



คุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ



ดวงกมล วรรณวิกรม์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์การแพทย์  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัตปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์การแพทย์  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "คุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ"

ของ ดวงกมล วรณวิกรม

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์การแพทย์

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.พวงเพ็ญ ตั้งบุญดวงจิตร์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวิฑู สุขเพ็ญ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาชื่น โททัท)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัสสรีย์ ชีพสุมนต์)

อนุมัติ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	คุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ
<b>ผู้วิจัย</b>	ดวงกมล วรรณวิกรม์
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภวิฑู สุขเพ็ญ
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาชื่น โททัฬ
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์การแพทย์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563
<b>คำสำคัญ</b>	อุปกรณ์วัดรังสี, ไอเอสแอล, นาโนดอท, รังสีรักษา

### บทคัดย่อ

อุปกรณ์นับวัดรังสีเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่จะฉายรังสีให้แก่ผู้ป่วย ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดรังสีจึงมีความจำเป็น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ โดยทำการศึกษาลักษณะการจางหายของสัญญาณ การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี การตอบสนองต่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสี และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี โดยทำการฉายรังสีไปยังอุปกรณ์วัดรังสี ด้วยเทคนิคระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับจุดรวมลำรังสี และเทคนิคระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับพื้นผิว ตั้งค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบตามการใช้งานทางคลินิก หลังจากการฉายรังสีทำการอ่านค่านับวัด ผลการศึกษาพบว่า ค่านับวัดอ่านที่เวลา 5 และ 8 นาทีภายหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณอยู่ในช่วงร้อยละ 13 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบตามลำดับ และค่านับวัดอ่านที่เวลา 30 วันภายหลังการฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 5 การสูญเสียสัญญาณจากการอ่านค่านับวัดรังสีขึ้นอยู่กับที่ ร้อยละ 0.05 ต่อการอ่านค่า อุปกรณ์นับวัดรังสีมีลักษณะการตอบสนองของปริมาณรังสีไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี แต่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสี และระยะทางที่ได้รับรังสี อีกทั้งตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นสำหรับปริมาณรังสีไม่เกิน 300 เซนติเกรย์ สำหรับทั้งพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

<b>Title</b>	CHARACTERISTICS OF NANODOT OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE DOSIMETER IN 6 MV FLATTENING FILTER FREE PHOTON BEAM
<b>Author</b>	DUANGKAMOL WANNAWIKORN
<b>Advisor</b>	Associate Professor Supawitoo Sookpeng, Ph.D.
<b>Co-Advisor</b>	Assistant Professor Pachuen Potup, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	Thesis M.S. in Medical Physics, Naresuan University, 2020
<b>Keywords</b>	Radiation dosimeter, OSL, Nanodot, Radiation therapy

### ABSTRACT

A radiation dosimeter is an essential device used for verification of patients radiation dose. The knowledge of the characterization of a dosimeter is crucial. The research aimed to study the dosimetric characteristics of optically stimulated luminescence (OSL) nanoDot for 6 megavoltage (MV) photon beam with Flattening Filter (FF) and 6 MV photon beam with Flattening Filter Free (FFF). Fading characteristics, signal depletion per readout, reproducibility, dose rate dependence, angular dependence, source to surface distance (SSD) dependence, and dose linearity were evaluated. The measurements were carried out with Source to Axis Distance (SAD) and SSD techniques using all available parameters used in the clinical range. The signal was read out after irradiation. The results revealed that the signal read at 5 and 8 minutes after irradiation were 15% faded for 6 MV photon beam with FF and 6 MV photon beam with FFF respectively, and those for 30 days were 5% in addition. The signal loss per read out was found to be 0.05%. The radiation response was found to be dose rate independent but angular and SSD dependences. It also responds dose linearity for the dosimeter was observed for doses up to 300 cGy, for both 6 MV photon beam with FF and 6 MV photon beam with FFF.

## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวิทู สุขเพ็ง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาชื่น โปทัพ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อุทิศสละเวลาอันมีค่ามากมาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ดร.พวงเพ็ญ ตั้งบุญดวงจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัสสุรีย์ ชีพสุมนต์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

กราบขอบพระคุณดร.คณนันท อุทิศสารและคุณคมกริช ครอบเกียรติเลิศ นักฟิสิกส์การแพทย์ กลุ่มงานรังสีรักษา โรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี และผู้อำนวยการโรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีในการเข้าไปทำวิจัยและเก็บข้อมูล

ขอขอบพระคุณคุณศิริชัย เขียวรัตน์กุล Senior Sales Executive/Technical Personal Radiation Monitoring Service บริษัทนากาเซ่ ประเทศไทย และขอขอบพระคุณบริษัทนากาเซ่ ประเทศไทย สำหรับการเอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้ ทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ที่แสดงให้เห็นถึงการคำนึงในการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับนับวัดปริมาณรังสีต่อผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

ดวงกมล วรณวิกรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศศุญชุปการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
อักษรย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท.....	4
2.1.1 ลักษณะและหลักการทำงาน.....	4
2.1.2 หลักการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี.....	6
2.1.3 หลักการล้างค่าปริมาณรังสี.....	8
2.2 การฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter: FF).....	9
2.3 การฉายรังสีแบบไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter free: FFF).....	10

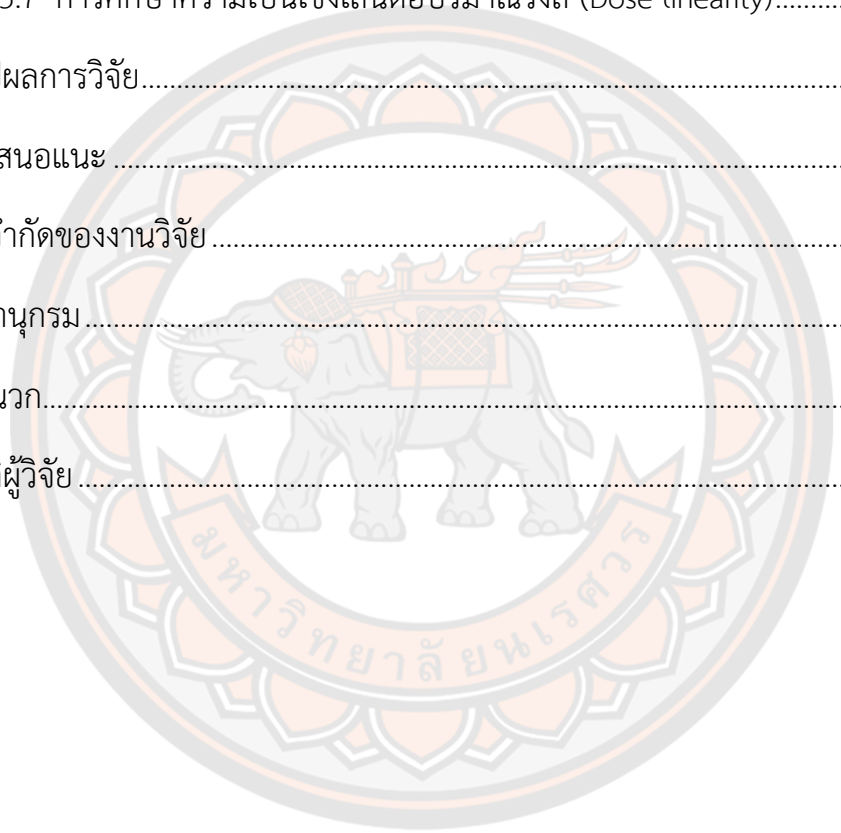


บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.1.1 ชุดอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA).....	22
3.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Linear accelerator).....	24
3.1.3 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง (Solid water phantom).....	25
3.1.4 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SuperFlab bolus).....	26
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	27
3.2.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics).....	27
3.2.2 การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out).....	28
3.2.3 ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility).....	29
3.2.4 การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence).....	30
3.2.5 การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence).....	31
3.2.6 การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence).....	31
3.2.7 ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity).....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	35
4.1 ลักษณะการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics).....	35
4.1.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	35
4.1.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	41
4.2 การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out).....	46
4.2.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	46



4.2.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	48
4.3	การวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) .....	50
4.3.1	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	50
4.3.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	52
4.4	การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) .....	54
4.4.1	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	54
4.4.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	56
4.5	การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence).....	58
4.5.1	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	58
4.5.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	61
4.6	การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence).....	64
4.6.1	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	64
4.6.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	66
4.7	ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity) .....	68
4.7.1	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	68
4.7.2	พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	70
บทที่ 5	บทสรุป.....	72
	อภิปรายผล .....	72
5.1	การศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics).....	72
5.2	การศึกษาการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) .....	73

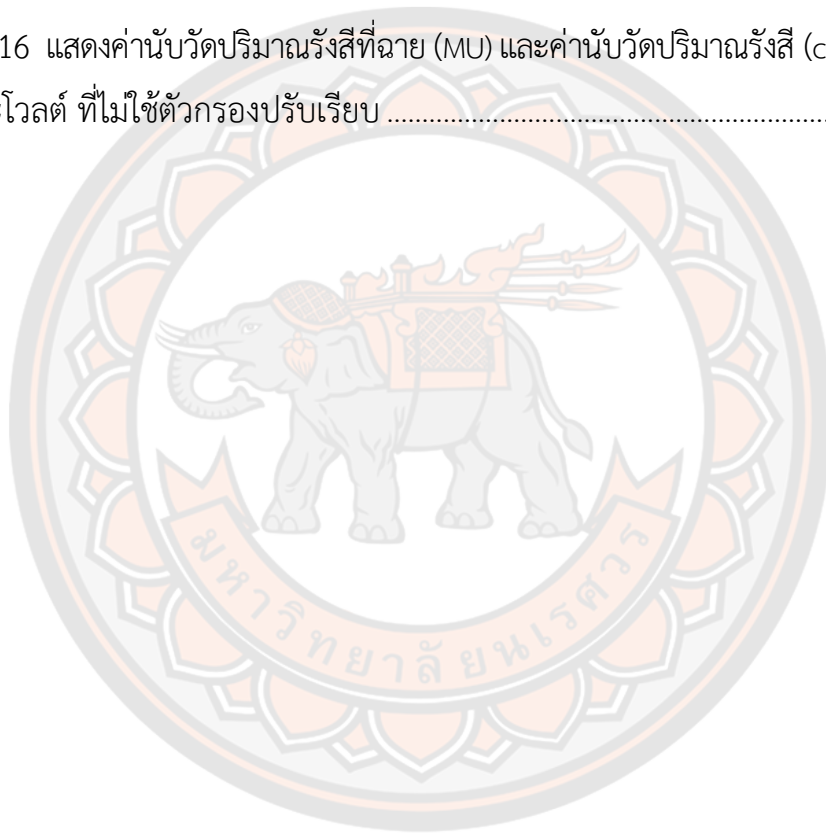
5.3 การศึกษาการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility).....	74
5.4 การศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence).....	74
5.5 การศึกษาการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence).....	75
5.6 การศึกษาการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence).....	76
5.7 การศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity).....	76
สรุปผลการวิจัย.....	77
ข้อเสนอแนะ.....	77
ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	78
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้วิจัย.....	101



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงสรุปการศึกษาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	20
ตาราง 2 แสดงข้อมูลจำเพาะเครื่องเร่งอนุภาค .....	25
ตาราง 3 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 480 นาที่ภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	36
ตาราง 4 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	37
ตาราง 5 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 480 นาที่ภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	41
ตาราง 6 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	42
ตาราง 7 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ....	50
ตาราง 8 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ..	52
ตาราง 9 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่อัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	54
ตาราง 10 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่อัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	56
ตาราง 11 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	58
ตาราง 12 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	61

ตาราง 13 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	64
ตาราง 14 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	66
ตาราง 15 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ฉาย (MU) และค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	68
ตาราง 16 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ฉาย (MU) และค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	70



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท.....	4
ภาพ 2 แผนภาพกระบวนการดูดกลืนแสงตัวเลขในแผนภาพแสดงกระบวนการดังนี้ ตามลำดับ 1. อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ดูดกลืนพลังงานรังสีเคลื่อนที่สู่แถบนำไฟฟ้าและ ถูกดักจับที่ ชั้นดักจับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ เนื่องจากการสูญเสีย อิเล็กตรอน 2. อิเล็กตรอนในชั้นดักจับโฮลเคลื่อนที่มาแทนโฮลในแถบวาเลนซ์ .....	5
ภาพ 3 แผนภาพกระบวนการเปล่งแสง ตัวเลขในแผนภาพแสดงกระบวนการดังนี้ ตามลำดับ 1. พลังงานแสงสีเขียวกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นดักจับอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มา รวมกับโฮลในชั้นดักจับโฮล (Recombination) 2. สารกึ่งตัวนำกลับสู่สภาวะเสถียร .....	6
ภาพ 4 หน้าต่างโปรแกรมเมื่ออ่านด้วยเครื่องอ่าน รุ่นไมโครสตาร์.....	7
ภาพ 5 การฉายรังสีและกราฟโปรไฟล์ของลำรังสีมีตัวกรองปรับเรียบ .....	9
ภาพ 6 การฉายรังสีและกราฟโปรไฟล์ของลำรังสีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	11
ภาพ 7 ลักษณะอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท .....	22
ภาพ 8 ชุดอุปกรณ์ MicroStar Reader .....	23
ภาพ 9 ชุดอุปกรณ์ Annealer รุ่น InLight .....	23
ภาพ 10 เครื่องเร่งอนุภาค รุ่น Vitalbeam .....	24
ภาพ 11 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง (Solid water phantom).....	25
ภาพ 12 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SuperFlab bolus).....	26
ภาพ 13 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ตำแหน่ง Central axis ในเทคนิค SSD .....	33
ภาพ 14 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ตำแหน่ง Central axis ในเทคนิค SAD .....	34

ภาพ 15 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 60 นาทีภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	38
ภาพ 16 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 7 วันภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	39
ภาพ 17 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 30 วันภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	40
ภาพ 18 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 60 นาทีภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	43
ภาพ 19 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 7 วันภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	44
ภาพ 20 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 30 วันภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	45
ภาพ 21 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการอ่านค่านับวัดซ้ำ สำหรับอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 1 (ก) ตัวที่ 2 (ข) ตัวที่ 3 (ค) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ .....	47
ภาพ 22 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการอ่านค่านับวัดซ้ำ สำหรับอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 1 (ก) ตัวที่ 2 (ข) ตัวที่ 3 (ค) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	49
ภาพ 23 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการวัดค่าปริมาณรังสีซ้ำที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	51
ภาพ 24 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการวัดค่าปริมาณรังสีซ้ำ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	53
ภาพ 25 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	55
ภาพ 26 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	57

ภาพ 27 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากทิศทางการเข้าของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	60
ภาพ 28 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากทิศทางการเข้าของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	63
ภาพ 29 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากระยะที่ได้รับรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	65
ภาพ 30 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากระยะที่ได้รับรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	67
ภาพ 31 ค่านับวัดปริมาณรังสีที่ฉายที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ.....	69
ภาพ 32 ค่านับวัดปริมาณรังสีที่ฉายที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ..	71
ภาพ 33 แสดงระยะจากผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ถึงอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ 15 เซนติเมตร.....	78
ภาพ 34 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เมื่อแกนทรีทำมุม 0 องศา (ก) และทำมุม 120 องศา (ข).....	79



## อักษรย่อ

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminum oxide
cGy	Centigray
eV	Electron volt
FF	Flattening filter
FFF	Flattening filter free
FS	Field size
Gy	Gray
$\text{g/cm}^3$	Gram per cubic centimeter
IMRT	Intensity modulated radiation therapy
KeV	Kiloelectronvolt
LINAC	Linear accelerator
MeV	Megaelectronvolt
MLC	Multileaf collimator
MU	Monitor unit
MV	Megavoltage
OSL	Optically stimulated luminescence
PDD	Percentage depth dose
PMT	Photomultiplier tube
SAD	Source to axis distance
SBRT	Stereotactic body radiotherapy
SRS	Stereotactic radiosurgery
SSD	Source to surface distance
TLD	Thermoluminescent dosimeter
VMAT	Volumetric modulated arc therapy
$\mu\text{Gy}$	Microgray
$\mu\text{Sv}$	Microsieve

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาของปัญหา

การใช้รังสีมีบทบาทสำคัญในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งซึ่งมีหลักการคือ บริเวณรอยโรคหรือก้อนมะเร็งได้รับปริมาณรังสีสูงสุดเพื่อทำลายเซลล์มะเร็งได้หมด ในขณะที่เนื้อเยื่อปกติซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุด (1) โดยในปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็งด้วยรังสีใช้เทคนิคขั้นสูง อาทิเช่น การฉายรังสีแบบปรับความเข้ม (Intensity modulated radiation therapy: IMRT) และการฉายรังสีปรับความเข้มแบบหมุนรอบตัวผู้ป่วย (Volumetric modulated arc therapy: VMAT) โดยใช้การวางแผนการรักษาที่มีความซับซ้อน เช่น มีการปรับความเร็วของหัวเครื่องฉายรังสี (Gantry speed) วัสดุกำบังรังสีแบบซี่ (Multileaf collimator: MLC) และอัตราปริมาณรังสี (Dose rate) ดังนั้นการตรวจสอบแผนการฉายรังสีก่อนการรักษาจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อนำไปสู่การรักษาที่แม่นยำ ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ (2, 3)

การตรวจสอบแผนการฉายรังสีโดยทั่วไปจะตรวจสอบทั้งปริมาณรังสีแบบจุด (Absolute point dose) และการกระจายปริมาณรังสีในระนาบ 2 มิติ (2D planar isodose distribution) การวัด Planar dose distribution ซึ่งเป็นการวัดการกระจายตัวของปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจากแผนการรักษาสามารถใช้อุปกรณ์วัดรังสีชนิดอาร์เรย์ 2 มิติ (2D array) ซึ่งได้แก่ หัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชัน (Ionization chamber) หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำหรือไดโอด (Diode) เช่น MapCheck และ Matrixx เป็นต้น อุปกรณ์วัดรังสีเหล่านี้มีข้อดี คือ ใช้งานง่าย สะดวกในการติดตั้งและสามารถทราบค่ารังสีได้ทันที แต่ยังมีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) (4, 5) อุปกรณ์ที่ใช้วัด Planar dose distribution อีกชนิดคือ ฟิล์มชนิดภาพโครมิก (Gafchromic EBT3 film) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มี Spatial resolution สูง และมีคุณสมบัติเทียบเท่าเนื้อเยื่อมนุษย์ แต่มีความซับซ้อนในการใช้งาน อีกทั้งต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลและแปลผลการนับวัดปริมาณรังสี (6, 7)

การวัดปริมาณรังสีแบบ Absolute point dose เป็นการวัดปริมาณรังสีจำเพาะจุด โดยสามารถวัดรังสีได้จากอุปกรณ์หลายชนิด อาทิเช่น หัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชัน หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ และอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescent dosimeter: TLD) โดยหัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชัน เป็นหนึ่งในอุปกรณ์นับวัดรังสีมาตรฐานที่ใช้สำหรับวัด Absolute point dose ในเทคนิค IMRT ซึ่งประกอบไปด้วยทิศทาง การเข้าของลำรังสีเล็ก ๆ  $1 \times 1$  ตาราง

เซนติเมตร ดังนั้นหัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชัน ที่มีปริมาตร (Volume) ใหญ่ อาจเกิดปัญหาการวัดค่ารังสีไม่ถูกต้องเนื่องจากปรากฏการณ์ Volume averaging (8-10) ส่วนอุปกรณ์วัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ มีความไวต่อรังสีสูง มีขนาดเล็กและใช้งานง่าย แต่หัววัดขึ้นกับพลังงาน อุณหภูมิ และอัตราปริมาณรังสี (11-13) อุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เป็นอุปกรณ์วัดรังสีที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าเนื้อเยื่อ สามารถนำมาใช้นับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง โดยที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสีและอัตราปริมาณรังสี แต่ข้อเสียคือ ระยะเวลาการวิเคราะห์ข้อมูลที่นานซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่นับวัดได้ในการอ่านค่านับวัด อีกทั้งการอ่านค่านับวัดสามารถอ่านค่าได้เพียงครั้งเดียว (Zeroed) (14-16)

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเริ่มแรกถูกใช้งานในทางรังสีวินิจฉัยและสิ่งแวดล้อม (17) ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงหรือเรียกว่า ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (nanoDot) ซึ่งมีคุณสมบัติและกระบวนการอ่านค่าปริมาณรังสีที่คล้ายคลึงกับอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ แต่กระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีใช้แสงกระตุ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้งานและอ่านค่านับวัดซ้ำได้ (18) การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใจลักษณะ ขอบเขตการใช้งาน ข้อจำกัดในการใช้งานของอุปกรณ์วัดรังสีนั้น ๆ และเพื่อเลือกใช้อุปกรณ์วัดรังสีให้เหมาะสมกับการใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีคณะผู้วิจัยในหลายสถาบันได้ทำการศึกษาคคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในงานรังสีรักษา อาทิเช่น คุณลักษณะในการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) (16, 19-21) อย่างไรก็ตามยังขาดการศึกษาคคุณลักษณะในบางหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการทำงานทางคลินิก นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาคคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter free: FFF)

การรักษาโรคมะเร็งปอด ด้วยเทคนิคการฉายรังสีร่วมพิกัดบริเวณลำตัว (Stereotactic body radiotherapy: SBRT) ซึ่งเป็นเทคนิคการฉายรังสีปริมาณสูง 6-30 เกรย์ (Gray: Gy) ต่อ 1-5 ครั้งที่บริเวณรอยโรค ทำให้มีการควบคุมรอยโรคได้ดีซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงการผ่าตัดซึ่งการรักษาด้วยเทคนิคนี้มีการใช้ระดับพลังงาน 6 หรือ 10 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (22-25) ในการฉายรังสีแบบศัลยกรรม (Stereotactic radiosurgery: SRS) และการฉายรังสีร่วมพิกัดบริเวณลำตัว เป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเพราะสามารถให้อัตราปริมาณรังสีสูง (High dose rate) นำไปสู่การลดระยะเวลาในการฉายรังสีให้กับผู้ป่วย รวมไปถึงการฉายรังสีบนพื้นที่ลำรังสี (Field size) ที่มีขนาดเล็กกว่า 10×10 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำให้อวัยวะปกติใกล้เคียงได้รับผลของ

รังสีน้อยลง (26) ในการฉายด้วยเทคนิคนี้ต้องมีการตรวจสอบปริมาณรังสีด้วยการประกันคุณภาพ ก่อนการรักษาของเทคนิคการฉายรังสีขั้นสูง เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อ การฉายรังสีหรือแม้แต่ว่าผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของผู้ป่วยหลังการเข้ารับการรักษา เนื่องด้วยการใช้ปริมาณรังสีที่สูงในการฉายรังสีอาจส่งผลต่อชีวิตผู้ป่วยได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพการนับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับรังสีรักษาพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ โดยทำการศึกษาคคุณลักษณะด้านลักษณะจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการเลือกใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบค่าปริมาณรังสีต่อไป

#### **จุดมุ่งหมายของการศึกษา**

ศึกษาคคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

#### **ขอบเขตของงานวิจัย**

ศึกษาคคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท รุ่น screen ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ใน 7 หัวข้อได้แก่ ลักษณะการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคยี่ห้อ Varian รุ่น Vitalbeam ทำการศึกษา ณ กลุ่มงานรังสีรักษา โรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎีพื้นฐาน

##### 2.1 อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท

###### 2.1.1 ลักษณะและหลักการทำงาน

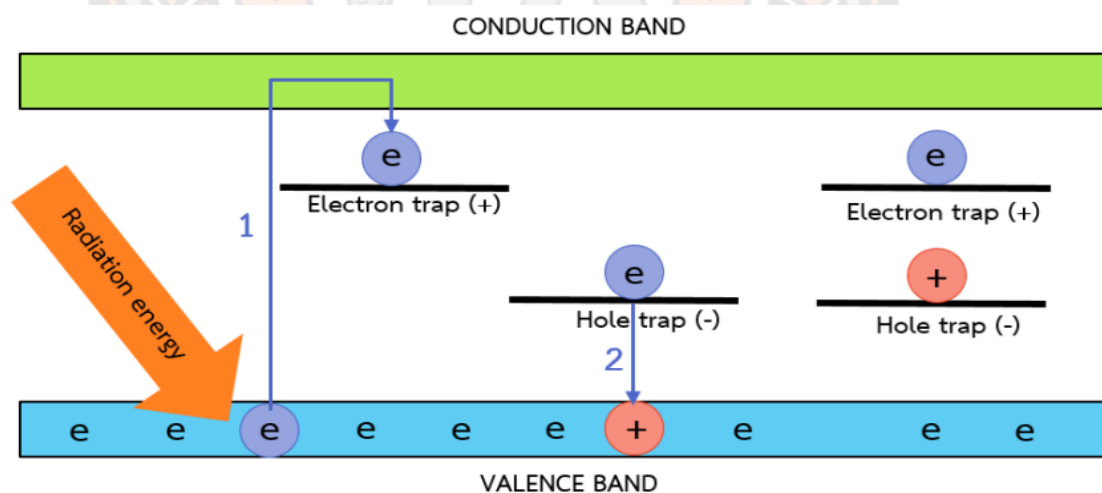
อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นผลึกของสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์บริสุทธิ์สูง ( $Al_2O_3$ ) ที่อุณหภูมิสูงและทำการตกผลึกหลังจากที่เพิ่มสารเจือปนชนิดคาร์บอน (C) ส่งผลให้โครงสร้างของออกซิเจนเกิดที่ว่าง เป็นการสร้างลักษณะเฉพาะตัวของโครงสร้างผลึกที่สามารถดักจับอิเล็กตรอนเมื่อผลึกถูกฉายรังสี เป็นอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีที่มีความทนทานทนต่อแรงกระแทก ความชื้นและอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นเม็ดผลึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร หนา 0.3 มิลลิเมตร ความหนาแน่นของผลึก  $3.95 - 4.10 \text{ g/cm}^3$  บรรจุในกล่องพลาสติกสีดำ ทึบแสง ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความหนาแน่น  $1.03 \text{ g/cm}^3$  เพื่อป้องกันแสง ด้านหน้าแผ่นมีแถบบาร์โค้ด ด้านหลังแผ่นเป็นหมายเลขประจำแผ่นและรหัสความไว ดังแสดงในภาพ 1 อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอทสามารถนับวัดปริมาณรังสีได้ในช่วงตั้งแต่  $10 \mu\text{Gy}$  ถึง  $100 \text{ Gy}$  ตอบสนองต่อพลังงานในช่วง  $5 \text{ keV}$  ถึง  $20 \text{ MeV}$  เมื่ออ่านค่าปริมาณรังสีแล้วสามารถทำการอ่านค่าซ้ำได้ และนำไปล้างเพื่อบันทึกค่าปริมาณรังสีในครั้งต่อไปได้ สำหรับการอ่านค่าใช้เครื่องอ่านอินไลน์ รุ่นไมโครสตาร์ (InLight reader the original microStar) และสามารถประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ทั้งด้านรังสีวินิจฉัย เวชศาสตร์นิวเคลียร์ รังสีร่วมรักษาและการตรวจวัดปริมาณรังสีภายในร่างกาย เนื่องจากมีขนาดเล็กและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการรักษาหรือขั้นตอนการวินิจฉัย อาทิเช่น การวัดปริมาณรังสีที่เลนส์ตา การวัดปริมาณรังสีที่พื้นผิว เป็นต้น รวมไปถึงการนับวัดปริมาณรังสีทางด้านรังสีรักษา เช่น การนับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง



ภาพ 1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท



หลักการการทำงานของอุปกรณ์ชนิดปริมาตรรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สามารถเรืองแสงได้จากการกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสง โดยมีช่องว่างระหว่างพลังงาน (Energy gap) ประมาณ 2.0 – 4.0 eV อยู่ระหว่างแถบพลังงาน 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และ แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) การเจือสาร (Doping) ด้วยคาร์บอน จะช่วยเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้า ทำให้เกิดชั้นดักจับอิเล็กตรอน (Electron trap) และชั้นดักจับโฮล (Hole trap) อลูมิเนียมออกไซด์ เจือด้วยคาร์บอน ( $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{C}$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำรีสอร์ทิอิเล็กตรอนทั้งหมดจะอยู่ในแถบวาเลนซ์ เมื่อผลึกได้รับรังสีที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ดังแสดงในภาพ 2 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะดูดกลืนพลังงานของรังสีเอาไว้ จนมีพลังงานสูงพอที่อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และเคลื่อนที่ตามแรงดึงดูดทางไฟฟ้ามาอยู่ที่ชั้นดักจับอิเล็กตรอนซึ่งมีแรงทางไฟฟ้าเหมือนประจุบวก แถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้เกิดช่องว่างหรือหลุม (Hole) ที่มีสภาพทางไฟฟ้าเหมือนประจุบวก โฮลจะเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ชั้นดักจับโฮลซึ่งมีแรงทางไฟฟ้าเหมือนประจุลบตามแรงดึงดูดทางไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนที่ชั้นดักจับโฮลเคลื่อนที่ลงมาเติมช่องว่างในแถบวาเลนซ์ เมื่อถึงขั้นตอนนี้หลังจากที่อิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานของรังสี ชั้นดักจับอิเล็กตรอนและชั้นดักจับโฮลจะถูกเติมเต็ม รวมไปถึงไม่มีช่องว่างในแถบวาเลนซ์ด้วย เรียกว่า กระบวนการดูดกลืนแสง (Absorption) (18, 27, 28)

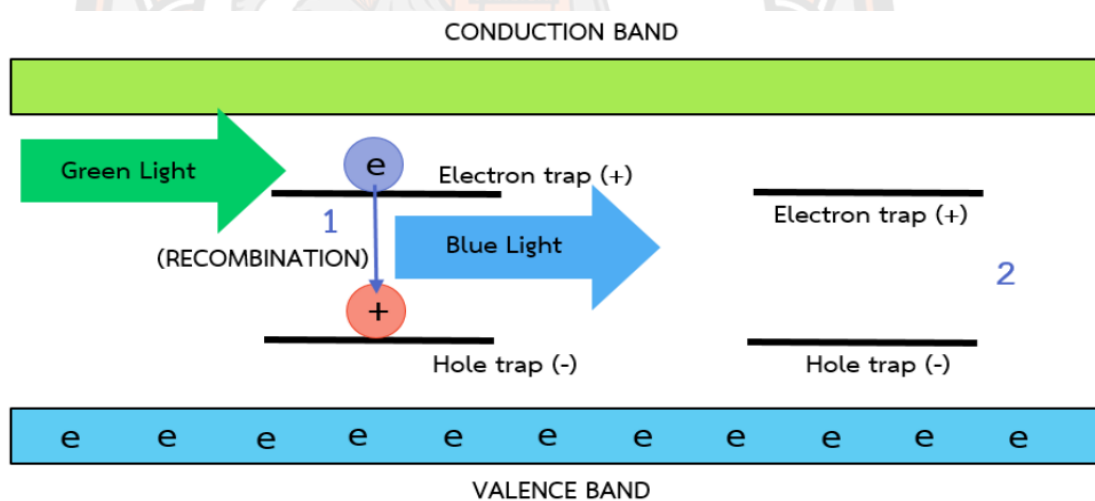


ภาพ 2 แผนภาพกระบวนการดูดกลืนแสงตัวเลขในแผนภาพแสดงกระบวนการดังนี้ ตามลำดับ

1. อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ดูดกลืนพลังงานรังสีเคลื่อนที่สู่แถบนำไฟฟ้าและถูกดักจับที่ชั้นดักจับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอน
2. อิเล็กตรอนในชั้นดักจับโฮลเคลื่อนที่มาแทนโฮลในแถบวาเลนซ์

## 2.1.2 หลักการอ่านค่าปริมาณรังสี

เมื่อต้องการทราบค่าปริมาณรังสีภายในแผ่น สามารถทำได้โดยใช้การกระตุ้นอิเล็กตรอนในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ด้วยแสงสีเขียว จนมีพลังงานสูงมากพอที่ทำให้อิเล็กตรอนจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า ทำให้เกิดหลุมในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปซึ่งจะคงสภาพในช่วงเวลาสั้น ๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับ (Recombination) ลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิม การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการคายพลังงานแสงหรือโฟตอน ที่มีความยาวคลื่นในช่วงสีน้ำเงินออกมา เรียกว่า กระบวนการเปล่งแสง (Luminescence) ดังแสดงในภาพ 3 ซึ่งปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมาจะแปรผันตามปริมาณของรังสีที่ได้รับ และเนื่องจากอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองช่วงเวลาสั้น ๆ จากการกระตุ้นด้วยแสง ทำให้การอ่านค่าปริมาณรังสีแต่ละครั้งนั้นจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาเพียงบางส่วนเท่านั้น ส่งผลให้สัญญาณสำคัญไม่หายไป จึงสามารถทำการกระตุ้นเพื่ออ่านค่าปริมาณรังสีจากแผ่นได้ซ้ำหลายครั้ง (27-29)



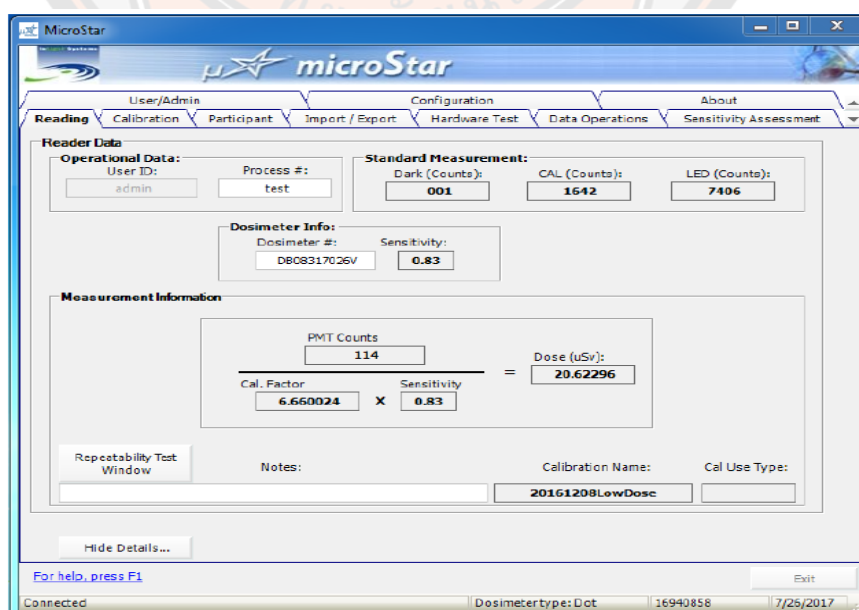
- ภาพ 3 แผนภาพกระบวนการเปล่งแสง ตัวเลขในแผนภาพแสดงกระบวนการดังนี้ตามลำดับ
1. พลังงานแสงสีเขียวกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นดักจับอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มารวมกับโฮลในชั้นดักจับโฮล (Recombination) 2. สารกึ่งตัวนำกลับสู่สภาวะเสถียร



เครื่องอ่านค่านับวัดของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอทอาศัยหลักการแปลงแสงสีเขียว เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน และได้แสงสีน้ำเงินเดินทางผ่านตัวกรองพลังงาน เข้าสู่ Photomultiplier tube (PMT) ทำหน้าที่เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนและเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะแปรผันตรงกับปริมาณรังสี และส่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานของรังสีในรูปของแสงออกสู่วงจรการนับวัดด้วยโปรแกรมที่ถูกติดตั้งในคอมพิวเตอร์ จากนั้นคำนวณค่าปริมาณรังสีที่สะสมในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ตามสมการที่ 1 โดยแสดงค่าปริมาณรังสีในหน่วย ไมโครซีเวิร์ต ( $\mu\text{Sv}$ ) โดยในโปรแกรมสามารถประมวลผลของค่านับวัดปริมาณรังสีได้ 3 หน่วยดังนี้ไมโครซีเวิร์ต ( $\mu\text{Sv}$ ) มิลลิเรด (mrad) และเซนติเกรย์ (cGy) ซึ่งเครื่องอ่านค่านับวัดของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีชื่อเฉพาะว่า ไมโครสตาร์ (Microstar reader) และหน้าต่างโปรแกรมในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี ดังแสดงในภาพ 4

$$\text{Dose} = \frac{\text{PMT}_{\text{counts}} \times \text{conversion factor}}{\text{sensitivity}} \quad (1)$$

Dose คือ ค่าปริมาณรังสีในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
 PMT counts คือ ค่านับวัดจากสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านได้  
 Conversion factor คือ ค่าการปรับแก้ มีหน่วยเป็น dose/count  
 Sensitivity คือ ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท



ภาพ 4 หน้าต่างโปรแกรมเมื่ออ่านด้วยเครื่องอ่าน รุ่นไมโครสตาร์

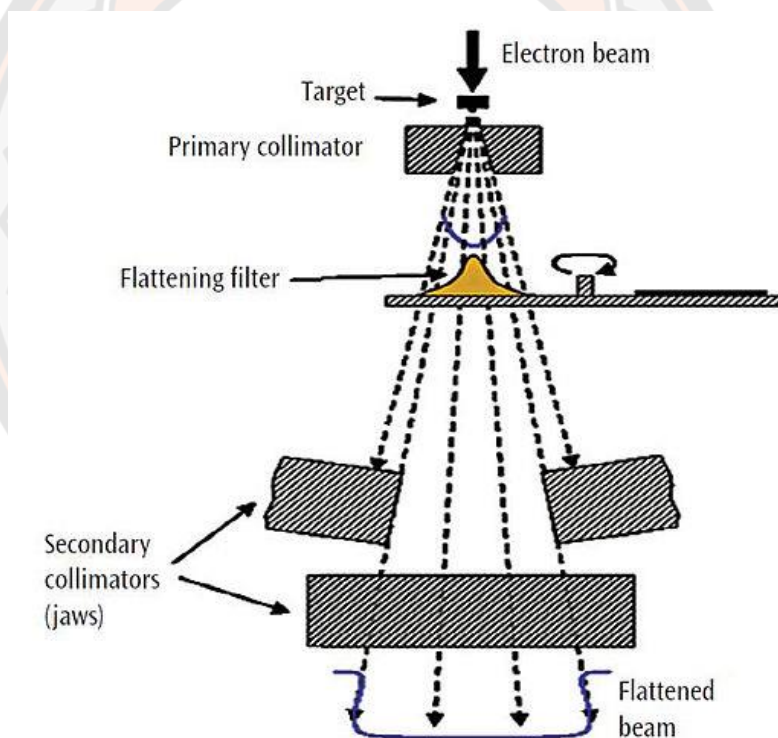
ก่อนจะนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มาใช้งานนั้นมีกระบวนการสอบเทียบอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ซึ่งใช้ Cs-137 ทำการสอบเทียบโดยบริษัท Nagase landauer, Ltd. จากนั้นทำการหาค่าแก้ในการนับวัดปริมาณรังสีที่ได้ โดยมีชุดการสอบเทียบทั้งหมด 5 ชุดการสอบเทียบ คือ ไม่ได้รับรังสี, 500 mrad, 3,000 mrad, 50,000 mrad และ 100,000 mrad จากนั้นนำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีที่ให้และค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้ และนำข้อมูลลงในโปรแกรมสำหรับการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี เมื่ออุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ถูกนำมาใช้งานในกระบวนการอ่านค่านับวัดที่เครื่องอ่าน Micro star เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าปริมาณรังสีจะสามารถอ่านค่านับวัดที่ได้ในหน่วย ไมโครซีเวิร์ต มิลลิเรด หรือเซนติเกรย์ ได้ตามที่บริษัทได้ทำการสอบเทียบแปลงค่าจากสัญญาณการนับวัดปริมาณรังสี

### 2.1.3 หลักการล้างค่าปริมาณรังสี

การล้างค่าปริมาณรังสีภายในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีหลักการคล้ายคลึงกับกระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี คือ ใช้แสงสีเขียวในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นดักจับอิเล็กตรอนจนเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าและตกลงมารวมกับโฮลในตำแหน่งศูนย์กลางการเปล่งแสง มีการคายพลังงานแสงหรือโฟตอนออกมาในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน ทำให้ขณะล้างข้อมูลการนับวัดปริมาณรังสีภายในแผ่น มีการเปล่งแสงสีน้ำเงินออกมาจากเครื่องตลอดการทำงาน ซึ่งวิธีการ คือ เลื่อนเม็ดผลึกออกมาจากตัวแผ่นพลาสติกและนำไปวางให้ตรงกับหลอดไฟบนเครื่องล้าง จากนั้นตั้งค่าและกำหนดเวลาที่ใช้ในการล้าง เมื่อเสร็จสามารถนำไปอ่านค่าพื้นหลังและบันทึกปริมาณรังสีในครั้งต่อไปได้ (30)

## 2.2 การฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter: FF)

ลำการผลิตรังสีเอกซเรย์พลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาค (Linear accelerator: Linac) ใช้หลักการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้ชนกับเป้าที่มีเลขอะตอมที่สูงทำให้ลำรังสีที่ได้มีลักษณะฟอร์เวิร์ดพีคโปรไฟล์ (Forward peaked profile) การทำให้โปรไฟล์ของลำรังสีมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งลำรังสี (Flat profile) โดยใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter) ส่งผลให้เกิดความเหมาะสมต่อการวางแผนการรักษาและการคำนวณปริมาณรังสี โดยการใช้ตัวกรองปรับเรียบยังช่วยกรองเอกซเรย์พลังงานต่ำ ทำให้ค่าพลังงานเฉลี่ยโดยรวมของเอกซเรย์สูงขึ้น ตำแหน่งของตัวกรองปรับเรียบอยู่ระหว่างคอลิเมเตอร์ปฐมภูมิ (Primary collimator) และหัววัดรังสี (Monitor chamber) โดยตัวกรองรังสีมีรูปร่างทรงกรวยและสร้างจากวัสดุที่มีเลขอะตอมปานกลางหรือสูง ซึ่งมีความหนาบริเวณตรงกลางมากกว่าด้านข้าง เพื่อให้ได้โปรไฟล์ของลำรังสีที่มีความสม่ำเสมอ (25) ดังแสดงในภาพ 5



ภาพ 5 การฉายรังสีและกราฟโปรไฟล์ของลำรังสีมีตัวกรองปรับเรียบ

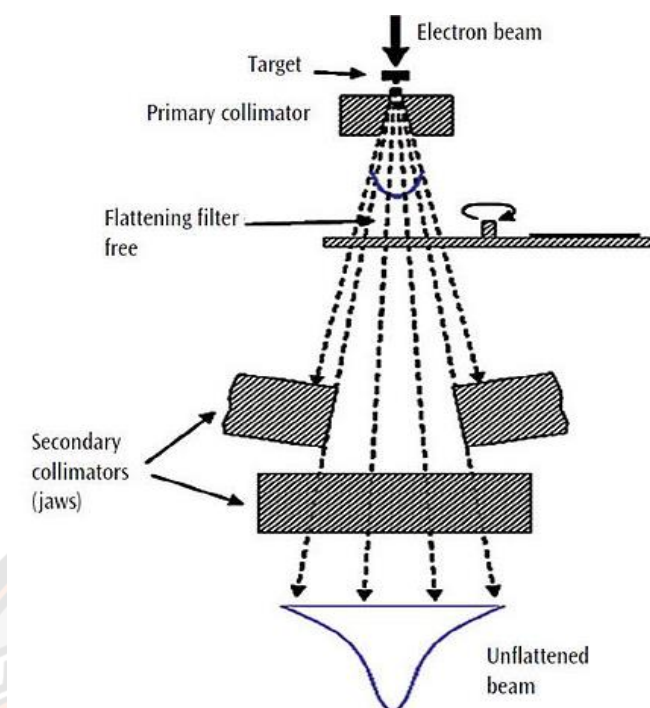
ที่มา: <http://radiation-oncology.de/index.php?page=flattening-filter-free-linac>

### 2.3 การฉายรังสีแบบไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter free: FFF)

การฉายรังสีแบบไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ใช้วิธีนำตัวกรองปรับเรียบออกขณะที่ทำการฉายรังสี วิธีดังกล่าวช่วยทำให้อัตราการให้ปริมาณรังสีต่อเวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับการฉายรังสีแบบมีตัวกรองปรับเรียบทำให้ลำรังสีมีลักษณะค่าปริมาณรังสีสูงบริเวณตอนกลางลำรังสี (Forward peaked profile) ดังแสดงในภาพ 6 เนื่องจากไม่ได้ถูกปรับให้เรียบเหมือนการใช้ตัวกรองปรับเรียบ ดังนั้นการฉายรังสีแบบไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบจึงเหมาะกับการฉายที่ใช้พื้นที่ลำรังสีเล็ก ๆ และใช้อัตราการให้ปริมาณรังสีต่อเวลาสูง อย่างไรก็ตามการรักษาด้วยรังสีสมัยใหม่ในปัจจุบันใช้เทคนิคการปรับความเข้มของลำรังสี เพื่อให้การกระจายปริมาณรังสีครอบคลุมก้อนมะเร็งมากขึ้น เช่น ใช้กับเทคนิคการฉายรังสีร่วมพิภักต์บริเวณลำตัว เนื่องจากลักษณะลำรังสีสำหรับพื้นที่ลำรังสีขนาดเล็กค่อนข้างเรียบเหนือศูนย์กลางเพียงไม่กี่เซนติเมตร ดังนั้นไม่จำเป็นต้องมีตัวกรองปรับเรียบ

ลำรังสีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบมีพลังงานที่มีประสิทธิภาพลดลงเช่นเดียวกับ Beam profile ที่มีพีคตรงกลางที่แตกต่างจากลำรังสีที่มีตัวกรองปรับเรียบ แต่รูปร่างโปรไฟล์กับ Output ที่เพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้น 2-4 เท่า) ส่งผลให้ลำรังสีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบมีประสิทธิภาพมากในการรักษาเป้าหมายขนาดเล็ก ในการฉายรังสีแบบศัลยกรรม และฉายรังสีร่วมพิภักต์บริเวณลำตัว ยิ่งไปกว่านั้น การนำตัวกรองปรับเรียบออกนำไปสู่การลดการรั่วไหลของรังสีที่หัวเครื่องเร่งอนุภาคมากกว่าครึ่งและส่งผลให้ปริมาณรังสีที่อยู่รอบนอกของตัวผู้ป่วยโดยรวมลดลงซึ่งปริมาณรังสีรอบนอกจะมากขึ้นเมื่อพลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีสเปกตรัมของพลังงานโฟตอนและคุณสมบัติของรังสีกระเจิง ที่หัวเครื่องเร่งอนุภาคมีความแตกต่างกัน รวมถึงคุณสมบัติของลำรังสีที่มีความคมชัดของเงามัว การกระจายของ Secondary electron จากหัวเครื่องเร่งอนุภาคน้อยกว่าและปริมาณรังสีที่อยู่นอกพื้นที่ฉายรังสีน้อยกว่าการตอบสนองของการวัดปริมาณรังสีที่เพิ่มการรวมตัวกันของไอออน และอาจเป็นไปได้ในช่วงในเรื่องของผลทางรังสีที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิต

การใช้งานทางคลินิกของลำรังสีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบนั้นถูกนำมาใช้เพื่อจะลดระยะเวลาในการฉายรังสีให้กับผู้ป่วยของการรักษาด้วยเทคนิคการฉายรังสีแบบศัลยกรรม เนื่องจากการนำตัวกรองปรับเรียบออกจะช่วยเพิ่มอัตราปริมาณรังสี (Dose rate) ทำให้ความเข้มเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการฉายรังสีร่วมพิภักต์บริเวณศีรษะ และสำหรับการฉายรังสีร่วมพิภักต์บริเวณลำตัว โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (22-25)



ภาพ 6 การฉายรังสีและกราฟโปรไฟล์ของลำรังสีที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ที่มา: <http://radiation-oncology.de/index.php?page=flattening-filter-free-linac>

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

ปี ค.ศ. 2007 Jursinic PA et al. (19) ได้ศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เพื่อนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีมาใช้ในทางรังสีรักษา อีกทั้งนับวัดปริมาณรังสีภายในร่างกาย ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลใช้เครื่องอ่าน MicroStar (Landauer, Inc. , Glenwood, IL) โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และอิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 6, 9, 12, 16 และ 20 เมกะโวลต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้ การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) การตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) และการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) ในการศึกษาทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้



รังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) โดยอ้างอิงจาก TG-51 และอิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 6, 9, 12, 16 และ 20 เมกะโวลต์อิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 6 ระดับความลึก  $R_{50}$  ของพลังงานนั้น ๆ จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) โดยทำการฉายรังสี 100 cGy พื้นที่ลำรังสี  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร และทุก ๆ การศึกษาทำการศึกษาเปรียบเทียบกับไอออไนเซชัน ประเภท cylindrical รุ่น N30001 สำหรับการศึกษานิวเคลียร์สัญญาณสูญเสียนิวเคลียร์ต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) หลังจากฉายรังสี 10 นาที ทำการอ่านค่าซ้ำ 25 ครั้ง พบว่ามีการสูญเสียนิวเคลียร์ร้อยละ 0.05 ต่อการอ่านค่า ต่อมาทำการศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) เริ่มทำการศึกษาตั้งแต่ 45 วินาที ภายหลังจากฉายรังสี จากการศึกษาค้นพบว่า ระยะเวลาที่อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท เริ่มมีการเสถียรที่สามารถอ่านค่าซ้ำวัดปริมาณรังสีได้ คือ 8 นาที ภายหลังจากฉายรังสี ซึ่งช่วงเวลาจาก 10 นาที ถึง 3600 นาที ภายหลังจากฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 2 ซึ่งแนะนำอ่านค่าซ้ำวัดปริมาณรังสีในช่วง 8 ถึง 15 นาที ภายหลังจากฉายรังสี ในการศึกษาผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ สำหรับการศึกษาค่าความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) ทำการศึกษาในช่วงปริมาณรังสี 50 cGy ถึง 1000 cGy พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) เมื่อนับวัดปริมาณรังสีไม่เกิน 300 cGy แต่เมื่อนับวัดปริมาณรังสีมากกว่า 300 cGy มีความสัมพันธ์เหนือเส้นตรง (Supralinearity) สำหรับการศึกษาค่าการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) ทำการศึกษาที่รังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ปริมาณรังสี 50 cGy โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท กับอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TLD) และไดโอดพื้นผิว (surface diode) ในการศึกษาได้ทำการประยุกต์วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดอะคริลิก รูปทรงเป็นทรงกระบอกและมีช่องว่างที่จุดกึ่งกลางเพื่อใส่อุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท และอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดยในการศึกษาปรับเปลี่ยนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ชนิดอะคริลิก ที่มุมต่าง ๆ จากการศึกษาค้นพบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท และอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ไม่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสี โดยมีค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ร้อยละ 0.9 และร้อยละ 1.9 ตามลำดับ ในขณะที่ไดโอดพื้นผิว ขึ้นกับทิศทางของลำรังสี ที่มุม 120 องศา นับวัดปริมาณรังสีได้ลดลง ร้อยละ 21 และมุม 180 องศา ลดลงร้อยละ 17 แต่ที่มุมอื่น ๆ สามารถนับวัดได้โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ 0.3 ในการศึกษาการตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) โดยทำการศึกษาที่ระดับความลึก 0 เซนติเมตร ถึง 5 เซนติเมตร ทำการเปรียบเทียบกับไดโอดพื้นผิวและไอออไนเซชัน ประเภท Parallel plate พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี

ไอเอสแอล ชนิดดอท มีการตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสีสูงที่สุดที่ระดับความลึก 3 เซนติเมตร จึงสามารถนำมาใช้ในการนับวัดที่พื้นผิวได้ ในส่วนของการตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ อิเล็กตรอนพลังงาน 6, 9, 12, 16 และ 20 เมกะโวลต์อิเล็กตรอนโวลต์ อีกทั้ง Ir - 192 ซึ่งเป็นอัตราปริมาณรังสีสูง (HDR) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึกสูงสุด ( $d_{max}$ ) ของพลังงานนั้น ๆ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับไดโอดพื้นผิวและไอออไนเซชัน ประเภท Markus รุ่น N23343 จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท ไม่ขึ้นกับพลังงานในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และอิเล็กตรอนพลังงาน 6, 9, 12, 16 และ 20 เมกะโวลต์อิเล็กตรอนโวลต์ และการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) ทำการศึกษาที่ปริมาณรังสี 100 cGy จักระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงอุปกรณ์ 90 เซนติเมตร (SAD) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดดอท กับอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TLD) และไดโอดพื้นผิว พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดดอท ไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสีแต่ไดโอดพื้นผิว ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี เมื่อเปรียบเทียบกับไอออไนเซชัน โดยมีค่าความไม่แน่นอนที่ร้อยละ 2.5 นอกจากนี้ อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท ยังไม่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วงเวลาของการฉายรังสี 10 – 40 องศาเซลเซียส ดังนั้นการใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท จึงสามารถใช้งานทางรังสีรักษา สำหรับการวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองได้

ปี ค.ศ. 2008 Viamonte A et al. (20) ทำการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลใช้เครื่องอ่าน MicroStar (Landauer, Inc. , Glenwood, IL) โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6, 8 และ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ โดยศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้ ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) การตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) การตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) และการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) ในการศึกษาทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร พื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคและ  $^{60}\text{Co}$  จักระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ และทุก ๆ การศึกษาทำการศึกษาเปรียบเทียบกับไอออไนเซชัน รุ่น NE2571 สำหรับการศึกษาในหัวข้อผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดดอท นำกลับมาใช้ซ้ำได้ ในการศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ทำการอ่านค่า



