



## การจำลองมอนติคาร์โลสำหรับคำนวณปริมาณรังสีของอุปกรณ์กำหนดพื้นที่ขนาด มาตรฐานของอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

คณิต พงษ์พิริยะเดชะ<sup>1</sup>, จีระภา ตันนانونท์<sup>2</sup>, กิตติพล เดชะวรกุล<sup>2</sup>,  
จิรศักดิ์ คำฟองเครือ<sup>2</sup> และนันทวัฒน์ ูดี<sup>1\*</sup>

### Monte carlo simulation for dose calculation of standard applicator of 9 MeV electron beam

Khanit Phongphiriyadecha<sup>1</sup>, Chirapha Tannanonta<sup>2</sup>, Kittipol Dachaworakul<sup>2</sup>,  
Chirasak Khamfongkhrua<sup>2</sup> and Nuntawat Udee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์การแพทย์ ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

<sup>2</sup>งานรังสีรักษา โรงพยาบาลจุฬาราชมนตรี กรุงเทพมหานคร 10210

<sup>1</sup>Medical Physics Program, Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand 65000

<sup>2</sup>Radiation Oncology Unit, Chulabhorn Hospital Bangkok 10210

\* Corresponding author. E-mail address: nuntawatu@nu.ac.th

#### บทคัดย่อ

การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งด้วยวิธีการทางรังสีรักษาต้องการความถูกต้องสูงเนื่องจากปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับมีค่าสูง โดยเฉพาะการรักษาด้วยการฉายลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาคที่มีการเกิดอันตรกิริยาในตัวกลางค่อนข้างซับซ้อนกว่าการฉายด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการคำนวณค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองน้ำด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โลเปรียบเทียบกับการวัดด้วยหัววัดรังสีไอออนในเซชัน โดยทำการจำลองมอนติคาร์โลลำอิเล็กตรอน พลังงาน 9 MeV พื้นที่ลำรังสีมาตรฐานขนาด 15x15 ตารางเซนติเมตร จากเครื่องเร่งอนุภาคด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล EGSnrc ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรม BEAMnrc สำหรับจำลองอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องเร่งอนุภาคและโปรแกรม DOSXYZnrc สำหรับจำลองอันตรกิริยาในหุ่นจำลองน้ำด้วยอนุภาคที่มาจากเครื่องเร่งอนุภาค สำหรับการจำลองมอนติคาร์โลได้ทำการจำลองอันตรกิริยาด้วยค่าพลังงานตั้งต้นเฉลี่ยตั้งแต่ 9.4-11 MeV และจำลองลำอิเล็กตรอนด้วยค่าการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนตั้งต้นขนาด 0.05-0.15 เซนติเมตร จากนั้นเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากมอนติคาร์โลกับค่าที่ได้จากการวัดจริงในหุ่นจำลองน้ำที่ระดับความลึก  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$  ผลการวิจัยพบว่าค่าที่คำนวณได้จากการจำลองมอนติคาร์โลด้วยพลังงานตั้งต้นเฉลี่ย 10.8 MeV และลำอิเล็กตรอนแบบเกาส์เซียนขนาด 0.05 เซนติเมตร มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริงมากที่สุดด้วยความแตกต่างของระยะ  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$  เท่ากับ 0.047, 0.004 และ 0.004 เซนติเมตร ตามลำดับ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำให้ทราบว่าการจำลองมอนติคาร์โลสามารถคำนวณค่าปริมาณรังสีได้สอดคล้องกับการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีซึ่งอาจนำไปใช้ในการประเมินความถูกต้องของการกำหนดปริมาณรังสีที่ใช้ในการรักษาผู้ป่วยได้

**คำสำคัญ:** การจำลองมอนติคาร์โล ลำรังสีอิเล็กตรอน อีจีเอสเอ็นอาร์ซี

#### Abstract

Radiation therapy for cancer patients requires high accuracy in beam delivery due to high dose being delivered to the patients especially treatment with high energy electron beam of linear accelerator. The interactions between electrons and medium are more complex than those of high-energy X-rays. This study aimed to compare dose distribution in water phantom from measured doses detected by ionization chamber with calculated doses computed by Monte Carlo method. In this study, the Monte Carlo simulation of 9 MeV electron beam used a standard field size of 15x15 cm<sup>2</sup> for linear accelerator (LINAC) with EGSnrc code system which included BEAMnrc for simulating interactions within LINAC head and DOSXYZnrc code for simulating interactions of electrons in water phantom. The Monte Carlo simulation indicated averaged initial interaction energy ranged from



