพิกัดบริเวณลำตัว (stereo-tactic body radiotherapy; SBRT) เนื่องจากอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการนับวัดสัญญาณแบบจำนวนเฟรมต่อเวลาทำให้ไม่สามารถนับวัดปริมาณรังสีที่มีอัตราปริมาณรังสีสูงได้จึงเกิดการอิ่มตัวต่อการนับวัดรังสี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาการตอบสนองของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ต่อการฉายรังสีที่ไม่มีตัวกรองปรับเรียบ โดยทดสอบวัดค่าปริมาณรังสีจากการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ พบว่าระยะระหว่างอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์และต้นกำเนิดรังสี (source to detector distance; SDD) ตั้งแต่ 130 เซนติเมตร และระยะตั้งแต่ 140 เซนติเมตร ที่พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ตามลำดับ เป็นระยะที่ไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยดังกล่าวจึงใช้ระยะ 150 เซนติเมตร เป็นระยะสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีจากการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบทั้งสองระดับพลังงาน[3] นอกจากนี้มีการศึกษาวิจัยคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเพิ่มระยะระหว่างอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์และต้นกำเนิดรังสี จากการคำนวณปริมาณรังสีด้วยวิธีแบล็กโปรเจ็คชั่น (back projection algorithm) เมื่อฉายรังสีพลังงาน 6 เมกะโวลต์ โดยกำหนดระยะระหว่างอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์และต้นกำเนิดรังสีเท่ากับ 150 เซนติเมตร เพื่อหาอัตราการให้ปริมาณรังสีต่อเวลาที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าอัตราการให้ปริมาณรังสีต่อเวลา 800 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที เป็นอัตราสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์[4]

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาหาคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบด้วยการทดสอบคุณลักษณะของการตอบสนองของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ต่อการวัดรังสีเพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในกระบวนการวัดรังสีในการทำประกันคุณภาพก่อนการรักษา

วัสดุและวิธีการ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนรุ่นทรูบีม (TrueBeam) ยี่ห้อวาเรียน (Varian) พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ สำหรับการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบพร้อมกับอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์รุ่นอะมอร์ฟัสซิลิคอน 1000 (aSi-1000) โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาอีคลิป เวอร์ชั่น 13.6

1. การสอบเทียบอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ (EPID calibration)

การสอบเทียบในขั้นตอนนี้เป็นการสอบเทียบอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีตามคู่มือของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์แนะนำ[7] สำหรับรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบโดยการสอบเทียบที่ระยะ 150 และ 180 เซนติเมตร สำหรับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ตามลำดับ

1.1 การสอบเทียบสัญญาณกรณีไม่ฉายรังสี (dark field calibration)

สอบเทียบสัญญาณของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการแก้ค่าสัญญาณรบกวนจากส่วนประกอบของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เมื่อไม่มีการฉายรังสี ซึ่งค่าดังกล่าว ($DF(i,j)$) จะถูกนำไปใช้สำหรับลบออกจากสัญญาณที่วัดได้ต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 1

1.2 การสอบเทียบความสม่ำเสมอ (flood field calibration)

แก้ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์รับภาพอิเล็ก-ทรอนิกส์ในแต่ละพิกเซลที่มีความไวแตกต่างกันโดยทำการแก้ค่าจากการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ด้วยอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาต่อเวลาเท่ากับ 400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที โดยการฉายรังสีพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ทำการสอบเทียบที่ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 150 เซนติเมตร ขนาดพื้นที่ลำรังสี 28×21 ตารางเซนติเมตร และที่ระดับพลังงาน

10 เมกะโวลต์ ทำการสอบเทียบที่ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 180 เซนติเมตร ขนาดพื้นที่ลำรังสี 24×18 ตารางเซนติเมตร โดยค่าการสอบเทียบความสม่ำเสมอของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์แต่ละพิกเซลสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$I(i,j) = \left(\frac{I_{raw}(i,j) - DF(i,j)}{FF(i,j)}\right)FF_{mean} \quad (1)$$

โดยที่ $I(i,j)$ คือ ภาพจากการสอบเทียบหลังการสอบเทียบ

$I_{raw}(i,j)$ คือ ภาพที่ได้จากการฉายรังสีพื้นที่ขนาดต่าง ๆ

$DF(i,j)$ คือ ภาพจากการสอบเทียบโดยไม่มีรังสี

$FF(i,j)$ คือ ภาพที่ได้จากการสอบเทียบความสม่ำเสมอ

FF_{mean} คือ ค่าเฉลี่ยของภาพที่ได้จากการสอบเทียบความสม่ำเสมอ

1.3 การสอบเทียบปริมาณรังสี (dose calibration)

การสอบเทียบปริมาณรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการปรับเทียบค่านับวัดของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ (dose normalization) ระหว่างค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิต (calibration unit; CU) ต่อค่ามอนิเตอร์ยูนิต (monitor unit; MU) ที่ได้จากการฉายด้วยเครื่องเร่งอนุภาคโดยทำการฉายรังสีด้วยพื้นที่ลำรังสีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการสอบเทียบปริมาณรังสีที่ใช้ในทางคลินิก 100 มอนิเตอร์ยูนิตให้เป็น 100 แคลลิเบชั่นยูนิต โดยที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ของการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ ทำการสอบเทียบที่ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 150 เซนติเมตร และที่พลังงาน 10 เมกะโวลต์ของการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ ทำการสอบเทียบที่ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 180 เซนติเมตร จากนั้นทำการแก้ค่าโปรไฟล์ลำรังสี (beam profile correction) เพื่อแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของความเข้มโฟตอนในตำแหน่งที่ห่างจากกึ่งกลางลำรังสีจากโปรไฟล์ของลำรังสีที่ได้จากการวัดปริมาณรังสีในน้ำที่ระยะความลึกที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุด (depth of dose maximum)

2. การประเมินคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์

การประเมินคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ทำที่ระยะที่ทำการสอบเทียบอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ตามคำแนะนำของผู้ผลิตตามขั้นตอนที่ 1

2.1 การทดสอบการตอบสนองต่อรังสีในหน่วยมอนิเตอร์ยูนิตที่ระยะทางต่าง ๆ

ทดสอบการตอบสนองต่อรังสีจากค่าปริมาณรังสี 500 มอนิเตอร์ยูนิตลำรังสีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร โดยใช้อัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาต่อเวลาสูงสุดเท่ากับ 1,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีสำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ และ 2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที สำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ ทำการเปลี่ยนแปลงระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพตั้งแต่ 120–180 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ผลการตอบสนองอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ต่อปริมาณรังสีในหน่วยมอนิเตอร์ยูนิตเพื่อทดสอบการตอบสนองตามกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทาง (inverse square law; ISL)

2.2 การทดสอบระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมโดยทำให้การนับวัดรังสีไม่เกิดการอิ่มตัว

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ เพื่อตรวจสอบว่าระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำสำหรับการวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ (ระยะ 150 เซนติเมตรสำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ และ 180 เซนติเมตรสำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์[7]) เป็นระยะที่เหมาะสมที่ทำให้การนับวัดรังสีไม่อิ่มตัว ทดสอบโดยวัดค่าปริมาณรังสีด้วยอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณรังสีต่อเวลาขนาดต่าง ๆ กำหนดค่าการฉายรังสี 500 มอนิเตอร์ยูนิต ขนาดลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร ทำการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณรังสีต่อเวลาตั้งแต่ค่าปกติถึงค่าปริมาณรังสีต่อเวลาสูงสุด ประกอบด้วย ค่าปริมาณรังสี 400–1,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีสำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์

และค่าปริมาณรังสีต่อเวลา 400–2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีสำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ จากนั้นเปลี่ยนแปลงระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพตั้งแต่ 120–180 เซนติเมตร วิเคราะห์ผลโดยการประเมินจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตรารังสีต่อเวลา (มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที) กับปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์วัดได้ (นอร์มอลไลซ์กับปริมาณรังสีที่อัตรารังสีต่อเวลา 400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที) นอกจากนั้นการทดสอบนี้ยังประเมินจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณรังสีหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิต (calibration unit; CU) ของระยะทางต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพใดๆ ที่วัดได้จากอัตราปริมาณรังสีต่อเวลาต่างๆ

2.3 การทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าปริมาณรังสี

วัดค่าการตอบสนองปริมาณรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์กำหนดระยะจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 150 และ 180 เซนติเมตร สำหรับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ตามลำดับ (ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำสำหรับการวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ[7]) เปิดพื้นที่ลำรังสีเท่ากับ 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 1,400 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์และค่าอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีสำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ โดยเปลี่ยนแปลงค่ามอนิเตอร์ยูนิตตั้งแต่ 10–1,000 มอนิเตอร์ยูนิต จากนั้นประเมินความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) ด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองระหว่างค่าปริมาณรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิตและค่าปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคในหน่วยมอนิเตอร์ยูนิต

