

การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับพลังงานรังสีเอกซ์ 6 เมกะโวลต์ในงานรังสีรักษา

The study of characteristics of optically stimulated luminescence NanoDot dosimeter for 6 megavoltage x-ray energy in radiotherapy

ดวงกมล วรรณวิกรม¹, พาชื่น โพทัพ¹, คณนันท อุทิศสาร² และศุภวิทู สุขเพ็ง¹

¹ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก 65000

²กลุ่มงานรังสีรักษา โรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี จ.ลพบุรี 15000

ผู้นิพนธ์ประสานงาน

ศุภวิทู สุขเพ็ง

ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก 65000

อีเมล: supawitoos@nu.ac.th

Duangkamol Wannawikorn¹, Pachuen Potup¹, Kananan Utitsarn², Supawitoo Sookpeng¹

¹Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Naresuan University

²Department of Radiotherapy, Lopburi Cancer Hospital

Corresponding author

Supawitoo Sookpeng

Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Naresuan University, Phitsanulok, 65000

E-mail: supawitoos@nu.ac.th

Submitted: May 13, 2020

Revised: Jun 1, 2020

Accepted: Jun 2, 2020

บทคัดย่อ

หลักการและเหตุผล: งานรังสีรักษาใช้รังสีพลังงานสูงในการทำลายเซลล์มะเร็ง การตรวจสอบปริมาณรังสีเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยจะได้รับนั้นถูกต้อง อุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ถูกนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสี การศึกษาลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จึงเป็นสิ่งจำเป็นก่อนจะนำมาใช้ในทางคลินิก

วัตถุประสงค์: เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับโฟตอน 6 เมกะโวลต์

วัสดุและวิธีการ: ทำการวัดด้วยอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) โดยใช้โฟตอน 6 เมกะโวลต์ เพื่อประเมินคุณลักษณะอุปกรณ์ในการนับวัดปริมาณรังสีในหัวข้อดังต่อไปนี้ การจางหายของสัญญาณ ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี และการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี วัดปริมาณรังสีโดยทำการการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งเทคนิคระยะทางจากแหล่งกำเนิดไปยังอุปกรณ์วัดรังสี โอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (SAD) และเทคนิคระยะทางจากแหล่งกำเนิดไปหุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง (SSD) การตั้งค่าการทดลองและพารามิเตอร์เป็นไปตามการใช้งานทางคลินิก หลังจากการฉายรังสีทำการอ่านค่าอย่างน้อย 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ผลการศึกษา: ผลการจางหายของสัญญาณของอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีค่ามากกว่า 15% หลังการฉายรังสีทันทีหลังจากฉายรังสีวันที่ 5 เป็นต้นไป อุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ $\pm 2.5\%$ และการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า 0.05%/ครั้ง อุปกรณ์วัดรังสีนี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีอ้างอิงแบบเชิงเส้น โดยมีค่า R^2 คือ 0.9991 อุปกรณ์วัดรังสีมีการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสีที่มุมตั้งฉากกับอุปกรณ์เท่านั้น อุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอทไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ แต่การตอบสนองของอุปกรณ์วัดรังสีมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะทาง SSD

ข้อสรุป: การศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดรังสีก่อนการใช้งานต้องทำโดยผู้ใช้งาน เพื่อการวัดและตรวจสอบรังสีที่ถูกต้องแก่ผู้ป่วย โดยการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ นี้จะนำไปสู่การรักษาที่มีคุณภาพและลดความผิดพลาดในการรักษาได้

คำสำคัญ: อุปกรณ์วัดรังสี, โอเอสแอล, นาโนดอท, รังสีรักษา

Abstract

Background: Radiation therapy uses high energy photon beams to damage cancer cell. Dose verification is an important step to ensure that dose delivered to patient is accurate. Optically stimulated luminescence dosimeters (OSL) NanoDot has been used for beam dosimetry. The study of dosimetric characteristic of OSL NanoDot is necessary before using it for clinical practice.

Objective: To evaluate the performance of the OSL NanoDot for 6 MV photon beams.

Materials and Methods: Measurements were carried out with OSL nanoDot (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) using 6 MV photon beam to evaluate the dosimetric characteristic such as

fading characteristics, reproducibility, signal depletion per read out, angular dependence, dose linearity, dose rate dependence and source to surface distance dependence. Measurements were performed with source axis distance (SAD) and source to surface distance (SSD) technique. The experimental set-up and dose parameter were according to the clinical practice. After irradiation, individual OSL NanoDots were read out and repeated at least five times and the values were averaged.

Results: The fading result of NanoDot showed more than 15% signal loss after irradiation then. The signal is stable after five minutes after irradiation. The reproducibility $\pm 2.5\%$ and signal depletion per read out 0.05% signal per read out. The detector exhibited linearity with the R2 of 0.9991. The angular dependency when the beam was irradiated perpendicular to the detector. NanoDot is independence with dose rate. However, the signal was decreased when increased the source to surface distance.

Conclusions: The detector properties must be studied by the user before apply in dose verification for accurate determination of the entire dose on the patient. The investigation possible lead to excellent treatment quality and prevention of any dose errors.

Keywords: radiation dosimeter, OSL, NanoDot, radiotherapy

J Thai Assoc Radiat Oncol 2020; 26(2): R14-R29

บทนำ

รังสีรักษามีบทบาทสำคัญในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งซึ่งมีหลักสำคัญคือ ให้ปริมาณรังสีสูงสุดเพื่อทำลายเซลล์มะเร็งได้หมด ในขณะที่เนื้อเยื่อปกติในบริเวณใกล้เคียงได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุด^[1] ทั้งนี้ในปัจจุบันวิธีการวางแผนการรักษาด้วยเทคนิคขั้นสูงต่าง ๆ เพื่อปรับปริมาณรังสีให้เป็นไปตามหลักการข้างต้นได้อย่างเหมาะสม เช่น การฉายรังสีปรับความเข้ม (Intensity modulated radiation therapy: IMRT) และการฉายรังสีปรับความเข้มหมุนรอบตัวผู้ป่วย (Volumetric modulated arc therapy: VMAT) เนื่องจากแผนการรักษาที่มีความซับซ้อน การตรวจสอบแผนการฉายรังสีก่อนการรักษาจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อนำไปสู่การรักษาที่แม่นยำปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ^[2]