นับวัดปริมาณรังสีภายหลังฉายรังสี 1 ชั่วโมง ถึง 21 วัน พบว่าภายหลังจากฉายรังสี 6 ชั่วโมง ไม่มีการจางหายของสัญญาณ และภายใน 5 วันแรกหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 2 อีกทั้งในช่วง 5 ถึง 21 วันหลังฉายรังสี มีความเสถียรไม่มีการจางหายของสัญญาณ ซึ่งก่อนหน้าที่จะทำการเริ่มอ่านค่านับวัด 17 วันหลังฉายรังสี การศึกษานี้ไม่ได้ทำการอ่านค่านับวัดทันที ในส่วนของ การศึกษาการตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6, 8 และ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ที่ระดับความลึกสูงสุดของแต่ละพลังงาน ( $d_{max}$ ) ปริมาณรังสี 50 cGy โดยประเมินการตอบสนองต่อพลังงาน ด้วยอัตราปริมาณรังสี 200, 400 และ 600 MU/min พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท สำหรับรังสีเอกซ์พลังงานมากกว่า 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ไม่ขึ้นกับพลังงาน อีกทั้งจากการศึกษาในหัวข้อนี้พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท ไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี สำหรับการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) ทำการศึกษาที่ปริมาณรังสี 0.5 ถึง 4 Gy ที่ระดับความลึก 0.5 เซนติเมตร พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นโดยมีค่า  $R^2 = 0.9983$  นอกจากนี้พบว่า มีความสัมพันธ์เหนือเชิงเส้นเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 400 cGy ในการศึกษาการตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบการนับวัดของไอออไนเซชันประเภท Markus ที่ระดับความลึก 0 ถึง 5 เซนติเมตร อีกทั้งยังทำการศึกษา Percentage depth dose (PDD) โดยทำการเปรียบเทียบกับไดโอด รุ่น Scanditronix พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท มีค่าการนับวัดที่เป็นในทิศทางเดียวกับไอออไนเซชัน สามารถวัดค่าได้แม่นยำ และสามารถวัดปริมาณรังสีที่พื้นผิวได้ สำหรับการศึกษาการตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) พื้นที่ลำรังสี  $5 \times 5$  ถึง  $22 \times 22$  ตารางเซนติเมตร ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร ทำการเปรียบเทียบกับไอออไนเซชัน รุ่น NE2571 พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท ไม่ขึ้นกับพื้นที่ลำรังสี และการศึกษาการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) ทำการศึกษาที่ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อชนิดแข็ง 85 ถึง 105 เซนติเมตร โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร ซึ่งทำการนับวัดเปรียบเทียบกับไอออไนเซชัน พบว่าอุปกรณ์นับวัดรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท ขึ้นกับระยะทางที่ได้รับรังสี โดยมีค่านับวัดใกล้เคียงกับไอออไนเซชัน ซึ่งเมื่อระยะทางที่ได้รับรังสีเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีจะลดลงตามไปด้วย จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเสถียรของระบบอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดดอท และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองและมีประสิทธิภาพที่สามารถทำการวัดและอ่านได้ ทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการวัดปริมาณรังสีในการรักษาด้วยรังสีทางคลินิก

ปี ค.ศ. 2013 Dunn L et al. (21) ได้ศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เพื่อใช้ทดแทนอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสี สำหรับใช้นับวัดรังสีระยะไกลรวมไปถึงใช้นับวัดภายในหุ่นจำลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลใช้เครื่องอ่าน MicroStar (Landauer, Inc. , Glenwood, IL) โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6, 10 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และอิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 4 ถึง 22 เมกะโวลต์ อิเล็กตรอนโวลต์ โดยทำการศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้ การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) และผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) ในการศึกษาทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร พื้นที่ลำรังสี  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 90 เซนติเมตร (SAD) สำหรับการศึกษาในหัวข้อการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ฉายรังสี 1 Gy ที่รังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ภายหลังฉายรังสี 7 วัน จากนั้นอ่านค่านับวัดจำนวน 190 ครั้ง พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.028 ต่อการอ่านค่า ในการศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ฉายรังสี 2 Gy ที่รังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ในช่วง 15 นาทีแรกหลังฉายรังสี ทำการอ่านค่านับวัดทุก ๆ 3 นาที หลังจากนั้นอ่านค่านับวัดทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ต่อมาอ่านค่านับวัดทุก ๆ วัน ในเวลาเช้าเที่ยง และเย็น เวลาเดียวกัน เป็นเวลา 7 วัน และอ่านค่านับวัดทุก ๆ วัน เป็นเวลา 270 วัน พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เริ่มมีความเสถียรที่สามารถอ่านค่านับวัดได้ คือ 16 นาทีหลังฉายรังสี สำหรับการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) ฉายรังสีตั้งแต่ 0 ถึง 11 Gy พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) เมื่อนับวัดปริมาณรังสีไม่เกิน 200 cGy แต่เมื่อนับวัดปริมาณรังสีมากกว่า 200 cGy มีความสัมพันธ์เหนือเส้นตรง (Supralinearity) ในส่วนของการศึกษาการตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) ศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6, 10 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และอิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 6, 8, 10, 12, 15 และ 18 เมกะโวลต์ อิเล็กตรอนโวลต์ ฉายรังสี 1 Gy ที่ระดับความลึก  $R_{50}$  ของพลังงานนั้น ๆ โดยใช้หุ่นจำลองทรวงอก (Computerised Imaging Reference Systems: CIRS) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับพลังงานเล็กน้อย โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ 1.6 หรือไม่ขึ้นกับพลังงาน และการศึกษาผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท นำกลับมาใช้ซ้ำได้ ซึ่งถือได้ว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นอีกทางเลือกที่ใช้

งานได้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์วัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ ที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพที่เทียบเท่า ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่และความแม่นยำของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ทำให้เหมาะสำหรับการนับวัดปริมาณรังสีในปัจจุบัน

ปี ค.ศ. 2017 Jain GK et al. (31) ทำการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เนื่องจากข้อดีหลายประการในการนับวัดปริมาณรังสีสำหรับการนับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง จึงได้ทำการศึกษาคูณลักษณะเพื่อใช้ในทางคลินิกซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลใช้เครื่องอ่าน MicroStar (Landauer, Inc. , Glenwood, IL) โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ โดยทำการศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้ การตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) การตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) และการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ในการศึกษาทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร พื้นที่ลำรังสี  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค และ  $^{60}\text{Co}$  จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) และ 80 เซนติเมตร ตามลำดับ และทุก ๆ การศึกษาทำการศึกษาเปรียบเทียบกับไอเอสแอลประเภท Cylindrical รุ่น TM30013 และใช้วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดอะคริลิก ในการติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จากนั้นปิดช่องว่างด้วยพาราฟิน สำหรับการศึกษาในหัวข้อการตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) ทำการศึกษาที่  $^{60}\text{Co}$ , 6 และ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ฉายรังสี 50 cGy ที่ระดับความลึกสูงสุด ( $d_{\max}$ ) โดยประเมินการตอบสนองต่อพลังงาน ด้วยอัตราปริมาณรังสี 200, 400 และ 600 MU/min จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 90 เซนติเมตร (SAD) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นอิสระต่อพลังงาน อีกทั้งจากการศึกษาในหัวข้อนี้ พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี สำหรับการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) ทำการศึกษาในช่วงปริมาณรังสี 50 ถึง 400 cGy พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น โดยมีค่า  $R^2 = 0.997$  ต่อมาได้มีการศึกษาการตอบสนองต่อความลึกที่ได้รับรังสี (Depth dose dependence) ที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4, 5, 10 และ 14 เซนติเมตร พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ 3.5 อีกทั้งทำการศึกษาการตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) โดยปรับเปลี่ยนพื้นที่ลำรังสีดังนี้  $4 \times 4$ ,  $10 \times 10$  และ

30 × 30 ตารางเซนติเมตร พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่ขึ้นกับพื้นที่ลำรังสี ซึ่งมีความไม่แน่นอนร้อยละ 1 สำหรับการศึกษากการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อทิศทางลำรังสีแบบมี build up และไม่มี build up ของแต่ละมุมนั้น ๆ จากการศึกษา พบว่าการตอบสนองต่อลำรังสีที่มี build up จะมีความไม่แน่นอนสูงสุดร้อยละ 8 และไม่มี build up ร้อยละ 38 อีกทั้งยังพบว่าที่มุม 90 – 270 องศา มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นเนื่องจากเป็นบริเวณที่ พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่สามารถรับรังสีได้ ในการศึกษาการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) พบว่า มีการสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.29 ต่อการอ่านค่า และในการศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) พบว่า 7 วันหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 1.4 และในช่วง 37 วันหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 1.8 ซึ่งการศึกษาพบสาเหตุของการทดสอบที่ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันจากการศึกษาของวรรณกรรมก่อนหน้านี้ เกิดจากความแตกต่างลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำการศึกษา รวมไปถึงหุ่นจำลองที่นำมาใช้ในการศึกษาและพารามิเตอร์ในการตั้งค่า

ปี ค.ศ. 2017 Ponmalar R et al. (32) ในเทคนิคการฉายรังสีที่ทันสมัย มีความซับซ้อน จึงต้องมีการนับวัดปริมาณรังสีที่มีความแม่นยำสูงและในการนับวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะพื้นฐานของระบบการนับวัดปริมาณรังสีในการประกันคุณภาพของแผนการรักษา ก่อนที่รักษาผู้ป่วยจึงทำการตรวจสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลใช้เครื่องอ่าน MicroStar (Landauer, Inc. , Glenwood, IL) โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาในรังสีเอกซ์พลังงาน 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ โดยทำการศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้ ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) การตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) และการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ในการศึกษาทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร พื้นที่ลำรังสี 10 × 10 ตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค และ  $^{60}\text{Co}$  จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง 100 เซนติเมตร (SSD) และ 80 เซนติเมตร ตามลำดับ และทุก ๆ การศึกษาทำการศึกษาเปรียบเทียบกับไอออนเซชัน ประเภท Cylindrical รุ่น FC65G และใช้วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดอะคริลิก ในการติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จากนั้นปิดช่องว่างด้วยพาราฟินและวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง สำหรับการศึกษาค้นหาข้อความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity)



ศึกษาที่ปริมาณรังสี 50 ถึง 1,000 cGy พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity) เมื่อนับวัดปริมาณรังสีไม่เกิน 300 cGy มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นโดยมีค่า  $R^2 = 0.9962, 0.9967$  และ  $0.996$  สำหรับ  $^{60}\text{Co}$ , 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ แต่เมื่อนับวัดปริมาณรังสีมากกว่า 300 cGy มีความสัมพันธ์เหนือเส้นตรง (Supralinearity) ในการศึกษาการตอบสนองต่อพื้นที่ลำรังสี (Field size dependence) ศึกษาพื้นที่ลำรังสี  $5 \times 5$  ถึง  $30 \times 30$  ตารางเซนติเมตร สำหรับ  $^{60}\text{Co}$  และ  $3 \times 3$  ถึง  $30 \times 30$  ตารางเซนติเมตร สำหรับเครื่องเร่งอนุภาค ที่ระดับความลึกสูงสุด ( $d_{\text{max}}$ ) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่ขึ้นกับพื้นที่ลำรังสี โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ  $1.1 \pm 0.4, 1.09 \pm 0.34$  และ  $1.2 \pm 0.26$  สำหรับ  $^{60}\text{Co}$ , 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ การศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) ทำการศึกษาที่อัตราปริมาณรังสี 100 ถึง 600 MU/min พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ  $1.3 \pm 0.4$  และ  $1.4 \pm 0.4$  สำหรับ 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ สำหรับการศึกษาคือการตอบสนองต่อพลังงาน (Energy dependence) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นอิสระต่อพลังงาน โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ  $1.5 \pm 0.7$  และ  $1.7 \pm 0.6$  สำหรับ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ  $^{60}\text{Co}$  ตามลำดับ ในการศึกษาการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) ที่ระยะจากแหล่งกำเนิด 70 ถึง 135 เซนติเมตร สำหรับ 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ที่ระยะ 65 ถึง 100 เซนติเมตร สำหรับ  $^{60}\text{Co}$  พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เมื่อทำการเปรียบเทียบการนับวัดกับไอออนเซชัน มีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ  $1.5 \pm 0.9$  และ  $1.5 \pm 1.3$  สำหรับ 6 และ 10 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ ในส่วนของ  $^{60}\text{Co}$  ค่าความไม่แน่นอนร้อยละ  $1.5 \pm 1.2$  การศึกษาผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ สำหรับการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) ทำการอ่านค่านับวัดรังสีภายหลังฉายรังสี 40 วินาที ถึง 10 นาที พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ 8.8 ซึ่งในช่วง 8 ถึง 10 นาทีหลังฉาย เริ่มมีความเสถียรที่สามารถอ่านค่านับวัดได้ และช่วงระยะเวลาภายหลังฉายรังสี 8 เดือนมีการจางหายของสัญญาณ โดยมีค่าความไม่แน่นอนร้อยละ 4.8 และ 5.7 สำหรับ 6 และ 18 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ และการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ทำการอ่านค่านับวัดจำนวน 200 ครั้ง สำหรับในการศึกษาที่ปริมาณรังสี 2 Gy พบว่ามีการสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.05 ต่อการอ่านค่า แต่สำหรับการศึกษาที่ปริมาณรังสี 10 Gy พบว่ามีการสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.06 ต่อการอ่านค่า จาก

การศึกษาแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีประสิทธิภาพและความเหมาะสม สำหรับการวัดปริมาณรังสีในการรักษาทางรังสีรักษา

จากวรรณกรรม แสดงสรุปการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท รายละเอียดดังตาราง 1



ตาราง 1 แสดงสรุปการศึกษาการรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Test	Jursinic PA et al. 2007 (19)	Viamonte A et al. 2008 (20)	Dunn L et al. 2013 (21)	Jain GK et al. 2017 (31)	Ponmalar R et al. 2017 (32)
Source	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Photon: 6, 15 MV</li> <li>· Electron :6, 9, 12, 16, 20 MeV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Photon: 6, 10, 18 MV</li> <li>· <sup>60</sup>Co</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Photon: 6, 10, 18 MV</li> <li>· Electron ; 6, 8, 10, 12, 15 และ 18 MeV</li> <li>· <sup>60</sup>Co</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Photon: 6, 10 MV</li> <li>· <sup>60</sup>Co</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Photon: 6, 18 MV</li> <li>· <sup>60</sup>Co</li> </ul>
Compare	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Markus N23343</li> <li>· surface Diode</li> <li>· TLD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Markus</li> <li>· Diode</li> </ul>	-	TM 30013	FC65G
Fading characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ช่วงเวลาอ่านค่านับวัด 8-15 นาทีหลังฉายรังสี</li> <li>· ช่วงเวลา 10 ถึง 3600 นาที หลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณ 2%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 6 ชั่วโมงหลังฉายรังสี ไม่มีการจางหายของสัญญาณ 2%</li> <li>· 1-5 วันหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณ 2%</li> <li>· 5- 21 วันหลังฉายรังสี ไม่มีการจางหายของสัญญาณ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ช่วงเวลาอ่านค่านับวัด 16 นาทีหลังฉายรังสี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 7 วัน หลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณ 1.4 %</li> <li>· 37 วันหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณ 1.8 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ช่วงเวลาอ่านค่านับวัด 8-10 นาทีหลังฉายรังสี</li> <li>· 8 เดือนหลังฉายรังสี มีการจางหายของสัญญาณ 4.8 %</li> </ul>
Signal depletion per read out (ต่อการอ่านค่า)	ร้อยละ 0.05	-	ร้อยละ 0.028	ร้อยละ 0.29	ร้อยละ 0.05



ตาราง 1 แสดงสรุปการศึกษาการรวมที่เกี่ยวของ (ต่อ)

Test	Jursinic PA et al. 2007 (19)	Viamonte A et al. 2008 (20)	Dunn L et al. 2013 (21)	Jain GK et al. 2017 (31)	Ponmalar R et al. 2017 (32)
Reproducibility	ใช้ซ้ำได้	ใช้ซ้ำได้	ใช้ซ้ำได้	-	ใช้ซ้ำได้
Dose rate dependency	ไม่ขึ้นกับ อัตราปริมาณรังสี	ไม่ขึ้นกับ อัตราปริมาณรังสี	-	ไม่ขึ้นกับ อัตราปริมาณรังสี	ไม่ขึ้นกับ อัตราปริมาณรังสี
Angular dependency	ไม่ขึ้นกับ ทิศทางของลำรังสี	-	-	ไม่ขึ้นกับ ทิศทางของลำรังสี	-
SSD dependency	-	ขึ้นกับระยะ ทางที่ได้รับรังสี	-	-	ขึ้นกับระยะ ทางที่ได้รับรังสี
Dose linearity	· 50 – 300 cGy Linearity · >300 cGy Supralinearity	50 – 400 cGy Linearity	· 50 – 200 cGy Linearity · >200 cGy Supralinearity	50 – 400 cGy Linearity	· 50 – 300 cGy Linearity · >300 cGy Supralinearity

หมายเหตุ: - ไม่ได้ทำการศึกษาในหัวข้อนี้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพการนับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท โดยมีรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยรายละเอียดของการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ชุดอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA)

3.1.1.1 อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท รุ่น Screened (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) ซึ่งมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร ภายในเป็นผลึกของสารประกอบ  $Al_2O_3:C$  (Aluminium oxidedoped with carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร หนา 0.3 มิลลิเมตร และสามารถวัดปริมาณรังสีได้ในช่วงระหว่าง 10  $\mu$ Gy ถึง 100 Gy ดังแสดงในภาพ 7



ภาพ 7 ลักษณะอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท

3.1.1.2 เครื่องอ่านค่านับวัด รุ่น Micro Star (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) MicroStar Reader สามารถอ่านค่าได้ภายใน 3 วินาทีต่ออุปกรณ์วัดรังสี 1 ตัว ดังแสดงในภาพ 8



ภาพ 8 ชุดอุปกรณ์ MicroStar Reader

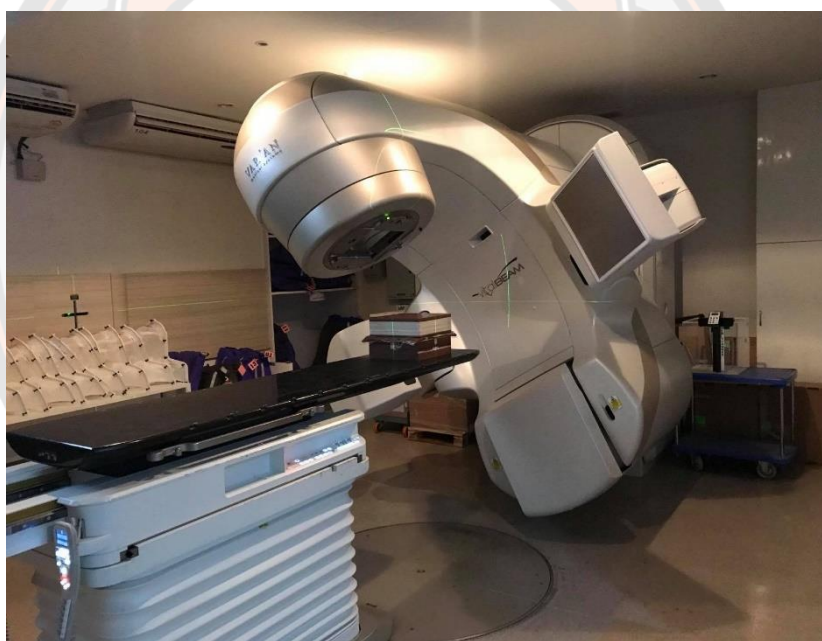
3.1.1.3 เครื่องล้างข้อมูลการนับวัด (Annealer) รุ่น InLight (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) ดังแสดงในภาพ 9



ภาพ 9 ชุดอุปกรณ์ Annealer รุ่น InLight

### 3.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Linear accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาค ยี่ห้อ Varian (Varian Medical System. Inc., Palo Alto, CA, USA) รุ่น Vitalbeam ดังแสดงในภาพ 10 ให้เอกซเรย์พลังงาน 6, 10 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter) พลังงาน 6 และ 10 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (Flattening filter free) และอิเล็กทรอนิกส์พลังงาน 6 ถึง 22 เมกะอิเล็กทรอนิกส์โวลต์ เครื่องประกอบด้วย Multileaf collimator (MLC) 120 Leaf (60 คู่ของ MLC) ความกว้างของ MLC 10 มิลลิเมตร จำนวน 20 คู่ และพื้นที่ของการฉายรังสีสูงสุด (Maximum static field size) เท่ากับ  $40 \times 40$  ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถปลดปล่อยปริมาณรังสีต่อเวลาสูงสุดเท่ากับ 600 MU/min มีตัวกรองปรับเรียบ ส่วนการฉายรังสีแบบไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ สามารถปลดปล่อยปริมาณรังสีต่อเวลาสูงสุดเท่ากับ 1,400 MU/min (33) ดังแสดงในตาราง 2



ภาพ 10 เครื่องเร่งอนุภาค รุ่น Vitalbeam

ตาราง 2 แสดงข้อมูลจำเพาะเครื่องเร่งอนุภาค

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
พลังงานเอกซเรย์	6, 10 และ 15 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ 6 และ 10 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ
พลังงานอิเล็กตรอน	6, 9, 12, 15, 18, 20 และ 22 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์
อัตราปริมาณรังสี (MU/min)	ใช้ตัวกรองปรับเรียบ: 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ: 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และ 1,400
พื้นที่ลำรังสีใหญ่ที่สุด (ตารางเซนติเมตร)	40 × 40

### 3.1.3 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง (Solid water phantom)

วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง มีค่าความหนาแน่น  $1.04 \text{ g/cm}^3$  ขนาด  $30 \times 30$  ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 11 และมีความหนาหลายขนาด เช่น 0.5, 1, 1.5, 2 และ 5 เซนติเมตร (34)



ภาพ 11 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง (Solid water phantom)

ที่มา: <http://jrtassociates.com/solidwaterphantommaterial.aspx>

### 3.1.4 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SuperFlab bolus)

วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ มีค่าความหนาแน่น  $1.02 \text{ g/cm}^3$  ขนาด  $30 \times 30$  ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 12 มีความหนาหลายขนาด เช่น 0.5, 1, 1.5, 2 เซนติเมตร และมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น  $30 \times 30$ ,  $30 \times 40$  และ  $40 \times 40$  ตารางเซนติเมตร เป็นต้น (35)



ภาพ 12 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SuperFlab bolus)

ที่มา: [https://www.bebig.com/home/products/radiotherapy\\_accessories/superflab](https://www.bebig.com/home/products/radiotherapy_accessories/superflab)



### 3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาโดยใช้รังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ซึ่งทำการศึกษาหัวข้อได้แก่ ลักษณะการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity)

ในการศึกษาแต่ละหัวข้อ ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และกระบวนการอ่านค่านับวัดทำการอ่านค่านับวัดซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยข้อมูลการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี โดยก่อนจะนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไปใช้งานจะต้องทำการอ่านค่าปริมาณรังสีพื้นหลังของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ทุกครั้ง เพื่อหาค่าปริมาณรังสีพื้นหลังที่หลงเหลืออยู่ภายในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี อีกทั้งในการศึกษาทำการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ดังภาคผนวก ก และในการศึกษาแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics)

##### 3.2.1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อหาลักษณะการจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้นหากไม่ได้ทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีทันทีภายหลังฉายรังสี โดยวิเคราะห์การสูญเสียสัญญาณและหาเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีภายหลังฉายรังสี

##### 3.2.1.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.1.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อหนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง และซ้อนทับด้วยวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค Source to surface distance (SSD) ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร

3.2.1.2.2 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีภายหลังฉายรังสีตามเวลาดังนี้ 1, 2, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 240, 360, 480 นาที และในทุก ๆ วันหลังฉายรังสีทั้งหมด 30 วัน

3.2.1.2.3 เมื่ออ่านค่าปริมาณรังสีครบ 30 วัน นำค่านับวัดปริมาณรังสีสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาหลังการฉายรังสี (Minutes) และค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose ช่วงเวลาแรก (1 นาที ภายหลังจากฉายรังสี) ให้มีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นวิเคราะห์ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่านับวัดภายหลังจากฉายรังสี โดยพิจารณาจากความคงที่ของค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ และเมื่อได้ระยะเวลาที่เหมาะสมของการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี ทำการ Normalized dose ช่วงเวลาที่เหมาะสมของการอ่านค่านับวัด ให้มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อหาการจางหายของสัญญาณนับวัดปริมาณรังสีภายหลังจากฉายรังสีในระยะ 30 วัน อีกทั้งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะนำไปใช้อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีกับการศึกษาในหัวข้ออื่น ๆ ต่อไป

### 3.2.2 การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out)

#### 3.2.2.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียของสัญญาณซึ่งเป็นผลจากการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีในแต่ละครั้ง

#### 3.2.2.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.2.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อหนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค SSD ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร

3.2.2.2.2 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min

3.2.2.2.3 อ่านค่านับวัดซ้ำจำนวน 100 ครั้ง โดยแต่ละครั้งห่างกันครั้งละ 5 นาที จนครบ 100 ครั้ง

3.2.2.2.4 นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดที่ได้แต่ละครั้ง ทั้งหมด 100 ครั้ง และค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose ในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีในครั้งแรก มีค่าเท่ากับ 1 และวิเคราะห์อัตราการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า

### 3.2.3 ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility)

#### 3.2.3.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ซ้ำของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท หลังจากทำการลบสัญญาณนับวัดปริมาณรังสีและนำกลับมาใช้ซ้ำ

#### 3.2.3.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.3.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ หนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค SSD ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร

3.2.3.2.2 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีภายหลังฉายรังสีโดยใช้ผลของระยะเวลาในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จากการทดสอบที่ 1 จากนั้นล้างข้อมูลและนำกลับมาฉายรังสีซ้ำแบบเดิมทั้งหมด 5 ครั้ง

3.2.3.2.3 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดปริมาณรังสีแต่ละครั้งของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และค่าปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose ในการอ่านค่านับวัดปริมาณในครั้งแรก มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อหาความแตกต่างของค่าปริมาณรังสีในการทดสอบซ้ำในครั้งที่ 2, 3, 4 และ 5

### 3.2.4 การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)

#### 3.2.4.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อตรวจสอบค่านับวัดรังสีที่ได้จากการฉายรังสีที่อัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสีหรือไม่

#### 3.2.4.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.4.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ หนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค SSD ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร

3.2.4.2.2 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU เปลี่ยนอัตราปริมาณรังสีตั้งแต่ 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 MU/min สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และปรับเปลี่ยนอัตราปริมาณรังสีตั้งแต่ 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และ 1,400 MU/min สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

3.2.4.2.3 อ่านค่านับวัดปริมาณรังสี โดยหาค่าเฉลี่ยในการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

3.2.4.2.4 นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากการฉายรังสีด้วยอัตราปริมาณรังสี (MU/min) ต่าง ๆ และปริมาณรังสีสัมพันธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ Normalized dose ด้วยอัตราปริมาณรังสี 300 MU/min และ 1,400 MU/min สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ให้มีค่าเท่ากับ 1

### 3.2.5 การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence)

#### 3.2.5.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาการตอบสนองของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทางของการเข้าของลำรังสีในมุมต่าง ๆ

#### 3.2.5.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.5.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 90 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค Source to axis distance (SAD) ดังแสดงในภาพ 14 เซนติเมตร ปรับมุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาคระหว่าง 0 ถึง 360 องศา โดยเปลี่ยนแปลงครั้งละ 10 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร

3.2.5.2.2 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min เมื่อฉายรังสีแล้วเสร็จ อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีและหาค่าเฉลี่ยของค่านับวัดปริมาณรังสี

3.2.5.2.3 นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากการฉายรังสีด้วยทิศทางของลำรังสีทำมุมองศา (Degree) ต่าง ๆ และปริมาณรังสีสัมพันธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose ในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีจากทิศทางของลำรังสี 0 องศา ให้มีค่าเท่ากับ 1

### 3.2.6 การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence)

#### 3.2.6.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อตรวจสอบค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับระยะทางที่ได้รับรังสีหรือไม่ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง

#### 3.2.6.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.6.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ หนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร



3.2.6.2.2 ปรับระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะต่าง ๆ ดังนี้ 70, 80, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 130 เซนติเมตร