2.4 การทดสอบการตอบสนองของค่าปริมาณรังสีต่อพื้นที่ลำรังสี

ทำการทดสอบการตอบสนองค่าปริมาณรังสีที่วัดได้จากอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เมื่อฉายรังสีที่ลำรังสีขนาด 3×3, 4×4, 5×5, 8×8, 10×10, 12×12, 15×15 และ 18×18 ตารางเซนติเมตร กำหนดระยะจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 150 เซนติเมตรสำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ และ 180 เซนติเมตรสำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ แบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ ด้วยค่าปริมาณรังสี 500 มอนิเตอร์ยูนิต ปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 1,400 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ และปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีสำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลโดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นที่ลำรังสีกับค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (relative dose) ที่ได้จากการนำค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ที่ลำรังสีขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับลำรังสีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร การทดสอบนี้ยังได้เปรียบเทียกับการตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสีของรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบด้วย

ผลการศึกษา

ผลการทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดค่าปริมาณรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน รุ่นทรูบีม พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. การสอบเทียบอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์

1.1 การสอบเทียบสัญญาณกรณีไม่ฉายรังสี

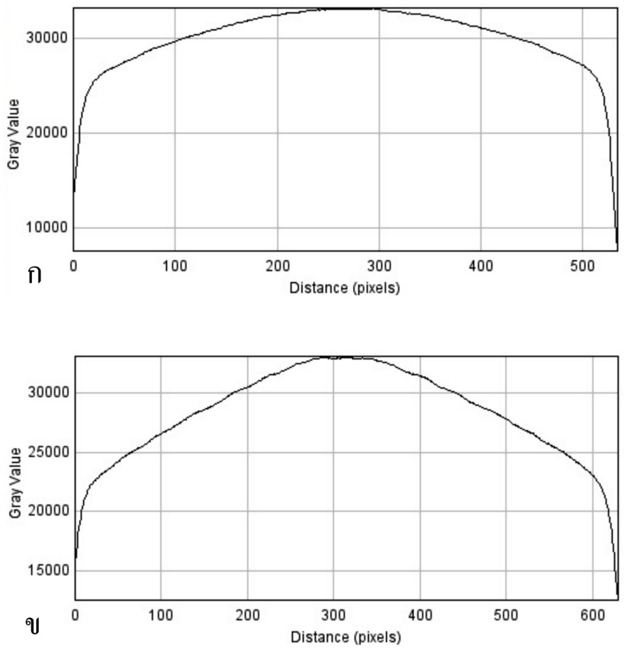
การสอบเทียบสัญญาณของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการแก้ค่าสัญญาณรบกวนเป็นไปตามคู่มือที่อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์แนะนำ[7]

1.2 การสอบเทียบความสม่ำเสมอ

การค่าแก้ความสม่ำเสมอในแต่ละพิกเซลของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์จากการฉายรังสีเป็นไปตามคู่มือที่อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์แนะนำ[7]

1.3 การสอบเทียบปริมาณรังสี

ผลการแก้ค่าโปรไฟล์ลำรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์จากข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการวัดปริมาณรังสีในน้ำที่ระยะความลึกที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุดเพื่อให้เกิดการตอบสนองต่อการวัดรังสีด้วยการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบที่เหมาะสม พบว่าโปรไฟล์ของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์จากการวัดรังสีในการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบพื้นที่ลำรังสีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร ที่พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ มีลักษณะแหลม (forward peak profile) บริเวณกลางลำรังสีมีค่าสูงกว่าด้านข้างซึ่งเป็นลักษณะโปรไฟล์ของการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โปรไฟล์ของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากประยุกต์โปรไฟล์ของน้ำในการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบที่ระดับความลึกที่ให้ปริมาณรังสีสูงสุดให้กับอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ โดยโปรไฟล์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในหน่วยพิกเซล (pixels) และค่าระดับความเข้ม (gray value) สำหรับพลังงาน (ก) 6 เมกะโวลต์ และ (ข) 10 เมกะโวลต์

2. การประเมินคุณลักษณะของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์

2.1 การทดสอบการตอบสนองต่อปริมาณรังสีที่ระยะทางต่างๆ

ผลการตอบสนองของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่ระยะ 120 เซนติเมตร พลังงาน 6 เมกะโวลต์ มีความสอดคล้องกับตามกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทาง โดยมีการลดลงของปริมาณรังสีตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น สำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ พบการอิ่มตัวของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่ระยะ 120–130 เซนติเมตร เนื่องจากฉายรังสีด้วยอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาสูง (2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที) ทำให้ในช่วงระยะทางดังกล่าว ค่าปริมาณรังสีไม่เป็นไปตามกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทาง ดังรูปที่ 2

2.2 การทดสอบระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมโดยทำให้การนับวัดรังสีไม่เกิดการอิ่มตัว