โดยทั่วไปการตรวจสอบแผนการฉายรังสีจะตรวจสอบทั้งปริมาณรังสีแบบจุดและการกระจายปริมาณรังสีในระนาบ 2 มิติ การวัดการกระจายปริมาณรังสีในระนาบ 2 มิติ สามารถใช้อุปกรณ์วัดรังสีชนิด อาร์เรย์ 2 มิติแบบไอออนไนเซชันหรือไดโอด เช่น MapCHECK และ MatriXX^[3, 4] อุปกรณ์วัดรังสีเหล่านี้มีข้อดี คือ ใช้งานง่าย สะดวกในการติดตั้งและสามารถทราบค่ารังสีได้ทันที แต่ยังมีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดเชิงพื้นที่โดยคุณลักษณะของ MapCHECK และ MatriXX ได้มีการศึกษาแล้วจาก Spezi^[4] EBT3 फिल्म เป็นอุปกรณ์วัดรังสีที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงและมีคุณสมบัติเทียบเท่าเนื้อเยื่อมนุษย์ แต่มีความซับซ้อนในการใช้งาน อีกทั้งต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์และแปลผลการนับวัดรังสี^[5, 6]

การวัดปริมาณรังสีแบบปริมาณรังสีแบบจุดสามารถวัดรังสีได้จากอุปกรณ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์วัดรังสีชนิดไอออนไนเซชันแคมเบอร์ อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ และอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ ไอออนไนเซชันแคมเบอร์ เป็นหนึ่งในอุปกรณ์นับวัดรังสีมาตรฐานที่ใช้สำหรับวัดปริมาณรังสีแบบจุด ซึ่งในเทคนิคการฉายรังสีปรับความเข้ม จะประกอบไปด้วยทิศทางการเข้าของลำรังสีการฉายรังสีเล็ก ๆ ซึ่งทิศทางการเข้าของลำรังสีนั้น ๆ อาจมีขนาดเล็ก เช่น 1x1 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นไอออนไนเซชันแคมเบอร์ ที่มีปริมาตรใหญ่ อาจเกิดปัญหาการวัดค่ารังสีไม่ถูกต้องเนื่องจากปรากฏการณ์ volume averaging^[7] อุปกรณ์วัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำมีความไวต่อรังสีสูง มีขนาดเล็ก ใช้งานง่ายแต่ผลการวัดขึ้นกับพลังงานปริมาณรังสี อุณหภูมิ และอัตราปริมาณรังสี^[4, 7-9] อุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ เป็นอุปกรณ์วัดรังสีที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าเนื้อเยื่อ สามารถนำมาใช้นับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง โดยที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสีและอัตราปริมาณรังสี แต่ข้อจำกัดคือ ระยะเวลาการวิเคราะห์ข้อมูลทีนาน ซึ่งอาจส่งผลต่อสัญญาณที่นับวัดได้ในการอ่านค่านับวัด อีกทั้งการอ่านค่านับวัดสามารถอ่านค่าได้เพียงครั้งเดียว (zeroed)^[10, 11]

อุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมาโดยเริ่มแรกถูกใช้งานในทางรังสีวินิจฉัยและสิ่งแวดล้อม^[12] ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง หรือเรียกว่า โอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (OSL NanoDot) ซึ่งมีคุณสมบัติและกระบวนการอ่านค่าปริมาณรังสีคล้ายคลึงกับอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ และสามารถอ่านค่าได้โดยการใช้แสงในการกระตุ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้งานและอ่านค่านับวัดซ้ำได้^[13] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสี เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใจลักษณะขอบเขตการใช้งาน ข้อจำกัดในการใช้งานของอุปกรณ์วัดรังสีนั้น ๆ และเพื่อเลือกใช้อุปกรณ์วัดรังสีที่เหมาะสมงานมีคณะผู้วิจัยในหลายสถาบันได้ทำการศึกษาคุณลักษณะอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในงานรังสีรักษา

อาทิ คุณสมบัติในการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) และตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)^[14-18] อย่างไรก็ตามยังขาดการศึกษาคุณลักษณะในบางหัวข้อ

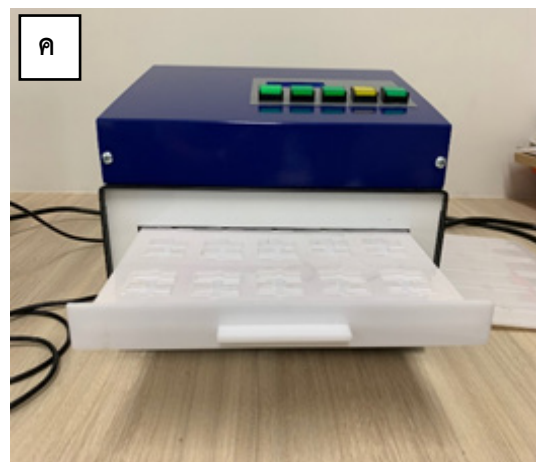
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพการนับวัดรังสีของอุปกรณ์วัดรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับรังสีรักษาพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ในหัวข้อคุณสมบัติการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) และการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ด้านการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีต่อไป

วัสดุและวิธีการ

ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) ขนาด 10x10 ตารางมิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ภายในเป็นผลึกของสารประกอบ $Al_2O_3:C$ (Aluminium oxide doped with carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรหนา 0.3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 (ก) พร้อมเครื่องอ่านค่านับวัด รุ่น micro Star (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) ดังภาพที่ 1 (ข) และเครื่องล้างข้อมูลการนับวัด Annealer รุ่น InLight (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) ดังภาพที่ 1 (ค) ทำการศึกษาโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (Linear accelerator) รุ่น VitalBeam ยี่ห้อ Varian (Varian Medical System. Inc., Palo Alto, CA, USA) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ได้ 6 และ 10 เมกะโวลต์ ส่วนพลังงานของรังสีเอกซ์ความเข้มสูง 6 เม

