

Improving patient capacity for gynecological brachytherapy through an optimization model for Iridium-192 source decay: A case study at Udon Thani Cancer Hospital

Panlop Malasri, Nillaya Bathcharee

Udon Thani Cancer Hospital, Udon Thani

Abstract

The radioactive decay of the Iridium-192 (Ir-192) source used in brachytherapy for gynecological cancer presents a significant scheduling challenge at Udon Thani Cancer Hospital. As the source decays over its 73.83-day half-life, treatment dwell times increase, creating a bottleneck that reduces the number of patients that can be treated daily. This research introduces an optimization model to counteract this effect by defining the optimal daily patient schedule. By analyzing the variables of source age and activity of source, the model prescribes a dynamic capacity: 9 patients per day for the initial 10 days post-replacement, reducing to 8 patients for days 11-82, and finally 7 patients from day

83 onward. The radioactivity readings revealed that when the source had levels of 9.1 and 4.59 curies (Ci), the encouragement capacity decreased by one patient. This enables Udon Thani Cancer Hospital to effectively manage resources and maximize service delivery throughout the entire lifecycle of the radiation source. .

Keywords: Brachytherapy; Gynecologic malignancy; Optimization model

Received: 29 September 2025, Revised: 25 October 2025, Accepted: 30 November 2025

Correspondence: Panlop Malasri, Udon Thani Cancer Hospital, 36, Nong Phai, Mueang Udon Thani District, Udon Thani 41330, Thailand, Tel.: 042 110 345, email: Panlopmlsko@gmail.com

การเพิ่มประสิทธิภาพการรองรับผู้ป่วยมะเร็งนรีเวช ด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ โดยใช้แบบจำลองการหาค่าเหมาะที่สุดพิจารณาการเสื่อมของแหล่งกำเนิดรังสี Iridium-192 กรณีศึกษาโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี

พัลลภ มาลาศรี, นิลยา ปากขาว

โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี, อุดรธานี

บทคัดย่อ

การรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ (Brachytherapy) เป็นการรักษามาตรฐานสำหรับผู้ป่วยมะเร็งนรีเวช โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี ใช้แหล่งรังสี อิริเดียม-192 (Ir-192) มีค่าครึ่งชีวิต 73.83 วัน ทำให้ค่ากัมมันตภาพรังสีลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาการรักษา (Dwell Time) ต่อราย ยาวนานขึ้นและกระทบต่อความสามารถในการรองรับผู้ป่วยของโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Model) ที่สามารถรองรับผู้ป่วยได้ในแต่ละวัน พิจารณาจากตัวแปรหลักคืออายุและค่ากัมมันตภาพของแหล่งรังสี Ir-192 โดยพบว่าสามารถรองรับผู้ป่วยได้สูงสุด 9 รายต่อวัน ใน 10 วันแรกหลังเปลี่ยนแร่แหล่งกำเนิด หลังจากนั้นจะลดลงเหลือ 8 รายต่อวัน ตั้งแต่วันที่ 11 ถึงวันที่ 82 และลดลงเหลือ 7 รายต่อวัน ตั้งแต่

วันที่ 83 เป็นต้นไป และจากค่ากัมมันตภาพพบว่า เมื่อแหล่งกำเนิดมีค่า 9.1 คูรี (Ci) และ 4.59 คูรี (Ci) ทำให้การรองรับผู้ป่วยได้ลดลงครั้งละ 1 รายตามลำดับ ทำให้โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีสามารถบริหารจัดการทรัพยากรและเพิ่มประสิทธิภาพการบริการได้อย่างสูงสุดตลอดอายุการใช้งานของแหล่งรังสี Ir-192

คำสำคัญ: รังสีรักษาระยะใกล้; มะเร็งนรีเวช; การหาค่าเหมาะสมที่สุด

วันที่รับต้นฉบับ: 29 กันยายน 2568, วันที่แก้ไข: 25 ตุลาคม 2568, วันที่ตอบรับ: 30 พฤศจิกายน 2568

บทนำ

การรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ หรือ Brachytherapy (BT) เป็นวิธีการรักษามาตรฐาน โดยมใช้เป็นการรักษาหลักหรือร่วมกับการฉายรังสีจากภายนอก (External Beam Radiation Therapy: EBRT) ในผู้ป่วยมะเร็งนรีเวช เช่น มะเร็งปากมดลูกและมะเร็งเยื่อบุโพรงมดลูก [1-2] โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีให้บริการรักษาผู้ป่วยกลุ่มนี้ด้วยเทคนิครังสีระยะใกล้หรือการใส่แร่แบบ 2 มิติ ชนิด High-Dose-Rate (HDR) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี อิริเดียม-192 (Iridium-192, Ir-192) [3-4]

แหล่งกำเนิดรังสี Ir-192 มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) 73.83 วัน ค่ากัมมันตภาพรังสี (Activity) ของแหล่งกำเนิดจะลดลงประมาณ 1% ต่อวัน [5] การลดลงนี้เป็นรูปแบบเอ็กโปเนนเชียลที่สามารถคาดการณ์ได้ เมื่อค่ากัมมันตภาพรังสีลดลง จะใช้ระยะเวลาการให้แร่รังสี (Dwell Time) ในการรักษานานขึ้น [6] ส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาการรักษาทั้งหมดต่อผู้ป่วยหนึ่งราย และจะกระทบต่อจำนวนผู้ป่วยที่โรงพยาบาลสามารถรองรับได้ใน