ผลการทดสอบการอิ่มตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาตั้งแต่ 400–1,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที ระยะทางตั้งแต่ 120–180 เซนติเมตร ในการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบด้วยพลังงาน 6 เมกะโวลต์ พบว่าที่ระยะ 150 เซนติเมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแคลลิเบชั่นยูนิตเท่ากับ ±1.35 สำหรับการทดสอบการอิ่มตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาตั้งแต่ 400–2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที และระยะทางตั้งแต่ 120–180 เซนติเมตร ด้วยพลังงาน 10 เมกะโวลต์ พบว่าการวัดค่าปริมาณรังสีที่ระยะ 180 เซนติเมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแคลลิเบชั่นยูนิตเท่ากับ ±1.64 และพบว่าสำหรับการวัดรังสีทั้งพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ เมื่อเพิ่มระยะทางมากขึ้นจะทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแคลลิเบชั่นยูนิตมีค่าลดลง (ตารางที่ 1)

เมื่อวิเคราะห์การตอบสนองของการวัดค่าปริมาณรังสีจากอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์กับการเปลี่ยนแปลงอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาจากกราฟดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าการวัดปริมาณรังสีในการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบของพลังงาน 6 เมกะโวลต์ เส้นกราฟเป็นเส้นตรงเรียบสำหรับระยะทาง 120–180 เซนติเมตร และการวัดปริมาณรังสีพลังงาน 10 เมกะโวลต์ พบว่าที่ระยะ 120 และ 130 เซนติเมตร เส้นกราฟเริ่มไม่เป็นเส้นตรงเรียบ โดยเริ่มไม่เรียบที่อัตราปริมาณรังสีต่อเวลา 1,600 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที สำหรับระยะทาง 120 เซนติเมตร และ 2,000 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที สำหรับระยะทาง 130 เซนติเมตร

2.3 การทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าปริมาณรังสี

ผลการเปลี่ยนแปลงค่ามอนิเตอร์ยูนิตตั้งแต่ 10–1,000 มอนิเตอร์ยูนิตที่อัตราการให้ปริมาณรังสีสูงสุด 1,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ และ 2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาที สำหรับพลังงาน 10 เมกะโวลต์ พบว่าการตอบสนองต่อการวัดรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเชิงเส้นตรงทั้งสองระดับพลังงานดังรูปที่ 4 โดยความ

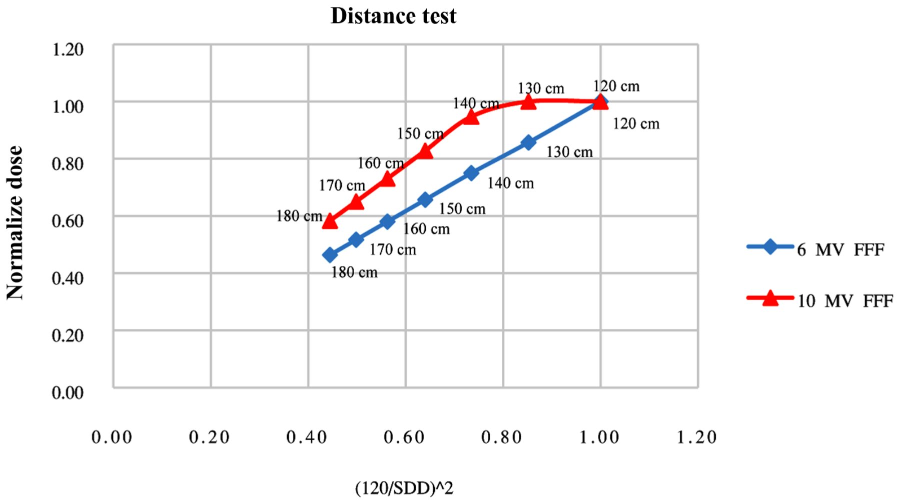
สัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสีในหน่วยมอนิเตอร์ยูนิตและค่าปริมาณรังสีในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิตที่นับวัดได้จากอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์มีค่า R^2 เท่ากับ 1 ทั้งสองระดับพลังงาน