กะโวลต์ ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter free) ซึ่งการปรับเปลี่ยนอัตราปริมาณรังสี สามารถปรับได้ตั้งแต่ 5 - 600 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ สำหรับพลังงานของรังสีเอกซ์และ 400 - 1400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ พลังงานของรังสีเอกซ์ความเข้มสูง ส่วนพื้นที่ลำรังสีสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.5×0.5 ถึง 40×40 ตาราง

เซนติเมตร นอกจากนี้ยังใช้หุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง (Solid water phantom) ขนาด 30×30 ตารางเซนติเมตร หน้า 2 และ 5 เซนติเมตร และวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SuperFlab bolus) ขนาด 30×30 ตารางเซนติเมตร หน้า 1 เซนติเมตร



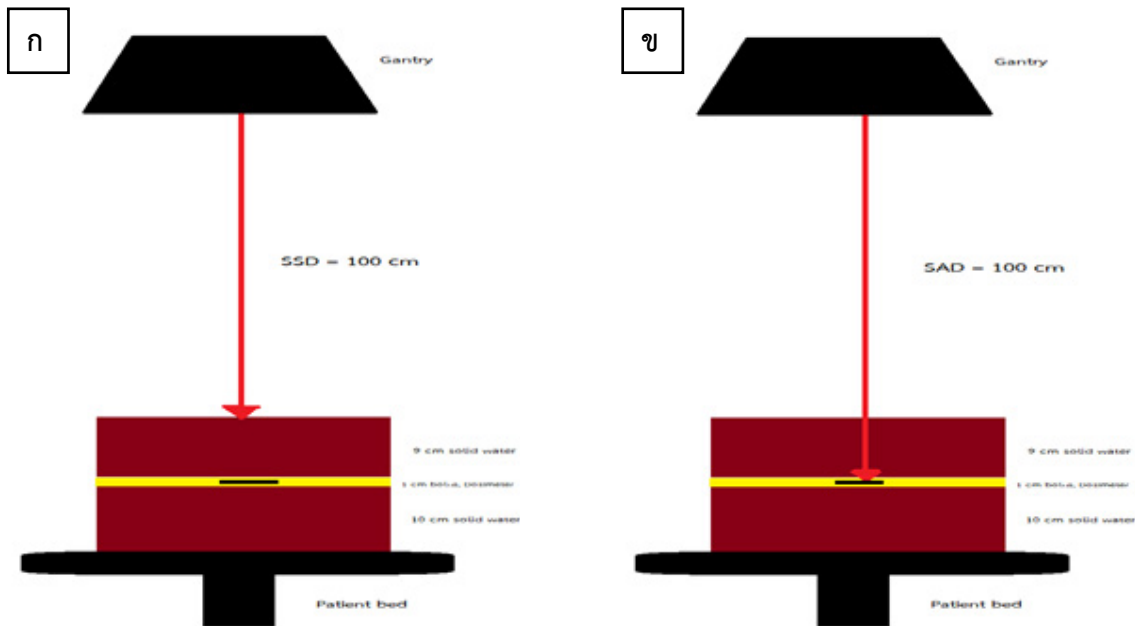
ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) (ก) แผ่นนาโนดอท (ข) เครื่องอ่านค่านับวัด รุ่น micro Star (ค) เครื่องล้างข้อมูลการนับวัด Annealer รุ่น InLight

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกกะโวลต์ทุกการทดสอบ โดยทำการจัดตั้งอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท บนหุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อหนา 1 เซนติเมตรและหุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจาก

แหล่งกำเนิดรังสีถึงหุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) ดังแสดงใน**ภาพที่ 2 (ก)** หรือระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท 100 เซนติเมตร (SAD) ดังแสดงใน**ภาพที่ 2 (ข)** โดยทำการศึกษาทั้งหมด 7 หัวข้อ ได้แก่ การจางหายของสัญญาณ ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ

การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี และการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี ซึ่งแต่ละการทดสอบจะทำการทดสอบซ้ำ

3 ครั้ง และในการอ่านค่านับวัดทำการอ่านค่าซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นนำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการศึกษาแต่ละหัวข้อจะมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีในการศึกษา ที่ตำแหน่ง central axis (ก) การติดตั้งอุปกรณ์ในเทคนิค SSD (ข) การติดตั้งอุปกรณ์ในเทคนิค SAD

1. การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics)

เพื่อศึกษาการจางหายของสัญญาณของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท หลังจากได้รับปริมาณรังสี และเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่านับวัดรังสี โดยจัดตั้งอุปกรณ์ด้วยเทคนิค SAD ตั้งหัวเครื่องฉายรังสีที่ 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิท/นาที่ ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ อ่านค่านับวัดหลังฉายรังสีตามเวลาดังนี้ 1, 2, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 240, 360, 480 นาที่

และทุก ๆ วัน โดยวัดจนครบทั้งหมด 30 วัน และผลของเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่านับวัดที่ได้จากการศึกษานี้จะนำไปใช้อ่านค่าปริมาณรังสีกับการศึกษาในหัวข้ออื่น ๆ

2. ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility)

เพื่อวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ซ้ำของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท หลังจากทำการลบสัญญาณนับวัดปริมาณรังสีและนำกลับมาใช้ซ้ำอีกรอบ การทดสอบทำการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร

ตั้งหัวเครื่องฉาย 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ โดยเมื่อฉายรังสีทำการอ่านค่านับวัดจากนั้นล้างข้อมูล และนำกลับมาฉายรังสีซ้ำแบบเดิมทั้งหมด 5 ครั้ง

3. การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out)

เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียของสัญญาณซึ่งเป็นผลของการอ่านค่าการนับวัดปริมาณรังสีซ้ำ ๆ โดยทำการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร ตั้งหัวเครื่องฉาย 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ อ่านค่านับวัดซ้ำจำนวน 100 ครั้ง โดยอ่านค่านับวัดห่างกันครั้งละ 5 นาที

4. ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity)

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และความเป็นเชิงเส้น โดยทำการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร ตั้งหัวเครื่องฉาย 0° เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ ฉายรังสีตั้งแต่ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 เซนติเกรย์

5. การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence)

เพื่อศึกษาการตอบสนองของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทาง การเข้าของลำรังสีในมุมต่าง ๆ โดยทำการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ SAD 100 เซนติเมตร เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ ปรับค่าหัวเครื่องฉายตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 องศา

6. การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)

เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ความเป็นอิสระต่ออัตราปริมาณรังสีหรือไม่ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราปริมาณรังสี โดยทำการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร ตั้งหัวเครื่องฉาย 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ เปลี่ยนอัตราปริมาณรังสีตั้งแต่ 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่

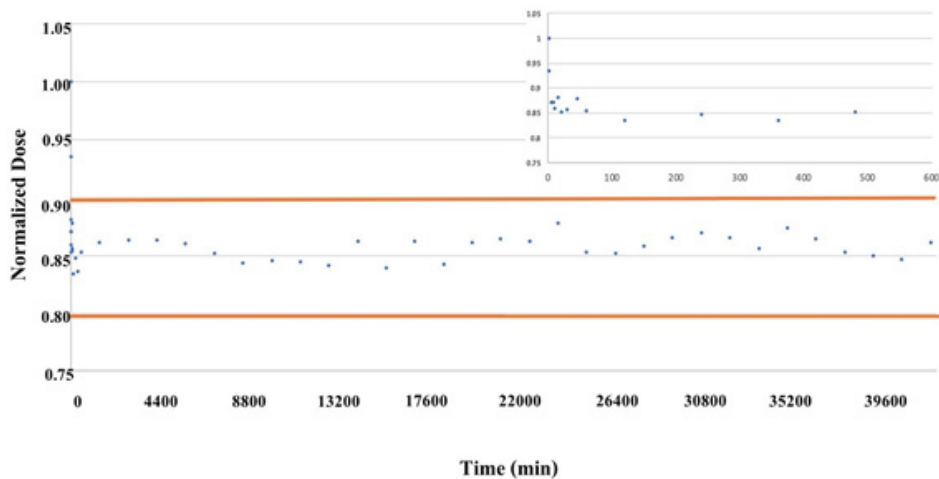
7. การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence)

เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ความเป็นอิสระต่อระยะทางที่ได้รับรังสีหรือไม่ ทั้งนี้ทำการปรับเปลี่ยนระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงพื้นผิวของหุ่นจำลองพลาสติกเทียบเท่าเนื้อเยื่อชนิดแข็ง โดยทำการจัดตั้งหัวเครื่องฉาย 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร อัตราปริมาณรังสี 400 มอนิเตอร์ยูนิต/นาที่ ฉายรังสี 200 เซนติเกรย์ จัดตำแหน่งของอุปกรณ์ ที่ระยะ SSD ต่าง ๆ ดังนี้ 70, 80, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 130 เซนติเมตร

ผลการศึกษา

1. การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics)

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา หลังการฉายรังสีและค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่าการนับวัดหลังฉายรังสี 1 นาที พบการจางหายของสัญญาณในช่วงระยะเวลา 5 นาทีแรก โดยค่าการนับวัดปริมาณรังสีจะลดลงร้อยละ 15 จากปริมาณรังสีของการอ่านค่าการนับวัดหลังฉายรังสี 1 นาที ซึ่งค่าปริมาณรังสีมีความแตกต่างกันน้อยลงและเริ่มเสถียรในนาทีที่ 5 ไปจนถึงวันที่ 30 ของฉายรังสี ซึ่งหลังจากฉายรังสี 5 นาทีที่เริ่มเสถียรจนถึง 30 วันหลังจากฉายรังสีมีความแตกต่างอยู่ในช่วง $\pm 2\%$

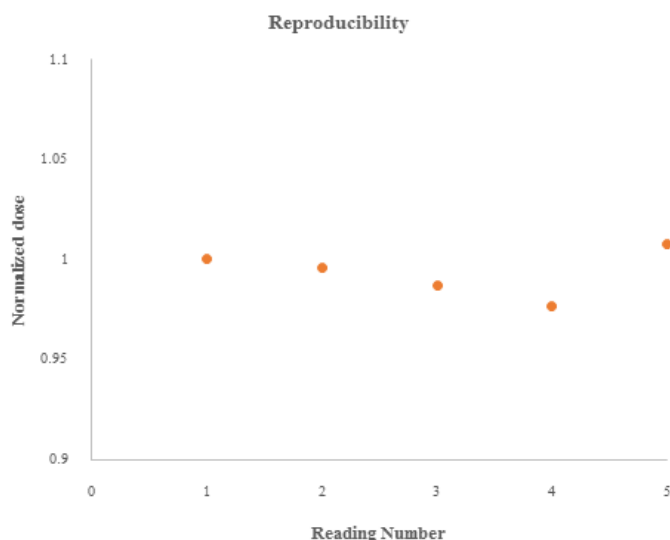


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาหลังการฉายรังสี (minutes) และค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose)

2. ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility)

ผลการทดสอบการนำกลับมาใช้ซ้ำของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท แสดงดังภาพที่ 4 ทำการ Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับ

วัดในครั้งแรก ซึ่งหลังจากนำอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ทำการล้างข้อมูลการนับวัดจากนั้นนำมาใช้ซ้ำและวัดปริมาณรังสีอีกครั้ง พบว่ามีค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีในช่วง $\pm 2.5 \%$

