

การขึ้นรูปและการประเมินปริมาณรังสีที่ผิวของโบลัสยางพาราธรรมชาติสำหรับการรักษาด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนที่พลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

Formation and surface dose determination of natural rubber bolus for a 9-MeV therapeutic electron beam

ชลิตพล เฉลยภาพ¹, ธนายุต วิริยะธารากิจ², ลักณา อภิปัญญาโสภณ³

¹ฝ่ายรังสีวิทยา โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย

²ศูนย์วินิจฉัยและบำบัดรักษา โรงพยาบาลบำรุงราษฎร์

³ภาควิชารังสีเทคนิคและฟิสิกส์ทางการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้นิพนธ์ประสานงาน

ลักณา อภิปัญญาโสภณ

154 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

อีเมล: Lapipanyasopon@gmail.com

Chalitpon Chaloeiparp¹, Thanayut Wiriyatharakij², Lukkana Apipunyasopon³

¹*Division of Radiology, King Chulalongkorn Memorial Hospital*

²*Diagnostic Center, Bumrungrad International Hospital*

³*Department of Radiological Technology and Medical Physics, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University*

Corresponding author

Lukkana Apipunyasopon

154 Rama 1 Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand

E-mail: Lapipanyasopon@gmail.com

Submitted: Jan 30, 2020

Revised: Apr 13, 2020

Accepted: Apr 15, 2020

บทคัดย่อ

หลักการและเหตุผล: โบลัสเป็นอุปกรณ์ร่วมการรักษาด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอน เพื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ผิว ทำจากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุสังเคราะห์ โบลัสเชิงพาณิชย์มีส่วนประกอบต่างกันและมักมีราคาสูงจึงเป็นการสิ้นเปลืองหากตัดให้มีขนาดเฉพาะกับผู้ป่วยแต่ละราย

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาการขึ้นรูปและประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผิวจากการใช้โบลัสยางพาราธรรมชาติ

วัสดุและวิธีการ: ยางพาราธรรมชาติและสารตัวเติมเป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูปโบลัสยางพาราธรรมชาติ ประเมินเลขซีทีและความหนาแน่นของโบลัสจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์และกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานเลขซีที วัดและประเมินปริมาณรังสีที่ผิวของโบลัสยางพาราธรรมชาติและโบลัสเจลสังเคราะห์ด้วยฟิล์ม Gafchromic EBT3 ในลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จากเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง คำนวณค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกันเพื่อเทียบเคียงปริมาณรังสีที่ผิวของโบลัสทั้งสองชนิด

ผลการศึกษา: โบลัสยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูปมีความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากการวัดพบว่าโบลัสยางพาราธรรมชาติให้ค่าปริมาณรังสีที่ผิวมากกว่าโบลัสเจลสังเคราะห์ทั้งสองความหนา โดยพบความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ผิวสูงที่ความหนาโบลัส 0.5 เซนติเมตร ค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกันของโบลัสทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียง 1 โดยปริมาณรังสีที่ผิวจากการวัดและการคำนวณหลังแก้ค่ามีความสอดคล้องกัน

ข้อสรุป: ยางพาราธรรมชาติมีคุณสมบัติและความหนาแน่นเหมาะสมในการขึ้นรูปโบลัส การคำนวณค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกันของโบลัสยางพาราธรรมชาติสามารถเปรียบเทียบความหนาและปริมาณรังสีที่ผิวให้เทียบเคียงกับการใช้โบลัสเจลสังเคราะห์ได้

คำสำคัญ: โบลัส, ค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกัน, ฟิล์มวัดรังสี, ยางพาราธรรมชาติ

Abstract

Backgrounds: Bolus is a device used in electron beam radiotherapy to increase the surface dose. It may be made from natural or synthetic materials that have a density close to human tissue. Because of an expensive price, commercial bolus cannot be cut to a suitable size for each patient in clinical practice.

Objectives: The aims of this study were to form the in-house bolus with natural rubber and to determine the doses at surface of our bolus sheet.

Materials and Methods: The natural rubber and additional materials were mixed to mold the in-house bolus. The computed tomography (CT) number and physical density of our bolus have been obtained from the CT images and CT calibration curve, respectively. The surface doses were measured using Gafchromic EBT3 film for the 9-MeV electron beam from a Varian Clinac 23EX linear accelerator. The correction factors for scaling thickness of bolus were introduced.

Results: The natural rubber was successfully fabricated as a bolus sheets with the thickness of 0.32 and 0.52 cm. The physical densities of two bolus sheets were consistent to each other which

equal to 0.87 g/cm³. The natural rubber bolus gave more measured surface dose than the commercial bolus that made of synthetic oil gel. The high differences of percentage surface dose were observed in the 0.5 cm thickness. For both the 0.3~ and 0.5~ cm thickness, the correction factors were closed to 1. After the correction, we found excellent agreement between the measured and calculated surface dose.

Conclusion: Natural rubber can be used as an alternative material to form the bolus sheet, because of its suitable property and density. Based on the correction factor from scaling thickness by its density, the surface doses equipped with the natural rubber bolus were equivalent to that with the synthetic gel bolus.