2.4 การทดสอบการตอบสนองของค่าปริมาณรังสีต่อพื้นที่ลำรังสี

การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ลำรังสีจากการวัดด้วยอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่ลำรังสี โดยกำหนดขนาดพื้นที่สำหรับวัดค่าปริมาณรังสีเท่ากับ 20×20 พิกเซล จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากพื้นที่ลำรังสีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีระหว่างการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบ และไม่มีตัวกรองปรับเรียบ พบว่าค่าปริมาณรังสีทั้งสองระดับพลังงานของการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบมีค่าสูงกว่าการฉายแบบมีตัวกรองปรับเรียบ เมื่อพื้นที่ลำรังสีขนาดเล็กกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร และเมื่อพื้นที่ลำรังสีมีขนาดมากกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร พบว่าค่าปริมาณรังสีของการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบมีค่าสูงกว่าการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ แสดงดังรูปที่ 5 โดยมีความแตกต่างสูงสุดของการตอบสนองรังสีต่อพื้นที่ลำรังสีระหว่างแบบมีตัวกรองปรับเรียบ และไม่มีตัวกรองปรับเรียบ คือ ร้อยละ 5.50 และ 6.78 ที่ระดับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ตามลำดับ

วิจารณ์

การทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระยะทางของการฉายรังสีด้วยพลังงาน 10 เมกะโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าค่าปริมาณรังสีที่นับวัดได้ไม่เป็นไปตามกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทางที่ระยะ 120-130 เซนติเมตร เนื่องจากอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา 2,400 มอนิเตอร์ยูนิตต่อนาทีเป็นอัตราการให้รังสีสูงมาก ทำให้หัววัดรังสีของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เกิดการอิ่มตัว สอดคล้องกับงานของ Pardo และคณะ[5] ซึ่งพบว่าระยะต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่น้อยกว่า 140 เซนติเมตร เป็นระยะที่ทำให้อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์เกิดการอิ่มตัวที่พลังงาน 10 เมกะโวลต์ เมื่อเพิ่มระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่ 140-160 เซนติเมตร ส่งผลให้อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์สามารถนับวัดค่าปริมาณรังสีได้โดยไม่เกิดการอิ่มตัว



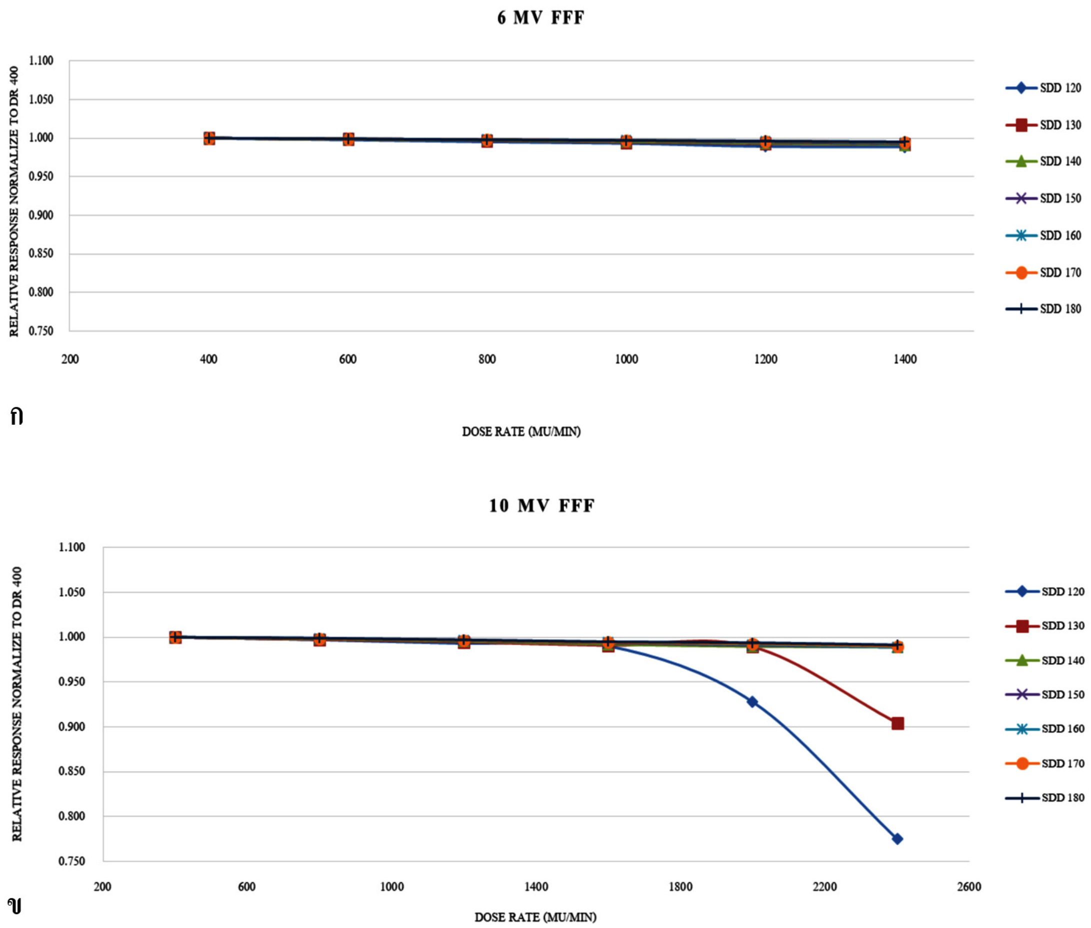
รูปที่ 2 กราฟการตอบสนองตามกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทางระหว่างระยะทางและค่าปริมาณรังสีในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิต โดยแกน x แสดงค่าระยะทางที่ทำการวัดค่าเปรียบเทียบกับระยะ 120 เซนติเมตร ทั้งหมดยกกำลังสอง (ISL) และแกน y แสดงค่าปริมาณรังสีที่ระยะต่างๆ เปรียบเทียบกับระยะ 120 เซนติเมตร