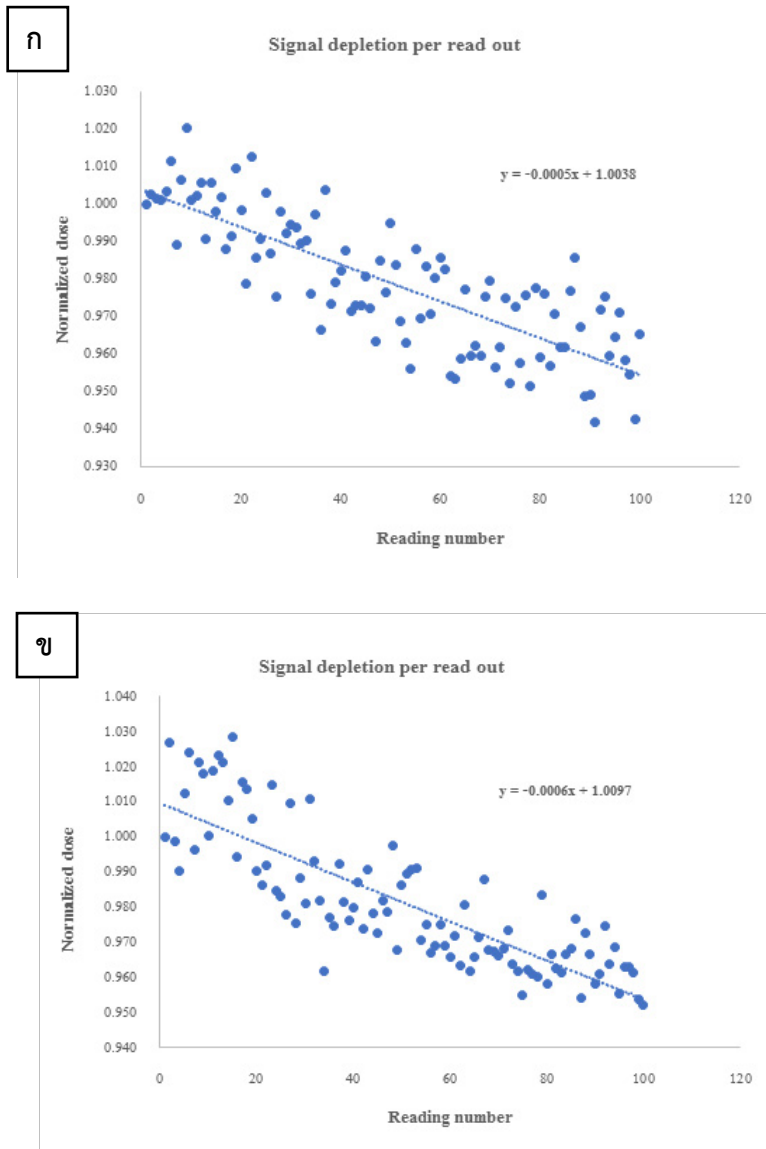


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการอ่านค่านับวัดของอุปกรณ์วัดรังสีและค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose)

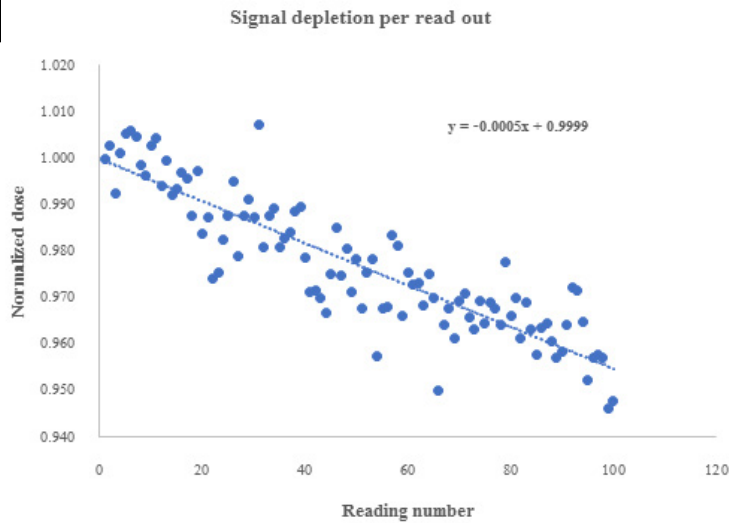
3. การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out)

ผลการทดสอบการอ่านค่าซ้ำของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอป พบว่าในช่วง 20 ครั้งแรก จะไม่มีการสูญเสียของสัญญาณการนับวัด หลังจากนั้นมีการสูญเสียสัญญาณ 0.05%/ครั้ง เมื่อเทียบกับการอ่าน

ค่านับวัดครั้งแรก ซึ่งการสูญเสียสัญญาณของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอป ทั้ง 3 ตัว เป็นไปในแบบเส้นตรงตามลำดับ ดังนี้ $y = -0.0005x + 1.0038$, $y = -0.0006x + 1.0097$ และ $y = -0.0005x + 0.9999$ ดังแสดงในภาพที่ 5



ค

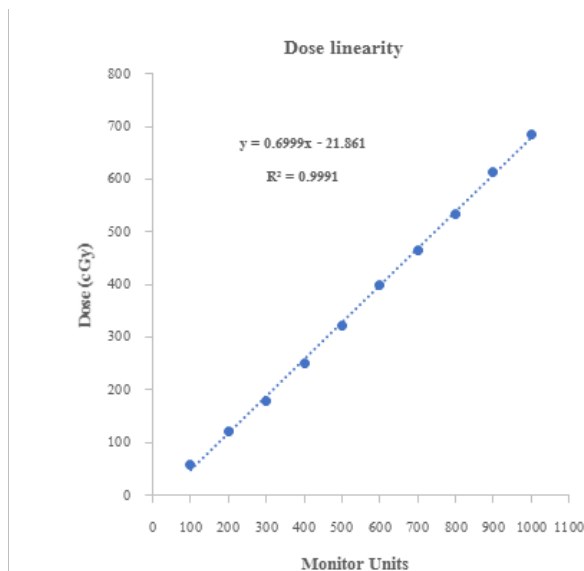


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่านับวัดซ้ำทั้งหมด 100 ครั้งและค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์(Normalized dose)
(ก) การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 1 (ข) การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 2 และ(ค) การทดสอบอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 3

4. ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่กำหนดให้และ
ปริมาณรังสีที่ได้รับ อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิด

นาโนดอท มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นโดยมีค่า
 $R^2 = 0.9991$ ดังแสดงในภาพที่ 6

