

ตัวทำนายความล้มเหลวการทำประกันคุณภาพก่อนฉายรังสี
ในผู้ป่วยที่วางแผนการรักษาด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน
Identifying predictive parameters for failure of DQA in patient
using helical tomotherapy planning

วรรณวิษา บำรุงักดี¹, ชวลิต หลักดี¹

¹หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก

ผู้นิพนธ์ประสานงาน

วรรณวิษา บำรุงักดี

หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก

90 ถนนศรีธรรมไตรปิฎก ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

E-mail: kureekureekuree@gmail.com

Wanwisa Bumrungpagdee¹, Chawalit Lakdee¹

¹Radiotherapy Unit, Department of Radiology, Buddhachinaraj Phitsanulok Hospital

Corresponding author

Wanwisa Bumrungpagdee

Radiotherapy Unit, Department of Radiology, Buddhachinaraj Phitsanulok Hospital

90 Srithamtripidok Road, Nai Mueang, Mueang Phitsanulok District, Phitsanulok 65000

E-mail: kureekureekuree@gmail.com

Submitted: Apr 22, 2025

Revised: Jul 12, 2025

Accepted: Aug 15, 2025

บทคัดย่อ

หลักการและเหตุผล: การฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน ต้องประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษา ในกรณีที่ไม่สามารถทำได้ เช่น ผู้ป่วยที่ต้องฉายรังสีเพื่อหยุดการไหลของเลือด ผู้ป่วยที่ต้องฉายรังสีเพื่อบรรเทาอาการปวด และผู้ป่วยที่ต้องฉายรังสีตามระยะเวลาที่กำหนดที่ไม่สามารถรอทำประกันคุณภาพก่อนฉายได้ ซึ่งต้องวางแผนการรักษาแล้วฉายรังสีทันที

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาตัวทำนายที่ทำให้การประกันคุณภาพก่อนฉายรังสีล้มเหลว และสร้างแบบจำลองการประกันคุณภาพก่อนฉายรังสี

วัสดุและวิธีการ: เก็บข้อมูลย้อนหลังจากแผนการรักษาที่ถูกเก็บไว้ในโปรแกรม Accuray Precision ได้แก่ treatment sites: head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis, fraction dose, target volume, field width: 1 cm, 2.5 cm, 5 cm, pitch, modulation factor (planned and actual), gantry rotations, gantry period, beam on time, couch travel, couch speed, fraction MUs, leaf open time(max), leaf open time(min), leaf open time(mean), leaf open time(mode) และ leaf open time(std) ภายในหน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก ตั้งแต่ มกราคม 2563 ถึง ธันวาคม 2566 วิเคราะห์ตัวแปรทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวด้วย odds ratio, OR จาก logistic regression analysis ผ่านวิธี stepwise backward selection

ผลการศึกษา: ตัวทำนายที่เพิ่มโอกาสให้การทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลว จนเป็นเหตุให้ต้องทำการวางแผนการรักษาใหม่ ได้แก่ treatment sites: pelvis (OR 2.91, 95% CI 1.52-5.57), field width 2.5 cm (OR 0.25, 95% CI 0.07-0.91), beam on time (OR 0.99, 95% CI 0.99-0.99), Couch speed (mm/sec) (OR 0.14, 95% CI 0.03-0.60), leaf open time (mode) (ms) (OR 0.99, 95% CI 0.99-1.00) และ leaf open time (std) (ms) (OR 1.02, 95% CI 1.01-1.04)

ข้อสรุป: ตัวทำนายที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการรักษา ลดความจำเป็นในการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีซ้ำ และลดระยะเวลาการคอยในกรณีที่ต้องวางแผนใหม่ โดยเฉพาะในสถานการณ์เร่งด่วนที่ไม่สามารถทำประกันคุณภาพได้ จึงเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน, การประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA), การวางแผนการรักษาด้วยเทคนิคปรับความเข้ม (IMRT), แบบจำลองการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี

Abstract

Background: Radiation therapy using helical tomotherapy requires pre-treatment delivery quality assurance (DQA) to verify treatment accuracy. However, in certain urgent situations such as patients requiring radiation to stop bleeding, those receiving radiation for pain relief, or those with a strictly scheduled treatment course where DQA cannot be performed immediate treatment planning and delivery are necessary without DQA verification.