แต่ละวัน ซึ่งในปัจจุบันโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีได้นัดผู้ป่วยมะเร็งนรีเวชรักษาด้วย HDR BT 6-9 รายต่อวัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงท้ายของรอบเปลี่ยนแหล่งกำเนิดมีระยะเวลาการรักษายาวนานขึ้น ทำให้เกิดความล่าช้าและอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการ หรือเกิดภาวะคอขวดในการบริการ และด้วยเหตุนี้แหล่งกำเนิดรังสีจึงต้องถูกเปลี่ยนใหม่ทุก 3-4 เดือน เพื่อรักษาประสิทธิภาพ [7]

ดังนั้น การศึกษานี้ใช้หลักการ Optimization Model ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์การวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) [8] เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถพยากรณ์และคำนวณจำนวนผู้ป่วยที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนัดในแต่ละวัน โดยพิจารณาจากตัวแปรหลักคืออายุของแหล่งรังสี Ir-192 และประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อให้โรงพยาบาลสามารถวางแผนการจัดคิวผู้ป่วยล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รังสีรักษามีบทบาทสำคัญในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งนรีเวช โดยเฉพาะมะเร็งปากมดลูกและมะเร็งเยื่อบุโพรงมดลูก ทั้งในแง่ของการรักษาให้หายขาด หรือเป็นการรักษาเสริมเพื่อลดโอกาสการกลับมาเป็นซ้ำของโรค [1, 2] การรักษาด้วยรังสี

ผู้สนับสนุนประสานงาน: พัลลภ มาลาศรี โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี 36 ม.1 ต.หนองไผ่ อ.มิตรภาพ (อุดร-ขอนแก่น) อ.เมือง จ.อุดรธานี 41330, โทร.: 042-110345, email: Panlopmlsko@gmail.com

ระยะใกล้ (BT) เป็นเทคนิคการรักษาด้วยรังสีรูปแบบหนึ่งที่มีหลักการคือการนำต้นกำเนิดรังสีไปวางไว้ภายในหรือใกล้ชิดกับก้อนมะเร็งโดยตรง ทำให้สามารถให้ปริมาณรังสีสูงที่ตัวมะเร็งได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่อวัยวะปกติข้างเคียงได้รับรังสีน้อยลงสำหรับมะเร็งในโพรง เทคนิคที่ซับซ้อนที่สุดคือการใส่แร่ในโพรงอวัยวะ (Intracavitary brachytherapy) โดยการสอดใส่อุปกรณ์นำส่งแร่ (Applicator) เข้าไปในโพรงมดลูกและช่องคลอด [3, 4]

ในอดีตการรักษานิยมใช้การให้รังสีแบบอัตราต่ำ (Low-Dose-Rate: LDR) ซึ่งผู้ป่วยต้องนอนพักในโรงพยาบาลเป็นเวลาหลายวัน แต่ปัจจุบันได้พัฒนาไปสู่การให้รังสีแบบอัตราสูง (High-Dose-Rate: HDR) ซึ่งใช้เวลาในการรักษาแต่ละครั้งสั้นลงทำให้ผู้ป่วยไม่ต้องนอนโรงพยาบาลและสะดวกสบายมากขึ้น [3-6]

แหล่งกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ในการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้แบบ HDR คือ Ir-192 [3,5,6] ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิต ประมาณ 73.83 วัน [5] มีการสลายตัวแบบเอ็กซีโพเนนเชียล ค่ากัมมันตภาพรังสี จะลดลงอย่างต่อเนื่องและลดลงประมาณ 1% ในทุกๆ วัน [6] การลดลงของค่ากัมมันตภาพรังสีนี้ส่งผลให้ระยะเวลาที่แหล่งรังสีหยุดอยู่ในตำแหน่งต่างๆ นานขึ้น ดังนั้น แหล่งรังสีมีอายุการใช้งานนานขึ้น ค่ากัมมันตภาพรังสีลดลง ระยะเวลาการรักษาทั้งหมดต่อผู้ป่วยหนึ่งรายก็จะยาวนานขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องมีการเปลี่ยนแหล่งรังสีใหม่ทุกๆ 3-4 เดือน [7]

การวิจัยดำเนินงาน (Operations Research: OR) [8, 9] เป็นสาขาวิชาที่ประยุกต์ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ สถิติ และแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนในระบบต่างๆ โดยมีเป้าหมายเพื่อช่วยในการตัดสินใจและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีที่สุด OR ได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ เทคนิคที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายได้แก่ กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) ใช้สำหรับปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่ค่าต่างๆ มีความแน่นอน เพื่อหาค่าสูงสุด (เช่น กำไร) หรือค่าต่ำสุด (เช่น ต้นทุน) ทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory) ใช้วิเคราะห์สถานการณ์การรอคอยที่มีความไม่แน่นอน เพื่อหาจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างต้นทุนการให้บริการและต้นทุนการรอคอยการจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นเครื่องมือสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนสูงและความไม่แน่นอน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบและประเมินทางเลือกต่างๆ ผ่านการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ สำหรับการประยุกต์ใช้ภาคสาธารณสุขและการบริการในการจัดสรรทรัพยากรที่มีจำกัด ทำให้การจัดการคิวผู้ป่วยเพื่อลดระยะเวลาการรอคอย และการวางแผนการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด [10-12]

แบบจำลองการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Model) เช่น กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) ซึ่งเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด เช่น จำนวนผู้ป่วยสูงสุด ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ที่มีอยู่ เช่น เวลาทำการของคลินิก, จำนวนบุคลากร [9-12] การศึกษานี้ได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองในการจัดตารางนัดผู้ป่วยรังสีรักษาระยะใกล้ เพื่อให้สามารถรองรับผู้ป่วยได้จำนวนมากที่สุดตลอดอายุการใช้งานของแหล่งรังสี

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อหาจำนวนผู้ป่วยมะเร็งในโพรงสูงที่สุดที่สามารถมารับบริการได้ในแต่ละวันตลอดอายุการใช้งานของแหล่งรังสีภายใต้ข้อกำหนดการให้บริการ
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดคิวใส่แร่ผู้ป่วยมะเร็งในโพรง โดยอิงจากค่ากัมมันตภาพรังสีของ Ir-192 ที่ลดลงตามเวลาและประเภทของอุปกรณ์

วิธีการดำเนินการศึกษา

ระเบียบวิธีวิจัย

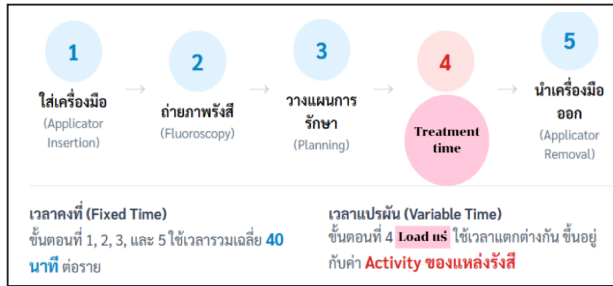
การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์ย้อนหลัง (Retrospective analytical study)

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ผู้ป่วยมะเร็งในโพรงที่เข้ารับการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้เทคนิค 2 มิติด้วยแหล่งรังสี Ir-192 ณ โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี ตั้งแต่วันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2567 ถึง 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2568

ผู้ป่วยในการศึกษานี้มี 2 กลุ่มตามประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรักษา คือ ผู้ป่วยที่ใช้ชุดอุปกรณ์มาตรฐาน Fletcher Williamson (A) และผู้ป่วยที่ใช้ชุดอุปกรณ์ Vaginal Cylinder (B) [1-4]

ขั้นตอนการรักษา 1. เริ่มจากการใส่เครื่องมือ, 2. ถ่ายภาพรังสี, 3.วางแผนการรักษา, 4. การรักษาโดยการโหลดแร่ และ 5. นำเครื่องมือออกให้เวลาคงที่ (Fixed Time) ของการใส่เครื่องมือ, การทำภาพด้วย Fluoroscopy, การวางแผนการรักษา และการนำเครื่องมือออก ใช้เวลารวมกันโดยเฉลี่ยประมาณ 40 นาทีต่อราย และระยะเวลาแปรผัน (Variable/Dwell Time) การให้แร่รังสี เป็นขั้นตอนที่ระยะเวลาขึ้นอยู่กับค่ากัมมันตภาพรังสีและประเภทของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ (Brachytherapy)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1. โปรแกรม Microsoft Excel เวอร์ชัน 2021^[13] เป็นเครื่องมือที่ใช้จัดเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดด้วยหลัก Optimization model
2. โปรแกรม Navicat^[14] เป็นเครื่องมือสำหรับจัดการฐานข้อมูล (Database Management Tool)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ขั้นตอนเก็บข้อมูล

เก็บข้อมูลย้อนหลังจากกลุ่มงานดิจิทัลด้านการแพทย์โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี ผู้ให้บริการ (แพทย์, พยาบาล, นักรังสีการแพทย์) ได้บันทึกข้อมูลผ่านระบบ Hospital Information System (HIS) ของโรงพยาบาล จัดทำรายงานจากระบบโดยดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Navicat^[12] โดยมีเงื่อนไขผู้ป่วยที่มารับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้หรือ การใส่แร่ ตั้งแต่วันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2567 ถึง 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 โดยไม่ระบุตัวตนของผู้ป่วยซึ่งขอข้อมูลผ่านการรองรับจากคณะกรรมการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการความรู้ โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ข้อมูลเวลาเข้าใส่เครื่องมือ, การถ่ายภาพทางรังสี, การวางแผนการรักษา, ห้องรักษาหรือการโหลดแร่รังสี และการนำอุปกรณ์ออก และ ค่ากัมมันตภาพรังสี ณ เวลาที่รักษานั้นๆ แล้ว นำข้อมูลออกมาในรูปแบบของ Microsoft Excel ซึ่งข้อมูลที่ได้จากระบบ HIS ของโรงพยาบาลมีความเที่ยงตรง และสะดวกต่อการบันทึกและเก็บข้อมูล