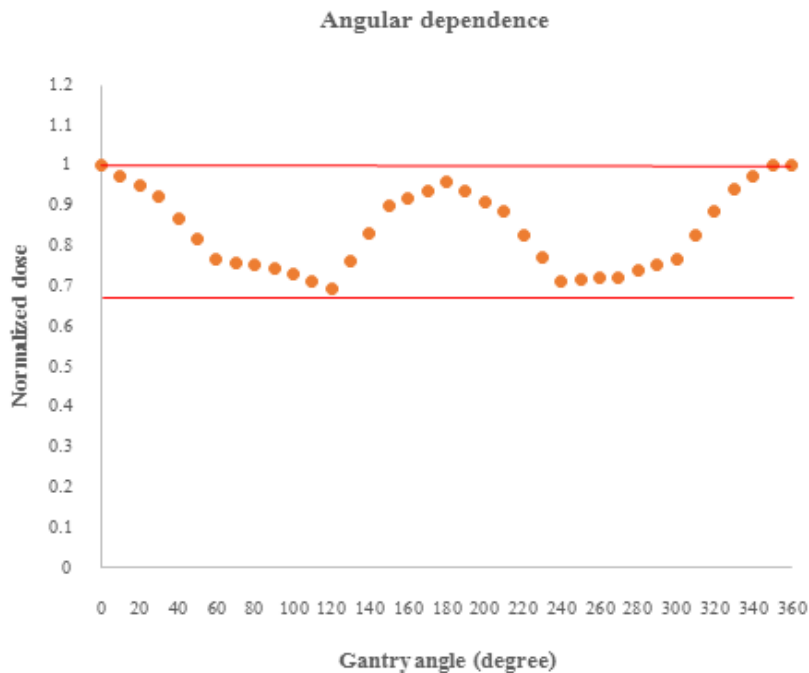


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีที่ให้ (MU) และปริมาณรังสีที่ได้รับ (cGy)

5. การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence)

ผลการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท พบว่า เมื่อมุมของทิศทางลำรังสีน้อยกว่า ± 10 องศา ค่าความแตกต่างของการตอบสนองต่อรังสีมีค่า 3% เมื่อเทียบกับที่มุม 0° และค่าความแตกต่างจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุม

ของทิศทางลำรังสีมากกว่า ± 10 องศา นอกจากนี้ยังพบว่า อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการตอบสนองต่อรังสีน้อยที่สุดที่มุม ± 120 องศา โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ที่ 31% ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยทำการ Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในมุม 0 องศา

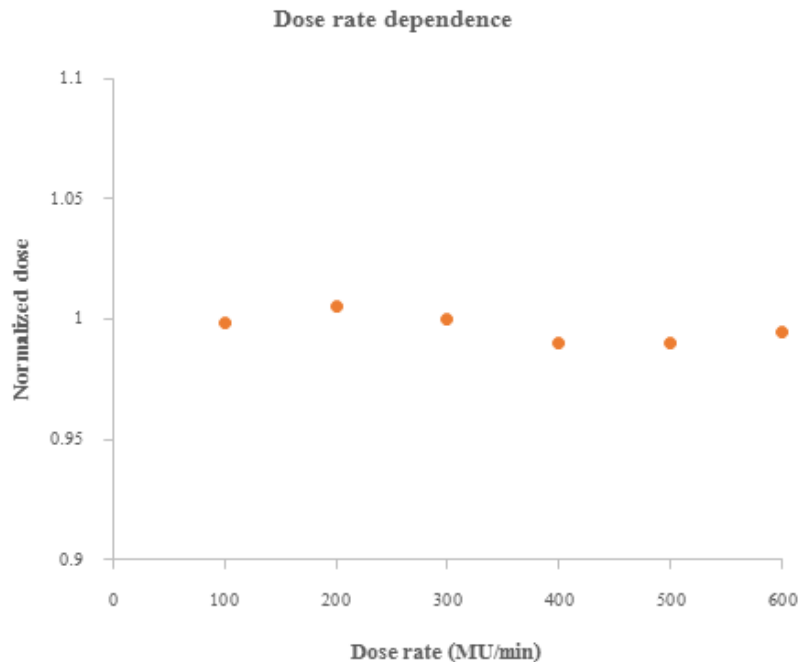


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนหมุน (degree) และปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose)

6. การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)

ผลการทดสอบการตอบสนองของอัตราปริมาณรังสี โดยทำการ Normalized dose จากอัตราปริมาณรังสี

300 MU/min พบว่า อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีความแตกต่างของการนับวัดอยู่ในช่วงอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ $0.9962 \pm 0.0060\%$ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปริมาณรังสี (MU/min) และปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose)

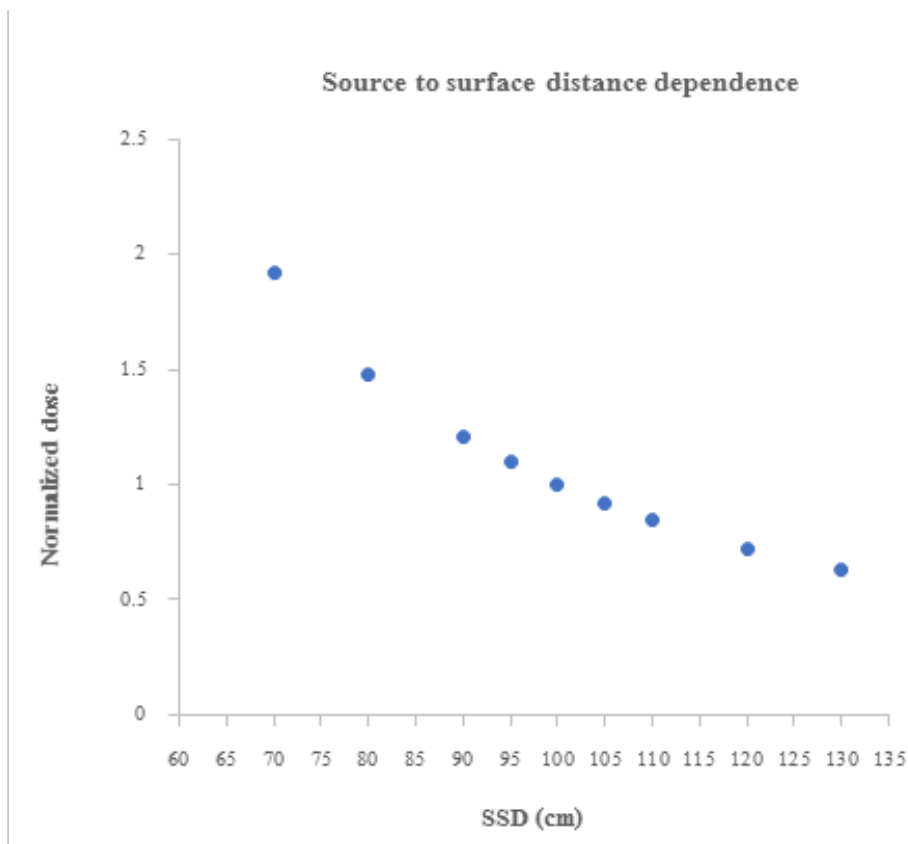
7. การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence)

ผลการทดสอบการตอบสนองของระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิว พบว่า เมื่อระยะทางที่ได้รับรังสีเปลี่ยนแปลงไป ปริมาณรังสีจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ตอบสนองต่อรังสีน้อยสุดที่ระยะ 130 เซนติเมตร (62.63%) และตอบสนองต่อรังสีมากที่สุดที่ระยะ 70 เซนติเมตร (191.65%) ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยทำการ Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในระยะทางที่ได้รับรังสี 100 เซนติเมตร

บทวิจารณ์

จากการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เพื่อใช้ในงานรังสีรักษาด้วยการใช้รังสีเอกซ์ 6 เมกะโวลต์ แสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์วัดรังสี

ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่สามารถอ่านค่านับวัดได้ทันทีหลังจากทำการฉายรังสี เนื่องจากยังไม่เกิดการเสถียรของชั้นอิเล็กตรอน โดยกระบวนการดูดกลืนปริมาณรังสีของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีหลักการคือ ต้องให้อิเล็กตรอนภายในตกลงไปยังชั้นของกักตุนอิเล็กตรอนจนเสถียร จากนั้นจึงนำไปอ่านค่าโดยการกระตุ้นด้วยแสงจะได้ค่าการนับวัดที่แม่นยำ การศึกษานี้พบว่า การอ่านค่านับวัดจะเริ่มเสถียรและเหมาะสมในอ่านค่านับวัดที่ระยะเวลา 5 นาทีหลังจากการฉายรังสี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Jursinic^[16] และ Ponmalar^[17] แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์ซึ่งผู้ทำการวิจัยไม่มีเครื่องอ่านค่านับวัด รุ่น micro Star จึงส่งอุปกรณ์ไปทำการอ่านค่านับวัด การศึกษานี้จึงทำการอ่านค่านับวัดหลังจากการฉายรังสีไปแล้ว 48 ชั่วโมง โดยค่าความแตกต่างของการจางหายของสัญญาณภายใน 30 วันหลังการฉายรังสีอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ในการ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระยะที่ได้รับรังสี (cm) และปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose)

ตอบสนองต่อการวัดปริมาณรังสีซ้ำนั้น มีความเชื่อมั่นในการใช้อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ซ้ำอยู่ที่ 97 % โดยส่วนหนึ่งอาจเพราะสภาพแวดล้อมหรืออุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้การนับวัดมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดสอบของ Ponmalar^[17] สำหรับการตอบสนองต่อการอ่านค่านับวัดซ้ำ อัตราการสูญเสียสัญญาณสามารถอธิบายทางคณิตศาสตร์ได้ โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบเส้นตรง จากการศึกษาี้แสดงให้เห็นการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านคือ 0.0005 มิลลิเกรย์ (0.05%) ของสัญญาณปัจจุบันและในการอ่าน

ค่านับวัดซ้ำในช่วง 20 ครั้งแรกไม่สูญเสียสัญญาณการนับวัด ผลการศึกษานี้คล้ายกับ Jursinic^[16] และ Ponmalar^[17] ส่วนการตอบสนองต่อขนาดปริมาณรังสี มีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นโดยมีค่า $R^2 = 0.9991$ (Linearity) ซึ่งมีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นถึง 600 เซนติเกรย์ โดยผลการทดสอบที่ได้เป็นในแนวทางเดียวกันกับการทดสอบที่ผ่านมาของ Jain^[15], Jursinic^[16], Ponmalar^[17] และ Viamonte^[18] จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในทางรังสีรักษาได้ สำหรับการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี พบว่า อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่เป็นอิสระเชิงมุม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่าน ๆ มาของ Jursinic^[16] และ Viamonte^[18] ซึ่งใน

ช่วงที่ G100-G160 และ G320-G340 จะเป็นช่วงที่ไม่สามารถนับวัดค่าปริมาณรังสีได้ เนื่องจากมีความแตกต่างมากกว่า 31% อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอทจึงขึ้นกับทิศทางเข้าของรังสี สามารถนับวัดปริมาณรังสีได้ถูกต้องที่สุดเมื่อให้อุปกรณ์วางตั้งฉากกับลำรังสี G0 ส่วนในการนับวัดที่มุมอื่น ๆ จำเป็นที่ต้องหาค่าแก้เรื่องมุมการเข้านั้น ๆ ในการศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสีที่ได้รับ การทดสอบนี้สอดคล้องกับการทดสอบที่ผ่านมาของ Jain^[15], Ponmalar^[17] และ Viamonte^[18] โดยมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันดังนี้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นอิสระต่ออัตราปริมาณรังสี สามารถสังเกตได้จากข้อมูลที่นับวัดโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.5% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการเพิ่มของจำนวนของอิเล็กตรอน ที่กลับมายังชั้นกับดักที่มีอัตราปริมาณรังสีที่สูงขึ้น ทำให้มีสัญญาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากในชั้นกับดักมีอิเล็กตรอนที่มากขึ้น และในการตอบสนองต่อระยะที่ได้รังสี ซึ่งเป็นระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสี อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นปริมาณรังสีที่นับวัดได้จะลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎผกผันกำลังสอง (Inverse square law) โดยการทดสอบที่เป็นมีความสัมพันธ์คล้ายกับการทดสอบของ Ponmalar^[17]