3.2.6.2.3 ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min เมื่อฉายรังสีแล้วเสร็จ อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีและหาค่าเฉลี่ยของค่านับวัดปริมาณรังสี

3.2.6.2.4 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะต่าง ๆ ที่ได้รับรังสี (เซนติเมตร) และปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (Normalized dose) โดยทำการ Normalized dose ด้วยปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในระยะ SSD 100 เซนติเมตร ให้มีค่าเท่ากับ 1

### 3.2.7 ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity)

#### 3.2.7.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และปริมาณรังสีที่ฉายมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่

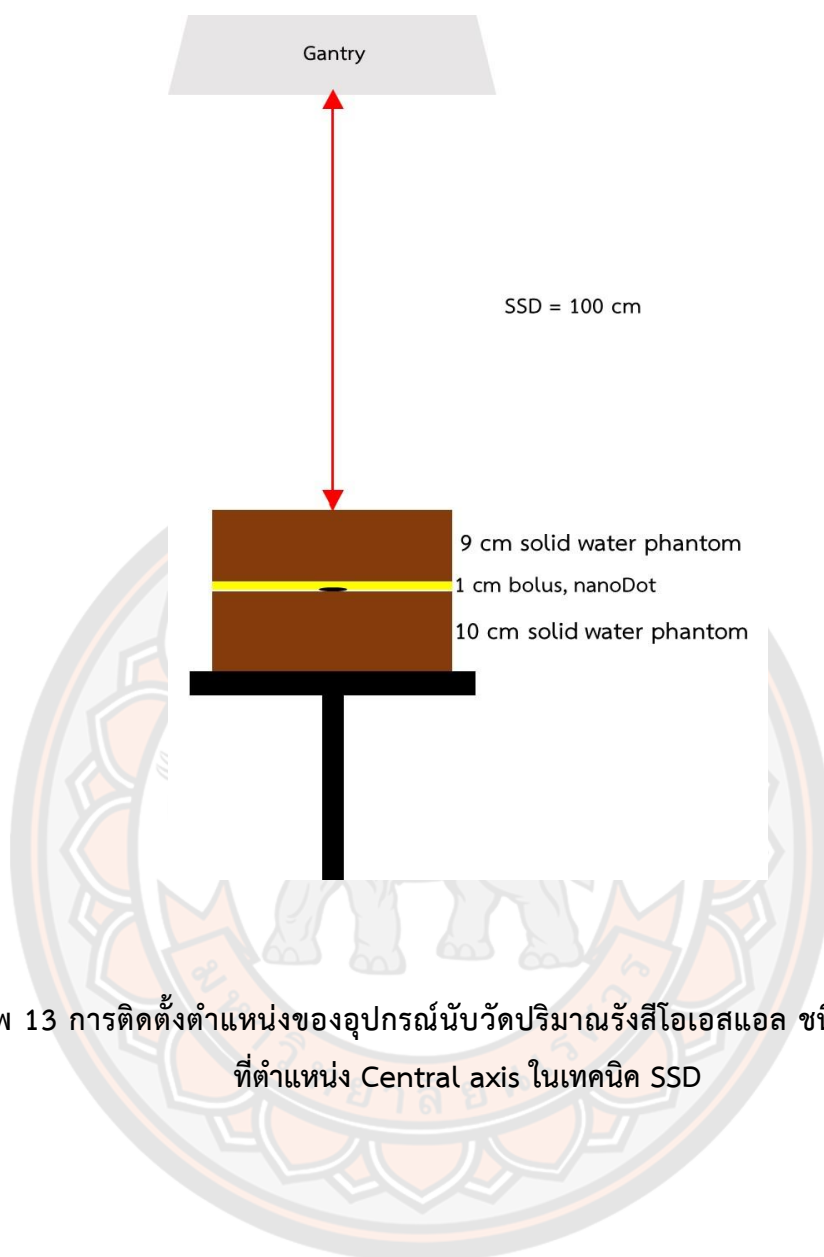
#### 3.2.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

3.2.7.2.1 วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 1 ตัว บนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ หนา 1 เซนติเมตร ซ้อนทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จัดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็งที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค SSD ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร

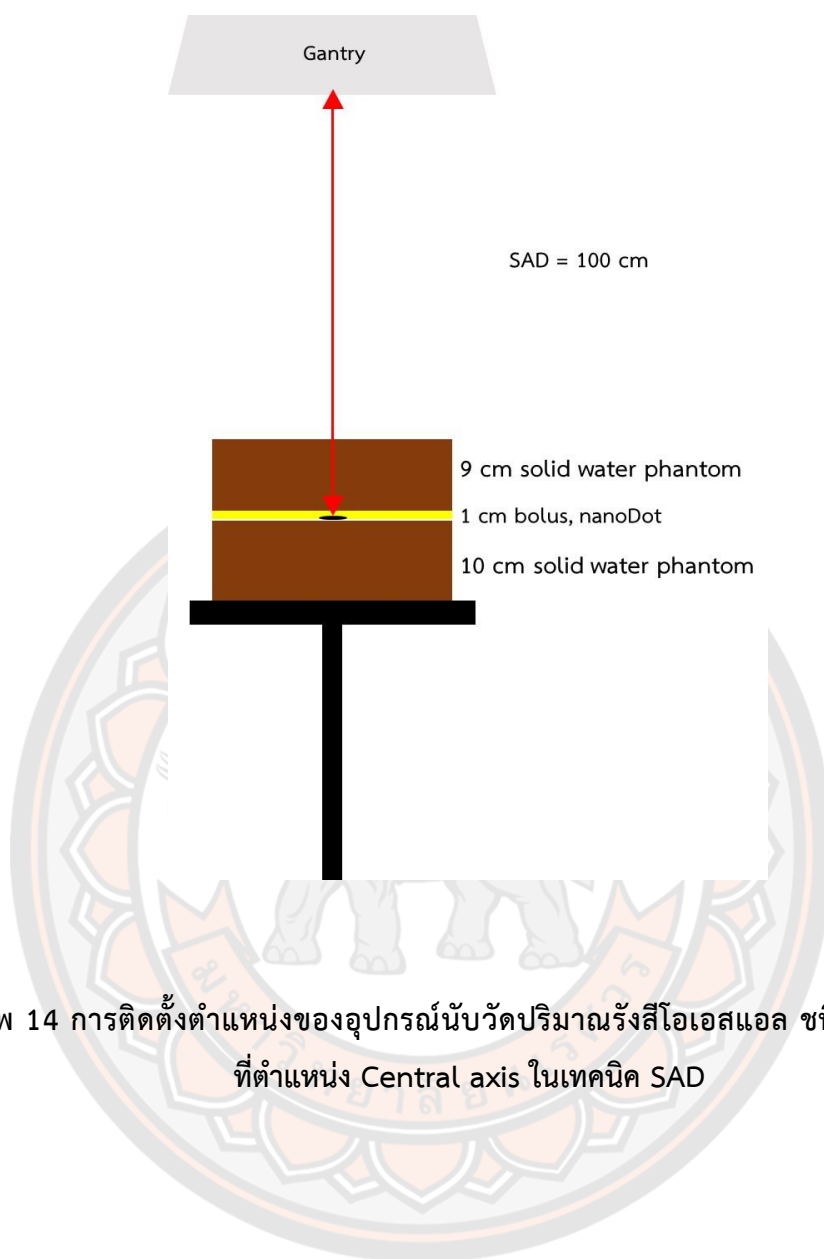
3.2.7.2.2 ตั้งค่าอัตราปริมาณรังสี 400 MU/min และฉายรังสีด้วยปริมาณรังสีตั้งแต่ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1,000 MU เมื่อฉายรังสีแล้วเสร็จ อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีและหาค่าเฉลี่ยของค่านับวัดปริมาณรังสี

3.2.7.2.3 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีที่ฉาย และค่านับวัดปริมาณรังสี เพื่อหาความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองในแบบ Linearity





ภาพ 13 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
ที่ตำแหน่ง Central axis ในเทคนิค SSD



ภาพ 14 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
ที่ตำแหน่ง Central axis ในเทคนิค SAD

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ได้แก่ ลักษณะการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ผลการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility) การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence) การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence) การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence) และความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose Linearity) โดยทุกการศึกษาใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 3 ตัวและอ่านค่านับวัดซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่านับวัดปริมาณรังสี โดยผลการศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ มีดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics)

##### 4.1.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลจากการศึกษาพบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 142.49 cGy ถึง 114.77 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 4.70 cGy ประมาณ 3.99 % และเมื่อนับวัดค่าปริมาณรังสีที่เวลา 1 – 60 นาทีภายหลังฉายรังสี ซึ่งปริมาณรังสีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกภายหลังฉายรังสี โดยลดลงร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับค่านับวัดปริมาณรังสีจากการอ่านค่านับวัดภายหลังฉายรังสี 1 นาที และค่านับวัดปริมาณรังสีเริ่มเสถียรในนาทีที่ 5 ภายหลังฉายรังสี ดังแสดงในตาราง 3, 4 และภาพ 15

ตาราง 3 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 480 นาทีภายหลังฉายรังสี  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (นาที)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
1	147.56	138.67	141.24	142.49 $\pm$ 4.57
2	136.53	131.85	126.67	131.68 $\pm$ 4.93
5	116.13	123.81	122.44	120.79 $\pm$ 4.10
8	120.45	120.03	122.05	120.84 $\pm$ 1.07
10	121.10	119.27	116.20	118.85 $\pm$ 2.47
15	119.58	124.80	123.36	122.58 $\pm$ 2.70
20	115.92	116.14	121.35	117.80 $\pm$ 3.07
30	117.91	117.72	119.76	118.46 $\pm$ 1.13
45	124.85	121.73	119.60	122.06 $\pm$ 2.64
60	115.09	118.29	120.48	117.95 $\pm$ 2.71
120	110.90	116.95	116.47	114.77 $\pm$ 3.37
240	116.92	116.33	117.47	116.91 $\pm$ 0.57
360	116.85	113.18	115.08	115.04 $\pm$ 1.84
480	119.28	116.95	117.47	117.90 $\pm$ 1.22

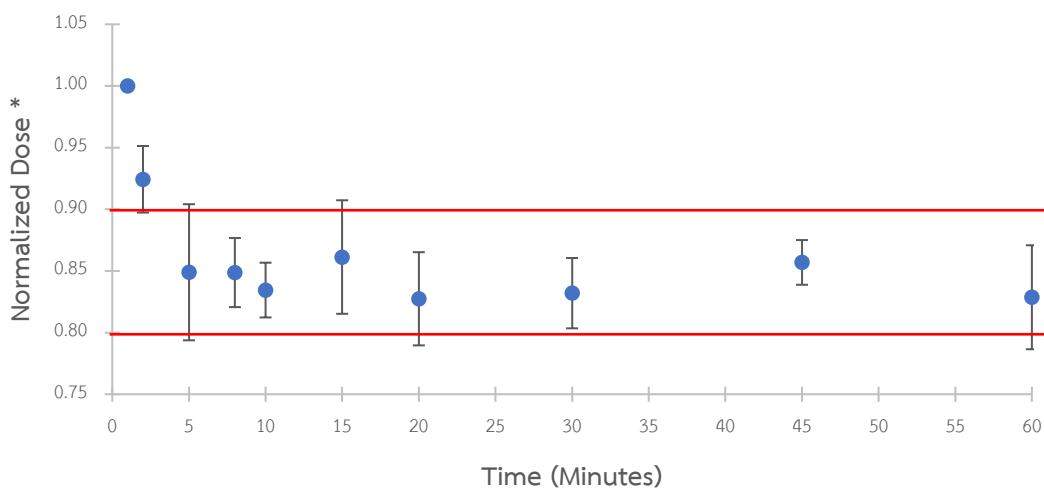
ตาราง 4 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังจากฉายรังสี  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (วัน)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
1	119.92	117.93	119.81	119.22 $\pm$ 1.12
2	120.35	122.27	116.15	119.59 $\pm$ 3.13
3	118.63	120.80	119.20	119.54 $\pm$ 1.12
4	119.61	120.32	117.38	119.10 $\pm$ 1.53
5	115.57	123.13	114.51	117.74 $\pm$ 4.70
6	116.23	115.89	116.96	116.36 $\pm$ 0.54
7	116.12	116.37	117.21	116.57 $\pm$ 0.57
8	117.31	116.19	115.88	116.46 $\pm$ 0.75
9	113.77	119.81	114.16	115.91 $\pm$ 3.38
10	118.74	119.45	120.12	119.43 $\pm$ 0.69
11	113.62	116.81	116.15	115.53 $\pm$ 1.68
12	117.79	122.30	118.01	119.37 $\pm$ 2.54
13	117.10	116.40	114.93	116.15 $\pm$ 1.11
14	116.79	120.21	120.80	119.27 $\pm$ 2.16
15	119.24	119.77	120.09	119.70 $\pm$ 0.43
16	119.55	119.24	119.36	119.38 $\pm$ 0.16
17	121.77	125.03	119.43	122.08 $\pm$ 2.81
18	119.80	115.90	117.81	117.84 $\pm$ 1.95
19	116.38	118.24	118.17	117.60 $\pm$ 1.06
20	117.50	118.93	119.98	118.80 $\pm$ 1.24
21	119.27	117.66	122.71	119.88 $\pm$ 2.58
22	123.69	119.33	119.18	120.74 $\pm$ 2.56
23	121.36	119.90	118.80	120.02 $\pm$ 1.28
24	118.95	120.81	115.40	118.39 $\pm$ 2.75

ตาราง 4 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังจากฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (วัน)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
25	118.82	123.18	121.91	121.30 $\pm$ 2.24
26	118.93	119.31	120.87	119.70 $\pm$ 1.03
27	114.91	120.25	118.20	117.79 $\pm$ 2.69
28	117.75	115.08	119.08	117.30 $\pm$ 2.04
29	115.65	115.71	119.30	116.89 $\pm$ 2.09
30	119.09	120.88	117.81	119.26 $\pm$ 1.54

Fading characteristics (6 MV) 60 minutes

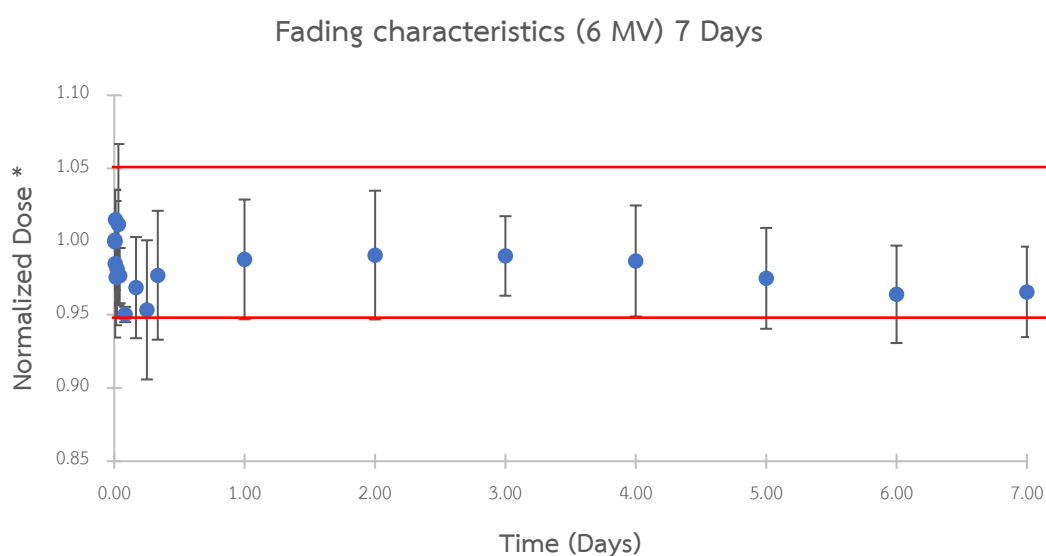


ภาพ 15 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 60 นาทีภายหลังจากฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose เทียบกับปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดภายหลังจากฉายรังสี 1 นาที

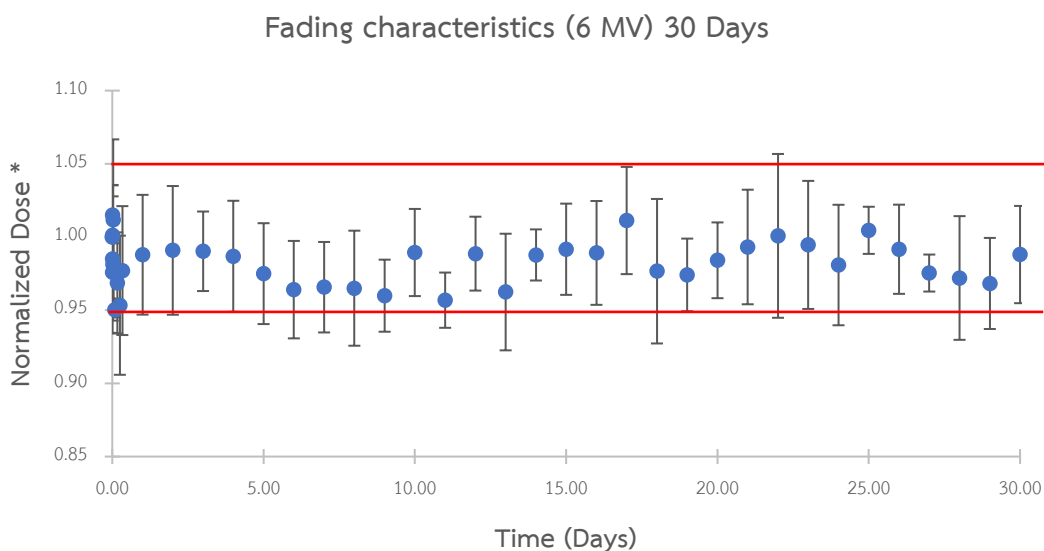


เมื่ออ่านค่านับวัดปริมาณรังสีจนครบ 30 วันภายหลังจากฉายรังสี พบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีมีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 5 ที่ระยะเวลา 5 นาที ถึง 30 วันภายหลังจากฉายรังสี ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ คือ ภายหลังจากฉายรังสี 5 นาที เป็นต้นไป โดยการจางหายของสัญญาณช่วงระยะเวลา 7 วันภายหลังจากฉายรังสี และ 30 วันภายหลังจากฉายรังสี แสดงดังในภาพ 16 และ 17 ตามลำดับ



ภาพ 16 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 7 วันภายหลังจากฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดหลังฉายรังสี 5 นาที



ภาพ 17 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 30 วันภายหลังฉายรังสี  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดหลังฉายรังสี 5 นาที

อย่างไรก็ตามเนื่องจากผู้วิจัยไม่มีชุดอุปกรณ์สำหรับการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี จึงไม่สามารถทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะเวลา 5 นาทีภายหลังฉายรังสีได้ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่านับวัดเริ่มเสถียรและเลือกอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะเวลา 2 วันภายหลังฉายรังสี โดยค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีที่อ่านได้ในระยะเวลา 5 นาทีภายหลังฉายรังสีและ 2 วันภายหลังฉายรังสี คือ ร้อยละ 0.73 ดังแสดงในภาพ 16 และ 17

#### 4.1.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ ทำการศึกษาช่วงเวลาในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีตั้งแต่ 1 นาทีภายหลังฉายรังสี ถึง 30 วันภายหลังฉายรังสี เช่นเดียวกันกับการศึกษาในพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ จากการศึกษาพบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 130.75 cGy ถึง 109.18 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 6.48 cGy ประมาณ 5.04 % และเมื่อนับวัดค่าปริมาณรังสีที่เวลา 1 – 60 นาที ภายหลังฉายรังสี ซึ่งนับวัดปริมาณรังสีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 8 นาทีภายหลังฉายรังสี โดยลดลงร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับค่านับวัดปริมาณรังสีจากการอ่านที่ระยะเวลา 1 นาทีภายหลังฉายรังสี และค่านับวัดปริมาณรังสีเริ่มเสถียรที่ 8 นาทีภายหลังฉายรังสี ดังแสดงในตาราง 5, 6 และภาพ 18

ตาราง 5 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 480 นาทีภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (นาที)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	135.42	126.91	129.92	130.75 $\pm$ 4.32
2	123.74	125.74	135.82	128.43 $\pm$ 6.48
5	115.97	112.87	120.68	116.51 $\pm$ 3.93
8	111.59	114.31	112.80	112.90 $\pm$ 1.36
10	114.07	115.83	112.59	114.16 $\pm$ 1.62
15	112.99	113.72	110.81	112.51 $\pm$ 1.51
20	113.11	111.70	112.20	112.34 $\pm$ 0.71
30	113.21	110.82	114.07	112.70 $\pm$ 1.69
45	114.16	111.96	115.27	113.80 $\pm$ 1.69
60	113.98	109.28	109.94	111.07 $\pm$ 2.55
120	111.40	113.95	115.74	113.70 $\pm$ 2.18
240	108.12	109.78	109.65	109.18 $\pm$ 0.93
360	113.76	111.59	113.40	112.92 $\pm$ 1.16
480	112.61	108.92	112.49	111.34 $\pm$ 2.10

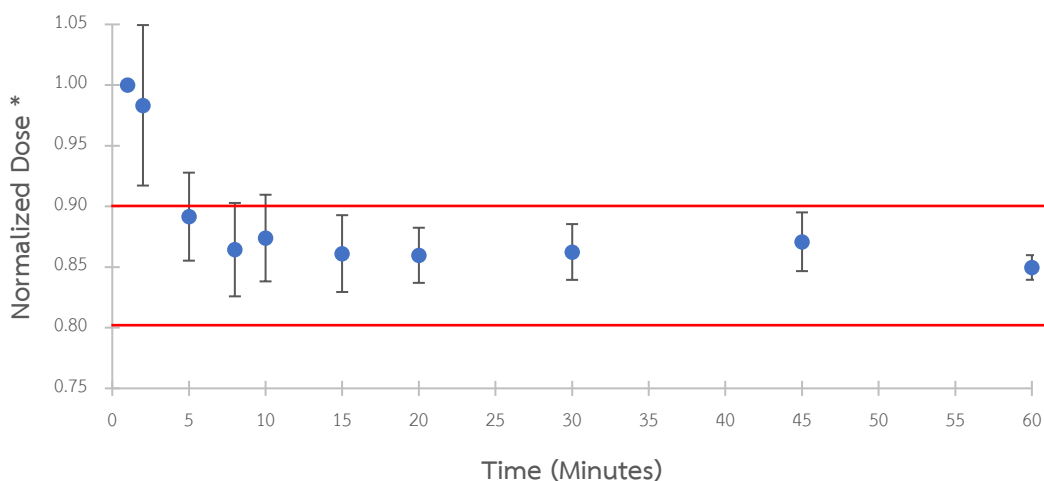
ตาราง 6 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังจากฉายรังสี  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (วัน)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
1	112.84	114.04	110.26	112.38 $\pm$ 1.01
2	111.53	111.42	108.94	110.63 $\pm$ 1.00
3	110.25	109.20	109.92	109.79 $\pm$ 0.99
4	116.10	112.24	114.88	114.41 $\pm$ 1.04
5	108.80	110.74	110.45	110.00 $\pm$ 0.97
6	113.90	118.26	109.83	114.00 $\pm$ 1.02
7	111.67	111.89	109.39	110.98 $\pm$ 1.00
8	112.06	111.48	108.11	110.55 $\pm$ 1.00
9	106.41	112.63	109.95	109.66 $\pm$ 0.95
10	114.90	112.02	110.76	112.56 $\pm$ 1.03
11	111.50	113.66	111.10	112.09 $\pm$ 1.00
12	110.71	110.35	114.46	111.84 $\pm$ 0.99
13	109.34	113.09	111.09	111.17 $\pm$ 0.98
14	115.52	112.42	112.51	113.48 $\pm$ 1.04
15	112.47	111.15	105.13	109.58 $\pm$ 1.01
16	111.61	114.19	114.46	113.42 $\pm$ 1.00
17	110.96	111.01	116.74	112.90 $\pm$ 0.99
18	110.61	114.11	112.28	112.33 $\pm$ 0.99
19	112.53	111.04	111.82	111.80 $\pm$ 1.01
20	104.14	113.07	113.57	110.26 $\pm$ 0.93
21	112.43	117.40	109.84	113.22 $\pm$ 1.01
22	113.91	115.66	114.43	114.67 $\pm$ 1.02
23	114.02	112.68	114.72	113.80 $\pm$ 1.02
24	112.81	112.11	113.22	112.71 $\pm$ 1.01

ตาราง 6 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 30 วันภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ระยะเวลาภายหลัง การฉายรังสี (วัน)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
25	112.99	112.70	111.65	112.44 $\pm$ 0.71
26	115.37	112.66	116.78	114.94 $\pm$ 2.10
27	113.24	112.21	109.55	111.67 $\pm$ 1.90
28	112.20	112.24	110.53	111.66 $\pm$ 0.98
29	116.11	115.23	109.06	113.47 $\pm$ 3.84
30	115.65	114.55	107.51	112.57 $\pm$ 4.42

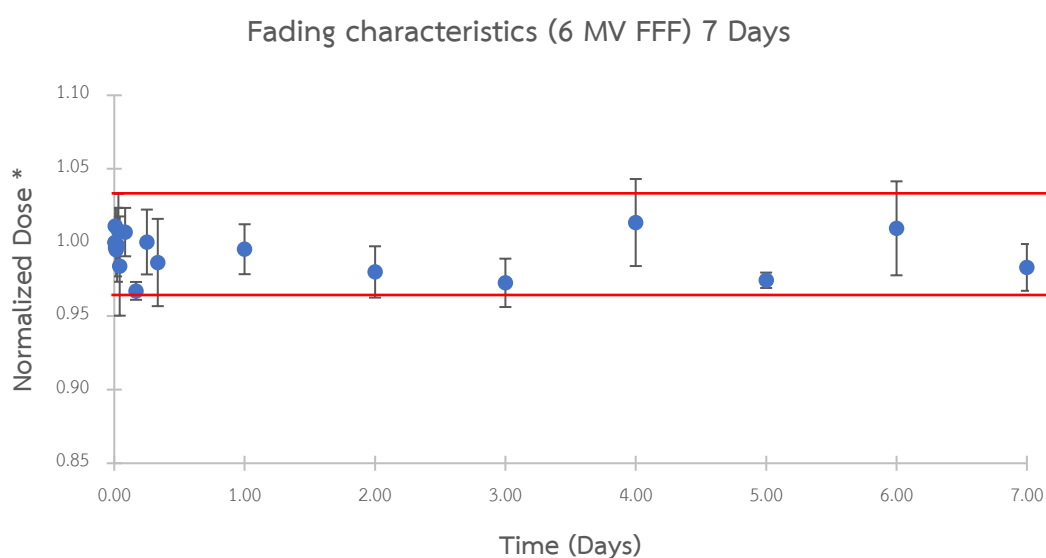
Fading characteristics (6 MV FFF) 60 minutes



ภาพ 18 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 60 นาทีภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดหลังฉายรังสี 1 นาที