9.4 to 11 MeV and used Gaussians distribution of electron beam ranged from 0.05 to 0.15 cm. The results of Monte Carlo simulation and measurement data was compared at depth  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  and practical range ( $R_p$ ) in water phantom. The result showed an averaged initial interaction energy of 10.8 MeV with Gaussians distribution of electron beam of approximately 0.05 cm which was similar to measurement data with difference at the depth of  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  and  $R_p$ , which were 0.047, 0.004, and 0.004 cm, respectively. The study showed that Monte Carlo simulation is capable of calculating dose distribution in accordance with measurement data and can be used to assess accuracy of prescribed doses for patient treatment.

**Keywords:** Monte Carlo simulation, electron beam, EGSnrc

## บทนำ

การรักษาโรคมะเร็งด้วยวิธีการทางรังสีรักษาต้องการความถูกต้องในการกำหนดปริมาณรังสีอย่างมาก เนื่องจากรังสีที่ใช้ในการรักษามีพลังงานและปริมาณที่สูงมาก หากเกิดความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ผู้ป่วยเกิดภาวะข้างเคียงจากการได้รับปริมาณรังสีสูงได้ ดังนั้น เพื่อให้การรักษามีความถูกต้องและเป็นสากลจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานการกำหนดปริมาณรังสีขึ้นเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการรักษาด้วยรังสีรักษา สำหรับการรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาส่วนใหญ่ใช้วิธีการรักษาด้วยรังสีเอกซ์หรือแกมมาในกรณีที่ยกเว้นมะเร็งที่อยู่ลึกใต้ผิวหนัง และใช้อิเล็กตรอนพลังงานสูงในการรักษาโรคมะเร็งที่อยู่ระดับตื้นจากผิวหนัง การถ่ายเทพลังงานรังสีให้กับเนื้อเยื่อจะมีความแตกต่างกันระหว่างรังสีแต่ละชนิดและการคำนวณเพื่อกำหนดปริมาณรังสีดังกล่าวมีความซับซ้อนแตกต่างกัน นอกจากนี้การถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนให้กับเนื้อเยื่อทำให้เกิดอันตรกิริยาที่มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีมวลและประจุส่งผลให้เกิดการกระเจิงค่อนข้างมาก กรณีดังกล่าวไม่สามารถคำนวณปริมาณรังสีด้วยวิธีการอย่างง่ายได้ สำหรับความถูกต้องของการกำหนดปริมาณรังสีดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้ด้วยการวัดค่าปริมาณรังสีในน้ำด้วยหัววัดรังสีแต่ด้วยขั้นตอนการตรวจสอบค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลามากจึงทำให้เกิดการละเว้นการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีดังกล่าว

อย่างไรก็ตามการคำนวณปริมาณรังสีด้วยหลักการจำลองมอนติคาร์โลเป็นวิธีการที่ให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องสูง โดยการจำลองมอนติคาร์โลเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์รังสีและสถิติเพื่อศึกษาการ

เคลื่อนที่ของอนุภาคและอันตรกิริยาในตัวกลาง (interaction with matter) ที่เกิดขึ้นในช่วงพลังงานที่ใช้ทางรังสีรักษา รูปแบบการคำนวณดังกล่าวจึงทำให้สามารถคำนวณการกระจายของปริมาณรังสีที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ (Chetty et al., 2007; O'Shea, 2012) การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อกำหนดปริมาณรังสีในทางรังสีรักษาเริ่มมีบทบาทมากยิ่งขึ้นและมีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ (Stern et al., 2011) การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการคำนวณค่าปริมาณรังสีด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โลลำอิเล็กตรอนพลังงาน 9 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โลเปรียบเทียบกับวิธีวัดด้วยหัววัดรังสีซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการตรวจสอบปริมาณรังสีในปัจจุบัน