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในโปรแกรม Microsoft Excel เวอร์ชัน 2021 กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) NA,d คือ จำนวนผู้ป่วยที่ใช้อุปกรณ์ Type A ณ วันที่ d ใดๆ และ NB,d คือจำนวนผู้ป่วยที่ใช้อุปกรณ์ Type B ณ วันที่ d ใดๆ กำหนดฟังก์ชันเป้าหมายจำนวนผู้ป่วยสูงสุดในแต่ละวัน (Objective Function) คือ จำนวนสูงสุดของ

($NA,d + NB,d$) และกำหนดข้อจำกัด (Constraints) นับเวลาปฏิบัติงานเวลารวมทั้งหมดต้องไม่เกิน 420 นาที หรือ 7 ชั่วโมง (นับเวลาปฏิบัติงานตั้งแต่ 08.30 น. ถึง 16.30 น. ไม่รวมพักกลางวัน 60 นาที) กำหนดให้ระยะเวลาในการรักษาครั้งที่สองขั้นตอน 1,2,3,5 เฉลี่ยคือ 40 นาที มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.91 ซึ่งได้จากข้อมูลของระยะเวลาการรักษาเฉลี่ยของผู้ป่วยในการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ในส่วนการใส่เครื่องมือ, ถ่ายภาพทางรังสี, วางแผนการรักษา และการนำเครื่องมือออก ของโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีตั้งแต่วันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2567 ถึง 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 ซึ่งจะแปลงเป็นสูตรในการวิเคราะห์ $((NA,d + NB,d) * 40) + (NA,d * DwellTime_A(d)) + (NB,d * DwellTime_B(d)) \leq 420$ โดย $DwellTime_A$ คือ ระยะเวลาในการรักษาโหลดแร่เฉลี่ย ณ วันหนึ่งๆ ของอุปกรณ์ A และ $DwellTime_B$ คือ ระยะเวลาในการรักษาโหลดแร่เฉลี่ย ณ วันหนึ่งๆ ของอุปกรณ์ B เนื่องจากข้อมูลพบว่า จำนวนผู้ป่วย อุปกรณ์ A > B ประมาณ 1.8 - 2.3 เท่า ในหนึ่งรอบของการใช้แหล่งกำเนิดรังสีประมาณ 120 วัน คิดเป็น 80 วันทำการ มีผู้ป่วยรับการรักษาด้วยอุปกรณ์ A 374 ราย คิดเป็น 4,675 ราย ต่อวัน และมีผู้ป่วยรับการรักษาด้วยอุปกรณ์ B 141 ราย คิดเป็น 1,7625 ราย ต่อวัน เพื่อให้ครอบคลุมการรองรับผู้ป่วยทั้งหมด ได้กำหนดจำนวนผู้ป่วยขั้นต่ำในแต่ละวัน จะได้ผู้ป่วยที่ใช้อุปกรณ์ $A \geq 5$ ราย และผู้ป่วยที่ใช้อุปกรณ์ $B \geq 2$, ($N_{A,d} \geq 5$ และ $N_{B,d} \geq 2$ และวิเคราะห์ข้อมูลในในรอบของแหล่งกำเนิดรังสี Ir-192 เพื่อหาจำนวนผู้ป่วยสูงสุดที่รองรับได้ต่อวันภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดด้วยฟังก์ชัน Solving ของโปรแกรม Microsoft Excel เวอร์ชัน 2021

3. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ซึ่งใช้เพื่ออธิบายลักษณะของข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง

3.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Regression Analysis) เพื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่ากัมมันตรังสี และจำนวนผู้ป่วยสูงสุดที่รองรับได้

ผลการศึกษา

พบจำนวนผู้ป่วยมะเร็งนรีเวชที่เข้ามารับบริการรักษาด้วยการรังสีระยะใกล้ ณ โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี ตั้งแต่ 27 พฤษภาคม 2567 ถึง 29 พฤษภาคม 2568 จำนวนทั้งสิ้น 1,433 ราย คิดเป็นวันทำการ 239 วัน โดยรอบแรกของแหล่งกำเนิดรังสีจำนวนผู้ป่วยมารับบริการ 515 ราย คิดเป็นวันทำการ 84 วัน รอบที่สองของแหล่งกำเนิดรังสี จำนวนผู้ป่วย 423 ราย คิดเป็นวันทำการ 80 วัน และรอบที่สามของแหล่ง

กำเนิดรังสี จำนวนผู้ป่วย 495 ราย คิดเป็นวันทำการ 75 วัน จากผลวิเคราะห์จำนวนผู้ป่วยสูงสุดที่สามารถรองรับได้ต่อวัน คือ 9 ราย และจำนวนผู้ป่วยต่อวันเฉลี่ยจำนวน 8 ราย มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.5 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนผู้ป่วยที่สามารถรองรับได้ต่อวัน