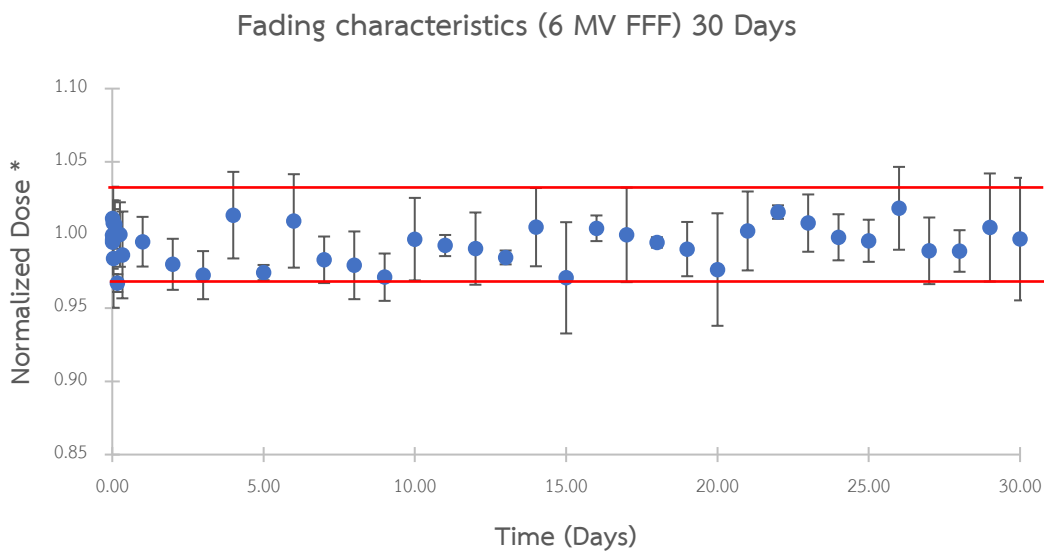
เมื่ออ่านค่านับวัดปริมาณรังสีครบ 30 วันภายหลังจากฉายรังสี พบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีมีการจางหายของสัญญาณร้อยละ 3 ที่ระยะเวลา 8 นาที ถึง 30 วันภายหลังจากฉายรังสี ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ คือ ภายหลังจากฉายรังสี 8 นาทีเป็นต้นไป โดยการจางหายของสัญญาณช่วงระยะเวลา 7 วันภายหลังจากฉายรังสี และ 30 วันภายหลังจากฉายรังสี แสดงดังในภาพ 19 และ 20 ตามลำดับ



ภาพ 19 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 7 วันภายหลังจากฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดหลังฉายรังสี 8 นาที





ภาพ 20 ค่านับวัดรังสีสัมพัทธ์ที่ได้จากการอ่านค่าในช่วงเวลา 30 วันภายหลังฉายรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดหลังฉายรังสี 8 นาที

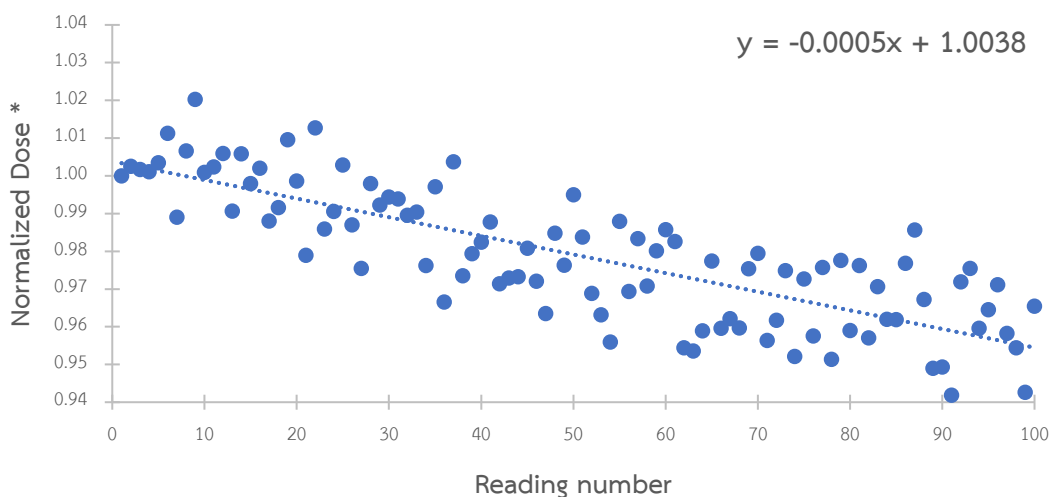
ทั้งนี้ในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ เมื่อทำการอ่านที่ระยะเวลา 2 วันภายหลังฉายรังสี ซึ่งมีค่าความแตกต่างจากนาที่ที่ 8 ภายหลังฉายรังสีร้อยละ 1.65 ดังแสดงในภาพ 19 และ 20

## 4.2 การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out)

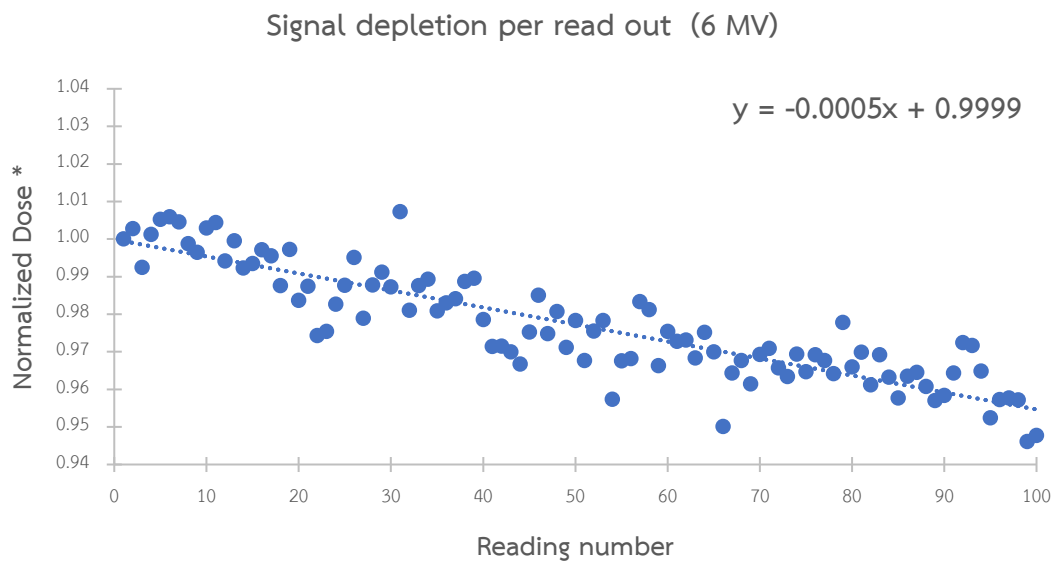
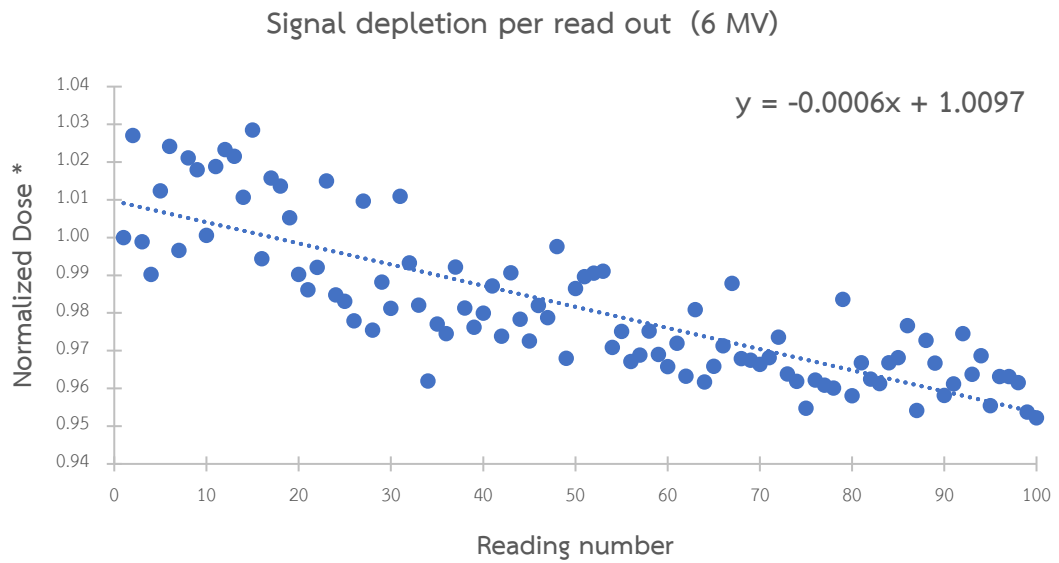
### 4.2.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการศึกษาพบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีในช่วงแรก 122.05 cGy เมื่อทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำจำนวน 100 ครั้ง ค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 114.06 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 2.88 cGy ประมาณ 2.42 % ดังแสดงในภาคผนวก ข และมีการสูญเสียสัญญาณจากการอ่านค่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.05 - 0.06 ต่อการอ่านค่า แต่ในการอ่านค่านับวัดซ้ำในช่วง 20 ครั้งแรกสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพ 21

Signal depletion per read out (6 MV)



( ก )



( ค )

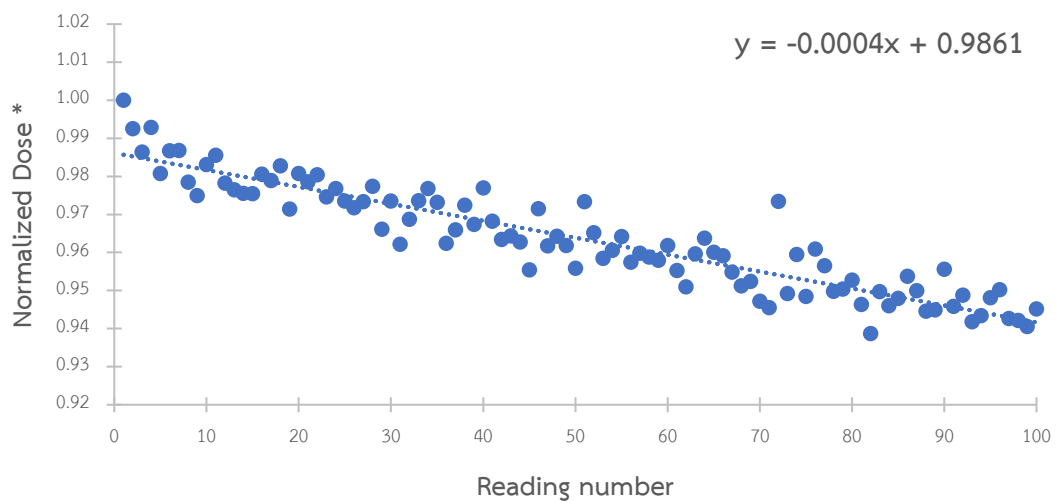
ภาพ 21 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการอ่านค่านับวัดซ้ำ สำหรับอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 1 (ก)  
ตัวที่ 2 (ข) ตัวที่ 3 (ค) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีในค่าที่ 1

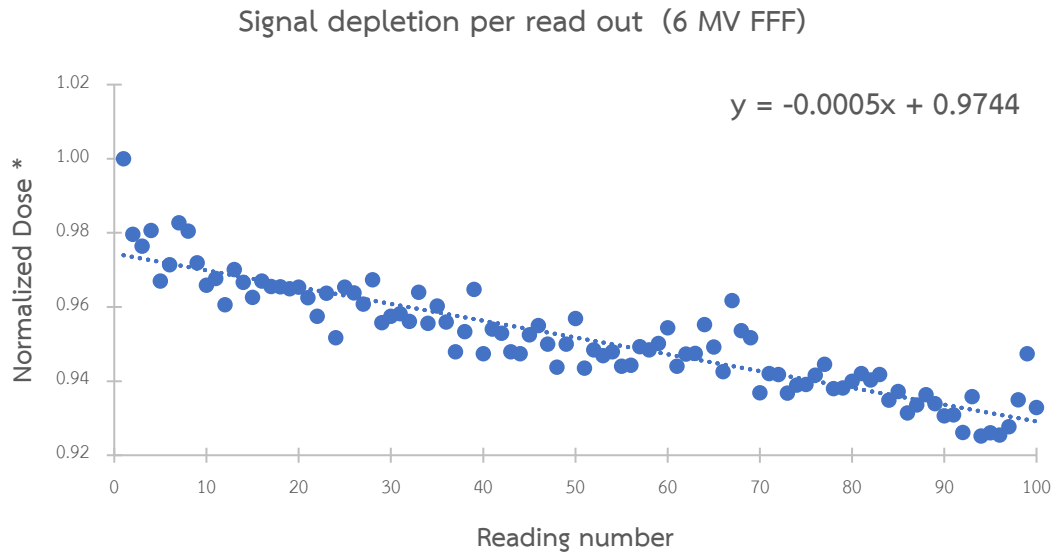
#### 4.2.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการศึกษาพบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีในช่วงแรก 118.18 cGy เมื่อทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำจำนวน 100 ครั้ง ค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 111.08 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 3.44 cGy ประมาณ 3.00 % ดังแสดงในภาคผนวก ข และมีการสูญเสียสัญญาณจากการอ่านค่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสูญเสียสัญญาณร้อยละ 0.04 - 0.05 ต่อการอ่านค่า แต่ในการอ่านค่านับวัดซ้ำในช่วง 20 ครั้งแรกสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพ 22

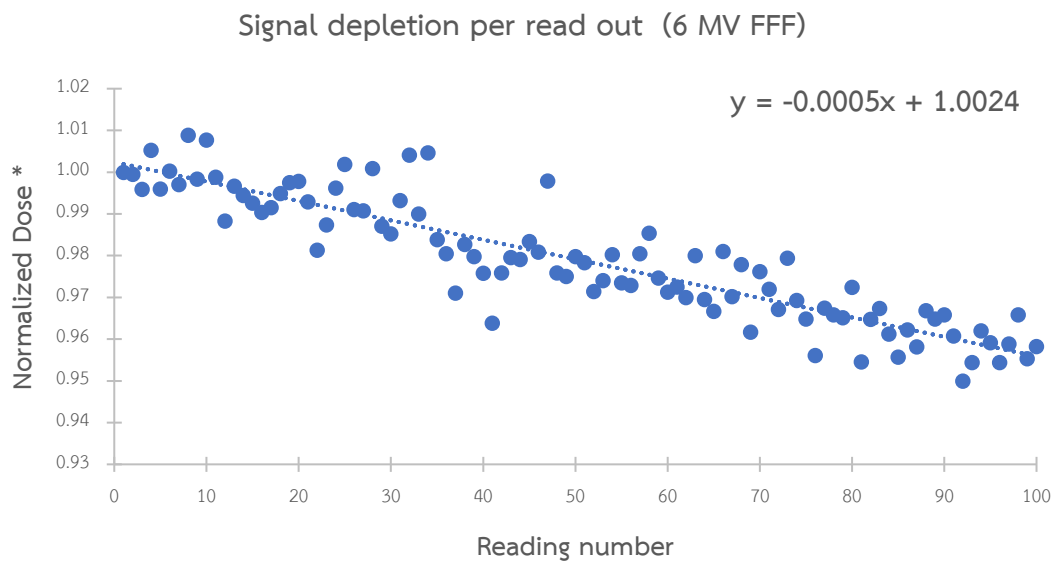
Signal depletion per read out (6 MV FFF)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 22 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการอ่านค่านับวัดซ้ำ สำหรับอุปกรณ์วัดรังสีตัวที่ 1 (ก)  
ตัวที่ 2 (ข) ตัวที่ 3 (ค) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่อ่านค่านับวัดปริมาณรังสีในค่าที่ 1

### 4.3 การวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility)

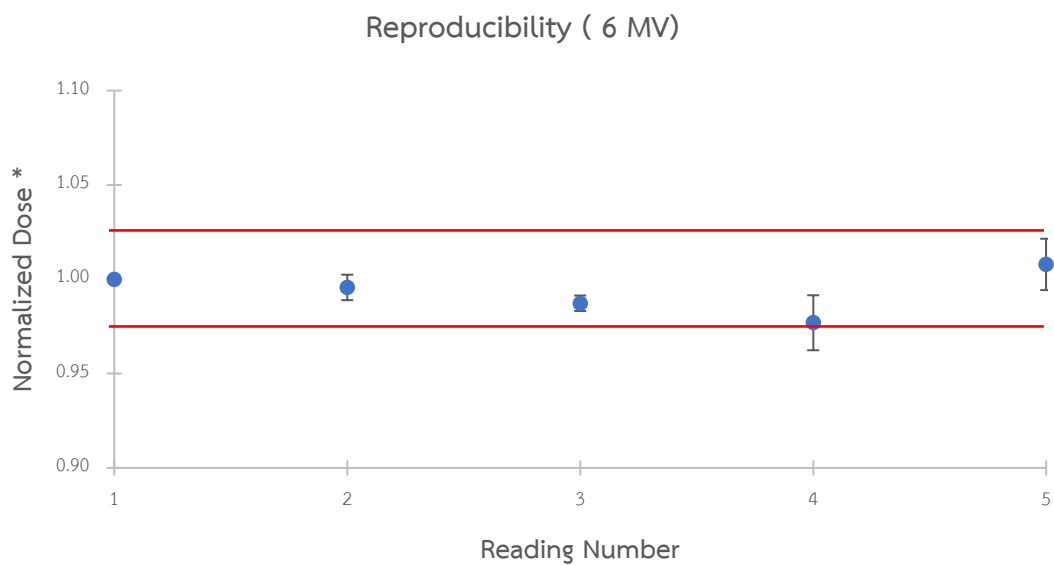
#### 4.3.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเทียบ

ผลการศึกษาพบว่า การนำกลับมาใช้ซ้ำของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีโอเอสแอล ชนิดนาโนดอท หลังทำการล้างข้อมูลค่านับวัดปริมาณรังสีหลังจากนั้นนำกลับมาใช้ซ้ำและวัดปริมาณรังสีอีกครั้ง โดยค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 118.61 cGy ถึง 122.36 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 1.51 cGy ประมาณ 1.24 % และเมื่อทำการนับวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง มีค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีร้อยละ 2 ดังแสดงในตาราง 7 และภาพ 23

ตาราง 7 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเทียบ

ครั้ง	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
1	123.16	120.48	120.62	121.42 $\pm$ 1.51	1.00
2	121.92	119.75	121.00	120.89 $\pm$ 1.09	1.00
3	121.07	119.42	119.12	119.87 $\pm$ 1.05	0.99
4	118.25	118.55	119.01	118.61 $\pm$ 0.38	0.98
5	122.50	121.34	123.26	122.36 $\pm$ 0.97	1.01





ภาพ 23 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการวัดค่าปริมาณรังสีซ้ำที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์  
ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

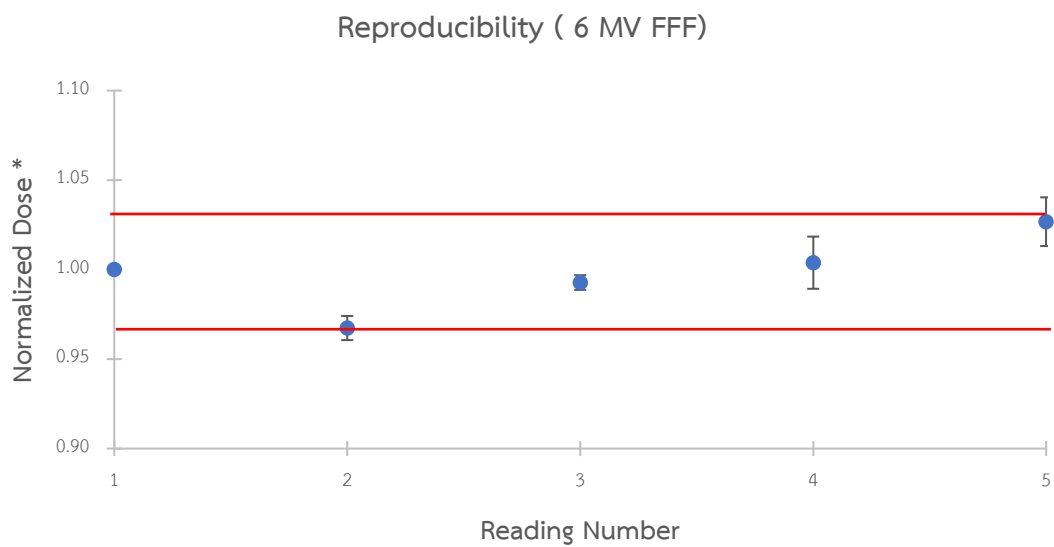
หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดในการศึกษาครั้งที่ 1

#### 4.3.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการศึกษาการวัดปริมาณรังสีซ้ำที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอต สามารถวัดปริมาณรังสีซ้ำอีกครั้งได้ โดยค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 110.94 cGy ถึง 117.76 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 1.48 cGy ประมาณ 1.30 % เมื่อทำการนับวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง มีค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีร้อยละ 3 ดังแสดงในตาราง 8 และภาพ 24

ตาราง 8 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ครั้ง	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
1	113.55	115.13	115.40	114.69 $\pm$ 1.00	1.00
2	111.42	111.24	110.16	110.94 $\pm$ 0.68	0.97
3	114.47	114.92	112.17	113.85 $\pm$ 1.48	0.99
4	114.00	116.05	115.36	115.13 $\pm$ 1.04	1.00
5	117.83	118.01	117.42	117.76 $\pm$ 0.30	1.03



ภาพ 24 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากการวัดค่าปริมาณรังสีซ้ำ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีของการอ่านค่านับวัดในการศึกษาครั้งที่ 1

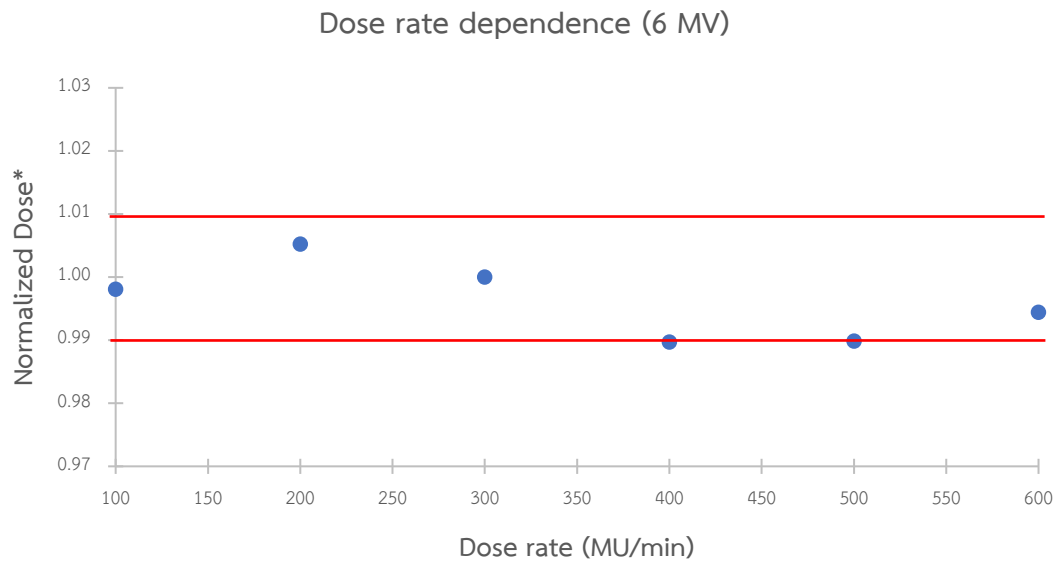
#### 4.4 การตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)

##### 4.4.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการทดสอบการตอบสนองของอัตราปริมาณรังสี พบว่า คำนับวัดปริมาณรังสี อยู่ในช่วง 120.19 cGy ถึง 122.08 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 3.28 cGy ประมาณ 2.73 % โดยมีค่าความแตกต่างของการนับวัดอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ อยู่ในช่วงร้อยละ 1 ดังแสดงในตาราง 9 และภาพ 25

ตาราง 9 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่อัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

อัตราปริมาณ รังสี (MU/min)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
100	119.43	121.16	123.04	121.21 $\pm$ 1.81	1.00
200	121.41	122.12	122.71	122.08 $\pm$ 0.65	1.01
300	123.42	120.65	120.26	121.44 $\pm$ 1.72	1.00
400	121.49	116.46	122.62	120.19 $\pm$ 3.28	0.99
500	120.66	119.08	120.90	120.21 $\pm$ 0.99	0.99
600	120.27	122.64	119.39	120.77 $\pm$ 1.68	0.99



ภาพ 25 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากอัตราปริมาณรังสี 300 MU/min

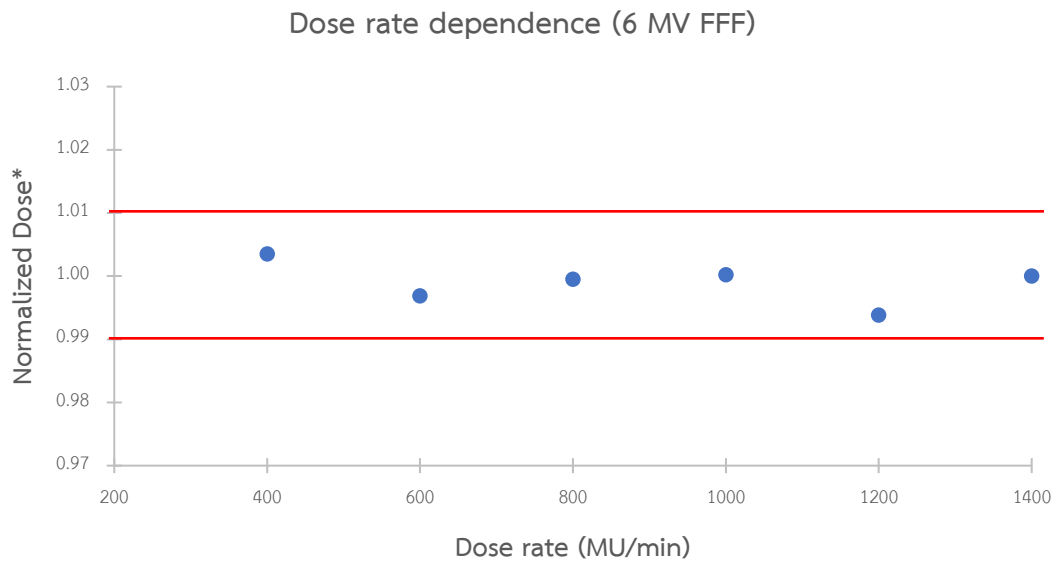
#### 4.4.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการทดสอบการตอบสนองของอัตราปริมาณรังสี พบว่า คำนับวัดปริมาณรังสี อยู่ในช่วง 116.04 cGy ถึง 117.17 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 4.03 cGy ประมาณ 3.45 % โดยมีค่าความแตกต่างของการนับวัดอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ อยู่ในช่วง ร้อยละ 1 ดังแสดงในตาราง 10 และภาพ 26

ตาราง 10 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่อัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

อัตราปริมาณ รังสี (MU/min)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
400	115.84	117.70	117.97	117.17 $\pm$ 1.16	1.00
600	117.38	115.60	116.20	116.39 $\pm$ 0.91	1.00
800	121.29	115.08	113.73	116.70 $\pm$ 4.03	1.00
1000	117.82	116.27	116.26	116.78 $\pm$ 0.90	1.00
1200	117.36	114.15	116.62	116.04 $\pm$ 1.68	0.99
1400	116.21	117.47	116.60	116.76 $\pm$ 0.64	1.00





ภาพ 26 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากอัตราปริมาณรังสีต่าง ๆ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากอัตราปริมาณรังสี 1400 MU/min