## วิธีการศึกษาและวัสดุอุปกรณ์

### 1. การจำลองมอนติคาร์โลสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี

การจำลองมอนติคาร์โลเพื่อกำหนดค่าปริมาณรังสีที่เกิดจากการฉายลำอิเล็กตรอนในน้ำจากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 9 MeV ทำโดยใช้โปรแกรมมอนติคาร์โล EGSnrc code system ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองอันตรกิริยาของรังสีชนิดต่างๆ ในตัวกลาง (Rogers, Kawrakow, Seuntjens, Walters, & Mainegra-Hing, 2003) ประกอบด้วยโปรแกรม BEAMnrc ใช้สำหรับจำลองการเกิดอันตรกิริยาภายในเครื่องเร่งอนุภาคและโปรแกรม DOSXYZnrc ใช้สำหรับจำลองอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนในตัวกลางน้ำ โดยการคำนวณ

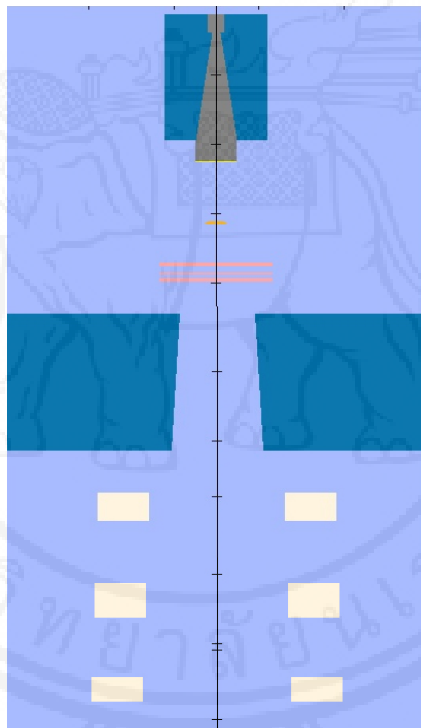


ค่าปริมาณรังสีด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โลด้วย EGSnrc code system ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 1.1 การสร้างส่วนประกอบเครื่องเร่งอนุภาค

การจำลองมอนติคาร์โลของลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาค CLINAC รุ่น 2100CD บริษัท Varian ทำโดยการสร้างโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคตามรูปร่างและขนาดจริงด้วยโปรแกรม BEAMnrc ประกอบด้วย component module (CMs) ชนิด CONS3R, SLABS, CONESTAK, CHAMBER, MIRROR, JAWS และ APPLICATOR สำหรับสร้างเป็นส่วนประกอบภายในเครื่องเร่งอนุภาค primary collimator, vacuum window, upper และ lower

scattering foil, monitor chamber, mirror, secondary collimator, applicator และ insert cutout ตามลำดับ (Antolak, Bieda, & Hogstrom, 2002; Lakkhana., 2012; Turian, Smith, Bernard, Griem, & Chu, 2004) ผลการสร้างส่วนประกอบภายในเครื่องเร่งอนุภาคด้วยโปรแกรม BEAMnrc แสดงดังรูปที่ 1 โดยโครงสร้างและอุปกรณ์ทั้งหมดกำหนดให้เป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับเครื่องเร่งอนุภาค สำหรับขนาดพื้นที่มาตรฐานของลำอิเล็กตรอนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ กำหนดให้ electron applicator มีขนาด 15x15 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะจากต้นกำเนิดรังสีถึงผิวหนัง (SSD) เท่ากับ 100 เซนติเมตร



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาค Varian Clinac 2100CD เมื่อใช้โปรแกรม BEAMnrc สร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ primary collimator, vacuum window, upper และ lower scattering foil, monitor chamber, mirror, secondary collimator และ applicator ตามลำดับ

### 1.2 การจำลองอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนภายในเครื่องเร่งอนุภาค

จำลองอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ภายในเครื่องเร่งอนุภาค โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทำการประเมินเพื่อให้การ

คำนวณมีความถูกต้องประกอบด้วยค่าพลังงานเฉลี่ยตั้งต้นตั้งแต่ 9.4, 9.6, 9.8, 10.0, 10.2, 10.4, 10.6 10.8 และ 11 MeV ตามลำดับ และค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้น (FWHM) ซึ่งกำหนดให้ค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้นมีลักษณะ Gaussian distribution