Objective: To identify predictors associated with DQA failure and to develop a predictive model for pre-treatment DQA in helical tomotherapy.

Materials and Methods: Data were retrospectively collected from treatment plans stored in the Accuray Precision system. The data included the following parameters: treatment sites (Head and Neck, Brain, Chest, Abdomen, and Pelvis), fraction dose, target volume, field width (1 cm, 2.5 cm, 5 cm), pitch, modulation factor (planned and actual), gantry rotations, gantry period, beam-on time, couch travel, couch speed, fraction monitor units (MUs), and leaf open time parameters (maximum, minimum, mean, mode, and standard deviation). All data were obtained from the Radiation Oncology Unit, Department of Radiology, Buddhachinaraj Hospital, Phitsanulok, between January 2020 and December 2023. Predictive factors for delivery quality assurance (DQA) failure prior to treatment delivery were analyzed using odds ratios (ORs) derived from logistic regression analysis with stepwise backward selection.

Results: Predictors significantly associated with DQA failure requiring treatment re-planning included: pelvic treatment sites (OR 2.91, 95% CI 1.52-5.57), field width of 2.5 cm (OR 0.25, 95% CI 0.07-0.91), beam on time (OR 0.99, 95% CI 0.99-0.99), couch speed (mm/sec) (OR 0.14, 95% CI 0.32-0.60), leaf open time (mode) (OR 0.99, 95% CI 0.99-1.00), and leaf open time (std) (OR 1.02, 95% CI 1.01-1.04).

Conclusion: The predictors obtained from this study can be applied to improve the efficiency of treatment planning, reduce the necessity of repeating pre-treatment quality assurance, and shorten the waiting time in cases where re-planning is required, especially in urgent situations where quality assurance cannot be performed. Therefore, they serve as tools to support clinical decision making more rapidly and accurately.

Keywords: Helical tomotherapy, pre-treatment delivery quality assurance (DQA), intensity-modulated radiation therapy (IMRT) planning, predictive model for DQA

หลักการและเหตุผล

การฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (Helical Tomotherapy: HT) เป็นเทคนิคการฉายรังสีที่ผสมผสานระหว่าง การวางแผนการรักษาด้วยเทคนิคปรับความเข้มของรังสี (Intensity-Modulated Radiation Therapy: IMRT) และ ระบบการนำทางด้วยภาพจากการตรวจเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography: CT-Guided Imaging)^[1] ทำให้สามารถปรับการกระจายของปริมาณรังสีให้สอดคล้องกับรูปร่างของเป้าหมายการรักษาได้อย่างแม่นยำ เนื่องจาก Helical Tomotherapy เป็นการฉายรังสีแบบหมุนเกลียวที่มีการปรับความเข้ม ทำให้การวางแผนการรักษามีความซับซ้อนสูงกว่าเทคนิคการฉายรังสีแบบทั่วไป การประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (Pre-Treatment Delivery Quality Assurance: DQA) จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่ง เพื่อยืนยันว่าปริมาณรังสีที่ส่งออกมานั้นสอดคล้องกับแผนการรักษาที่ออกแบบไว้

การประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (Pre-Treatment Delivery Quality Assurance: DQA) มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษา ก่อนที่จะนำไปใช้กับผู้ป่วยจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคนิคที่มีความซับซ้อน เช่น IMRT (Intensity-Modulated Radiation Therapy), VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy), SBRT (Stereotactic Body Radiation Therapy) และ HT (Helical Tomotherapy)^[2-5] ขั้นตอนการทำการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ประกอบด้วย การส่งแผนการรักษาที่วางแผนไว้ไปฉายรังสีบน phantom ที่ติดตั้งหัววัด ionization chamber แสดงดังภาพที่ 1 จากนั้นจึงนำค่าปริมาณรังสีที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของระบบวางแผนการรักษา (Treatment Planning System:TPS) โดยอิงตามเกณฑ์

ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คือ %dose difference ต้องน้อยกว่า $\pm 3\%$ หากผลการประเมินล้มเหลว หมายความว่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณไว้เกินขอบเขตที่กำหนด อันดับแรกแผนการรักษาดังกล่าวจะถูกวัดซ้ำ หากวัดซ้ำแล้วยังล้มเหลว จะทำการปรับจุดของการวัดใหม่ และหากยังล้มเหลว แผนการรักษาจะถูกลบออกและวางแผนการรักษาใหม่ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการรักษาล่าช้า ผู้ป่วยต้องรอนานขึ้น และเพิ่มภาระงานให้กับนักฟิสิกส์การแพทย์

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของแผนการรักษาและผลการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี ได้แก่ pitch, field width (FW), modulation factor (MF) และ leaf open time (LOT)^[6] โดย pitch คือ อัตราการหมุนของเครื่องฉายรังสีต่อระยะการเคลื่อนที่ของเตียงผู้ป่วย ซึ่งมีผลต่อความละเอียดของการกระจายรังสี Field Width (FW) คือ ความกว้างของลำแสงที่ส่งออกมา ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาการรักษา Modulation Factor (MF) คือ ความสามารถในการปรับความเข้มของลำแสงที่แตกต่างกันตามจุดต่าง ๆ ของเป้าหมายการรักษา และ Leaf Open Time (LOT) คือ ระยะเวลาที่ MLC (Multileaf Collimator) เปิดเพื่อให้ลำแสงผ่าน ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำในการส่งรังสี จากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า pitch, FW และ MF เกี่ยวข้องกับคุณภาพของแผนการรักษาที่ฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุนและแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนการรักษากับผลของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีในการตรวจสอบการกระจายของปริมาณรังสี^[7-13] อย่างไรก็ตาม ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของการทำการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ยังไม่ได้รับการวิเคราะห์อย่างครอบคลุม ในบริบทของการฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (HT) ที่ใช้เทคนิคการวางแผนการรักษาแบบซับซ้อน

ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายความล้มเหลวของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างแม่นยำ จึงมีความสำคัญ เพราะจะช่วยลดขั้นตอนที่ซับซ้อนในกระบวนการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี ลดการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ซ้ำ ลดภาระงานของนักฟิสิกส์การแพทย์ และลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยในกรณีที่แผนการรักษาการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ล้มเหลว รวมถึงช่วยให้สามารถวางแผนการรักษาและเริ่มฉายรังสีได้เร็วขึ้นในกรณีเร่งด่วนที่ไม่สามารถทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายฉบับที่พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายผลลัพธ์ของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) โดยใช้พารามิเตอร์จากแผนการรักษา เช่น ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อพยากรณ์ผลของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีของ Helical Tomotherapy^[14] และมีการศึกษาการประยุกต์ใช้ machine learning และ knowledge-based planning เพื่อทำนายผลลัพธ์ของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ในหลายเทคนิค^[15,16] แม้ว่างานวิจัย

เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองในการช่วยคัดกรองแผนที่มีแนวโน้มล้มเหลวในการประกันคุณภาพ แต่ยังมีข้อจำกัด เช่น ไม่ครอบคลุมตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการวางแผนการรักษาสำหรับเครื่องฉายรังสีแบบ Helical Tomotherapy และยังต้องการการประเมินเพิ่มเติมในบริบทคลินิกจริง

ดังนั้นการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาปัจจัยทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีแบบจุด ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษา, ลดการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีซ้ำ, ลดภาระงานและลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยจากการวางแผนการรักษาใหม่ กรณีทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลว และสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ทดแทนการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีของการวัดปริมาณรังสีแบบจุด ในกรณีที่ไม่สามารถทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีได้ เช่นในกรณีเคสเร่งด่วนที่ต้องการทำการวางแผนการรักษา และทำการฉายรังสีเลยทันที เพื่อลดภาระงานของนักฟิสิกส์การแพทย์ และเพิ่มความรวดเร็วในการได้รับการฉายรังสีที่เร็วขึ้นของผู้ป่วย