#### 4.5 การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence)

##### 4.5.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี พบว่า เมื่อมุมของลำรังสีน้อยกว่า  $\pm 10$  องศา ค่าความแตกต่างของการตอบสนองต่อรังสีอยู่ในช่วงร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับที่มุม 0 องศา โดยคำนวณวัดปริมาณรังสีในทิศทางของลำรังสีที่มุม 0 องศา มีค่า 148.21 cGy ในขณะที่ทิศทางของลำรังสีที่มุม  $\pm 10$  องศา มีค่า 144.46 cGy ค่าความแตกต่างจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมของทิศทางลำรังสีมากกว่า  $\pm 10$  องศา ดังแสดงในตาราง 11 นอกจากนี้ยังพบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอต มีการตอบสนองต่อรังสีน้อยที่สุดที่มุม  $\pm 120$  องศา โดยมีค่านับวัดปริมาณรังสี 103.11 cGy และ 105.61 cGy ที่ทิศทางของลำรังสีที่มุม 120 องศาและ 240 องศา ตามลำดับ โดยมีค่าความแตกต่างจากค่านับวัดปริมาณรังสีที่อ่านได้ที่มุม 0 องศา เท่ากับร้อยละ 30.43 อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 4.09 cGy ประมาณ 3.62 % ดังแสดงในภาพ 27

ตาราง 11 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

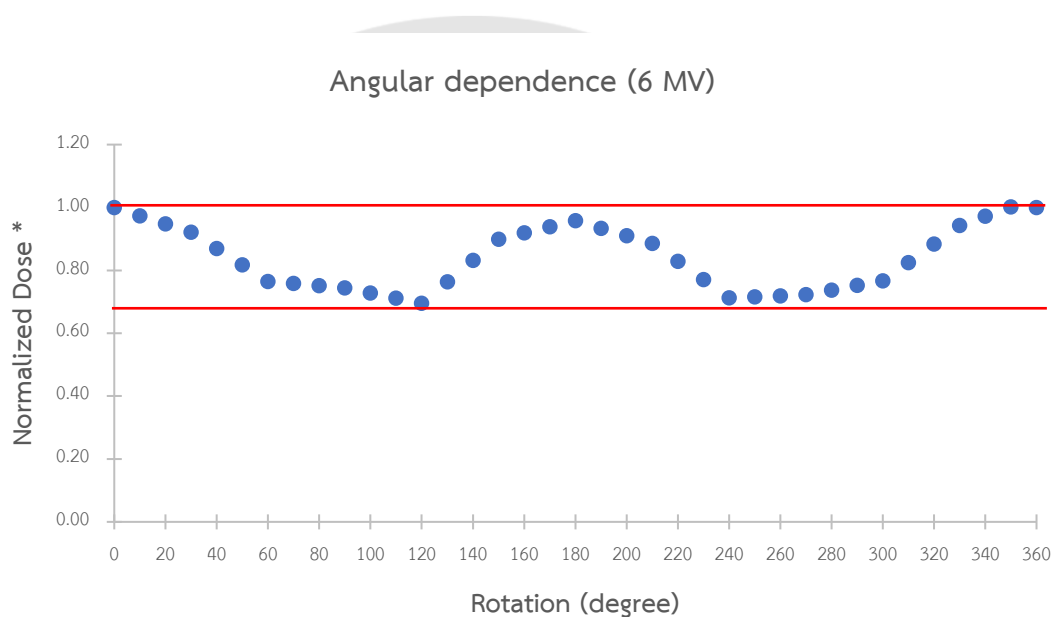
ทิศทางของ ลำรังสี(องศา)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
0	150.58	148.84	145.19	148.21 $\pm$ 2.75	1.00
10	145.97	144.28	142.83	144.36 $\pm$ 1.57	0.97
20	141.34	139.70	140.47	140.50 $\pm$ 0.82	0.95
30	136.70	135.12	138.09	136.63 $\pm$ 1.49	0.92
40	128.00	129.46	129.24	128.90 $\pm$ 0.79	0.87
50	119.30	123.80	120.38	121.16 $\pm$ 2.35	0.82
60	110.58	118.12	111.50	113.40 $\pm$ 4.11	0.77
70	111.42	115.54	110.23	112.40 $\pm$ 2.79	0.76
80	112.24	112.95	108.95	111.38 $\pm$ 2.14	0.75
90	113.04	110.35	107.65	110.35 $\pm$ 2.70	0.74
100	109.25	108.05	106.54	107.95 $\pm$ 1.36	0.73

ตาราง 11 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์  
ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ทิศทางของ ลำรังสี(องศา)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
110	105.44	105.75	105.42	105.54 $\pm$ 0.18	0.71
120	101.62	103.43	104.29	103.11 $\pm$ 1.36	0.70
130	112.66	112.67	114.28	113.20 $\pm$ 0.93	0.76
140	123.69	121.90	124.25	123.28 $\pm$ 1.23	0.83
150	134.70	131.11	134.22	133.34 $\pm$ 1.95	0.90
160	136.54	134.77	137.39	136.24 $\pm$ 1.34	0.92
170	138.37	138.43	140.56	139.12 $\pm$ 1.25	0.94
180	140.18	142.06	143.70	141.98 $\pm$ 1.76	0.96
190	138.79	138.11	138.50	138.47 $\pm$ 0.34	0.93
200	137.38	134.15	133.29	134.94 $\pm$ 2.16	0.91
210	135.96	130.17	128.05	131.39 $\pm$ 4.09	0.89
220	124.90	122.47	121.07	122.82 $\pm$ 1.94	0.83
230	113.83	114.77	114.07	114.22 $\pm$ 0.49	0.77
240	102.74	107.05	107.05	105.61 $\pm$ 2.49	0.71
250	104.78	106.05	107.58	106.14 $\pm$ 1.41	0.72
260	106.80	105.04	108.10	106.65 $\pm$ 1.54	0.72
270	108.80	104.01	108.61	107.14 $\pm$ 2.72	0.72
280	111.97	106.51	109.48	109.32 $\pm$ 2.73	0.74
290	115.12	109.01	110.33	111.48 $\pm$ 3.22	0.75
300	118.26	111.49	111.17	113.64 $\pm$ 4.01	0.77
310	125.40	120.57	121.06	122.34 $\pm$ 2.65	0.83
320	132.52	129.65	130.94	131.04 $\pm$ 1.44	0.88
330	139.63	138.72	140.81	139.72 $\pm$ 1.05	0.94
340	144.26	142.78	145.35	144.13 $\pm$ 1.29	0.97

ตาราง 11 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ทิศทางของ ลำรังสี(องศา)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
350	148.86	146.81	149.86	148.51 $\pm$ 1.55	1.00
360	150.58	148.84	145.19	148.21 $\pm$ 2.75	1.00



ภาพ 27 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพันธ์จากทิศทางการเข้าของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในมุม 0 องศา

#### 4.5.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี พบว่าเมื่อมุมของลำรังสีน้อยกว่า  $\pm 10$  องศา ค่าความแตกต่างของการตอบสนองต่อรังสีมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับที่มุม 0 องศา โดยค่านับวัดปริมาณรังสีในทิศทางของลำรังสีที่มุม 0 องศา มีค่า 141.23 cGy ในขณะที่ทิศทางของลำรังสีที่มุม  $\pm 10$  องศา มีค่า 137.14 cGy ค่าความแตกต่างจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมของทิศทางลำรังสีมากกว่า  $\pm 10$  องศา ดังแสดงในตาราง 12 นอกจากนี้ยังพบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการตอบสนองต่อรังสีน้อยที่สุดที่มุม  $\pm 120$  องศา โดยมีค่านับวัดปริมาณรังสี 95.45 cGy และ 95.09 cGy ที่ทิศทางของลำรังสีที่มุม 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ โดยมีค่าความแตกต่างจากค่านับวัดปริมาณรังสีที่อ่านได้ที่มุม 0 องศา เท่ากับร้อยละ 32.42 อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 6.04 cGy ประมาณ 6.02 % ดังแสดงใน ภาพ 28

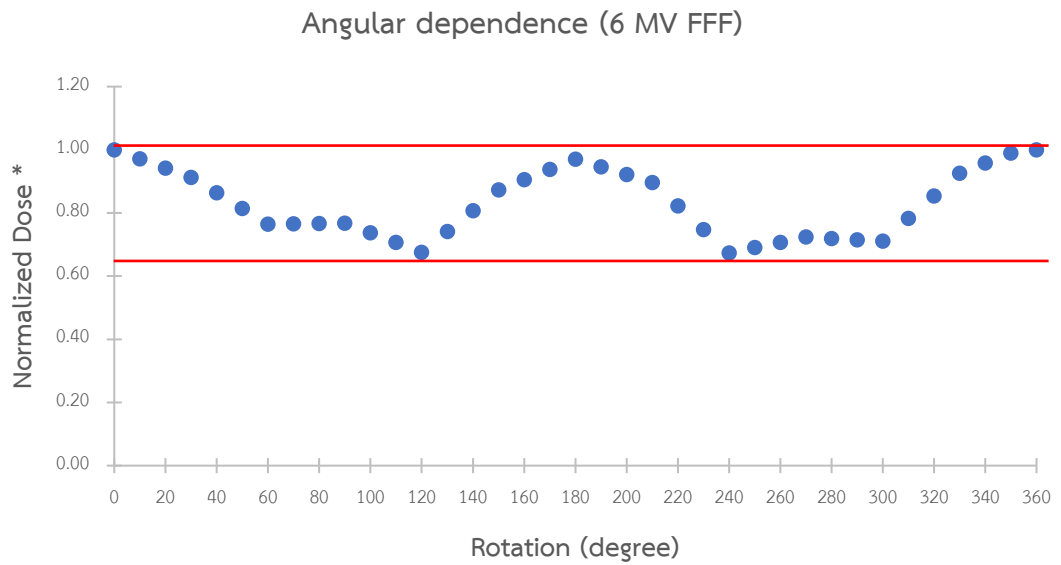
ตาราง 12 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ทิศทางของ ลำรังสี(องศา)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
0	140.79	141.37	141.54	141.23 $\pm$ 0.39	1.00
10	136.35	136.79	138.28	137.14 $\pm$ 1.01	0.97
20	131.89	132.20	135.02	133.03 $\pm$ 1.73	0.94
30	127.42	127.59	131.75	128.92 $\pm$ 2.45	0.91
40	120.26	120.28	125.34	121.96 $\pm$ 2.93	0.86
50	113.08	112.97	118.92	114.99 $\pm$ 3.40	0.81
60	105.90	105.63	112.49	108.01 $\pm$ 3.88	0.76
70	107.59	105.97	110.93	108.16 $\pm$ 2.53	0.77
80	109.27	106.30	109.36	108.31 $\pm$ 1.74	0.77
90	110.93	106.62	107.79	108.45 $\pm$ 2.23	0.77
100	106.35	102.72	103.31	104.13 $\pm$ 1.95	0.74
110	101.74	98.81	98.83	99.79 $\pm$ 1.69	0.71
120	97.13	94.88	94.33	95.45 $\pm$ 1.48	0.68

ตาราง 12 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้จากทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์  
ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ทิศทางของ ลำรังสี(องศา)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
130	105.28	104.15	104.77	104.74 $\pm$ 0.57	0.74
140	113.43	113.40	115.21	114.01 $\pm$ 1.04	0.81
150	121.56	122.64	125.63	123.28 $\pm$ 2.11	0.87
160	125.87	128.05	129.76	127.89 $\pm$ 1.95	0.91
170	130.18	133.45	133.88	132.50 $\pm$ 2.02	0.94
180	134.47	138.83	137.98	137.10 $\pm$ 2.31	0.97
190	131.90	134.83	134.12	133.62 $\pm$ 1.53	0.95
200	129.31	130.82	130.25	130.13 $\pm$ 0.76	0.92
210	126.71	126.79	126.37	126.62 $\pm$ 0.22	0.90
220	116.07	116.09	116.21	116.12 $\pm$ 0.07	0.82
230	105.42	105.39	106.03	105.61 $\pm$ 0.36	0.75
240	94.76	94.67	95.85	95.09 $\pm$ 0.66	0.67
250	97.84	97.02	97.55	97.47 $\pm$ 0.41	0.69
260	100.90	99.36	99.24	99.83 $\pm$ 0.92	0.71
270	103.95	101.69	100.92	102.19 $\pm$ 1.57	0.72
280	104.12	98.93	101.68	101.58 $\pm$ 2.59	0.72
290	104.27	96.16	102.43	100.96 $\pm$ 4.25	0.71
300	104.42	93.38	103.16	100.32 $\pm$ 6.04	0.71
310	112.54	106.46	112.45	110.49 $\pm$ 3.48	0.78
320	120.65	119.53	121.73	120.64 $\pm$ 1.10	0.85
330	128.75	132.59	130.99	130.78 $\pm$ 1.93	0.93
340	134.77	135.59	135.52	135.29 $\pm$ 0.46	0.96
350	140.76	138.56	140.03	139.78 $\pm$ 1.12	0.99
360	140.79	141.37	141.54	141.23 $\pm$ 0.39	1.00





ภาพ 28 ค่านับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากทิศทางการเข้าของลำรังสีต่าง ๆ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในมุม 0 องศา

#### 4.6 การตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence)

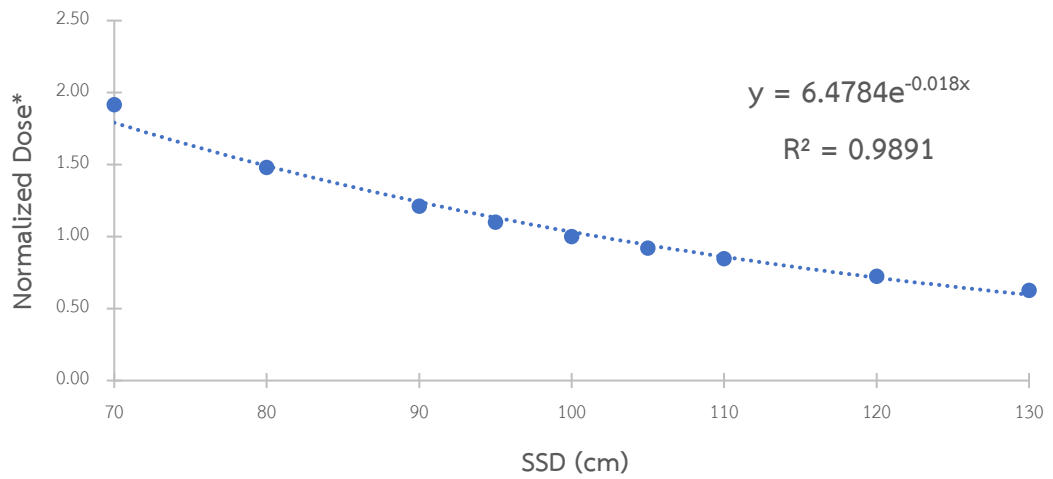
##### 4.6.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลของค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่มระยะทางที่ได้รับรังสี ปริมาณรังสีจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่า  $R^2 = 0.9891$  ตามกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law) ตามความสัมพันธ์ดังสมการ  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$  โดยตอบสนองต่อปริมาณรังสีน้อยสุดที่ระยะ 130 เซนติเมตร (62.64%) ซึ่งค่านับวัดปริมาณรังสี 76.47 cGy ในขณะที่ตอบสนองต่อปริมาณรังสีมากที่สุดที่ระยะ 70 เซนติเมตร (191.65%) ค่านับวัดปริมาณรังสี 233.97 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 4.19 cGy ประมาณ 1.79 % ดังแสดงในตาราง 13 และภาพ 29

ตาราง 13 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะ SSD (cm)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
70	237.48	229.34	235.09	233.97 $\pm$ 4.19	1.92
80	181.96	178.53	181.85	180.78 $\pm$ 1.95	1.48
90	148.47	148.77	146.20	147.80 $\pm$ 1.41	1.21
95	134.79	134.25	134.10	134.38 $\pm$ 0.36	1.10
100	121.41	122.12	122.71	122.08 $\pm$ 0.65	1.00
105	113.63	114.03	109.04	112.23 $\pm$ 2.77	0.92
110	104.84	102.28	102.68	103.27 $\pm$ 1.38	0.85
120	88.67	87.60	89.01	88.43 $\pm$ 0.73	0.72
130	75.68	77.34	76.39	76.47 $\pm$ 0.83	0.63

Source to surface distance dependence (6 MV)



ภาพ 29 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากระยะที่ได้รับรังสีต่าง ๆ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

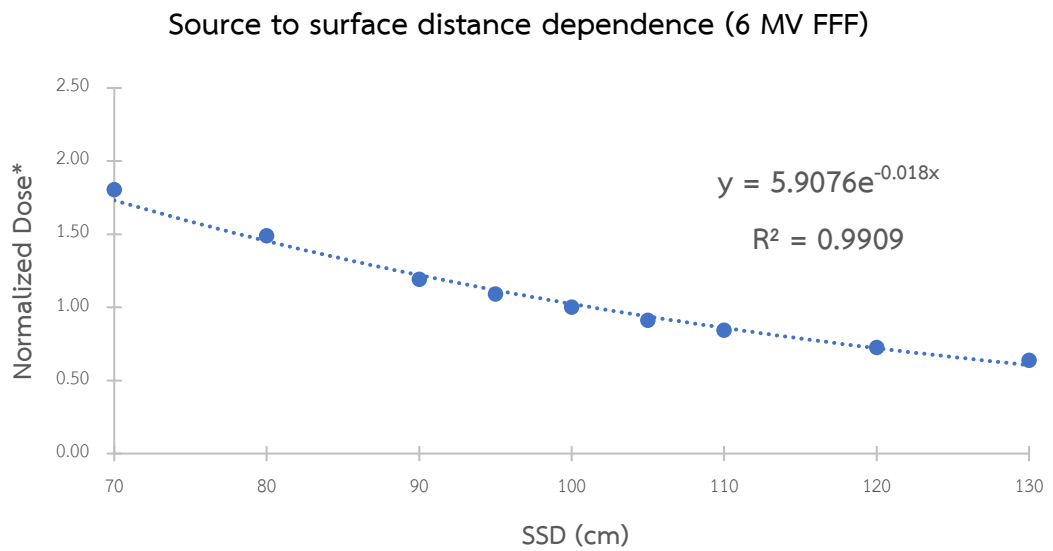
หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในระยะทางที่ได้รับรังสี 100 เซนติเมตร

#### 4.6.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ผลของค่านับวัดปริมาณรังสีจากระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่มระยะทางที่ได้รับรังสีปริมาณรังสีจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่า  $R^2 = 0.9909$  ตามกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law) ตามความสัมพันธ์ดังสมการ  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$  โดยตอบสนองต่อรังสีน้อยสุดที่ระยะ 130 เซนติเมตร (63.76%) ซึ่งค่านับวัดปริมาณรังสี 74.56 cGy ในขณะที่ตอบสนองต่อรังสีมากที่สุดที่ระยะ 70 เซนติเมตร (180.36%) โดยมีค่านับวัดปริมาณรังสี 210.91 cGy อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 5.59 cGy ประมาณ 2.65 % ดังแสดงในตาราง 14 และภาพ 30

ตาราง 14 แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีที่ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงพื้นผิวต่าง ๆ ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ระยะ SSD (cm)	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)				Normalized Dose
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.	
70	214.15	214.13	204.46	210.91 $\pm$ 5.59	1.80
80	171.12	176.51	174.80	174.14 $\pm$ 2.75	1.49
90	140.07	137.90	139.74	139.24 $\pm$ 1.17	1.19
95	127.57	130.07	124.84	127.49 $\pm$ 2.62	1.09
100	118.33	114.38	118.11	116.94 $\pm$ 2.22	1.00
105	106.18	106.72	106.64	106.51 $\pm$ 0.29	0.91
110	96.88	99.10	99.37	98.45 $\pm$ 1.37	0.84
120	84.99	84.00	85.44	84.81 $\pm$ 0.74	0.73
130	74.34	76.18	73.15	74.56 $\pm$ 1.53	0.64



ภาพ 30 คำนับวัดปริมาณรังสีสัมพัทธ์จากระยะที่ได้รับรังสีต่าง ๆ  
ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

หมายเหตุ: Normalized dose จากปริมาณรังสีที่นับวัดได้ในระยะทางที่ได้รับรังสี 100 เซนติเมตร

#### 4.7 ความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity)

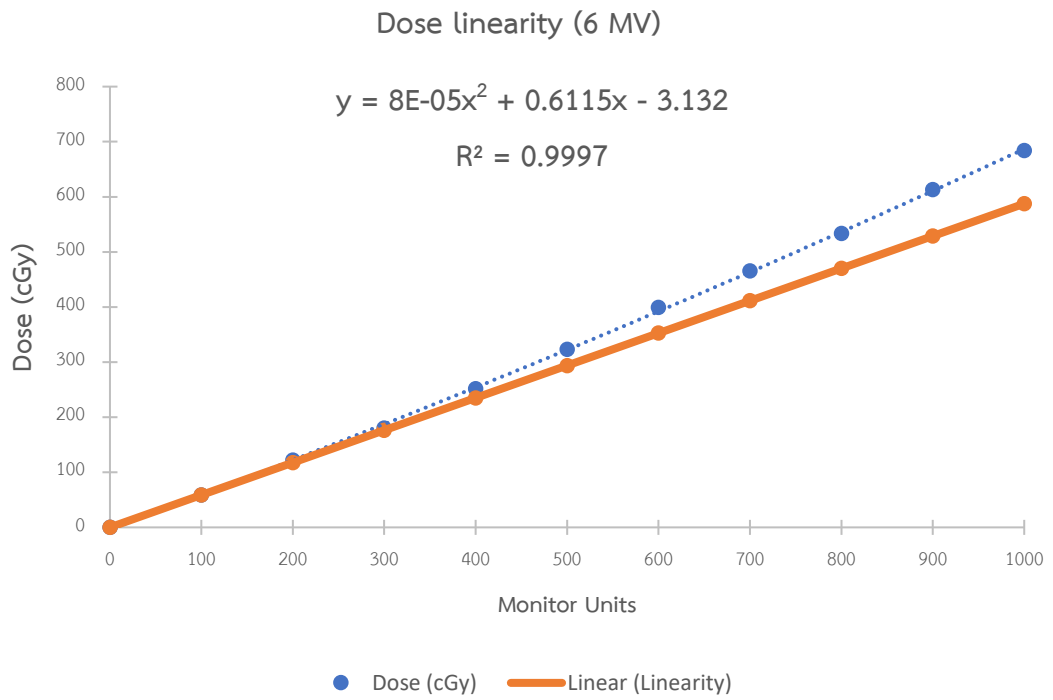
##### 4.7.1 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ผลการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสีที่ฉาย โดยคำนวณวัตปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 0 cGy ถึง 684.04 cGy ซึ่งเพิ่มขึ้นในสัดส่วนโดยตรง อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัตปริมาณรังสีมากที่สุด 15.55 cGy ประมาณ 2.27 % ดังแสดงในตาราง 15 โดยมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงปริมาณรังสีถึง 300 cGy และเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 300 cGy จะมีความสัมพันธ์เหนือเส้นตรง อีกทั้งมีความเป็นเชิงเส้นในปริมาณรังสีถึง 684.04 cGy โดยมีค่า  $R^2 = 0.9997$  ดังแสดงในภาพ 31

ตาราง 15 แสดงคำนวณวัตปริมาณรังสีที่ฉาย (MU) และคำนวณวัตปริมาณรังสี (cGy) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ปริมาณรังสีที่ฉาย (MU)	คำนวณวัตปริมาณรังสี (cGy)			ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
0	0.00	0.00	0.00	0.00 $\pm$ 0.00
100	58.38	58.42	59.44	58.75 $\pm$ 0.60
200	121.41	122.12	122.71	122.08 $\pm$ 0.65
300	183.23	183.96	172.77	179.98 $\pm$ 6.26
400	250.40	255.67	249.25	251.77 $\pm$ 3.42
500	320.60	328.74	320.67	323.33 $\pm$ 4.68
600	399.64	401.45	396.10	399.06 $\pm$ 2.72
700	464.82	471.31	460.11	465.41 $\pm$ 5.63
800	528.46	536.63	534.98	533.36 $\pm$ 4.32
900	630.65	604.84	603.99	613.16 $\pm$ 15.15
1000	684.71	699.25	668.17	684.04 $\pm$ 15.55





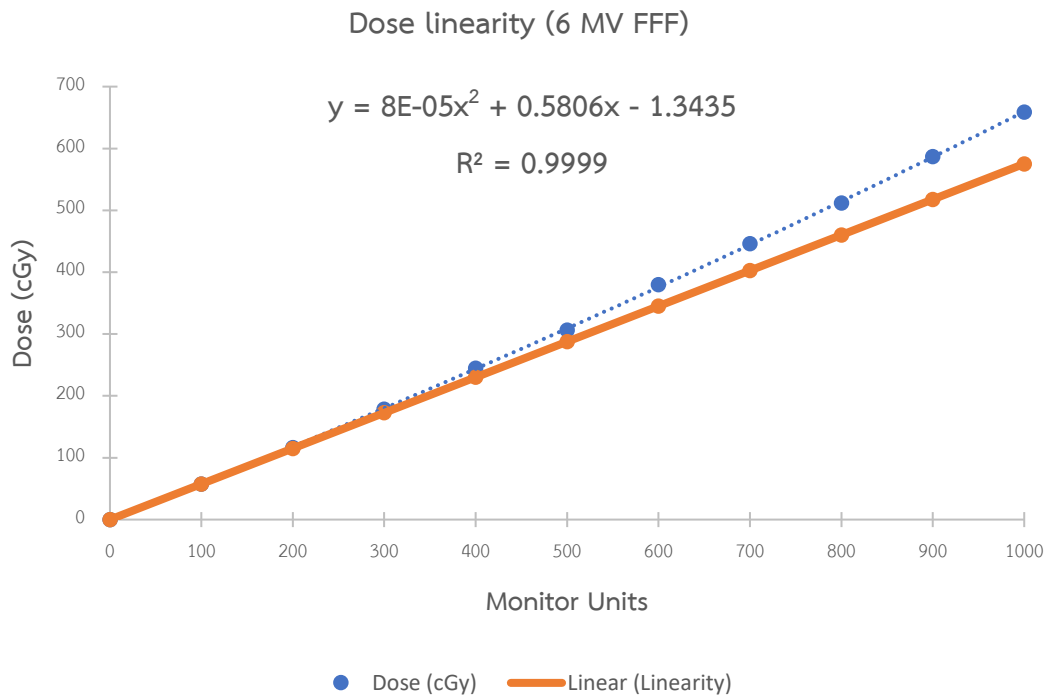
ภาพ 31 คำนับวัดปริมาณรังสีที่ฉายที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

#### 4.7.2 พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

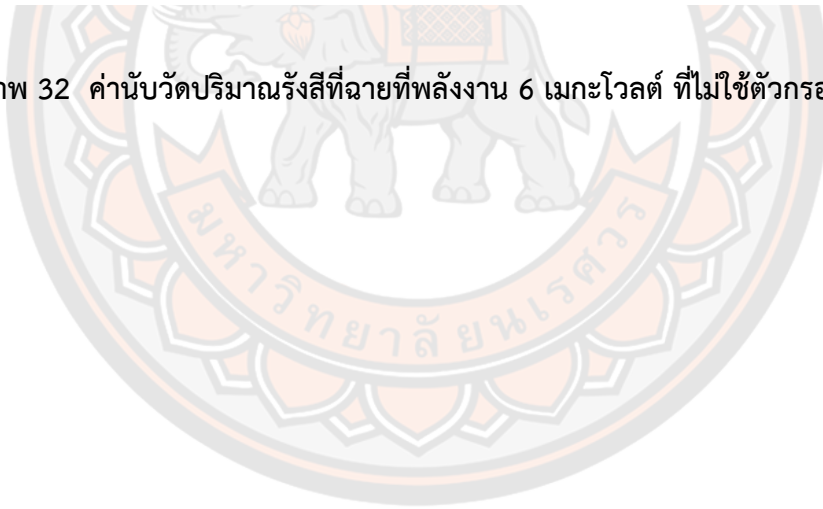
ผลการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสีที่ฉาย โดยคำนวณวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 0 cGy ถึง 658.86 cGy ซึ่งเพิ่มขึ้นในสัดส่วนโดยตรง อีกทั้งมีความคลาดเคลื่อนในการนับวัดปริมาณรังสีมากที่สุด 17.31 cGy ประมาณ 2.63 % ดังแสดงในตาราง 16 โดยมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงปริมาณรังสีถึง 300 cGy และเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 300 cGy จะมีความสัมพันธ์เหนือเส้นตรง อีกทั้งมีความเป็นเชิงเส้นในปริมาณรังสีถึง 658.86 cGy โดยมีค่า  $R^2 = 0.9999$  ดังแสดงในภาพ 32