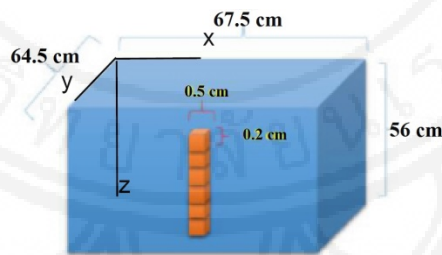
ที่มีขนาด 0.05, 0.1 และ 0.15 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับการประเมินความถูกต้องของการคำนวณใช้วิธีการตรวจสอบจากค่าปริมาณรังสีที่ระดับความลึกร้อยละ 90, 50 และ practical range ( $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$ ) ของค่า percentage depth dose (PDD) และ relative beam profile กำหนดให้จำนวนอนุภาคเริ่มต้น (initial particle) ที่ใช้ในการจำลองอันตรกิริยาเท่ากับ  $5 \times 10^8$  อนุภาค เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องสูง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการจำลองอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนหัวของเครื่องเร่งอนุภาคประกอบด้วยพลังงานขั้นต่ำที่กำหนดให้อนุภาคเคลื่อนที่หรือหยุดซึ่งการศึกษาวิจัยครั้งนี้กำหนดค่า transport parameters ด้วยวิธี BCA แบบ EXACT และกำหนดค่า electron step algorithm ชนิด PRESTA-II ประกอบด้วย ECUt เท่ากับ 0.521 MeV และ PCUT เท่ากับ 0.01 MeV (Antolak et al., 2002; Faddegon, Perl, & Asai, 2008; Lakkhana., 2012)

1.3 การสร้างหุ่นจำลองน้ำสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสีดูดกลืน

สร้างหุ่นจำลองน้ำสำหรับใช้ในการคำนวณค่าปริมาณรังสีดูดกลืนจากส่วนหัวของเครื่องเร่งอนุภาคด้วยโปรแกรม DOSXYZnrc ซึ่งมีขนาด 67.5 x 64.5 x

56 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยหุ่นจำลองน้ำที่สร้างขึ้นสำหรับจำลองมอนติคาร์โลมีขนาดเท่ากับหุ่นจำลองน้ำที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีในน้ำด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชันแชมเบอร์ (ionization chamber) ขนาด 0.13 cc

1.4 การคำนวณค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองน้ำ  
ทำการคำนวณหาค่า percentage depth dose (PDD) และ relative beam profile ในหุ่นจำลองน้ำด้วยโปรแกรม DOSXYZnrc โดยแบ่งขนาดของวอกเซลล์สำหรับการคำนวณค่า percentage depth dose ตามแนวกึ่งกลางลำรังสีออกเป็น 3 ช่วงเพื่อลดเวลาในการคำนวณประกอบด้วย วอกเซลล์ขนาด 0.5x0.5x0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ระดับผิวน้ำถึงความลึก 6 เซนติเมตร จากนั้นกำหนดให้มีขนาด 0.5x0.5x0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จนถึงความลึก 16 เซนติเมตร และให้มีขนาด 0.5x0.5x40 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ฐานหุ่นจำลองน้ำ ตามลำดับสำหรับค่า relative beam profile กำหนดวอกเซลล์ในแนวแกน x ให้มีขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.5 เซนติเมตร แกน y กำหนดวอกเซลล์ขนาด 0.5 เซนติเมตรตลอดพื้นที่ลำรังสี และแกน z ใช้วอกเซลล์ขนาดตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 เซนติเมตร ตลอดระยะลึกที่เก็บค่าปริมาณรังสีดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการออกแบบหุ่นจำลองน้ำขนาด 67.5 x 64.5 x 56 ลูกบาศก์เซนติเมตรด้วยโปรแกรม DOSXYZnrc

1. การวิเคราะห์ผลการคำนวณปริมาณรังสีด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล

ทำการวิเคราะห์ผลการจำลองมอนติคาร์โล EGSnrc ในส่วนของเครื่องเร่งอนุภาคด้วยโปรแกรม BEAMnrc และคำนวณค่าปริมาณรังสีในน้ำด้วยโปรแกรม DOSXYZnrc ผลที่ได้จากการประเมินหาค่าพลังงานตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการจำลองมอนติคาร์โลด้วยค่า

ปริมาณรังสีที่ระดับความลึกร้อยละ 90, 50 และ practical range ( $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$ ) จาก percentage depth dose เปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีระหว่างค่าจากการจำลองมอนติคาร์โลและการวัดปริมาณรังสีในน้ำด้วยหัววัดรังสี โดยทำการวิเคราะห์จากค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความลึกร้อยละ 90, 50 และ practical range สำหรับค่า relative beam profile ใช้การวิเคราะห์