รอบของ แหล่งกำเนิดรังสี	จำนวนวัน ทำการ	ผู้ป่วย เฉลี่ยต่อ วัน	ผู้ป่วย ต่ำสุดต่อ วัน	ผู้ป่วยสูงสุด ต่อวัน
1	84	7.86	7	9
2	80	8.11	7	9
3	75	8.15	7	9
รวม	239	8.04	7	9
SD		0.5		

SD = Standard deviation

จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 รอบของอายุแหล่งกำเนิด Ir-192 พบว่าจำนวนผู้ป่วยที่สามารถรองรับได้ เมื่ออายุของแหล่งกำเนิด 1-10 วัน สามารถรองรับผู้ป่วยได้สูงสุด 9 รายต่อวัน อายุของแหล่งกำเนิด 11-82 วัน สามารถรองรับผู้ป่วยได้ลดลงสูงสุด 8 รายต่อวันและ อายุของแหล่งกำเนิดตั้งแต่ 83 วันสามารถรองรับผู้ป่วยได้ลดลงสูงสุด 7 รายต่อวัน แสดงดังรูปที่ 1

จำนวนสูงสุดที่รองรับได้ 9 ราย จำแนกเป็นอุปกรณ์ A จำนวน 5 ราย และ B จำนวน 4 ราย จำนวนสูงสุดที่รองรับได้ 8 ราย จำแนกเป็นอุปกรณ์ A จำนวน 5 ราย และ B จำนวน 3 ราย และจำนวนสูงสุดที่รองรับได้ 7 ราย จำแนกเป็นอุปกรณ์ A จำนวน 5 ราย และ B จำนวน 2 ราย ตามลำดับ

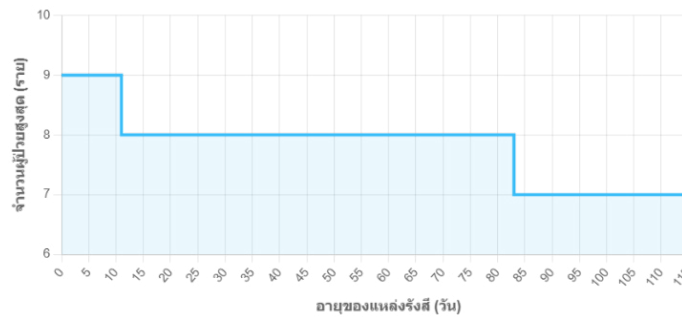
จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Regression Analysis) พบว่าที่ค่ากัมมันตภาพรังสีที่ 9.10 คูรี (Ci) มีความสามารถในการรองรับผู้ป่วยได้ลดลง 1 ราย และค่ากัมมันตภาพรังสีที่ 4.59 คูรี (Ci) มีความสามารถในการรองรับผู้ป่วยได้ลดลง อีก 1 ราย ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2

สามารถคำนวณหาค่า Dwell Time ของแต่ละอุปกรณ์ได้จากสมการดังนี้

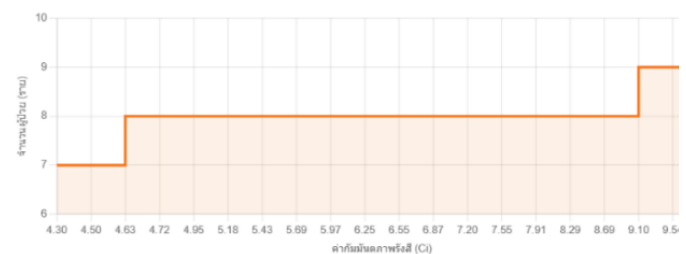
$$\text{DwellTime}_A = 65.15 * (\text{Activity})^{-1.008}$$

$$\text{DwellTime}_B = 49.21 * (\text{Activity})^{-1.115}$$

Activity คือ ค่ากัมมันตภาพรังสี ณ วันนั้นๆ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ป่วยกับอายุของแหล่งกำเนิด Ir-192



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากัมมันตภาพรังสีกับจำนวนผู้ป่วยที่รองรับได้

อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่าจำนวนผู้ป่วยสูงสุดที่รองรับได้คือ 9 ราย และจะลดลงเหลือ 8 ราย ในวันที่ 11 ของอายุแร่แหล่งกำเนิด และจะลดลงเหลือ 7 ราย ในวันที่ 82 ของอายุแร่แหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นจำนวนผู้ป่วยอย่างน้อยที่สุดที่รองรับได้ในเงื่อนไขที่กำหนด จากข้อมูลการวิเคราะห์ความสามารถในการรองรับผู้ป่วยสูงสุดต่อวัน ทั้ง 3 รอบของอายุแหล่งกำเนิด ตั้งแต่ 27 พฤษภาคม 2567 ถึง 29 พฤษภาคม 2568 คิดเป็นจำนวนวันทำการ 239 วัน จะสามารถรองรับผู้ป่วยได้เพิ่มขึ้น สูงสุด 1,867 รายต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.29