จากการศึกษาจะเห็นว่า การเข้าใจลักษณะคุณสมบัติ และข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอทเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อการนำไปใช้งานที่เหมาะสม การใช้อุปกรณ์วัดรังสีชนิดนี้ในการประกันคุณภาพหรือยืนยันปริมาณรังสีให้แก่ผู้ป่วยในทางรังสีรักษาจึงเป็นไปได้ เพื่อเป็นการยืนยันว่าผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่

เหมาะสมและสามารถนำมาใช้ในกระบวนการตรวจสอบการฉายรังสีก่อนนำไปฉายแก่ผู้ป่วยได้

สรุป

การวิจัยนี้พบว่าอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีคุณลักษณะการตอบสนองต่อรังสีอย่างเป็นเชิงเส้นในช่วงปริมาณรังสีของรังสีรักษา เป็นอิสระต่ออัตราปริมาณรังสีแต่ขึ้นกับระยะทางในการวางอุปกรณ์จากแหล่งกำเนิด ซึ่งระยะเวลาในการอ่านค่านับวัดที่เหมาะสม คือช่วงระยะเวลาหลังฉายรังสี 5 นาที นอกจากนี้ อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สามารถนำกลับมานับวัดซ้ำได้ ดังนั้นอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำมาใช้ในทางรังสีรักษาได้ การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีมีความจำเป็นในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีที่ใช้ฉายกับผู้ป่วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคลากรกลุ่มงานรังสีรักษา โรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือ ขอขอบคุณคุณสิริชัย เจริญรัตนกุล Senior Sales Executive/ Technical Personal Radiation Monitoring Service บริษัทนาคาเซ ประเทศไทย และขอขอบคุณบริษัทนาคาเซ ประเทศไทย สำหรับการเอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และคณะสหเวชศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับสถานที่ในการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

1. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์. หลักการรักษาด้วยรังสี. [cited 2020 10 march]; Available from: <https://www.chulacancer.net/patient-list-page.php?id=420>.
2. Agazaryan N. Patient specific quality assurance for the delivery of intensity modulated radiotherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2003;4(1):40.
3. Son J, Baek T, Lee B, Shin D, Park SY, Park J, et al. A comparison of the quality assurance of four dosimetric tools for intensity modulated radiation therapy. *Radiology and oncology*. 2015 Sep;49(3): 307-313.
4. Spezi E, Angelini AL, Romani F, Ferri A. Characterization of a 2D ion chamber array for the verification of radiotherapy treatments. *Physics in medicine and biology*. 2005 Jul 21;50(14):3361-3373.
5. Campajola L, Casolaro P, Capua FD. Absolute dose calibration of EBT3 Gafchromic films. *Journal of Instrumentation*. 2017;12(08):P08015-P.
6. Devic S, Tomic N, Lewis D. Reference radiochromic film dosimetry: Review of technical aspects. *Physica medica : PM : an international journal devoted to the applications of physics to medicine and biology : official journal of the Italian Association of Biomedical Physics*. 2016 Apr;32(4):541-556.
7. Syam Kumar SA, Sukumar P, Sriram P, Rajasekaran D, Aketi S, Vivekanandan N. A patient-specific quality assurance study on absolute dose verification using ionization chambers of different volumes in RapidArc treatments. *Medical dosimetry : official journal of the American Association of Medical Dosimetrists*. 2012 Winter;37(4):436-441.
8. Carlino A, Stock M, Zagler N, Marrale M, Osorio J, Vatnitsky S, et al. Characterization of PTW-31015 PinPoint ionization chambers in photon and proton beams. *Physics in medicine and biology*. 2018 Sep 19;63(18):185020.
9. Low DA, Parikh P, Dempsey JF, Wahab S, Huq S. Ionization chamber volume averaging effects in dynamic intensity modulated radiation therapy beams. *Medical physics*. 2003 Jul;30(7):1706-1711.
10. ศุภวิทู สุขเพ็ง. เครื่องมือวัดปริมาณรังสีเอกซ์: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2016:67 - 91.
11. Alvarez P, Kry SF, Stingo F, Followill D. TLD and OSLD dosimetry systems for remote audits of radiotherapy external beam calibration. *Radiat Meas*. 2017 Nov;106:412-425.
12. จินดา ทองเรือง สิริชัย, เขียวรัตนกุล และวีรชัย ดิษฐ์พัฒน์. คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับงานรังสีวินิจฉัย. *กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์*. 2016; 158(3):141-148.
13. Landauer N. OSL Dosimeters. [cited 2020 10 march]; Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/dosimeters.html>.

14. Dunn L, Lye J, Kenny J, Lehmann J, Williams I, Kron T. Commissioning of optically stimulated luminescence dosimeters for use in radiotherapy. *Radiation Measurements*. 2013;51-52: 31-39.
15. Jain GK, Chougule A, Kaliyamoorthy A, Akula SK. Study of dosimetric characteristics of a commercial optically stimulated luminescence system. *Journal of Radiotherapy in Practice*. 2017;16(4): 461-475.
16. Jursinic PA. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements. *Medical physics*. 2007 Dec;34(12): 4594-4604.
17. Ponmalar R, Manickam R, Ganesh KM, Saminathan S, Raman A, Godson HF. Dosimetric characterization of optically stimulated luminescence dosimeter with therapeutic photon beams for use in clinical radiotherapy measurements. *Journal of cancer research and therapeutics*. 2017 Apr-Jun;13(2):304-312.
18. Viamonte A, da Rosa LA, Buckley LA, Cherpak A, Cygler JE. Radiotherapy dosimetry using a commercial OSL system. *Medical physics*. 2008 Apr;35(4): 1261-1276.