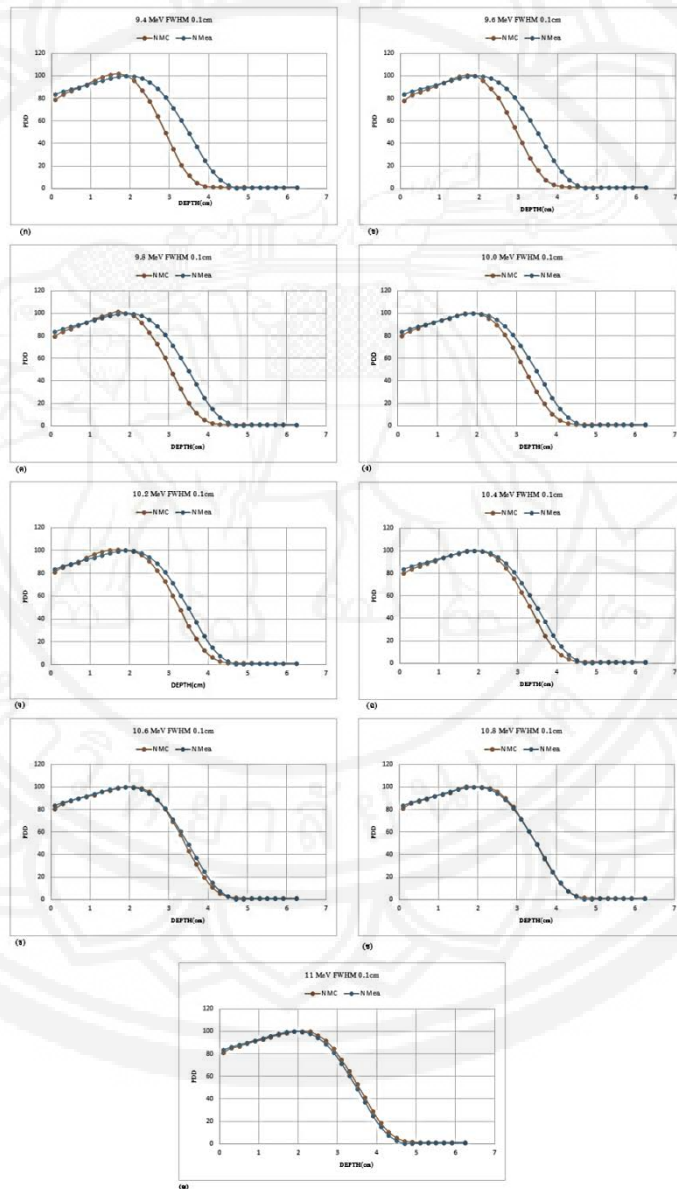


ค่าปริมาณรังสีภายในพื้นที่ร้อยละ 80 ของลำรังสีทั้งหมด โดยประเมินด้วยค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ระดับความลึกร้อยละ 90 และ 50 ตามลำดับ

### ผลการศึกษา

จากการคำนวณปริมาณรังสีของลำอิเล็กตรอน พลังงาน 9 MeV ในน้ำด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล

เมื่อใช้พลังงานเฉลี่ยตั้งต้นของอิเล็กตรอนจากช่วง พลังงาน 9.4 ถึง 11 MeV เมื่อกำหนดค่าความกว้างของ ลำอิเล็กตรอนตั้งต้นเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และใช้พื้นที่ ลำรังสีขนาด 15x15 ตารางเซนติเมตรที่ระยะ SSD เท่ากับ 100 เซนติเมตร ผลการเปรียบเทียบค่า percentage depth dose ระหว่างการวัดค่าปริมาณรังสี ด้วยหัววัดรังสีและจำลองมอนติคาร์โลแสดงผลดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่า percentage depth dose จากการวัด (N Mea.) และจำลองมอนติคาร์โล (N MC) ของอิเล็กตรอน พลังงาน 9 MeV กำหนดขนาด FWHM เท่ากับ 0.1 เซนติเมตร พลังงานเฉลี่ยเริ่มต้นตั้งแต่ 9.4 – 11 MeV ดังรูป ก – ฉ



จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลอง มอนติคาร์โลด้วยค่าพลังงานเฉลี่ยตั้งต้น 9.4-11 MeV ซึ่งมีค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้นเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร กับค่าจากการวัดด้วยหัววัดรังสีไอออนเซชัน จากเครื่องเร่งอนุภาคได้ผลดังตารางที่ 1 โดยพบว่าการ

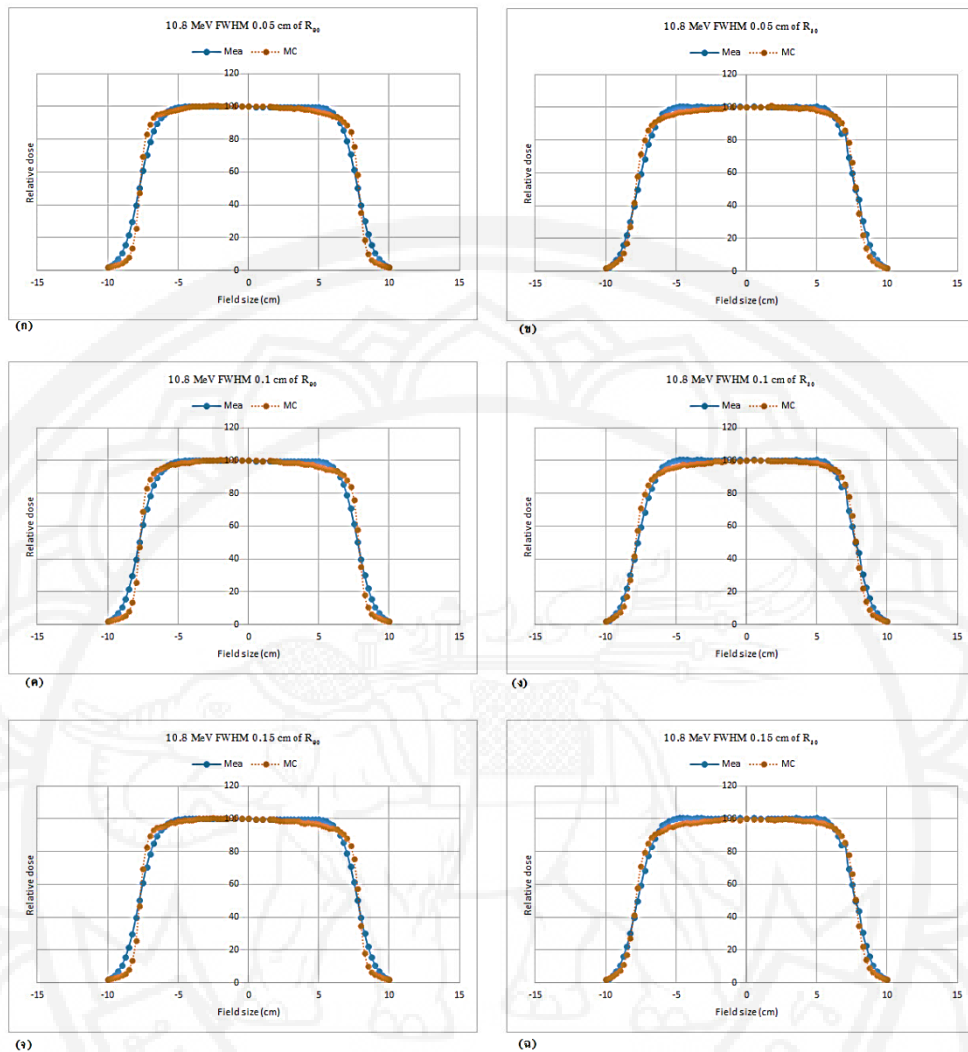
จำลองมอนติคาร์โลของอิเล็กตรอนพลังงานเฉลี่ยตั้งต้น 10.8 MeV มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง มากที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างของ  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$  เท่ากับ 0.047, 0.004 และ 0.004 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าความแตกต่างของ percentage depth dose ระหว่างการวัดและการจำลองมอนติคาร์โลที่ระยะ  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$  ของ อิเล็กตรอนพลังงาน 9 MeV เมื่อใช้พื้นที่ลำรังสี 15x15 ตารางเซนติเมตร