Keywords: Bolus, Depth-scaling factor, Gafchromic EBT3, Natural rubber

J Thai Assoc Radiat Oncol 2020; 26(1): R55-R67

บทนำ

ลำอนุภาคอิเล็กตรอนที่ใช้ในการรักษาทางการแพทย์ มีประโยชน์ต่อการรักษารอยโรคบริเวณผิวและความลึกใกล้เคียงผิว^[1] เนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ค่าปริมาณรังสีบริเวณผิวสูงกว่าลำรังสีโฟตอน โดยปริมาณรังสีตามความลึกจะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ความลึกใดๆ ตามระดับพลังงานของลำอนุภาคอิเล็กตรอนที่เลือกใช้ จากนั้นปริมาณรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid dose fall-off) ตามความลึกที่เพิ่มขึ้น^[2] โดยทั่วไปความลึกในการรักษา (therapeutic range) ด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนควรให้ค่าปริมาณรังสีที่ 80-90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าปริมาณรังสีสูงสุด การฉายรังสีด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 6 และ 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ให้ค่าปริมาณรังสีที่ผิวน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานรังสีที่ใช้ อาจไม่เหมาะสมกับความลึกของรอยโรคที่ต้องการรักษา^[3] จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์เพื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ผิวให้สูงขึ้น ซึ่งทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ลดระดับพลังงาน (energy degrader)^[3] และการวางโบลัส (bolus)^[4,5] จากการศึกษาของ Gunhun และคณะ^[6]

แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีที่ผิวขึ้นกับพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนและขนาดพื้นที่รังสี การฉายรังสีด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ขนาดพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร ร่วมกับการวางโบลัสที่มีความหนา 0.6 และ 1.25 เซนติเมตร ให้ค่าปริมาณรังสีที่ผิวเท่ากับ 93 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ของค่าปริมาณรังสีสูงสุด ตามลำดับ

โบลัสเป็นอุปกรณ์ร่วมในงานรังสีรักษา อาจทำจากวัสดุธรรมชาติหรือสังเคราะห์ มีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์ (tissue equivalence) จึงมีคุณสมบัติในการลดทอนและกระเจิงรังสีเหมือนเนื้อเยื่อ ใช้วางแนบติดบนผิวของผู้ป่วยบริเวณที่ต้องการรักษาร่วมกับการฉายรังสี เพื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ผิว ลดอำนาจทะลุทะลวงของลำรังสีตามแนวลึกในบริเวณที่ต้องการรักษา และทดแทนเนื้อเยื่อที่หายไปจากการผ่าตัดโบลัสที่ดีควรมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความยืดหยุ่นสูง ง่ายต่อการจัดรูป และไม่เป็นพิษ เป็นต้น โดยทั่วไปโบลัสที่ใช้ในช่วงระดับพลังงานเมกะโวลต์มีความหนาตั้งแต่ 2-20 มิลลิเมตร^[7] อย่างไรก็ตามหากวางโบลัสร่วมในการฉายรังสีไม่แนบชิด

อาจมีอากาศบริเวณช่วงรอยต่อระหว่างผิวผู้ป่วยกับโบลัส (air gap) จากการศึกษาของ Benoit และคณะ^[8] พบว่า ความหนาของอากาศบริเวณช่วงรอยต่อระหว่างผิวผู้ป่วย กับโบลัสที่ 4 และ 10 มิลลิเมตร ทำให้ปริมาณรังสีลดลง 0-4 เปอร์เซ็นต์ และ 4-10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ปัจจุบันโบลัสที่มีจำหน่ายผลิตจากวัสดุหลากหลาย ชนิด ตัวอย่างเช่น Paraffin wax, Polystyrene, Lucite, Elastic-gel, Thermoplastic sheets, Dental wax และ Rayon cloth เป็นต้น^[7,9,10] ซึ่งมีส่วนประกอบและความหนาแน่น (physical density) แตกต่างกัน โดยมากมักมีราคาสูง เมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัติจึงให้ปริมาณรังสีที่ผิว ต่างกันและการตัดให้มีขนาดเฉพาะแนบไปกับบริเวณที่ ต้องการฉายรังสีในผู้ป่วยแต่ละรายจึงเป็นความสิ้นเปลือง น้ำเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดแรกที้นำมาใช้ผลิตโบลัส แต่การ ขึ้นรูปให้ได้ตามที่ต้องการทำได้ยากและไม่สามารถตัดตาม ขนาดที่ต้องการได้^[7] จึงมีการนำวัสดุธรรมชาติและวัสดุสังเคราะห์อื่นมาผลิตโบลัส จากงานวิจัยของ Supratman และคณะ^[11] พบว่ายางพาราธรรมชาติ (Natural rubber) มีคุณสมบัติทางกายภาพและความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ใกล้เคียงเนื้อเยื่อ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ ขึ้นรูปโบลัส

ยางพาราธรรมชาติ^[12,13] ได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า Hevea Brasiliensis และมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene, $-(C_5H_8)_n-$) น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพาราเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายน้ำมัน ประกอบด้วยน้ำ 50-80 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อยาง 20-45 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในลักษณะสารแขวนลอย โดยทั่วไปน้ำยางสดจะถูกนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงให้ได้น้ำยางข้น ที่มีเนื้อยางประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และเติมสารรักษา สภาพน้ำยาง เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfite) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เพื่อเก็บรักษาน้ำยางให้คงสภาพก่อนนำไปผลิตเป็น

ผลิตภัณฑ์ ยางพาราบริสุทธิ์มีเลขอะตอมเท่ากับ 4.99 ± 0.04 และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสมที่เติม^[14]

คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจยางพาราธรรมชาติ ซึ่งมีราคาต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อการฉีกขาดสึกหรอได้ดี และจัดหาได้ง่ายภายในประเทศมาขึ้นรูปโบลัส และประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผิวจากการวางโบลัสยางพาราธรรมชาติที่ผลิตได้บนหุ่นจำลองวัสดุเทียบเท่าน้ำในลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จากเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงทางการแพทย์ (Linear accelerator; Linac) เนื่องจากเป็นระดับพลังงานที่สามารถนำมาใช้รักษารอยโรคที่ผิวเช่น เปลือกตา หู จมูก และใบหน้า รวมถึงรอยโรคที่ความลึกใกล้ผิวเช่น ศีรษะและลำคอ และเต้านม เป็นต้น^[11] คำนวณหาค่าแก้เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกันของโบลัสยางพาราธรรมชาติและตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ ที่มีค่าความหนาแน่น 0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบความหนาและปริมาณรังสีที่ผิวจากการใช้โบลัสยางพาราธรรมชาติให้เทียบเคียงกับการใช้ตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์

วัสดุและวิธีการ

การขึ้นรูปโบลัสยางพาราธรรมชาติ

การศึกษานี้ทำการขึ้นรูปโบลัสจากน้ำยางพาราธรรมชาติที่ความหนา 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร โดยโบลัสความหนา 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร ใช้น้ำยางพาราธรรมชาติ 206 และ 275 มิลลิลิตร กำหนดสัดส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติต่อน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารตัวเติมทำให้น้ำยางนิ่ม 3 ส่วนต่อน้ำหนักน้ำยางพาราธรรมชาติหนึ่งร้อยส่วน (part per hundred of rubber; phr) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน ยี่ห้อ Corning รุ่น PC-420D ผลิตภัณฑ์จากประเทศสหรัฐอเมริกา ด้วยความเร็วในการผสม 800 รอบต่อนาที

เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเทส่วนผสมที่เข้ากันลงบนแม่พิมพ์ขนาด 20×20 ตารางเซนติเมตร คลุมด้วยผ้าขาวบางตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 วัน นำส่วนผสมในแม่พิมพ์ที่เริ่มแข็งตัว เข้าอบด้วยตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลมยี่ห้อ Lenton รุ่น WF60 ผลิตภัณฑ์จากประเทศสหราชอาณาจักร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 2 สัปดาห์ จะได้โบลัสยางพาราธรรมชาติที่แห้งและหลุดจากแม่พิมพ์

การประเมินเลขซีทีและความหนาแน่นของโบลัสยางพาราธรรมชาติ

เก็บภาพถ่ายทางรังสีของโบลัสยางพาราธรรมชาติ และหุ่นจำลองลักษณะเนื้อเยื่อ ยี่ห้อ Gammex รุ่น 467 ประเทศสหรัฐอเมริกา^[15] จากการสแกนเก็บภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (Computed tomography simulator) ยี่ห้อ Philips รุ่น Brilliance Big Bore ที่ 120 กิโลโวลต์พีค (kVp) 250 มิลลิแอมแปร์วินาที (mAs) ความหนาสไลด์ 0.3 มิลลิเมตร จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ตัดขวางหุ่นจำลองลักษณะเนื้อเยื่อ กำหนดพื้นที่สนใจขนาด 100 ตารางมิลลิเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของวัสดุแต่ละชนิด บันทึกเลขซีที (Computed Tomography; CT number) ที่อ่านได้สร้างกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานจากเลขซีทีที่อ่านได้และความหนาแน่น (Physical density) ของวัสดุแต่ละชนิด ประเมินเลขซีทีของโบลัสยางพาราธรรมชาติที่ตำแหน่งกึ่งกลาง โดยกำหนดพื้นที่สนใจขนาด 100 ตารางมิลลิเมตร นำเลขซีทีที่ได้ไปอ่านค่าความหนาแน่นของโบลัสยางพาราธรรมชาติจากกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานเลขซีที

การวัดและคำนวณปริมาณรังสีที่ผิว

วัดค่าปริมาณรังสีที่ผิวบนหุ่นจำลองวัสดุความหนา

แน่นเทียบเท่าน้ำ (Solid water phantom) ยี่ห้อ Gammex ประเทศสหรัฐอเมริกา จากการฉายรังสีด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงผิวหุ่นจำลอง (Source to surface distance; SSD) 100 เซนติเมตร ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ยี่ห้อ Varian รุ่น Clinac 21EX ประเทศสหรัฐอเมริกา ด้วยฟิล์ม Radiochromic ชนิด GafChromic EBT3^[16] ขนาด 3×5 ตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองและกึ่งกลางพื้นที่รังสี กำหนดให้ค่าปริมาณรังสีที่ผิวเท่ากับ 300 เซนติเกรย์ (cGy) ทำการวัดค่าปริมาณรังสีที่ผิวซ้ำในสถานะเดิมโดยเพิ่มการวางตัวอย่างโบลัสเซิงพาณิชย์จากเจสสังเคราะห์^[17,18] ความหนา 0.3, 0.5 และ 1 เซนติเมตร และโบลัสยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูปได้ ความหนา 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร ทับลงบนฟิล์ม ตามลำดับ

นำฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสีและทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้กระบวนการสร้างภาพเสร็จสมบูรณ์ และให้ค่าความดำคงที่โดยเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์^[19,20] มาสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ ยี่ห้อ EPSON รุ่น Perfection V800 ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยจัดวางตำแหน่งฟิล์มที่กึ่งกลางสแกนเนอร์ในทิศทางเดียวกัน เลือกประเภทการสแกนเป็นฟิล์มที่ 48 บิต ความละเอียด 72 จุดต่อนิ้ว (dots per inch; dpi) สแกนในช่วงแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ภาพที่ได้ภายหลังการสแกนจะนำมาอ่านค่าพิกเซล (Pixel value) ด้วยโปรแกรม Image J เวอร์ชัน 1.52a กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่สนใจ (Region of interest; ROI) เท่ากับ 1.5 เซนติเมตร^[21] หาค่าความดำสุทธิ (Net optical density; OD_{net}) จากค่าพิกเซล^[22] ด้วยสมการที่ (1)

$$OD_{net} = \log \frac{PV_{unexposed}}{PV_{exposed}} \quad (1)$$

เมื่อ	OD_{net}	หมายถึง ค่าความดำสุทธิ
	$PV_{unexposed}$	หมายถึง ค่าฟิกเชลเฉลี่ยวัดจากฟิล์มที่ยังไม่ผ่านการฉายรังสี
	$PV_{exposed}$	หมายถึง ค่าฟิกเชลเฉลี่ยวัดจากฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสี

หาค่าปริมาณรังสีที่ผิวขณะไม่วางโบลัส วางตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ และโบลัสยางพาราธรรมชาติบนหุ่นจำลอง จากกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานฟิล์ม GafChromic EBT3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำสุทธิและปริมาณรังสีที่ทราบค่า เนื่องจากผลการศึกษาก่อนหน้า^[19,22,23] แสดงให้เห็นว่าความไวในการตอบสนองของฟิล์ม GafChromic EBT3 ในลำอนุภาคอิเล็กตรอนจะคงที่ที่ค่าปริมาณรังสีสูงกว่า 100 เซนติเกรย์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดค่าปริมาณรังสีในการเปรียบเทียบมาตรฐานฟิล์มที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 เซนติเกรย์ จากลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอน ที่ความลึก 2 เซนติเมตรจากผิวหุ่นจำลองวัสดุเทียบเท่า น้ำ ในพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร

การแก้ค่าความหนาแน่นที่ต่างกันของวัสดุและความหนาเทียบเท่า

คำนวณหาค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกัน (Depth-scaling factor; C_{pt}) ของตัวอย่างโบลัส

เชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์และโบลัสยางพาราธรรมชาติ และหาค่าความหนาเทียบเท่าของโบลัสยางพาราธรรมชาติ จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ^[24]

$$C_{NR} = \frac{Z_{av}^{SG} \rho_w}{Z_{av}^{NR} \rho_{NR}} \quad (2)$$

$$Z_{SG} = Z_{NR} C_{NR} \quad (3)$$

เมื่อ C_{NR} หมายถึง ค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกันของตัวกลาง Z_{av}^{SG} และ Z_{av}^{NR} หมายถึง ความหนาเฉลี่ยของโบลัสทำจากเจลสังเคราะห์และยางพาราธรรมชาติในหน่วยเซนติเมตร ρ_{SG} และ ρ_{NR} หมายถึงความหนาแน่นของโบลัสทำจากเจลสังเคราะห์และยางพาราธรรมชาติในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ Z_{SG} และ Z_{NR} หมายถึงความหนาของโบลัสทำจากเจลสังเคราะห์และยางพาราธรรมชาติในหน่วยกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลการศึกษา

โบลัสยางพาราธรรมชาติ

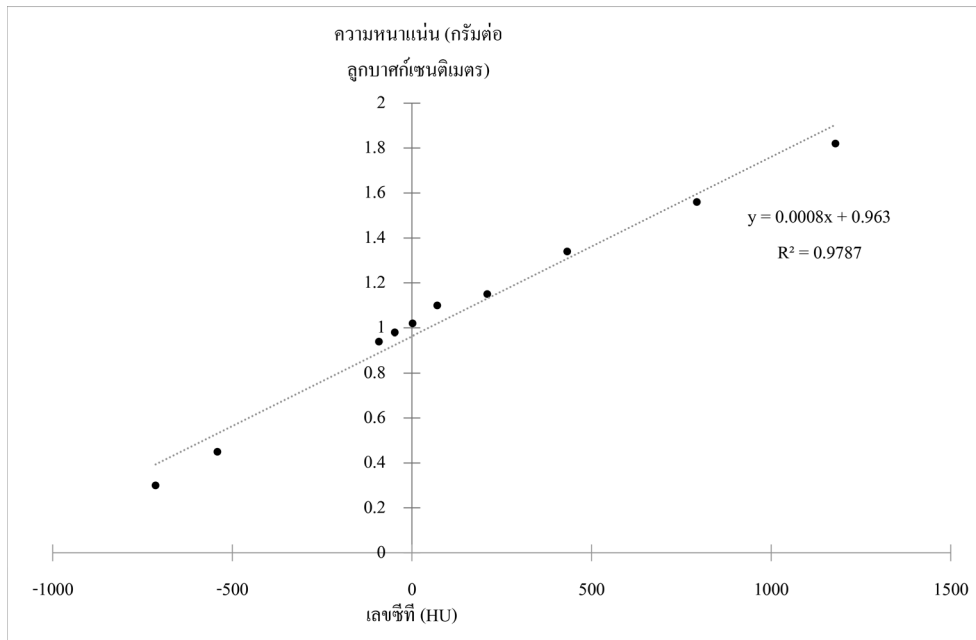
โบลัสยางพาราธรรมชาติที่คงรูป หลุดออกจากแม่พิมพ์เปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล บริเวณขอบโค้งขึ้น มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่หดตัวลงจากเดิม ดังภาพที่ 1 วัดความกว้างและความยาวของโบลัสยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูปได้เท่ากับ 18x18 และ 18.5x18.5 ตารางเซนติเมตร โดยมีความหนาที่ตำแหน่งกึ่งกลางโบลัสเท่ากับ 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ส่วนผสมยางพาราธรรมชาติและโบลัสยางพาราธรรมชาติที่คงรูปในแม่พิมพ์