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของจำนวนผู้ป่วยและระยะเวลาของอายุแร่ Ir-192 อาจไม่ได้ไปถึงการลดลงของผู้ป่วยที่แท้จริงเนื่องจากกัมมันตภาพรังสีมีค่าเริ่มต้นที่ไม่เท่ากันในแต่ละรอบของแหล่งกำเนิด อันเป็นผลจากการขนส่ง ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีของแร่ที่ได้รับ จึงได้หาค่าความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล พบว่าที่ค่ากัมมันตภาพรังสีที่ 9.10 คูรี (Ci) มีความสามารถในการรองรับผู้ป่วยได้ลดลง 1 ราย และค่ากัมมันตภาพรังสีที่ 4.59 คูรี (Ci) มีความสามารถในการรองรับผู้ป่วยได้ลดลง อีก 1 ราย ตามลำดับ จึงสามารถใช้เป็นค่าที่บอกได้แม่นยำที่สุด และสามารถคำนวณหาค่า Dwell Time ของแต่ละอุปกรณ์ได้จากสมการดังนี้

$$\text{DwellTime_A} = 65.15 * (\text{Activity})^{\{-1.008\}}$$

$$\text{DwellTime_B} = 49.21 * (\text{Activity})^{\{-1.115\}}$$

Activity คือ ค่ากัมมันตภาพรังสี ณ วันนั้นๆ

สำหรับตัวอย่างแนวทางในการนัดผู้ป่วยจากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3

มิถุนายน 2568

จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
						1 (หยุด)
2 (หยุด)	3 (หยุด)	4 (9)	5 (9)	6 (9)	7 (หยุด)	8 (หยุด)
9 (9)	10 (8)	11 (8)	12 (8)	13 (8)	14 (หยุด)	15 (หยุด)
16 (8)	17 (8)	18 (8)	19 (8)	20 (8)	21 (หยุด)	22 (หยุด)
23 (8)	24 (8)	25 (8)	26 (8)	27 (8)	28 (หยุด)	29 (หยุด)
30 (8)						

กรกฎาคม 2568

จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
	1 (8)	2 (8)	3 (8)	4 (8)	5 (หยุด)	6 (หยุด)
7 (8)	8 (8)	9 (8)	10 (หยุด)	11 (8)	12 (หยุด)	13 (หยุด)
14 (8)	15 (8)	16 (8)	17 (8)	18 (8)	19 (หยุด)	20 (หยุด)
21 (8)	22 (8)	23 (8)	24 (8)	25 (8)	26 (หยุด)	27 (หยุด)
28 (หยุด)	29 (8)	30 (8)	31 (8)			

สิงหาคม 2568

จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
				1 (8)	2 (หยุด)	3 (หยุด)
4 (8)	5 (8)	6 (8)	7 (8)	8 (8)	9 (หยุด)	10 (หยุด)
11 (หยุด)	12 (หยุด)	13 (8)	14 (8)	15 (8)	16 (หยุด)	17 (หยุด)
18 (8)	19 (8)	20 (8)	21 (7)	22 (7)	23 (หยุด)	24 (หยุด)
25 (7)	26 (7)	27 (7)	28 (7)	29 (7)	30 (หยุด)	31 (หยุด)

กันยายน 2568

จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
1 (7)	2 (7)	3 (7)	4 (7)	5 (7)	6 (หยุด)	7 (หยุด)
8 (7)	9 (7)	10 (7)	11 (7)	12 (7)	13 (หยุด)	14 (หยุด)
15 (7)	16 (7)	17 (7)	18 (7)	19 (7)	20 (หยุด)	21 (หยุด)
22 (7)	23 (7)	24 (7)	25 (7)	26 (7)	27	28
29	30					

รูปที่ 4 ตัวอย่างการนัดผู้ป่วยมะเร็งรังสีเวชเข้ารับการรักษในแต่ละวัน ในเดือนมิถุนายน ถึง กันยายน พ.ศ. 2568

เมื่อปรับเวลาคำนวณ Optimization model ในส่วนค่าคงที่ (Fixed Time) ของการใส่เครื่องมือ, การทำภาพด้วย Fluoroscopy, การวางแผนการรักษา และการนำเครื่องมือออก ใช้เวลารวมกันโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาทีต่อราย พบว่าสามารถรองรับผู้ป่วยได้สูงสุดต่อวันที่ 11 ราย เป็นอุปกรณ์ A 6 ราย อุปกรณ์ B 5 ราย และจะลดลงในวันที่ 11 ของอายุแหล่งกำเนิด เหลือ 10 รายต่อวัน และลดลงเหลือ 9 รายต่อวัน ในวันที่ 46 ของอายุแหล่งกำเนิด และจะลดลงเหลือ 8 รายต่อวัน ในวันที่ 69 ของอายุแหล่งกำเนิด พบว่า จะสามารถรองรับผู้ป่วยได้มากขึ้นจากการใช้เวลาเฉลี่ย 40 นาที คิดเป็นจำนวนวันทำการ 239 วัน จะสามารถรองรับผู้ป่วยได้เพิ่มขึ้นจาก 1,867 เป็น 2,260 รายต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 หรือคิดเป็นร้อยละ 50.7 จากจำนวนผู้ป่วยจริง และหากปรับเวลาค่าคงที่เพิ่มขึ้นเป็น 50 นาที พบว่าการรองรับผู้ป่วยลดลงเหลือเพียง 7 รายต่อวัน เป็นอุปกรณ์ A 5 ราย อุปกรณ์ B 2 ราย และจะลดลงเหลือ 6 ราย ในวันที่ 83 ของอายุแหล่งกำเนิด และเมื่อปรับเวลาค่าคงที่ เป็น 35 นาที และ 45 นาที พบว่ารองรับผู้ป่วยเพิ่มขึ้นและลดลง 1 ราย ใน 10 วันแรกของอายุแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นไปตามผลของการศึกษานี้