ตารางที่ 1 แสดงค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ปริมาณรังสีต่อเวลา และระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ ที่ระดับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ โดยใช้ปริมาณรังสีเท่ากับ 500 มอนิเตอร์ยูนิต

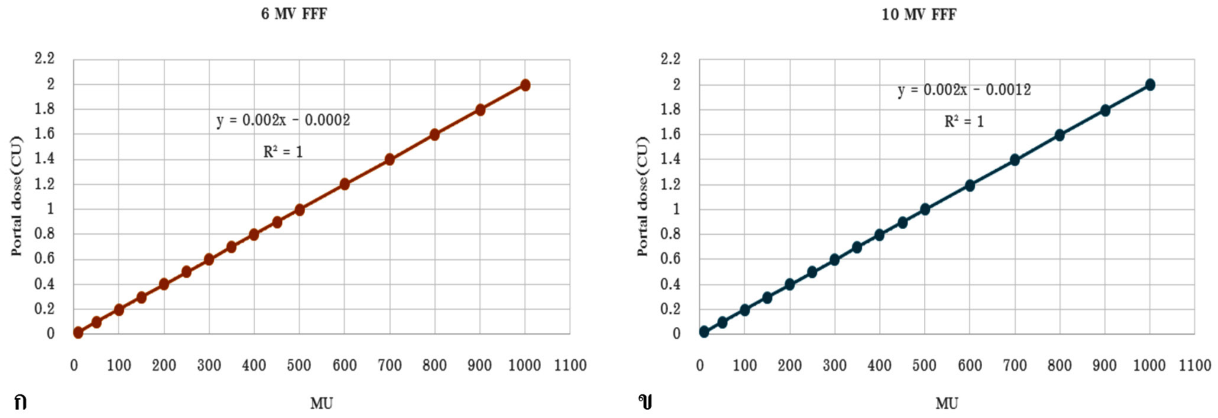
SDD (cm)	6 MV FFF, 500 MU							
	Dose rate (MU/min)							
	1400	1200	1000	800	600	400	AVG.	S.D.
120	765.26	765.51	768.61	770.10	772.14	773.76	769.23	3.45
130	655.66	656.27	657.59	659.10	660.32	661.09	658.34	2.19
140	567.53	568.59	569.72	570.86	571.63	572.38	570.12	1.85
150	497.18	498.20	499.05	499.62	500.32	500.81	499.20	1.35
160	439.42	440.20	440.75	441.19	441.81	442.16	440.92	1.02
170	391.38	391.92	392.30	392.81	393.18	393.53	392.52	0.81
180	351.14	351.52	351.89	352.17	352.56	352.85	352.02	0.64

SDD (cm)	10 MV FFF, 500 MU							
	Dose rate (MU/min)							
	2400	2000	1600	1200	800	400	AVG.	S.D.
120	852.82	1021.20	1089.86	1093.00	1097.51	1100.74	1042.52	97.61
130	851.89	931.85	933.28	936.79	939.45	941.97	922.54	34.81
140	805.88	806.35	808.25	810.97	813.09	814.77	809.88	3.65
150	704.32	705.66	707.60	709.46	711.09	712.17	708.38	3.08
160	621.33	623.13	624.79	626.16	627.45	628.34	625.20	2.66
170	553.13	554.70	555.49	556.91	557.94	558.79	556.16	2.12
180	496.13	497.36	497.93	499.03	499.96	500.46	498.48	1.64