ตาราง 16 แสดงคำนวณวัดปริมาณรังสีที่ฉาย (MU) และคำนวณวัดปริมาณรังสี (cGy) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ

ปริมาณรังสีที่ฉาย (MU)	คำนวณวัดปริมาณรังสี (cGy)			ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
0	0.00	0.00	0.00	0.00 $\pm$ 0.00
100	57.78	56.92	57.85	57.52 $\pm$ 0.52
200	117.86	115.28	116.01	116.38 $\pm$ 1.33
300	177.43	179.18	179.02	178.54 $\pm$ 0.97
400	246.72	244.80	242.70	244.74 $\pm$ 2.01
500	298.70	312.30	307.93	306.31 $\pm$ 6.94
600	379.79	380.60	379.79	380.06 $\pm$ 0.47
700	436.69	455.35	446.05	446.03 $\pm$ 9.33
800	523.33	514.84	496.98	511.72 $\pm$ 13.45
900	587.76	588.24	584.81	586.94 $\pm$ 1.86
1000	652.35	645.71	678.51	658.86 $\pm$ 17.34



ภาพ 32 คำนับวัดปริมาณรังสีที่ฉายที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### อภิปรายผล

จากการศึกษาทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ทั้งหมด 3 ตัว พบว่า ค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 6 cGy ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 6.02 โดยส่วนเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบทั้ง 3 ครั้งนั้น อาจเกิดจากหลายปัจจัยในการตอบสนองระหว่างการทดสอบซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมระหว่างการทดสอบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดรังสี เนื่องจากการปล่อยรังสีแบบ Dose per pulse มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้การนับวัดปริมาณรังสีมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น รวมไปถึงกระบวนการใช้แสงเข้าไปกระตุ้นในการอ่านค่านับวัดอาจมีความผิดพลาดจากเครื่องมือ ค่านับวัดที่ได้จากอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ทั้ง 3 ตัว จึงมีความต่างแตกต่างกันเกิดขึ้น

#### 5.1 การศึกษาการจางหายของสัญญาณ (Fading characteristics)

จากการศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีภายหลังการฉายรังสี แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ทำการอ่านค่า นับวัดได้ทันทีหลังจากทำการฉายรังสี โดยมีความแปรปรวนของค่านับวัดปริมาณรังสีร้อยละ 15 ในช่วง 5 – 8 นาทีแรก ทั้งนี้อาจมาจากยังไม่เกิดการเสถียรของชั้นอิเล็กตรอน โดยกระบวนการ ดูดกลืนปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีหลักการ คือต้องให้อิเล็กตรอนภายในตกลงไปยังชั้นของกับดักอิเล็กตรอนจนเสถียร จากนั้นจึงนำไปอ่านค่าโดยการ กระตุ้นด้วยแสงจะได้ค่าการนับวัดที่แม่นยำ ซึ่งในช่วงระยะแรกภายหลังการฉายรังสีจะเป็นช่วงของ สัญญาณชั่วคราวจึงไม่สามารถอ่านค่าปริมาณรังสีได้ (19) การศึกษานี้ พบว่าการอ่านค่าปริมาณรังสี จะเริ่มเสถียรที่ระยะเวลา 5 นาทีภายหลังฉายรังสี สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับ เรียบ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Jursinic PA et al. (2007) และ Ponmalar R et al. (2017) ในขณะที่การศึกษาของ Dunn L et al. (2013) ทำการอ่านค่าปริมาณรังสีได้ ในช่วงระยะเวลา 16 นาทีหลังฉายรังสี อย่างไรก็ตามเนื่องจากการศึกษานี้มีข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์ อ่านค่าปริมาณรังสีจึงต้องส่งอุปกรณ์ไปทำการอ่านค่าปริมาณรังสีซึ่งต้องใช้เวลา 48 ชั่วโมง และมีค่าความแตกต่างจากการอ่านค่าปริมาณรังสีที่ 5 นาทีภายหลังฉายรังสี ร้อยละ 0.73 และการจางหายของสัญญาณภายใน 30 วันภายหลังฉายรังสี อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ในขณะที่ พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ สามารถทำการอ่านค่าปริมาณรังสีได้ที่ 8 นาที

ภายหลังฉายรังสี โดยมีค่าความแตกต่างของการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีที่ 48 ชั่วโมงภายหลังฉายรังสีร้อยละ 1.65 และการจางหายของสัญญาณภายใน 30 วันภายหลังฉายรังสี อยู่ในช่วงร้อยละ 3 จากการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีภายหลังฉายรังสีได้ภายในระยะเวลาสั้นๆ อีกทั้งมีกระบวนการอ่านค่านับวัดรวดเร็ว จึงเป็นข้อได้เปรียบของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอต โดยในทางรังสีรักษาต้องการกระบวนการนับวัดได้รวดเร็ว เพื่อประกอบการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยจะได้รับ อีกทั้งการศึกษาการจางหายของสัญญาณนั้น เมื่อถูกนำไปใช้งานในทางคลินิกแต่เนื่องด้วยข้อจำกัดในการอ่านค่านับวัด ปริมาณรังสีจึงมั่นใจได้ว่าค่านับวัดปริมาณรังสีที่ได้นั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการอ่านค่านับวัดที่ระยะเวลา 5 นาทีภายหลังฉายรังสี และ 8 นาทีภายหลังฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ

## 5.2 การศึกษาการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out)

จากการศึกษาการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี พบว่าอัตราการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี ในแต่ละครั้งเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอต มีกระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีโดยการดึงอิเล็กตรอนบางส่วนเท่านั้นในกระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี จึงทำให้สามารถทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำได้ ซึ่งสูญเสียสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยพบว่าการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านร้อยละ 0.04 – 0.06 ต่อการอ่าน สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบและ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ แต่ในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำในช่วง 20 ครั้งแรก สูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีเพียงเล็กน้อย ผลการศึกษานี้คล้ายกับ Jursinic PA et al. (2007) และ Ponmalar R et al. (2017) ในขณะที่การศึกษาของ Dunn L et al. (2013) และ Jain GK et al. (2017) การสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี คือร้อยละ 0.02 ต่อการอ่านค่านับวัด ซึ่งกระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีเป็นเกณฑ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในการเลือกใช้งานอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี โดยแต่ละประเภทมีข้อดีแตกต่างกัน ซึ่งอุปกรณ์นับวัดบางประเภทสามารถอ่านค่านับวัดได้เพียงครั้งเดียว ในบางครั้งอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นสำหรับการใช้งานจำเป็นที่จะต้องใช้ค่านับวัดปริมาณรังสีนั้นอีกครั้ง โดยอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนคอต สามารถอ่านค่านับวัดซ้ำได้

### 5.3 การศึกษาการวัดปริมาณรังสีซ้ำ (Reproducibility)

จากการศึกษาการตอบสนองต่อการวัดปริมาณรังสีซ้ำ พบว่าค่านับวัดอยู่ที่ร้อยละ 98 และร้อยละ 97 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ โดยปัจจัยหลายอย่างอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ปัจจัยที่อาจส่งผลของการตอบสนองในระหว่างวันซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมระหว่างวัน เช่น ความชื้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดรังสีรวมไปถึงการติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้การนับวัดมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นและในกระบวนการใช้แสงเข้าไปกระตุ้นในการอ่านค่านับวัดอาจมีความผิดพลาดจากการใช้เครื่องมือ อีกทั้งค่านับวัดปริมาณรังสีที่นับวัดได้นั้นจากการศึกษาในอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท 3 ตัว และในการศึกษากระบวนการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ 5 ครั้ง พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 1.5 อย่างไรก็ตามตามอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดสอบของ Jursinic PA et al. (2007), Viamonte A et al. (2008), Dunn L et al. (2013) และ Ponmalar R et al. (2017) ซึ่งเป็นช่วงที่ถือได้ว่ามีความเชื่อมั่นในการที่จะนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท นำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกครั้งหลังทำการใช้งานแล้วเสร็จ จากนั้นนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ถ้างค่านับวัดปริมาณรังสี พร้อมทั้งจะใช้งานในครั้งต่อไปได้

### 5.4 การศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี (Dose rate dependence)

จากการศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี พบว่าการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jursinic PA et al. (2007), Viamonte A et al. (2007), Jain GK et al. (2017) และ Ponmalar R et al. (2017) อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี ในช่วงของปริมาณรังสีต่ำทางรังสีรักษา โดยค่านับวัดปริมาณรังสีมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1 ทั้งสองพลังงาน ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากการเพิ่มของจำนวนของอิเล็กตรอนที่กลับมายังชั้นกับดักที่มีอัตราปริมาณรังสีที่สูงขึ้น ทำให้มีสัญญาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากในชั้นกับดักมีอิเล็กตรอนที่มากเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถนับวัดค่าปริมาณรังสีได้อย่างแม่นยำสำหรับอัตราปริมาณรังสีแบบ Dose per pulse เนื่องจากไม่เปลี่ยนแปลง Sensitivity เนื่องจากอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มี sensitivity ที่มีค่าคงที่เฉพาะของตัวนั้น ๆ จึงเหมาะสมกับการนับวัดในการฉายรังสีด้วยเทคนิค Total body รวมไปถึงใช้ในการนับวัดปริมาณรังสีที่ในเทคนิคการฉายรังสีที่ต้องการอัตราปริมาณรังสีสูง



### 5.5 การศึกษาการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี (Angular dependence)

จากการศึกษาการตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เมื่อแกนทรีทำมุม 100 – 160 องศา และ 320 – 340 องศา กับระนาบของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท โดยมีค่าความแตกต่างร้อยละ 30.43 และร้อยละ 32.42 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่านับวัดที่มุม 0 องศา ซึ่งในช่วงที่ 100 – 160 องศา และ 320 – 340 องศา กับระนาบของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เป็นทิศทางทางเข้าของลำรังสีด้านข้างของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ซึ่งขนานกับผลึกที่ใช้ในการนับวัดปริมาณรังสีจึงทำให้มีการตอบสนองในการนับวัดปริมาณรังสีต่ำ อีกทั้งช่วงทิศทางทางเข้าของลำรังสีนั้นอยู่ในทิศทางขอบของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง จึงทำให้ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง นั้นมีระยะที่มากกว่าทิศทางของลำรังสีอื่น ๆ ส่งผลต่อปริมาณรังสีที่นับวัดได้ จึงทำให้การตอบสนองต่ำลงเช่นกัน ซึ่งเป็นข้อจำกัดวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ดังแสดงในภาพ 33 และ 34 ดังนั้นจากการศึกษาจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับระยะทางที่ได้รับรังสีหรือไม่ เนื่องจากการศึกษาทิศทางของลำรังสี ทุก ๆ ทิศทางของลำรังสีจะต้องมีระยะจากแหล่งกำเนิดที่เท่ากันในทุก ๆ ทิศทาง โดยใช้หุ่นจำลองรูปทรงกระบอก พร้อมทั้งเมื่อมีการตอบสนองต่อการนับวัดที่ทิศทางเข้าต่ำลง อีกทั้งหุ่นจำลองมีช่องใส่สำหรับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท รวมไปถึงการนับวัดที่มุมอื่น ๆ จำเป็นที่ต้องหาค่าแก้ สำหรับการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำรังสี เพื่อให้ได้ค่านับวัดปริมาณรังสีที่ถูกต้อง ในขณะที่การศึกษาที่ผ่านมาของ Jursinic PA et al. (2007) และ Jain GK et al. (2017) ซึ่งลักษณะของการฉายรังสีแตกต่างกับการศึกษาครั้งนี้โดยมีการสร้างหุ่นจำลอง อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอลจึงไม่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสี เนื่องจากการศึกษาดังกล่าว ได้สร้างหุ่นจำลองเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ให้ตั้งฉากกับทิศทางของลำรังสีในระหว่างการฉายรังสีได้ซึ่งเป็นรูปทรงกระบอก



## 5.6 การศึกษาการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี (Source to surface distance dependence)

จากการศึกษาการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี ซึ่งเป็นระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสี พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นปริมาณรังสีที่นับวัดได้จะลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law) ทั้งสองพลังงาน โดยผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องการศึกษาของ Jursinic PA et al. (2007) และ Ponmalar R et al. (2017) จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบค่า นับวัดปริมาณรังสีกับหัววัดไอออไนเซชัน เพื่อเปรียบเทียบความต้องการของการนับวัดปริมาณรังสีซึ่งผลที่ได้ นั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับหัววัดไอออไนเซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ขึ้นกับระยะทางที่ได้รับรังสี

## 5.7 การศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสี (Dose linearity)

จากการศึกษาการตอบสนองต่อปริมาณรังสี พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นสำหรับปริมาณรังสี ไม่เกิน 300 cGy และมีความสัมพันธ์เหนือเชิงเส้นเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 300 cGy ซึ่งช่วงที่ปริมาณรังสีมีความสัมพันธ์เหนือเชิงเส้นสามารถหาค่า นับวัดปริมาณรังสีได้โดยแก้ค่าปริมาณรังสี จากความสัมพันธ์  $8 \times 10^{-5} X^2 + 0.6115X - 3.132$  และ  $8 \times 10^{-5} X^2 + 0.5806x - 1.3435$  สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ เนื่องจากที่ปริมาณรังสีต่ำอิเล็กตรอนเข้าสู่ระดับชั้นพลังงานที่ลึกกว่าปริมาณรังสีสูง เมื่อทำการอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสีต้องใช้แสงเข้าไปกระตุ้นให้คายอิเล็กตรอนออกมานั้น ทำให้ปริมาณรังสีสูงที่อยู่ในชั้น กับดักอิเล็กตรอนตื้นกว่าจึงคายอิเล็กตรอนออกมาง่ายกว่าปริมาณรังสีต่ำจึงส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์เหนือเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในช่วงของการใช้นับวัดรังสีในทางรังสีรักษา เช่น การรักษาโดยเทคนิค VMAT ทำการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 200 cGy ในส่วนของการใช้นับวัดปริมาณรังสีสำหรับการฉายรังสีด้วยเทคนิคขั้นสูง พลังงานที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบนั้น ทำการฉายรังสีโดยให้ปริมาณรังสีที่ 600 cGy ซึ่งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง 650 – 700 cGy โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9997 และ 0.9999 สำหรับพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ จากผลการทดสอบที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดสอบที่ผ่านมาของ Jursinic PA et al. (2007), Viamonte A et al. (2008), Jain GK et al. (2017) และ Ponmalar R et al. (2017) ในขณะที่การศึกษาของ Dunn L et al. (2013) มีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงปริมาณรังสีถึง 250 cGy จากการศึกษาอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้นับวัดปริมาณรังสีในทางรังสีรักษาได้

## สรุปผลการวิจัย

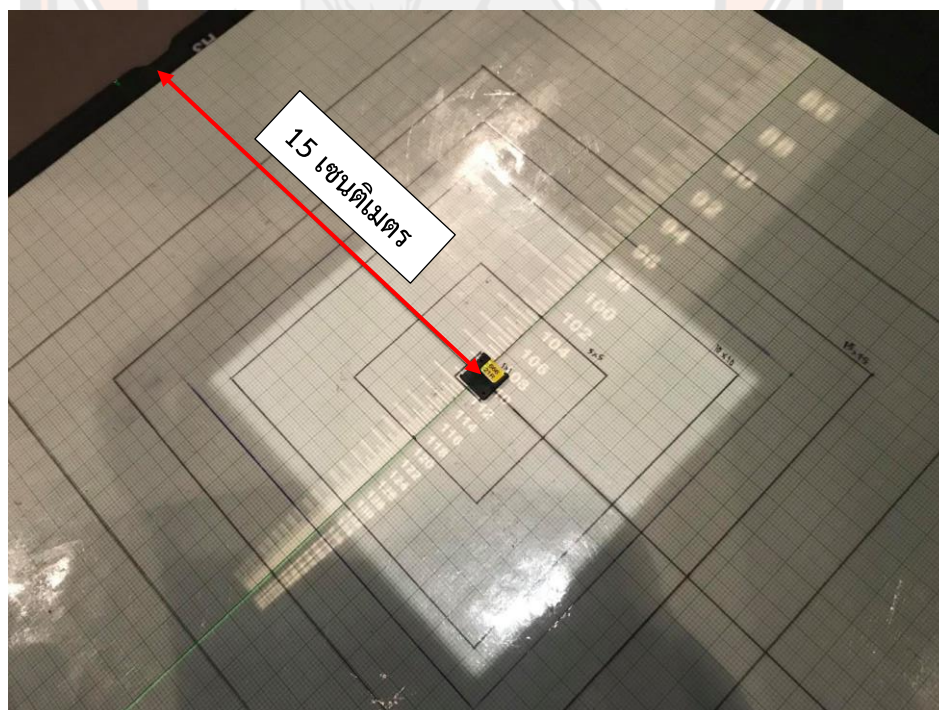
การศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพการนับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับรังสีรักษาพลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เริ่มทำการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี คือช่วงระยะเวลา 5 นาที และ 8 นาทีภายหลังจากฉายรังสี ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ ซึ่งค่าความแตกต่างของการอ่านในช่วงเวลาที่เหมาะสมกับค่าที่อ่านในระยะเวลา 30 วันภายหลังจากฉายรังสี อยู่ในช่วงร้อยละ 5 และร้อยละ 3 ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ ในขณะที่การอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำ มีการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีซ้ำร้อยละ 0.05 ของปริมาณรังสีปัจจุบัน เมื่อนำอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท นำกลับมาใช้ซ้ำ โดยการฉายรังสีปริมาณเท่าเดิมจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ของค่านับวัดปริมาณรังสี ในการอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีครั้งแรกที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ และ 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ ตามลำดับ ผลการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสี พบว่าไม่ขึ้นกับอัตราปริมาณรังสี สำหรับการนับวัดปริมาณรังสีค่าในทางรังสีรักษาซึ่งอยู่ในช่วงปริมาณรังสี 2 Gy การตอบสนองต่อทิศทางของลำรังสี พบว่าอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ไม่สามารถสรุปได้ว่าขึ้นกับทิศทางของลำรังสีหรือไม่ เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้หุ่นจำลองในการติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ในส่วนการตอบสนองต่อระยะทางที่ได้รับรังสี เป็นไปตามกฎกำลังสองผกผัน และการศึกษาความเป็นเชิงเส้นต่อขนาดปริมาณรังสี พบว่ามีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้นสำหรับปริมาณรังสีไม่เกิน 300 cGy และความสัมพันธ์ลักษณะเหนือเชิงเส้นที่ปริมาณรังสีสูงกว่า 300 cGy ทั้งสองพลังงาน

## ข้อเสนอแนะ

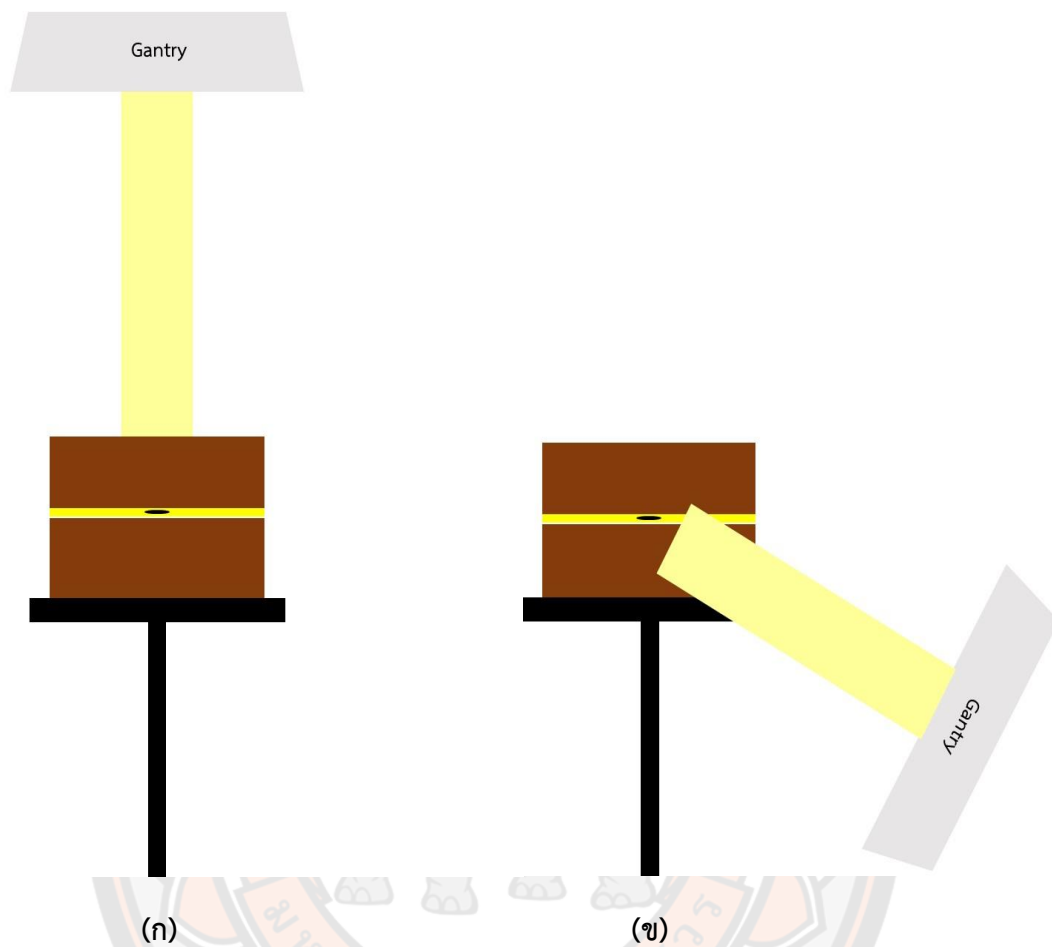
การศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ควรทำการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีชนิดอื่น ๆ ร่วมด้วย เพื่อยืนยันความถูกต้อง อาทิเช่น หัววัดไอเอสแอลในเซชัน ที่ใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากมีความแม่นยำสูง อีกทั้งจากการศึกษาควรศึกษาใช้ในสถานการณ์จริงสำหรับการนับวัดปริมาณรังสีในการฉายรังสีด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อยืนยันได้ว่าการศึกษานำไปประยุกต์ใช้ในทางรังสีรักษาได้และเพื่อเป็นอีกทางเลือกในการใช้อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี รวมไปถึงควรมีการสร้างหุ่นจำลองที่มีช่องสำหรับการใส่อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และหุ่นจำลองมีรูปทรงที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ได้ที่ระดับความลึกเท่ากันทุก ๆ ทิศทาง

### ข้อจำกัดของงานวิจัย

การใช้ชุดอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เนื่องจากการอุปกรณ์ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย จึงมีข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์ อาทิเช่น การอ่านค่านับวัดปริมาณรังสีต้องส่งไปอ่านและการล้างข้อมูลการนับวัดปริมาณรังสีของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ยังบริษัท รวมไปถึงการติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท เนื่องจากยังไม่มีหุ่นจำลองใดที่สามารถมีช่องการใช้งานสำหรับใส่อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีได้อย่างเช่น หัววัดไอออนในเซชัน จึงทำให้มีข้อจำกัดในการนับวัดปริมาณรังสีที่ทิศทางของลำรังสีต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมจึงส่งผลให้ในการฉายรังสีในแต่ละทิศทางของลำรังสีนั้น ๆ มีระยะ SAD ที่แตกต่างกัน เช่น ที่มุม 90 องศา ซึ่งเป็นด้านข้างของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ระยะที่ได้รับรังสีจึงมากกว่าที่ทิศทางอื่น ๆ การตอบสนองต่อรังสีจึงต่ำลง เนื่องจากที่ทิศทางของลำรังสี 0 องศา ระดับความลึกที่ติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท อยู่ที่ 10 เซนติเมตร ในขณะที่ทิศทางของลำรังสี 90 องศา ระดับความลึกที่ติดตั้งอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท อยู่ที่ 15 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 33



ภาพ 33 แสดงระยะจากผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ถึงอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ระยะ 15 เซนติเมตร



ภาพ 34 การติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท  
เมื่อแกนทรีทำมุม 0 องศา (ก) และทำมุม 120 องศา (ข)

# บรรณานุกรม





## บรรณานุกรม

1. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์. หลักการรังสีด้วยรังสี [cited 2020 March 10]. Available from: <https://www.chulacancer.net/patient-list-page.php?id=420>.
2. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์. การฉายรังสีแบบปรับความเข้ม (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) [cited 2020 March 10]. Available from: <https://chulacancer.net/education-inner.php?id=393>.
3. Agazaryan N. Patient specific quality assurance for the delivery of intensity modulated radiotherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2003;4(1):40-50.
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;50(14):3361-73.
5. 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;49(3):307-13.
6. Campajola L, Casolaro P, Capua FD. Absolute dose calibration of EBT3 Gafchromic films. *Journal of Instrumentation*. 2017;12(08):1-10.
7. 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;32(4):541-56.
8. 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;30(7):1706-11.
9. 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;63(18):1-15.

10. 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;37(4):436-41.
11. Hayashi N, Malmin RL, Watanabe Y. Dosimetric verification for intensity-modulated arc therapy plans by use of 2D diode array, radiochromic film and radiosensitive polymer gel. *Journal of radiation research*. 2014;55(3):541-52.
12. Jursinic PA, Nelms BE. A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery. *Medical physics*. 2003;30(5):870-9.
13. Saini AS, Zhu TC. Dose rate and SDD dependence of commercially available diode detectors. *Medical physics*. 2004;31(4):914-24.
14. Alvarez P, Kry SF, Stingo F, Followill D. TLD and OSLD dosimetry systems for remote audits of radiotherapy external beam calibration. *Radiation measurements*. 2017;106:412-5.
15. Shirlane Barbosa dA, Villani D, Sakuraba RK, de Rezende ACP, Santos SC, Campos LL. Dosimetric evaluation employing TL and OSL techniques with different luminescent materials for clinical evaluation of extremity doses using electron beams applied to Total-Irradiation-of-Skin treatments. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. 2018;48:1-9
16. Wesolowska PE, Cole A, Santos T, Bokulic T, Kazantsev P, Izewska J. Characterization of three solid state dosimetry systems for use in high energy photon dosimetry audits in radiotherapy. *Radiation measurements*. 2017;106:556-62.
17. จินดา ทองเรือง. คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สำหรับงานรังสีวินิจฉัย. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์*. 2016;58(3):141-8.
18. Landauer N. OSL Dosimeters [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/dosimeters.html>.