การศึกษานี้มีข้อจำกัด ประการแรกเนื่องจากแบบจำลองได้คำนวณจาก ระยะเวลาการรักษาเฉลี่ยในแต่ละรายแยกอุปกรณ์ ยังไม่ได้พิจารณาถึงความซับซ้อนที่แตกต่างกันของผู้ป่วยแต่ละราย [15] ซึ่งบางกรณีใช้เวลาในการรักษาขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าปกติประการที่สองแบบจำลองตั้งอยู่บนข้อสมมติของเวลาปฏิบัติงานที่คงที่ ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น เหตุฉุกเฉิน และความซับซ้อนของแต่ละรายที่มีความแตกต่างกัน หรือการซ่อมบำรุงเครื่องมือ [16-17] สำหรับการจัดการกรณีเหตุฉุกเฉินผู้ป่วยมะเร็งรังสีเวชในโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี อาทิการรักษาเพื่อหยุดภาวะเลือดออกที่ต้องรักษาเร่งด่วนด้วยการใส่แร่ ซึ่งจะต้องเผื่อเวลาการทำงานในกรณีดังกล่าว 10-15 % ของ เวลาทั้งหมด คือ 45-50 นาที อาจทำให้วันนั้นๆ เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้น โดยไม่ลดจำนวนผู้ป่วยลง ประการที่สามการศึกษานี้มีขั้นตอนการทำงานที่ใช้การวางแผนแบบ 2 มิติ (2D) อย่างไรก็ตามแนวโน้มปัจจุบันได้มีการพัฒนางานแผนแบบ 3 มิติ (3D) หรือ Image Guide Brachytherapy (IGBT) [18] มีการใช้เวลามากกว่าในส่วนของการขั้นตอนทำภาพ ขั้นตอน วาดภาพ หรือ contouring และขั้นตอนการวางแผนที่ซับซ้อนมากกว่า จึงต้องมีการคำนวณและวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป

แหล่งกำเนิดรังสีระยะใกล้ที่ใช้สำหรับผู้ป่วยมะเร็งรังสีเวชในปัจจุบันด้วยการให้รังสีแบบอัตราสูง (High-Dose-Rate: HDR) ได้แก่ อิริเดียม 192 (Ir-192) และโคบอลต์ 60 (Co-60) แหล่งกำเนิดรังสี Co-60 มีความแตกต่างทางคุณสมบัติทางรังสีคือ

มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 5.3 ปี [19] เป็นผลทำให้รอบของการเปลี่ยนเม็ดแร่ยาวนานกว่า Ir-192 ซึ่ง แหล่งกำเนิด Ir-192 จะต้องเปลี่ยนรอบบ่อยกว่า Co-60 แต่เมื่อหากค่ากัมมันตภาพรังสีที่เท่ากันของทั้งสอง จะมีระยะเวลาในการรักษาใกล้เคียงกัน [20] อย่างไรก็ตามพลวัตของแหล่งกำเนิดรังสี Co-60 ช่วงท้ายก่อนการเปลี่ยนเม็ดแร่ dwell time จะมีระยะเวลานาน ซึ่งคาดการณ์เวลาประมาณมากกว่า 3 เดือน ทำให้การรองรับผู้ป่วยช่วงท้ายได้จำนวนจำกัดเป็นเวลานาน ซึ่งจากการศึกษานี้คำนวณแหล่งกำเนิด Ir-192 ด้วยเทคนิค 2 มิติ ช่วงเวลาท้ายของแหล่งกำเนิดประมาณ 38-40 วัน การเลือกใช้แหล่งกำเนิดชนิดใดอาจขึ้นกับจำนวนผู้ป่วย การรองรับการรักษา สถานพยาบาล ซึ่งจะต้องมีการศึกษาการวิเคราะห์เพิ่มเติมในอีกบริบทหนึ่งและจากการศึกษาจะเห็นได้ความสามารถในการรองรับผู้ป่วยมะเร็งเนื้องอกที่เข้ามารับการรักษาในโรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีด้วยการใส่แร่มีความเพียงพอต่อจำนวนผู้ป่วยและสามารถเพิ่มการรองรับจำนวนที่เพิ่มขึ้นได้จากข้อมูลการศึกษา หากจำนวนผู้ป่วยมากขึ้นเกินข้อจำกัดอาจพิจารณาเพิ่มการรองรับผู้ป่วย เช่น การเพิ่มเครื่องแหล่งกำเนิดในการรักษา เป็นต้น