โบลัสยางพาราธรรมชาติที่ความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร วัดค่าเลขซีทีที่เฉลี่ยจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางโบลัสได้เท่ากับ -150.51 ± 14.71 HU (Hounsfield Units) และ -152.12 ± 10.37 HU ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของโบลัสยางพารา

ธรรมชาติหาได้จากกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานเลขซีทีที่แสดงดังภาพที่ 2 โบลัสยางพาราธรรมชาติความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.870 ± 0.013 และ 0.869 ± 0.090 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 2 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐานเลขซีทีจากหุ่นจำลองลักษณะเนื้อเยื่อ

ปริมาณรังสีที่ผิวจากโบลัสยางพาราธรรมชาติ

ค่าความต่ำสุดจากฟิล์ม GafChromic EBT3 จากการฉายด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยปริมาณรังสีที่ทราบค่า นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานฟิล์ม GafChromic EBT3 ในช่วงสัญญาณสีแดง เขียว และน้ำเงิน ดังภาพที่ 3

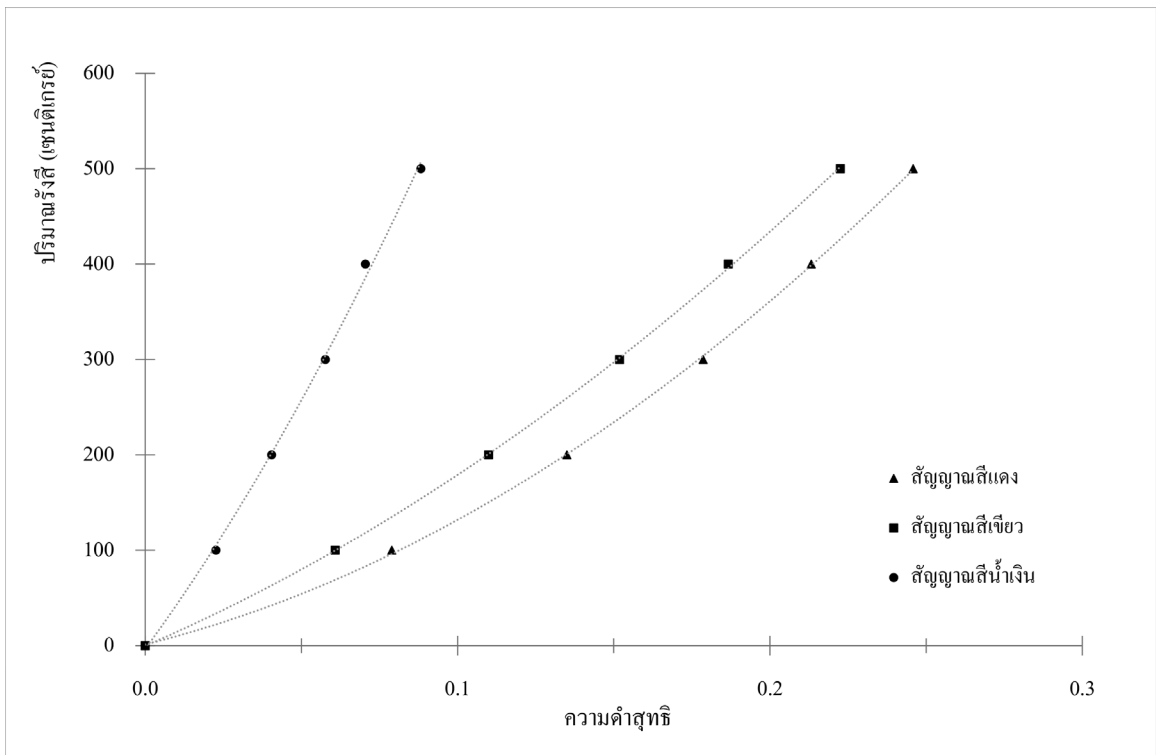
จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าช่วงสัญญาณสีแดงมีความไวในการตอบสนองต่อปริมาณรังสีสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sorriaux และคณะ^[19] ดังนั้นการศึกษานี้

จึงประเมินปริมาณรังสีที่ผิวจากค่าความต่ำสุดในช่วงสัญญาณสีแดง ดังสมการที่ (4)

$$Y = 4929.1X^2 + 812.8X + 1.3158 \quad (4)$$

เมื่อ Y หมายถึง ปริมาณรังสีในหน่วยเกรย์ และ X หมายถึง ค่าความต่ำสุด

ในสถานะที่ไม่วางโบลัสวัดค่าปริมาณรังสีที่ผิวได้เท่ากับ 232.42 ± 2.56 เซนติเกรย์ คิดเป็น 78 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณรังสีสูงสุด การวางตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 3 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐานฟิล์ม GafChromic EBT3 ในช่องสัญญาณสีแดง เขียว และน้ำเงิน