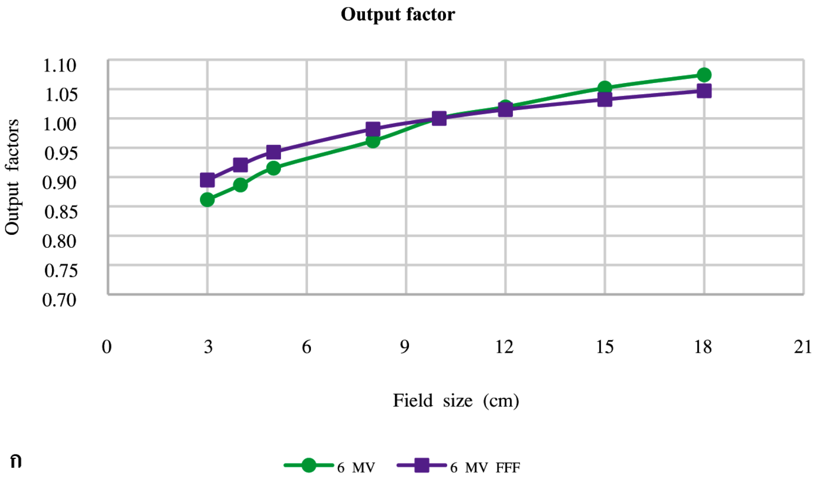
MV=megavoltage, FFF=flattening filter-free, MU=monitor unit, SDD=source-detector-distance, AVG=average S.D.=standard deviation



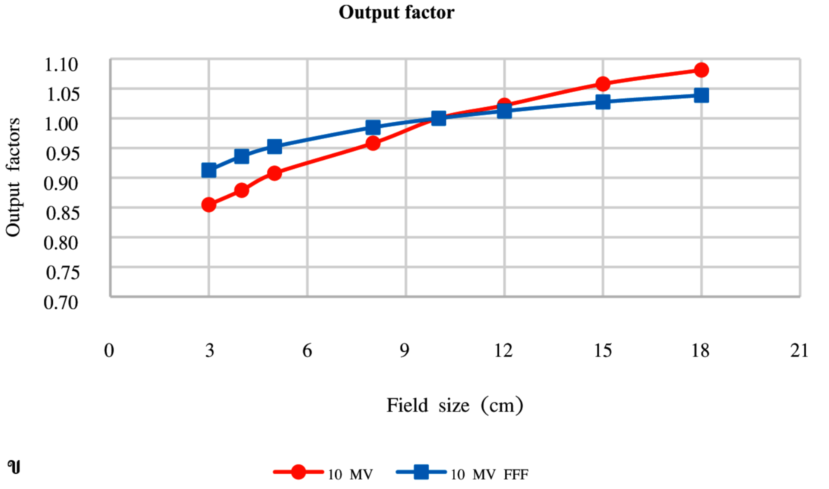
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาและค่าปริมาณรังสีในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิตของพลังงาน (ก) 6 และ (ข) 10 เมกะโวลต์ที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสีในหน่วยมอนิเตอร์ยูนิตและค่าปริมาณรังสีในหน่วยแคลลิเบชั่นยูนิตที่นับวัดได้จากอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ของพลังงาน (ก) 6 และ (ข) 10 เมกะโวลต์



ก



ข

รูปที่ 5 กราฟการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ลำรังสีระหว่างการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบและไม่มีตัวกรองปรับเรียบ ที่พลังงาน (ก) 6 และ (ข) 10 เมกะโวลต์ ในพื้นที่ลำรังสีขนาด 3×3 ถึง 18×18 ตารางเซนติเมตร

การทดสอบการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาและระยะทางพบว่าระยะ 150 และ 180 เซนติเมตร ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ มีความเหมาะสมสำหรับวัดปริมาณรังสีด้วยการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบของพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ตามลำดับ โดยที่ระยะดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับทุกค่าอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาของการฉายแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบได้

การทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าปริมาณรังสีที่อุปกรณ์รับภาพวัดได้และมอนิเตอร์ยูนิต พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในช่วง 10–1,000 มอนิเตอร์ยูนิตทั้งสองระดับพลังงาน ซึ่งช่วงมอนิเตอร์ยูนิตดังกล่าวเป็นช่วงที่ใช้ในการฉายรังสีแบบศัลยกรรมและการฉายรังสีร่วมพิกัดบริเวณลำตัว จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำอุปกรณ์รับภาพไปสอบเทียบเพื่อใช้ในการวัดรังสีแบบศัลยกรรมและการฉายรังสีร่วมพิกัดบริเวณลำตัวได้ และการทดสอบการตอบสนองของรังสีกับขนาดพื้นที่ลำรังสีพบว่าค่าปริมาณรังสีทั้งสองระดับพลังงานของการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบมีค่าสูงกว่าการฉายแบบมีตัวกรองปรับเรียบสำหรับพื้นที่ลำรังสีขนาด