Initial energy of 9 MeV	Depth (cm)								
	$R_{90}$			$R_{50}$			$R_p$		
	Measured	Monte Carlo	Diff.	Measured	Monte Carlo	Diff.	Measured	Monte Carlo	Diff.
9.4	2.651	2.311	0.34	3.484	2.692	0.792	4.199	3.191	1.008
9.6	2.651	2.345	0.306	3.484	2.879	0.605	4.199	3.429	0.77
9.8	2.651	2.362	0.289	3.484	3.03	0.454	4.199	3.621	0.578
10	2.651	2.497	0.154	3.484	3.206	0.278	4.199	3.845	0.354
10.2	2.651	2.511	0.14	3.484	3.268	0.216	4.199	3.923	0.276
10.4	2.651	2.552	0.099	3.484	3.312	0.172	4.199	3.98	0.219
10.6	2.651	2.667	-0.016	3.484	3.408	0.076	4.199	4.101	0.098
10.8	2.651	2.698	-0.047	3.484	3.488	-0.004	4.199	4.203	-0.004
11	2.651	2.775	-0.124	3.484	3.548	-0.064	4.199	4.28	-0.081

เมื่อทำการประเมินค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอน ตั้งต้นระหว่าง 0.05 - 0.15 เซนติเมตร ด้วยพลังงาน เฉลี่ยตั้งต้น 10.8 MeV ได้ผลการเปรียบเทียบระหว่าง การจำลองมอนติคาร์โลและการวัดด้วยหัววัดรังสีแสดง ดังรูปที่ 4 พบว่าค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนเท่ากับ

0.05 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความ แตกต่างระหว่างค่าปริมาณรังสีที่ระดับความลึกร้อยละ 90 และ 50 เท่ากับ 0.715 และ 1.342 ตามลำดับ



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า relative beam profile ระหว่างการวัด (Measured) และจำลองมอนติคาร์โล (MC) ของอิเล็กตรอนพลังงาน 10.8 MeV เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า FWHM เท่ากับ 0.5, 0.1 และ 0.15 เซนติเมตร ที่ความลึก R<sub>90</sub> และ R<sub>50</sub> ดังรูป ก - จ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของ relative beam profile ระหว่างการวัดและการจำลองมอนติคาร์โลที่ความลึก R<sub>90</sub> และ R<sub>50</sub> ของอิเล็กตรอนพลังงานเฉลี่ย 10.8 MeV เมื่อใช้พื้นที่ลำรังสี 15x15 ตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้น 0.05, 0.1 และ 0.15 เซนติเมตร

FWHM(cm)	Average difference (%)	
	R <sub>90</sub>	R <sub>50</sub>
0.05	0.715	1.342
0.1	0.962	1.552
0.15	1.004	1.720

## อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการหาค่าพลังงานเฉลี่ยตั้งต้นและค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสีในตัวกลางน้ำจากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 9 MeV ด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล EGSnrc ซึ่งได้ทำการสร้างส่วนหัวของเครื่องเร่งอนุภาคให้มีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เหมือนกับเครื่องเร่งอนุภาคจริงเพื่อความถูกต้องของการจำลองอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนในตัวกลาง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการจำลองมอนติคาร์โลประกอบด้วยกำหนัดจำนวนอนุภาคเริ่มต้นในการจำลองซึ่งจะต้องมีจำนวนที่มากพอเพื่อให้ค่าทางสถิติมีความสอดคล้องกับการวัดจริง การศึกษาวิจัยครั้งนี้กำหนดค่าจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการจำลอง  $5 \times 10^8$  อนุภาค ทำให้ค่าการคำนวณมีความถูกต้องค่อนข้างสูง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีด้วยค่า percentage depth dose และ relative beam profile ระหว่างการจำลองมอนติคาร์โลและการวัดจริงพบว่าค่าพลังงานเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 10.8 MeV และค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้น 0.05 เซนติเมตร พื้นที่ลำรังสีขนาด  $15 \times 15$  ตารางเซนติเมตรมีค่าใกล้เคียงกับการวัดด้วยหัววัดรังสีมากที่สุด สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Anna et al. (Rodrigues, Sawkey, Yin, & Wu, 2015) ที่ทำการจำลองมอนติคาร์โลลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาครุ่น TureBeam พบว่ามีความแตกต่างระหว่างการวัดจริงกับการจำลองอยู่ภายในร้อยละ 2 ในพื้นที่ลำรังสีขนาด  $3 \times 3$  ถึง  $25 \times 25$  ตารางเซนติเมตร การศึกษาวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการจำลองมอนติคาร์โลของพื้นที่ลำรังสีมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีซึ่งใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณปริมาณรังสี ดังนั้นการคำนวณค่าปริมาณรังสีด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โลสามารถนำไปใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณรังสีได้