ภาพที่ 1 การทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีแบบจุด

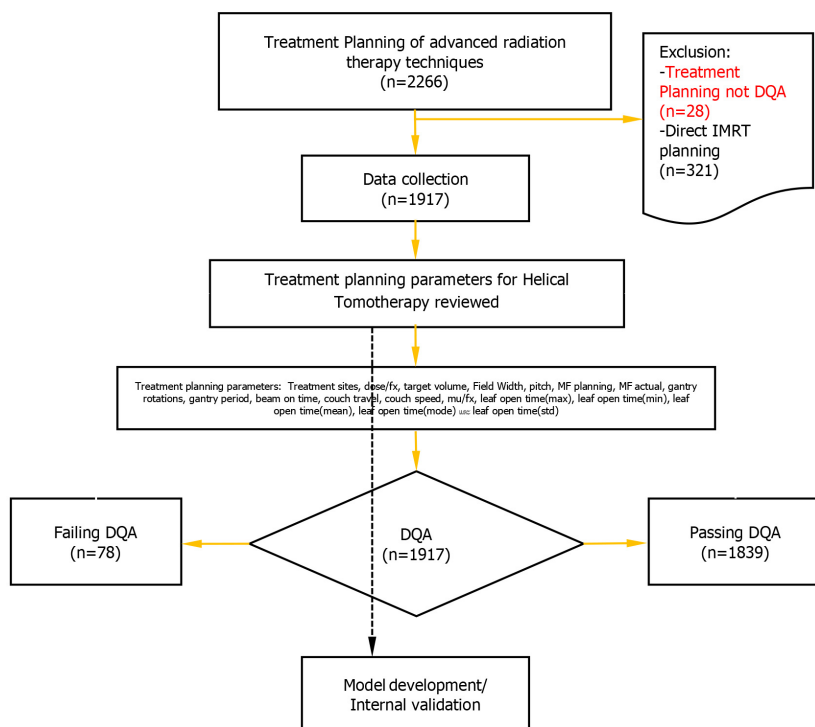
วัสดุและวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิง prognostic prediction research รูปแบบ retrospective observational cohort design ศึกษาในผู้ป่วยที่วางแผนรักษาด้วยเทคนิคปรับความเข้ม ที่ฉายด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน ที่ได้รับการฉายรังสีที่หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก ตั้งแต่ มกราคม 2563 ถึง ธันวาคม 2566 คำนวณขนาดศึกษาโดยใช้โปรแกรม Stata v17.0 ร่วมกับคำสั่ง pmsampsize สำหรับ ordinal outcome โดยอิงจากข้อมูลการศึกษา นำร่องจำนวน 30 ราย กำหนดตัวแปรทำนาย 13 ตัวแปร, ค่า C-statistic 0.8935 (ค่าที่ได้จากข้อมูลการศึกษา นำร่อง) และระดับความแม่นยำที่ต้องการ 0.05 ผลการคำนวณให้ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำเท่ากับ 334 ราย โดยในจำนวนนี้มีแผนการรักษาที่ล้มเหลวในการทำประกันคุณภาพก่อนการรักษา (DQA) จำนวน 67 ราย ซึ่งถือเป็นจำนวนขั้นต่ำที่เพียงพอสำหรับการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ โดยข้อมูลถูกรวบรวมย้อนหลังจากแผนการรักษาที่จัดเก็บในระบบ Accuray Precision โดยรวบรวมเฉพาะแผนที่ใช้การฉายรังสีแบบ Helical Tomotherapy และผ่านการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) แบบจุด โดยใช้พารามิเตอร์ทั้งหมด 13 ตัว ได้แก่ treatment sites: head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis, fraction dose, target volume, field width: 1 cm, 2.5 cm, 5 cm, pitch, MF planning (ค่าที่กำหนดโดยผู้วางแผน), MF actual (Modulation Factor), gantry rotations, gantry period, beam on time, couch travel, couch speed, Fraction MUs, leaf open time (max), leaf open time (min), leaf open time (mean), leaf

open time (mode) และ leaf open time (standard deviation:std) ผู้ป่วยที่รวมในการศึกษา คือ ผู้ที่ได้รับการวางแผนการรักษาด้วย Helical Tomotherapy และมีการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) แบบจุดอย่างครบถ้วน แผนการรักษาที่ไม่ได้ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) หรือวางแผนโดยใช้เทคนิค Direct IMRT ถูกคัดออกจากการศึกษา ในกรณีที่ผู้ป่วยคนเดียวมีหลายแผนการรักษาหรือมีการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ซ้ำ จะเลือกแผนแรกที่ผ่านมาเกณฑ์เข้าร่วมเท่านั้น จำนวนแผนที่รวมในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1.) กลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลว จำนวน 78 ราย และ 2.) กลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีผ่าน จำนวน 1,839 ราย แสดงดังภาพที่ 2