ทำจากเจลสังเคราะห์ ความหนา 1 เซนติเมตร วัดค่าปริมาณรังสีที่ผิวได้เท่ากับ 303.92 ± 5.92 เซนติเกรย์ คิดเป็น 101 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณรังสีสูงสุด ค่าปริมาณรังสีที่ผิวจากการวางตัวอย่างโพลีเอทิลีนทำจากเจลสังเคราะห์ที่มีความหนา 0.30 และ 0.50 เซนติเมตร เท่ากับ 86 และ 91 ของค่าปริมาณรังสีสูงสุดตามลำดับ ขณะที่ค่าปริมาณรังสีที่ผิวจากการวางโพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร เท่ากับ 86 และ 92 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณรังสีสูงสุดตามลำดับ โดยโพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ทำให้ปริมาณรังสีที่ผิวเพิ่มขึ้น 8 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณรังสีที่ผิวจากการวางโพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ทำให้ปริมาณรังสีที่ผิวเพิ่มขึ้น 8 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากเจลสังเคราะห์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ผิวจากการวางโพลีเอทิลีนความหนา 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร เท่ากับ -0.39 และ -1.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ผิวจากโพลีเอทิลีนทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของโพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้น ดังนั้นการแก้ค่าเนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกันของโพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ทำให้ปริมาณรังสีที่ผิวจากการใช้โพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร เท่ากับ 86 และ 92 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณรังสีสูงสุดตามลำดับ โดยโพลีเอทิลีนความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ทำให้ปริมาณรังสีที่ผิวเพิ่มขึ้น 8 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่ผิวในสภาวะที่วางโบลัสยางพาราธรรมชาติ ความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร และตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ ความหนา 0.30 และ 0.50 เซนติเมตร จากการฉายด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

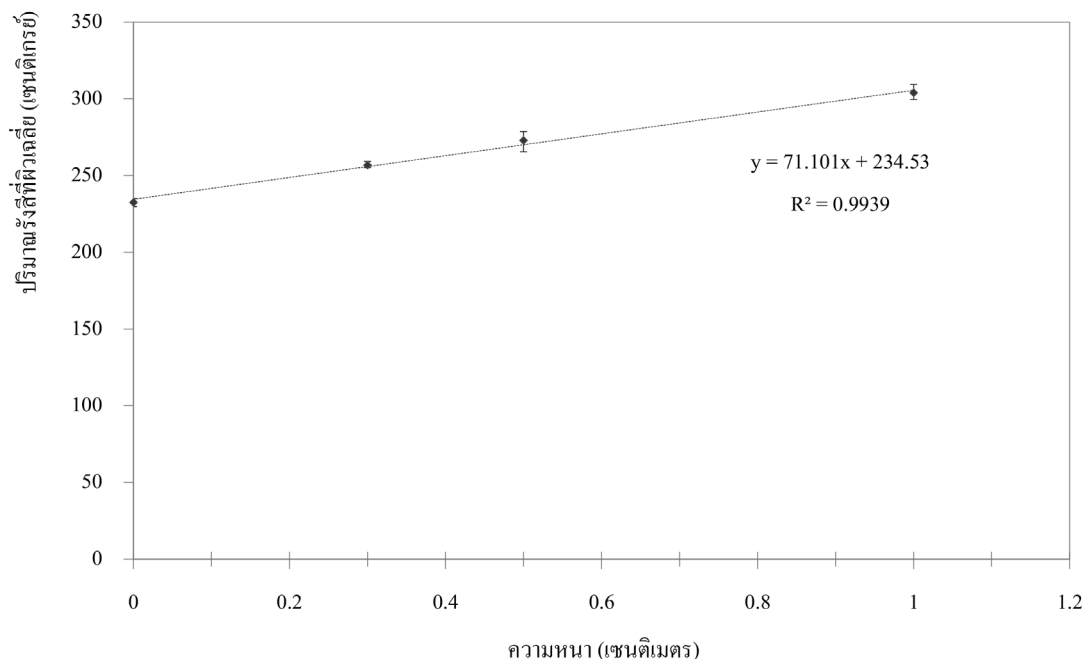
ความหนาโบลัส (เซนติเมตร)	ปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เซนติเกรย์)		ความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)	p-value
	โบลัสยางพาราธรรมชาติ	โบลัสเจลสังเคราะห์		
	0.3	257.76 ± 2.93	256.76 ± 2.10	-0.39
0.5	276.32 ± 0.94	272.41 ± 3.31	-1.43	0.17

ให้เหมาะสมกับรอยโรคและพลังงานรังสี รวมถึงนำไปใช้ในการกำหนดความหนาและความหนาแน่นในการสร้างโบลัสภายในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้