19. Jursinic PA. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements. *Medical physics*. 2007;34(12):4594-604.
20. Viamonte A, da Rosa LA, Buckley LA, Cherpak A, Cygler JE. Radiotherapy dosimetry using a commercial OSL system. *Medical physics*. 2008;35(4):1261-6.
21. 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;51-52:31-9.
22. Liu HW, Olivotto I, Lau H, Nugent Z, Khan R. Role of Volumetric-Modulated Arc Therapy with Flattening Filter Free Delivery in Lung Stereotactic Body Radiotherapy. *Journal of medical imaging and radiation sciences*. 2016;47(2):155-9.
23. Stephen F. Kry. Flattening Filter Free Accelerators [cited 2020 March 20]. Available from: [http://www.medfys.no/nfmf-documents/Opplastet/downloads/2012/07/Kry\\_FFF](http://www.medfys.no/nfmf-documents/Opplastet/downloads/2012/07/Kry_FFF).
24. University MFMaH. Flattening filter free (FFF) Linac. Available from: <http://radiation-oncology.de/index.php?page=flattening-filter-free-linac>.
25. Medicine AAOPI. Facts and Fiction of Flattening Filter Free (FF-FFF) X-Rays Beams [cited 2020 20 March]. Available from: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1118/1.4735765>.
26. Benedict SH, Yenice KM, Followill D, Galvin JM, Hinson W, Kavanagh B, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101. *Medical physics*. 2010;37(8):4078-101.
27. Landauer N. InLight® systems & OSL TECHNOLOGY [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/technology.html>.
28. Landauer N. nanoDot® Dosimeter [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/dosimeters.html>.
29. Landauer N. InLight® Readers [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/microstar.html>.

30. Landauer N. InLight® Anealers [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/annealers.html>.
31. 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):461-75.
32. 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;13(2):304-12.
33. Varian Systems. VitalBeam specifications [cited 2020 March 20]. Available from: <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-delivery/vitalbeam>.
34. Best medical. Solid Water®Phantom Materials [cited 2020 March 20]. Available from: [http://www.teambest.com/CNMC\\_docs/dosimetry/slabPhantoms/CNMC\\_solidwater.pdf](http://www.teambest.com/CNMC_docs/dosimetry/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf)
35. Best medical. Superflab Bolus [cited 2020 March 20]. Available from: [http://www.teambest.com/CNMC\\_docs/treatment/position/CNMC\\_TA\\_Superflab\\_Bolus\\_05292015.pdf](http://www.teambest.com/CNMC_docs/treatment/position/CNMC_TA_Superflab_Bolus_05292015.pdf)



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนครพนม

### ภาคผนวก ก

การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท สามารถทำได้ดังนี้

1. วางอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 100 ตัว บนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร จากนั้นวางวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ หนา 1 เซนติเมตร ทับอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท และซ้อนทับด้วยวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง หนา 9 เซนติเมตร จักระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ ชนิดแข็ง ที่ระยะ 100 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค SSD ดังแสดงในภาพ 13 มุมแกนทรีของเครื่องเร่งอนุภาค 0 องศา เปิดพื้นที่ลำรังสี 10×10 ตารางเซนติเมตร
2. ตั้งค่าปริมาณรังสี 200 MU อัตราปริมาณรังสี 400 MU/min นำไปอ่านค่านับวัดปริมาณรังสี จำนวน 5 ครั้ง และนับวัดปริมาณรังสีซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ
3. นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ที่นับวัดได้จากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

ตัวที่	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
1	121.41	121.92	122.50	121.94 ± 0.54
2	123.16	120.48	119.75	121.13 ± 1.80
3	122.71	122.12	118.25	121.03 ± 2.42
4	119.01	123.26	121.07	121.11 ± 2.12
5	119.42	121.55	121.34	120.77 ± 1.17
6	120.62	121.00	119.12	120.25 ± 0.99
7	123.42	120.65	120.26	121.44 ± 1.72
8	121.41	120.96	122.80	121.72 ± 0.96
9	122.12	123.17	122.54	122.61 ± 0.52

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ที่นับวัดได้จากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี  
ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ตัวที่	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
10	122.71	123.71	121.52	122.65 $\pm$ 1.10
11	120.89	123.49	119.71	121.36 $\pm$ 1.93
12	124.17	122.18	119.22	121.85 $\pm$ 2.49
13	120.76	124.33	119.93	121.67 $\pm$ 2.34
14	119.71	120.21	122.70	120.87 $\pm$ 1.60
15	122.38	120.48	123.45	122.10 $\pm$ 1.50
16	123.81	119.05	118.85	120.57 $\pm$ 2.81
17	122.06	123.06	118.22	121.11 $\pm$ 2.55
18	118.93	120.89	120.96	120.26 $\pm$ 1.16
19	121.52	124.17	121.30	122.33 $\pm$ 1.60
20	120.81	120.76	120.05	120.54 $\pm$ 0.42
21	120.54	119.71	121.11	120.45 $\pm$ 0.70
22	121.32	122.38	121.60	121.77 $\pm$ 0.55
23	121.49	123.81	121.68	122.33 $\pm$ 1.29
24	120.26	120.48	119.95	120.23 $\pm$ 0.26
25	120.91	123.45	118.85	121.07 $\pm$ 2.30
26	120.03	123.06	118.22	120.44 $\pm$ 2.44
27	120.96	120.17	122.06	121.06 $\pm$ 0.95
28	123.17	120.61	122.80	122.19 $\pm$ 1.38
29	123.71	120.43	122.54	122.23 $\pm$ 1.67
30	123.49	119.46	121.52	121.49 $\pm$ 2.01
31	122.18	120.63	119.71	120.84 $\pm$ 1.25
32	121.33	119.99	119.22	120.18 $\pm$ 1.07
33	120.21	122.70	119.93	120.95 $\pm$ 1.52
34	119.29	121.71	119.42	120.14 $\pm$ 1.36

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ที่นับวัดได้จากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี  
ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ตัวที่	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
35	120.60	120.08	119.70	120.13 $\pm$ 0.45
36	119.49	119.99	120.64	120.04 $\pm$ 0.58
37	119.16	123.42	120.65	121.08 $\pm$ 2.16
38	124.94	121.41	120.96	122.44 $\pm$ 2.18
39	124.67	122.12	123.17	123.32 $\pm$ 1.28
40	120.81	122.71	123.71	122.41 $\pm$ 1.47
41	121.37	120.89	123.49	121.92 $\pm$ 1.38
42	122.74	122.94	121.56	122.41 $\pm$ 0.75
43	121.45	122.67	120.97	121.70 $\pm$ 0.87
44	121.42	122.81	119.60	121.28 $\pm$ 1.61
45	121.85	123.21	120.32	121.79 $\pm$ 1.45
46	121.46	123.52	121.37	122.12 $\pm$ 1.22
47	122.87	123.56	122.04	122.82 $\pm$ 0.76
48	121.62	119.94	120.75	120.77 $\pm$ 0.84
49	122.73	119.21	120.72	120.89 $\pm$ 1.76
50	121.67	120.48	121.93	121.36 $\pm$ 0.77
51	120.42	119.37	120.29	120.02 $\pm$ 0.57
52	122.37	119.21	120.06	120.55 $\pm$ 1.63
53	122.73	119.52	121.01	121.09 $\pm$ 1.60
54	121.85	119.62	122.30	121.26 $\pm$ 1.43
55	120.30	119.33	120.62	120.08 $\pm$ 0.68
56	120.64	119.67	122.12	120.81 $\pm$ 1.23
57	122.37	126.73	121.21	123.44 $\pm$ 2.91
58	121.93	125.67	121.52	123.04 $\pm$ 2.29
59	120.29	124.42	121.56	122.09 $\pm$ 2.12

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ที่นับวัดได้จากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี  
ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ตัวที่	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
60	120.06	125.42	120.97	122.15 $\pm$ 2.86
61	121.01	125.16	121.91	122.69 $\pm$ 2.18
62	122.30	124.94	122.22	123.15 $\pm$ 1.55
63	120.62	124.67	122.26	122.52 $\pm$ 2.04
64	122.37	125.42	120.94	122.91 $\pm$ 2.29
65	120.06	120.16	121.62	120.61 $\pm$ 0.87
66	121.82	124.94	120.17	122.31 $\pm$ 2.42
67	121.75	124.67	119.64	122.02 $\pm$ 2.53
68	121.33	124.81	118.60	121.58 $\pm$ 3.11
69	122.44	125.21	119.95	122.53 $\pm$ 2.63
70	121.33	125.52	119.76	122.21 $\pm$ 2.98
71	121.85	125.56	119.68	122.36 $\pm$ 2.98
72	121.46	119.94	120.54	120.65 $\pm$ 0.77
73	122.87	119.21	118.42	120.17 $\pm$ 2.37
74	121.62	119.56	119.63	120.27 $\pm$ 1.17
75	120.29	119.93	120.33	120.13 $\pm$ 0.28
76	121.01	119.84	120.44	120.14 $\pm$ 0.42
77	121.82	119.87	125.33	122.60 $\pm$ 3.86
78	121.75	119.64	120.42	120.60 $\pm$ 1.07
79	120.99	119.76	125.21	121.99 $\pm$ 2.86
80	120.48	119.16	125.56	121.73 $\pm$ 3.38
81	126.04	119.30	119.94	121.76 $\pm$ 3.72
82	124.75	118.97	119.21	120.98 $\pm$ 3.27
83	124.72	118.40	125.52	122.88 $\pm$ 3.90
84	120.87	119.93	120.56	120.45 $\pm$ 0.48



แสดงค่านับวัดปริมาณรังสี ที่นับวัดได้จากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสี ไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

ตัวที่	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
85	119.56	119.76	120.72	120.01 $\pm$ 0.62
86	124.97	118.51	121.93	121.80 $\pm$ 3.23
87	123.60	118.85	120.29	120.91 $\pm$ 2.43
88	124.32	123.81	120.06	122.73 $\pm$ 2.32
89	120.44	119.12	121.01	120.19 $\pm$ 0.97
90	121.52	119.71	119.22	120.15 $\pm$ 1.21
91	120.63	119.99	120.44	120.35 $\pm$ 0.33
92	120.81	119.61	120.17	120.20 $\pm$ 0.60
93	119.93	122.70	119.05	120.56 $\pm$ 1.90
94	119.86	120.99	119.86	120.24 $\pm$ 0.65
95	117.74	124.81	119.64	120.73 $\pm$ 3.66
96	118.22	124.75	118.85	120.61 $\pm$ 3.60
97	120.37	124.72	119.47	121.52 $\pm$ 2.81
98	117.37	125.37	119.05	120.59 $\pm$ 4.22
99	122.06	125.21	117.93	121.73 $\pm$ 3.65
100	118.41	125.52	119.48	121.14 $\pm$ 3.84

ผลการศึกษาประสิทธิภาพอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท จำนวน 100 ตัว พบว่า อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ค่านับวัดปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 120.01 cGy ถึง 123.44 cGy และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.26 cGy ถึง 4.22 cGy ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ของบริษัท Landauer ที่กำหนดความถูกต้องร้อยละ 5 อุปกรณ์นับวัดปริมาณรังสีไอเอสแอล ชนิดนาโนดอท ที่ใช้ในการศึกษานี้จึงสามารถวัดค่าปริมาณรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาคผนวก ข

ค่านับวัดปริมาณรังสีสำหรับการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
1	119.29	120.89	120.96	120.38 $\pm$ 0.95
2	119.60	124.17	121.30	121.69 $\pm$ 2.31
3	119.49	120.76	120.05	120.10 $\pm$ 0.64
4	119.42	119.71	121.11	120.08 $\pm$ 0.90
5	119.70	122.38	121.60	121.23 $\pm$ 1.38
6	120.64	123.81	121.68	122.05 $\pm$ 1.62
7	117.99	120.48	121.52	119.99 $\pm$ 1.81
8	120.08	123.45	120.81	121.45 $\pm$ 1.77
9	121.71	123.06	120.54	121.77 $\pm$ 1.26
10	119.41	120.96	121.32	120.56 $\pm$ 1.01
11	119.57	123.17	121.49	121.41 $\pm$ 1.80
12	120.00	123.71	120.26	121.32 $\pm$ 2.07
13	118.18	123.49	120.91	120.86 $\pm$ 2.66
14	119.99	122.18	120.03	120.73 $\pm$ 1.25
15	119.05	124.33	120.17	121.18 $\pm$ 2.78
16	119.53	120.21	120.61	120.12 $\pm$ 0.55
17	117.87	122.80	120.43	120.36 $\pm$ 2.46
18	118.29	122.54	119.46	120.10 $\pm$ 2.19
19	120.44	121.52	120.63	120.86 $\pm$ 0.58
20	119.12	119.71	118.99	119.27 $\pm$ 0.38
21	116.78	119.22	119.44	118.48 $\pm$ 1.48

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
22	120.81	119.93	117.86	119.53 $\pm$ 1.52
23	117.61	122.70	117.99	119.43 $\pm$ 2.84
24	118.17	119.05	118.86	118.69 $\pm$ 0.46
25	119.64	118.85	119.47	119.32 $\pm$ 0.41
26	117.74	118.22	120.37	118.78 $\pm$ 1.40
27	116.37	122.06	118.41	118.95 $\pm$ 2.88
28	119.05	117.93	119.48	118.82 $\pm$ 0.80
29	118.37	119.46	119.89	119.24 $\pm$ 0.79
30	118.63	118.62	119.42	118.89 $\pm$ 0.46
31	118.56	122.22	121.85	120.87 $\pm$ 2.01
32	118.04	120.08	118.67	118.93 $\pm$ 1.04
33	118.14	118.72	119.47	118.78 $\pm$ 0.66
34	116.46	116.29	119.67	117.47 $\pm$ 1.90
35	118.95	118.12	118.65	118.57 $\pm$ 0.42
36	115.30	117.81	118.90	117.34 $\pm$ 1.85
37	119.73	119.95	119.04	119.57 $\pm$ 0.48
38	116.13	118.63	119.60	118.12 $\pm$ 1.79
39	116.83	118.02	119.70	118.18 $\pm$ 1.44
40	117.20	118.46	118.37	118.01 $\pm$ 0.71
41	117.83	119.34	117.51	118.23 $\pm$ 0.98
42	115.88	117.73	117.51	117.04 $\pm$ 1.01
43	116.06	119.76	117.33	117.72 $\pm$ 1.88
44	116.10	118.27	116.94	117.10 $\pm$ 1.09
45	117.01	117.58	117.97	117.52 $\pm$ 0.48
46	115.97	118.72	119.16	117.95 $\pm$ 1.73

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

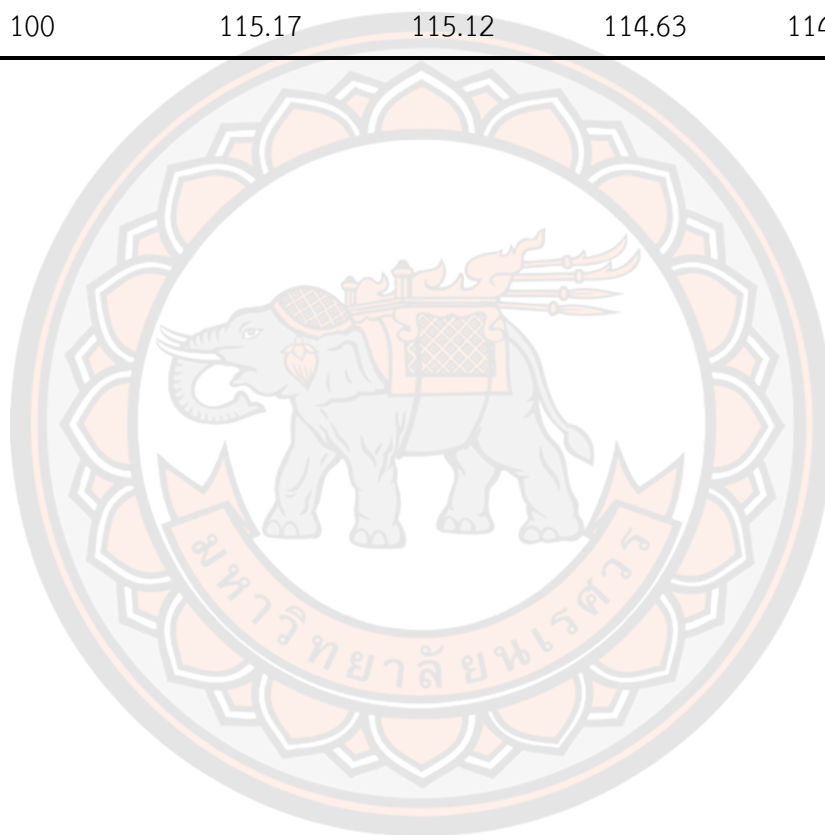
จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
47	114.94	118.33	117.92	117.06 $\pm$ 1.85
48	117.48	120.61	118.63	118.91 $\pm$ 1.58
49	116.47	117.02	117.48	116.99 $\pm$ 0.50
50	118.69	119.26	118.34	118.76 $\pm$ 0.46
51	117.36	119.64	117.05	118.02 $\pm$ 1.41
52	115.57	119.75	118.00	117.77 $\pm$ 2.10
53	114.90	119.82	118.34	117.69 $\pm$ 2.52
54	114.04	117.37	115.80	115.74 $\pm$ 1.66
55	117.85	117.89	117.05	117.60 $\pm$ 0.48
56	115.64	116.92	117.11	116.56 $\pm$ 0.80
57	117.31	117.13	118.95	117.80 $\pm$ 1.00
58	115.81	117.90	118.69	117.47 $\pm$ 1.49
59	116.93	117.14	116.88	116.98 $\pm$ 0.14
60	117.59	116.75	117.99	117.44 $\pm$ 0.63
61	117.22	117.50	117.67	117.46 $\pm$ 0.23
62	113.85	116.45	117.71	116.00 $\pm$ 1.97
63	113.76	118.58	117.13	116.49 $\pm$ 2.47
64	114.39	116.26	117.96	116.20 $\pm$ 1.78
65	116.60	116.77	117.33	116.90 $\pm$ 0.38
66	114.47	117.42	114.93	115.61 $\pm$ 1.59
67	114.77	119.43	116.65	116.95 $\pm$ 2.34
68	114.48	117.01	117.05	116.18 $\pm$ 1.47
69	116.36	116.97	116.30	116.54 $\pm$ 0.37
70	116.85	116.83	117.25	116.97 $\pm$ 0.24
71	114.09	117.05	117.45	116.19 $\pm$ 1.83

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
72	114.73	117.70	116.81	116.41 $\pm$ 1.53
73	116.29	116.52	116.53	116.45 $\pm$ 0.14
74	113.58	116.29	117.25	115.71 $\pm$ 1.90
75	116.03	115.43	116.69	116.05 $\pm$ 0.63
76	114.23	116.32	117.24	115.93 $\pm$ 1.54
77	116.40	116.16	117.05	116.54 $\pm$ 0.46
78	113.49	116.07	116.63	115.40 $\pm$ 1.67
79	116.62	118.91	118.27	117.93 $\pm$ 1.18
80	114.41	115.82	116.85	115.69 $\pm$ 1.23
81	116.45	116.88	117.31	116.88 $\pm$ 0.43
82	114.17	116.36	116.27	115.60 $\pm$ 1.24
83	115.79	116.21	117.23	116.41 $\pm$ 0.74
84	114.76	116.88	116.52	116.05 $\pm$ 1.13
85	114.75	117.05	115.85	115.88 $\pm$ 1.15
86	116.53	118.07	116.55	117.05 $\pm$ 0.89
87	117.58	115.35	116.67	116.53 $\pm$ 1.12
88	115.38	117.60	116.21	116.40 $\pm$ 1.12
89	113.21	116.87	115.76	115.28 $\pm$ 1.88
90	113.25	115.83	115.92	115.00 $\pm$ 1.52
91	112.35	116.20	116.65	115.07 $\pm$ 2.36
92	115.94	117.81	117.63	117.12 $\pm$ 1.03
93	116.36	116.51	117.53	116.80 $\pm$ 0.64
94	114.47	117.10	116.71	116.09 $\pm$ 1.42
95	115.06	115.51	115.20	115.26 $\pm$ 0.23
96	115.85	116.44	115.79	116.03 $\pm$ 0.36

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ใช้ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
97	114.31	116.44	115.85	115.53 $\pm$ 1.10
98	113.86	116.25	115.79	115.30 $\pm$ 1.27
99	112.45	115.30	114.44	114.06 $\pm$ 1.47
100	115.17	115.12	114.63	114.97 $\pm$ 0.29



ค่านับวัดปริมาณรังสีสำหรับการสูญเสียสัญญาณต่อการอ่านค่า (Signal depletion per read out) ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช้ตัวกรองปรับเรียบ

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
1	117.62	118.10	118.82	118.18 $\pm$ 0.60
2	116.74	115.69	118.75	117.06 $\pm$ 1.56
3	116.01	115.32	118.33	116.55 $\pm$ 1.57
4	116.78	115.82	119.44	117.35 $\pm$ 1.88
5	115.35	114.21	118.33	115.97 $\pm$ 2.13
6	116.06	114.72	118.85	116.54 $\pm$ 2.10
7	116.06	116.06	118.46	116.86 $\pm$ 1.38
8	115.09	115.80	119.87	116.92 $\pm$ 2.58
9	114.68	114.79	118.62	116.03 $\pm$ 2.24
10	115.63	114.08	119.73	116.48 $\pm$ 2.92
11	115.92	114.29	118.67	116.29 $\pm$ 2.22
12	115.06	113.45	117.42	115.31 $\pm$ 2.00
13	114.85	114.57	118.42	115.94 $\pm$ 2.15
14	114.74	114.16	118.16	115.69 $\pm$ 2.16
15	114.73	113.68	117.94	115.45 $\pm$ 2.22
16	115.33	114.21	117.67	115.74 $\pm$ 1.76
17	115.14	114.03	117.81	115.66 $\pm$ 1.94
18	115.59	114.03	118.21	115.94 $\pm$ 2.11
19	114.26	113.97	118.52	115.58 $\pm$ 2.55
20	115.35	114.01	118.56	115.97 $\pm$ 2.34
21	115.10	113.67	117.97	115.58 $\pm$ 2.19
22	115.31	113.08	116.60	115.00 $\pm$ 1.78
23	114.64	113.82	117.32	115.26 $\pm$ 1.83



แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
24	114.89	112.40	118.37	115.22 $\pm$ 3.00
25	114.50	114.01	119.04	115.85 $\pm$ 2.77
26	114.30	113.83	117.75	115.29 $\pm$ 2.14
27	114.48	113.48	117.72	115.23 $\pm$ 2.22
28	114.96	114.25	118.93	116.04 $\pm$ 2.52
29	113.63	112.88	117.29	114.60 $\pm$ 2.36
30	114.51	113.09	117.06	114.89 $\pm$ 2.02
31	113.17	113.17	118.01	114.78 $\pm$ 2.79
32	113.94	112.92	119.30	115.39 $\pm$ 3.43
33	114.52	113.85	117.62	115.33 $\pm$ 2.01
34	114.89	112.86	119.37	115.70 $\pm$ 3.33
35	114.47	113.41	116.90	114.93 $\pm$ 1.79
36	113.20	112.90	116.50	114.20 $\pm$ 2.00
37	113.61	111.95	115.37	113.65 $\pm$ 1.71
38	114.37	112.60	116.76	114.58 $\pm$ 2.09
39	113.79	113.95	116.42	114.72 $\pm$ 1.48
40	114.91	111.89	115.94	114.25 $\pm$ 2.10
41	113.88	112.67	114.52	113.69 $\pm$ 0.94
42	113.31	112.54	115.95	113.94 $\pm$ 1.79
43	113.42	111.95	116.39	113.92 $\pm$ 2.26
44	113.24	111.89	116.34	113.82 $\pm$ 2.28
45	112.38	112.49	116.84	113.90 $\pm$ 2.55
46	114.27	112.79	116.54	114.53 $\pm$ 1.89
47	113.11	112.20	118.57	114.63 $\pm$ 3.44
48	113.42	111.47	115.96	113.61 $\pm$ 2.25

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
49	113.13	112.20	115.85	113.73 $\pm$ 1.90
50	112.43	113.01	116.41	113.95 $\pm$ 2.15
51	114.48	111.43	116.24	114.05 $\pm$ 2.44
52	113.52	112.02	115.42	113.65 $\pm$ 1.71
53	112.73	111.83	115.73	113.43 $\pm$ 2.04
54	112.98	111.95	116.47	113.80 $\pm$ 2.37
55	113.41	111.50	115.67	113.52 $\pm$ 2.09
56	112.61	111.52	115.60	113.25 $\pm$ 2.11
57	112.89	112.12	116.49	113.83 $\pm$ 2.34
58	112.77	112.01	117.08	113.95 $\pm$ 2.74
59	112.68	112.22	115.81	113.57 $\pm$ 1.95
60	113.13	112.71	115.41	113.75 $\pm$ 1.45
61	112.36	111.49	115.55	113.13 $\pm$ 2.14
62	111.85	111.88	115.25	113.00 $\pm$ 1.95
63	112.87	111.90	116.44	113.74 $\pm$ 2.39
64	113.35	112.82	115.19	113.79 $\pm$ 1.25
65	112.92	112.10	114.86	113.30 $\pm$ 1.42
66	112.81	111.32	116.56	113.56 $\pm$ 2.70
67	112.31	113.58	115.27	113.72 $\pm$ 1.49
68	111.88	112.62	116.19	113.56 $\pm$ 2.30
69	112.02	112.40	114.27	112.90 $\pm$ 1.20
70	111.41	110.65	115.99	112.68 $\pm$ 2.89
71	111.21	111.25	115.48	112.65 $\pm$ 2.46
72	114.49	111.22	114.91	113.54 $\pm$ 2.02
73	111.65	110.63	116.37	112.88 $\pm$ 3.06

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
74	112.85	110.89	115.17	112.97 $\pm$ 2.14
75	111.55	110.91	114.64	112.37 $\pm$ 1.99
76	113.02	111.21	113.60	112.61 $\pm$ 1.25
77	112.50	111.55	114.95	113.00 $\pm$ 1.75
78	111.72	110.78	114.76	112.42 $\pm$ 2.08
79	111.78	110.80	114.68	112.42 $\pm$ 2.02
80	112.06	111.01	115.54	112.87 $\pm$ 2.37
81	111.31	111.26	113.42	112.00 $\pm$ 1.23
82	110.41	111.06	114.63	112.03 $\pm$ 2.28
83	111.70	111.23	114.94	112.62 $\pm$ 2.02
84	111.27	110.41	114.21	111.97 $\pm$ 1.99
85	111.50	110.68	113.56	111.91 $\pm$ 1.48
86	112.18	110.00	114.33	112.17 $\pm$ 2.16
87	111.74	110.26	113.84	111.95 $\pm$ 1.80
88	111.10	110.58	114.87	112.18 $\pm$ 2.34
89	111.14	110.30	114.64	112.02 $\pm$ 2.30
90	112.39	109.91	114.76	112.35 $\pm$ 2.43
91	111.24	109.94	114.16	111.78 $\pm$ 2.16
92	111.60	109.38	112.87	111.28 $\pm$ 1.76
93	110.78	110.52	113.40	111.57 $\pm$ 1.59
94	110.96	109.26	114.30	111.51 $\pm$ 2.56
95	111.51	109.37	113.97	111.62 $\pm$ 2.30
96	111.76	109.30	113.40	111.49 $\pm$ 2.06
97	110.88	109.56	113.93	111.46 $\pm$ 2.24
98	110.81	110.42	114.76	112.00 $\pm$ 2.40

แสดงค่านับวัดปริมาณรังสีจำนวน 100 ครั้ง ที่พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ที่ไม่ใช่ตัวกรองปรับเรียบ (ต่อ)

จำนวนครั้งอ่านค่า นับวัดปริมาณรังสี	ค่านับวัดปริมาณรังสี (cGy)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
99	110.63	111.89	113.51	112.01 $\pm$ 1.44
100	111.17	110.18	113.85	111.73 $\pm$ 1.90