เล็กกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร และเมื่อพื้นที่ลำรังสีมีขนาดมากกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร พบว่าการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบมีค่าปริมาณรังสีสูงกว่าการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ โดยพลังงานที่สูงขึ้นและขนาดพื้นที่ลำรังสีที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าปริมาณรังสีระหว่างการฉายรังสีทั้ง 2 แบบต่างกันมากขึ้น ความแตกต่างนี้มีผลจากการเกิดรังสีกระเจิง (scatter radiation) ภายในหัวของเครื่องเร่งอนุภาค โดยมีผลจากการใช้ตัวกรองปรับเรียบ ซึ่งจากการที่ตัวกรองปรับเรียบมีความหนาไม่เท่ากัน เมื่อเปิดรังสีที่มีขนาดแตกต่างกัน พลังงานเฉลี่ยของรังสีที่ผ่านตัวกรองปรับเรียบจึงมีผลจากขนาดของลำรังสีมาก ขณะที่การฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบมีพลังงานเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ขนาดลำรังสีต่างๆ ทำให้การเกิดรังสีกระเจิงภายในหัวของเครื่องหัวของเครื่องเร่งอนุภาคลดลง สอดคล้องกับงานของ Shende และคณะ[6] ซึ่งมีค่าปริมาณรังสีทั้งสองระดับพลังงานของการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบสูงกว่าการฉายแบบมีตัวกรองปรับเรียบสำหรับพื้นที่ลำรังสีขนาดเล็กกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร และเมื่อพื้นที่ลำรังสีมีขนาดมากกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร พบว่าค่าปริมาณรังสีของการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบมีค่าสูงกว่าการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบ เนื่องจากปริมาณรังสีขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ลำรังสีน้อยกว่าแบบมีตัวกรองปรับเรียบ โดยการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีลดลง

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบระยะทางที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำสำหรับวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าระยะทางที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำสามารถทำให้อุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์สามารถวัดการฉายรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบได้ในทุกๆค่าของอัตราปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา และสามารถใช้ระยะดังกล่าวเพื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าปริมาณรังสีที่อุปกรณ์รับภาพวัดได้ต่อค่ามอนิเตอร์ยูนิตและขนาดพื้นที่ลำรังสีได้

สรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติต่อการวัดรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบของอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ในด้านต่าง ๆ พบว่าสามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสีแบบไม่มีตัวกรองปรับเรียบได้ โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่างค่าปริมาณรังสีที่อุปกรณ์รับภาพวัดได้และมอนิเตอร์ยูนิต นอกจากนี้ยังพบว่าอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์รุ่นอะมอร์ฟัสซิลิคอน 1,000 สามารถวัดปริมาณรังสีได้ทุกค่าของอัตราการให้รังสีต่อหน่วยเวลา โดยการขยายระยะแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์รับภาพอิเล็กทรอนิกส์ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำเป็น 150 และ 180 เซนติเมตร สำหรับพลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งจะช่วยลดการอิ่มตัวของการวัดค่าปริมาณรังสีได้

เอกสารอ้างอิง

1. CamilleriJ, MazurierJ, Franck D, Dudouet P, Latorzeff I, FrancerіesX. 2D EPID dose calibration for pretreatment quality control of conformal and IMRT fields: a simple and fast convolution approach. PhysicaMedica 2016; 32: 133 - 40.
2. Mekuria Y, Bjorkqvist M, Kulmala J. Quality control and pre-treatment quality assurance application of EPID (as1000) for FF and FFF beam VMAT plans. MPI Journal 2015; 3: 120 - 5.
3. Nicolini G, Clivio A, Vanetti E, Krauss H, Fenoglietto P, Cozzi L, et al. Evaluation of an aSi-EPID with flattening filter free beams: applicability to the GLAaSalgorithm for portal dosimetry and first experience for pretreatment QA of RapidArc. Med Phys 2013; 40: 1 - 8
4. Chuter RW, Rixham PA, Weston SJ, Cosgrove VP. Feasibility of portal dosimetry for flattening filter-free radiotherapy. J Appl Clin Med Phys 2016; 17: 112 - 20.
5. Pardo E, Castro NJ, Molina MY, Ruiz MS. On flattening filter-free portal dosimetry. Med Phys 2016; 17: 132 - 45.
6. Shende R, Gupta G, Patel G, Kumar S. Commissioning of TrueBeam Medical Linear Accelerator: quantitative and qualitative dosimetric analysis and comparison of flattening filter (FF) and flattening filter free (FFF) Beam. International Journal of Medical Physics 2016; 5: 51 - 9.
7. Varian Medical Systems. Vision documentation: portal vision & dosimetry 6.5. Palo Alto: Varian Medical Systems; 2003.