จากพื้นฐานงานวิจัยของ Mihailescu และคณะ^[24] ในสมการที่ (2) คำนวณค่าแก๊จจากความหนาแน่นที่ต่างกันของตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ และโบลัสยางพาราธรรมชาติ ความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ได้เท่ากับ 1.0228 และ 1.1349 ตามลำดับ โดยโบลัสยางพาราธรรมชาติ ความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร จะมีความหนาเทียบเท่ากับการใช้ตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ ที่ความหนา 0.33 และ 0.59 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นการใช้โบลัสยางพาราธรรมชาติความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ควรให้ค่าปริมาณรังสีที่ผิวใกล้เคียงกับการใช้ตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ความหนา 0.33 และ 0.59 เซนติเมตร ตามลำดับ ประเมินความถูกต้องของความหนาตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ที่แก้ค่าความหนาแน่นที่ต่างกันและหาปริมาณรังสีที่ผิว

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์และค่าปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ยจากการวัดด้วยฟิล์ม แสดง**ดังภาพที่ 4**

จากความหนาเทียบเท่าระหว่างการใส่โบลัสยางพาราธรรมชาติกับตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ เปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ยจากการวัดด้วยฟิล์มและการคำนวณจากสมการเส้นตรงในภาพที่ 4 ผลการศึกษาใน**ตารางที่ 2** แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาเทียบเท่าของโบลัสที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) มีความถูกต้อง โดยให้ค่าความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ยจากการวัดและการคำนวณน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางสถิติด้วย T-test พบว่าค่าปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ยจากการวัดเมื่อวางโบลัสยางพาราธรรมชาติและการคำนวณจากความหนาเทียบเท่าของตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตัวอย่างโบลิสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์และปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ย จากลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 9 เมกะโวลต์

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ยจากการวัดจริงตามความหนาโบลิสยางพาราธรรมชาติ และการคำนวณจากความหนาของตัวอย่างโบลิสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ที่แก้ค่าความหนาแน่น

ความหนาโบลิสแก้ค่าความหนาแน่น ของวัสดุ (เซนติเมตร)		ปริมาณรังสีที่ผิวเฉลี่ย (เซนต์ิเกรย์)		ความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)	p-value
ยางพาราธรรมชาติ	เจลสังเคราะห์	การวัด	การคำนวณ		
0.32	0.33	257.76	257.80	-0.02	0.98
0.52	0.59	276.32	276.49	-0.06	0.78

บทวิจารณ์

โบลิสยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูปมีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อไขมัน (Adipose tissue)^[15] ซึ่งแตกต่างจากโบลิสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ 0.04-0.13 กรัม

ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคุณ Supratmen และคณะ^[11] พบว่าโบลิสยางพาราธรรมชาติ ความหนา 0.5 เซนติเมตร มีเลขซีทีเท่ากับ -107 HU และความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Relative electron

density) เท่ากับ 0.893 ซึ่งแตกต่างจากเลขซีทีของโบลัส ยางพาราธรรมชาติในการศึกษาที่ ~40 HU เนื่องมาจาก ชนิดของยางพาราธรรมชาติ ส่วนผสมและวิธีการขึ้นรูป โบลัสยางพาราธรรมชาติ รวมถึงค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (Kilovoltage peak; kVp) ในการเก็บข้อมูลภาพเอกซเรย์ คอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกัน^[15]

เนื่องจากส่วนประกอบของยางพาราธรรมชาติต่างจาก เจลสังเคราะห์ ยางพาราธรรมชาติประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอน โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ แร่ธาตุ และน้ำ^[25] ส่วนประกอบที่ต่างกันนี้ส่งผลต่อเลขอะตอมและความหนาแน่นของวัสดุ^[26] ดังนั้น ความหนาแน่นของโบลัสยางพาราธรรมชาติซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ จึงลดทอนปริมาณรังสีได้มากกว่า เพื่อให้การลดทอนปริมาณรังสีจากโบลัสทั้งสองชนิดมีค่าเทียบเคียงกันจำเป็นต้องแก้ค่าความแตกต่างจากความหนาแน่นของวัสดุที่ต่างกัน

จากการศึกษาที่ แม้โบลัสยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูป จะสามารถเพิ่มปริมาณรังสีที่ผิวได้ใกล้เคียงกับตัวอย่าง โบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ โดยมีค่าความแตกต่างเพียง 1 และ 3.4 เซนติเกรย์ ที่ความหนา 0.32 และ 0.52 เซนติเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามโบลัสยางพาราธรรมชาติมีความยืดหยุ่นน้อย โค้งแบนไปกับพื้นผิวได้น้อยกว่าตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ ดังนั้น การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มชนิดของสารตัวเติม ปรับสัดส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติกับสารตัวเติม เพื่อให้ได้โบลัสยางพาราธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่นเหมือนโบลัสเชิงพาณิชย์มากขึ้น นอกจากนี้หากต้องการนำโบลัส

ยางพาราธรรมชาติที่ขึ้นรูปไปใช้ในทางคลินิก ควรเพิ่มเติม การทดสอบความเป็นพิษต่อผู้ป่วย