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการจำลองมอนติคาร์โลเปรียบเทียบกับการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีใน

หุ่นจำลองน้ำด้วยค่า percentage depth dose และ relative beam profile โดยทำการหาค่าพลังงานเฉลี่ยและค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้นที่เหมาะสมในตัวกลางน้ำของเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 9 MeV ด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล EGSnrc พบว่าค่าพลังงานเฉลี่ยเริ่มต้น 10.8 MeV และค่าความกว้างของลำอิเล็กตรอนตั้งต้น 0.05 เซนติเมตร ของพื้นที่ลำรังสีขนาด  $15 \times 15$  ตารางเซนติเมตรที่ระยะจากจุดกำเนิดรังสีถึงผิวหน้า 100 เซนติเมตรมีค่าใกล้เคียงกับการวัดด้วยหัววัดรังสีมากที่สุดซึ่งมีค่าร้อยละความแตกต่างของค่า percentage depth dose ที่ความลึก  $R_{90}$ ,  $R_{50}$  และ  $R_p$  และค่าเฉลี่ยร้อยละความแตกต่างของ relative beam profile ระหว่างการวัดและการคำนวณที่ความลึก  $R_{90}$  และ  $R_{50}$  ไม่เกิน 2 ดังนั้นการจำลองมอนติคาร์โลสามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีได้ อย่างไรก็ตามควรศึกษาผลการจำลองมอนติคาร์โลที่พื้นที่ลำรังสีขนาดอื่น ๆ ที่ใช้งานจริงเพื่อประเมินความถูกต้องของการจำลองมอนติคาร์โลสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายกฤษณะ อุทาพรหม สำหรับความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลและอำนวยความสะดวกในทุกด้านขณะทำการศึกษาวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

Antolak, J. A., Bieda, M. R., & Hogstrom, K. R. (2002). Using Monte Carlo methods to commission electron beams: A feasibility study. *Medical Physics*, 29(5), 771–786.

Chetty, I. J., Curran, B., Cygler, J. E., DeMarco, J. J., Ezzell, G., Faddegon, B. A., . . . Ma, C.-M. C. (2007). Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external





- beam treatment planning. *Medical Physics*, 34(12), 4818-4853. doi:doi:http://dx.doi.org/10.1118/1.4916896
- Faddegon, B. A., Perl, J., & Asai, M. (2008). Monte Carlo simulation of large electron fields. *Physics in medicine and biology*, 53(5), 1497.
- Lakkhana., A. (2012). *Estimation of surface dose from therapeutic 6 mv photon beams*. (Doctoral dissertation). Chulalongkorn University, Bangkok.
- O'Shea, T. (2012). *Monte Carlo Simulation of Medical Accelerator Electron Treatment Heads*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10379/2712>
- Rodrigues, A., Sawkey, D., Yin, F.-F., & Wu, Q. (2015). A Monte Carlo simulation framework for electron beam dose calculations using Varian phase space files for TrueBeam Linacs. *Medical Physics*, 42(5), 2389-2403.
- Rogers, D., Kawrakow, I., Seuntjens, J., Walters, B., & Mainegra-Hing, E. (2003). NRC user codes for EGSnrc. *NRCC Report PIRS-702 (Rev. B)*. Ottawa, Canada: National Research Council Canada.
- Stern, R. L., Heaton, R., Fraser, M. W., Goddu, S. M., Kirby, T. H., Lam, K. L., . . . Zhu, T. C. (2011). Verification of monitor unit calculations for non-IMRT clinical radiotherapy: report of AAPM Task Group 114. *Medical Physics*, 38(1), 504-530.
- Turian, J. V., Smith, B. D., Bernard, D. A., Griem, K. L., & Chu, J. C. (2004). Monte Carlo calculations of output factors for clinically shaped electron fields. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 5(2).