ผู้วิจัยหวังว่าการศึกษานี้อาจเป็นแบบและนำไปต่อยอดการศึกษาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรองรับผู้ป่วย และบริหารจัดการทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์แบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Model) ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดจำนวนผู้ป่วยผู้ป่วยมะเร็งเนื้องอกสูงสุดที่สามารถให้บริการรังสีรักษาระยะใกล้ โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี Ir-192 ในแต่ละวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอิงตามค่ากัมมันตภาพรังสีของแหล่งกำเนิดที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ข้อกำหนดการให้บริการ แบบจำลองนี้สามารถช่วยให้โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานีและสถาบันอื่น ๆ ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดคิวผู้ป่วย บริหารจัดการทรัพยากรได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มงานดิจิทัลการแพทย์ หน่วยวิจัยการแพทย์ กลุ่มงานรังสีรักษา โรงพยาบาลมะเร็งอุดรธานี ด้วยการสนับสนุนการเรียนและการศึกษาวิจัยครั้งนี้ของข้าพเจ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bhatla N, Aoki D, Sharma DN, Sankaranarayanan R. Cancer of the cervix uteri. Int J Gynecol Obstet. 2018;143:22–36.
- [2] Oaknin A., T. J. Bosse, C. L. Creutzberg et al, Endometrial cancer, ESMO Guidelines Committee, Ann Oncol. 2022;33(9):860-877
- [3] Pötter R, Haie-Meder C, Van Limbergen E, et al. Recommendations from Gynaecological (GYN) GEC ESTRO Working Group (I): concepts and terms in 3D image-based treatment planning in cervix cancer brachytherapy-3D dose volume parameters and aspects of 3D image-based anatomy, radiation physics, radiobiology. Radiother Oncol. 2005;74(3): 251-60.
- [4] Nag S, Erickson B, Thomadsen B, Orton C, Demanes JD, Petereit D. The American Brachytherapy Society recommendations for high-dose-rate brachytherapy for carcinoma of the endometrium. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2000;48(3):779-90.
- [5] Libby B, Eifel P, Tanderup K, et al. Iridium-192. In: Thomadsen B, Rivard M, Butler W, eds. Brachytherapy Physics. 3rd ed. Madison, WI: Medical Physics Publishing; 2012: 245-268.
- [6] Rao CA, Singh Y, Kumar A, et al. Effect of Iridium-192 (Ir 192) HDR brachytherapy source decay during the treatment time in gynecological intracavitary brachytherapy treatment. J Chalmers Anand Rao Inst Med Sci. 2019;18(2):1-7.
- [7] Lancellotta V, Kovacs G, Tagliaferri L, et al. A cost-comparison analysis of adjuvant vaginal brachytherapy with electronic brachytherapy versus high-dose-rate 192Ir for endometrial cancer. J Contemp Brachytherapy. 2024;16(1):45-52.
- [8] Strohmaier S, Zwierzchowski G. Co-60 versus Ir-192 in HDR brachytherapy: Scientific and technological comparison. Rev Fis Med. 2012;13(2):125-30.
- [9] Green LV. Using operations research to reduce delays for healthcare. Tutorials in Operations Research. 2005;15:1-25.

- [10]ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, "การวิจัยดำเนินงาน (Operations Research), "เข้าถึงได้จาก: <https://mathematics.sc.mahidol.ac.th/th/research-th/operations-research/>.
- [11] Hillier FS, Lieberman GJ. Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Education; 2015.
- [12]Gupta D, Denton B. Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities. IIE Transactions. 2008;40(9):800-19.
- [13]Microsoft Corporation. (2021). Microsoft Excel 2021.
- [14]PremiumSoft CyberTech Ltd. (2025). Navicat Premium [Computer software]. Retrieved from <https://navicat.com>
- [15]Chen Z, King W, Pearcey R, Kerba M, Mackillop WJ. The relationship between waiting time for radiotherapy and clinical outcomes: a systematic review of the literature. Radiother Oncol. 2008;87(1):3-16.
- [16] Fountzilas E, et al. Workflow analysis and optimization in brachytherapy: a motion and time study. Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2019;20(9):105-112.
- [17]Sturdza A, Pötter R, Fokter D, Dvornik N, et al. Image guided brachytherapy in locally advanced cervical cancer: an update. Brachytherapy. 2016;15(5):625-35.
- [18]Madan R, Pathy S, Subramani V, et al. Comparative evaluation of 2-dimensional radiography and 3-dimensional computed tomography based dosimetry of high-dose-rate intracavitary brachytherapy in cervical cancer. Asian Pac J Cancer Prev. 2014;15(11):4717-21.
- [19]Stefan S., Comparison of 60Co and 192Ir sources in HDR brachytherapy, J Contemp Brachytherapy. 2011 Dec 30;3(4):199–208.
- [20]Park DW, Kim YS, Park SH, et al. A comparison of dose distributions of HDR intracavitary brachytherapy using different sources and treatment planning systems. Appl Radiat Isot. 2009;67:1426–1431. doi: 10.1016/j.apradiso.2009.02.066.