ข้อสรุป

ยางพาราธรรมชาติมีคุณสมบัติและความหนาแน่นที่เหมาะสมในการนำมาขึ้นรูปโบลัส การเลือกชนิดและปรับ สัดส่วนของสารตัวเติม รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปโบลัส ยางพาราธรรมชาติส่งผลต่อความยืดหยุ่น ความหนาแน่น และการลดทอนปริมาณรังสี การคำนวณหาค่าแก้จากความหนาแน่นที่ต่างกันของโบลัสยางพาราธรรมชาติกับ ตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์สามารถเปรียบเทียบความหนาและปริมาณรังสีที่ผิวจากการใช้โบลัส ยางพาราธรรมชาติให้เทียบเคียงกับการใช้ตัวอย่างโบลัสเชิงพาณิชย์ทำจากเจลสังเคราะห์ได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศักดิ์ กิ่งแก้ว นักฟิสิกส์ การแพทย์ สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ฝายรังสีวิทยา โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่จัดหาห้องทดลอง และวัสดุอุปกรณ์ในการประดิษฐ์โบลัสจาก ยางพาราธรรมชาติ และคุณสังจาใจ เครื่อง หัวหน้านักรังสีเทคนิค ฝายรังสีรักษา โรงพยาบาลศิริราชปิยมหาราช การุณย์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในการ สแกนเก็บภาพถ่ายทางรังสีของโบลัสด้วยเครื่องเอกซเรย์ คอมพิวเตอร์

เอกสารอ้างอิง

1. Clifford Chos KS, Perez CA, Brady LW. Radiation oncology: management decisions. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2011. P. 27.
2. Podgorsak EB. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005.
3. Park JI, Ha SW, Kim JI, Lee H, L J, Kim IH, et al. Design and evaluation of electron beam energy degraders for breast boost irradiation. Radiat Oncol. 2016; 11:112.
4. Canters RA, Lips IM, Wendling M, Kusters M, Van ZM, Gerritsen RM, et al. Clinical implementation of 3D printing in the construction of patient specific bolus for electron beam radiotherapy for non-melanoma skin cancer. Radiother Oncol. 2016; 12:148-53.
5. Malaescu I, Marin CN, Spunei M. Comparative Study on the Surface Dose of Some Bolus Materials. Int J Med Phys Clin Eng Radiat Oncol. 2015; 4:348-52.
6. Gunhan B, Kemikler G, Koca A. Determination of surface dose and the effect of bolus to surface dose in electron beams. Med Dosim. 2003; 28:193-8.
7. Vyas V, Palmer L, Mudge R, Jiang R, Fleck A, Schaly B, et al. On bolus for megavoltage photon and electron radiation therapy. Med Dosim. 2013; 38:268-73.
8. Benoit J, Pruitt AF, Thrall DE. Effect of wetness level on the suitability of wet gauze as a substitute for Superflab as a bolus material for use with 6 MV photons. Vet Radiol Ultrasound. 2009; 50:555-9.
9. Seppala T, Collan J, Auterinen I, Seren T, Salli E, Kotiluoto P, et al. A dosimetric study on the use of bolus materials for treatment of superficial tumors with BNCT. Appl Radiat Isot. 2004; 61:787-91.
10. Chang F, Chang P, Benson K, Share F. Study of elasto-gel pads used as surface bolus material in high energy photon and electron therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1992; 22:191-3.
11. Supratman AS, Sutanto H, Hidayanto E, Jaya GW, Astuti SY, Budiono T, et al. Characteristic of natural rubber as bolus material for radiotherapy. Mater Res Express. 2018; 5: 095302.
12. ยางธรรมชาติ, Available from: <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9002/6/Chapter2.pdf>
13. Cornish K. Biosynthesis of natural rubber (NR) in different rubber-producing species. USA: Woodhead Publishing Limited; 2014. P. 3-27.
14. Saion E, Sulaiman AA, Ahmad A, Wagiran H. Determination of Effective Atomic Number of Rubber. 1983; 6(3):95-8.
15. Tissue Characterization Phantom Model 467 User's guide, Available from: <http://www.gammex.com>.
16. GAFChromic™ EBT3 film specification, Available from: www.gafchromic.com
17. Superflab bolus specification, Available from: www.rpdinc.com

18. Tissue-equivalent gel bolus specifications, Available from: <https://civcort.com>
19. Sorriaux J, Kacperek A, Rossomme S, Lee JA, Bertrand D, Vynckier S, et al. Evaluation of Gafchromic® EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams. *Phys Med*. 2013; 29:599-606.
20. Sipila P, Ojala J, Kaijaluoto S, Jokelainen I, Kosunen A. Gafchromic EBT3 film dosimetry in electron beams – energy dependence and improved film read-out. *J Appl Clin med Phys*. 2016; 17: 360-73.
21. Moylan R, Aland T, Kairn T. Dosimetric accuracy of Gafchromic EBT2 and EBT3 film for in vivo dosimetry. *Australas Phys Eng Sci Med*. 2013; 36:331-7.
22. Ulya S, Wibowo WE, Nuruddin N, Pawiro S.A. Dosimetric characteristics of gafchromic EBT3 film on small field electron beam. *J Phys: Conf Ser*. 2017; 851:012023.
23. Papaconstadopoulos P, Hegyi G, Seuntjens J, Devic S. A protocol for EBT3 radiochromic film dosimetry using reflection scanning. *Med Phys*. 2014; 41: 122101-1.
24. Mihailescu D, Borgia C. Water Equivalence of Some Plastic Materials used in Electron Dosimetry: A Monte Carlo Investigation. *Rom Rep Phys*. 2006; 58:415-25.
25. Jacob JL, d'Auzac J, Prevot JC. The composition of Natural Latex from Hevea brasiliensis. *Clin Rev Allergy*. 1993; 11:3255-37.
26. Knoos T, Nilsson M, Ahlgren L. A method for conversion of Hounsfield number to electron density and prediction for macroscopic pair production cross-sections. *Radiother Oncol*. 1986; 5:337-45.