ในหน่วยงานที่ศึกษามีการทำ Pre-treatment point-dose DQA โดยใช้ Cheese Phantom (Accuray Inc.) ร่วมกับ A1SL ionization chamber วางในตำแหน่ง high dose region ที่กำหนดจากแผนการรักษา แล้วทำการวัดปริมาณรังสีจริงจากการฉายแผนการรักษาด้วยเครื่องฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (HT) เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจาก TPS (Accuray Precision) โดยใช้เกณฑ์ความเบี่ยงเบน $\pm 3\%$ หากค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนเกิน 3% ถือว่า “ล้มเหลว” ในการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) และอันดับแรกแผนการรักษาดังกล่าวจะถูกวัดซ้ำ หากวัดซ้ำแล้วยังล้มเหลว จะทำการปรับจุดของการวัดใหม่ และหากยังล้มเหลวแผนการรักษานี้จะถูกวางแผนการรักษาใหม่

การศึกษานี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก เลขที่ COA No. 069/2567



ภาพที่ 2 แผนภาพลำดับขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

สถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมคำนวณสถิติสำเร็จรูป ใช้สถิติพรรณนา (descriptive statistics) อธิบายตัวทำนายทั้งหมด สำหรับข้อมูลที่แจกแจงแบบปกติ ใช้ค่าเฉลี่ย (mean) คู่กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ทดสอบความแตกต่างด้วยสถิติ Student's t-test สำหรับข้อมูลที่แจกแจงแบบไม่ปกติ ใช้ค่ามัธยฐาน (median) คู่กับค่าพิสัยควอไทล์ (IQR) ที่ค่าต่ำสุด (minimum) และค่าสูงสุด (maximum) ทดสอบความแตกต่างด้วยสถิติ Wilcoxon rank sum test ข้อมูลตัวแปรที่แจกแจงความถี่เป็นจำนวนและร้อยละ ทดสอบ

ความแตกต่างด้วยสถิติ exact probability test และวิเคราะห์ตัวแปรทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวด้วย odds ratio, OR จาก logistic regression analysis ผ่านวิธี stepwise backward selection กำหนดนัยสำคัญทางสถิติ $p\text{-value} < 0.05$

ผลการศึกษา

จากการศึกษาแผนการรักษาที่ผ่านการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี ตั้งแต่ มกราคม 2563 ถึง ธันวาคม 2566 ได้นำเข้าสู่การศึกษาจำนวน 1,917 ราย พบว่ากลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการ

ฉายรังสีล้มเหลวและกลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีผ่าน มีลักษณะเท่าเทียมกันของ fraction dose, MF planning(ค่าที่กำหนดโดยผู้วางแผน), gantry periods (sec), couch travel (mm), leaf open time (max) (ms), leaf open time (min) (ms), leaf open time (mean) (ms) และ leaf open time (std) (ms) มี target region, target volume, field width, pitch, gantry rotations, beam on time (sec), fraction Mus และ leaf open time (mode) (ms) ที่พบว่ากลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวน้อยกว่า ส่วน MF actual และ couch speed (mm/sec) กลุ่มแผนการรักษาที่ทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ รายละเอียดดังตารางที่ 1

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปรทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวด้วย odds ratio (OR) จาก logistic regression analysis โดยใช้วิธี stepwise backward selection และกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p\text{-value} < 0.05$ พบว่ามีตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการเพิ่มโอกาสที่การทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) จะล้มเหลว ซึ่งอาจนำไปสู่ความจำเป็นในการวางแผนการรักษาใหม่ ได้แก่:

Treatment sites: Pelvis (OR 2.91, 95% CI 1.52-5.57) บริเวณเชิงกรานมักมีความหลากหลายของโครงสร้างทางกายวิภาค (anatomical variation) และขนาดเป้าหมายที่ใหญ่ (large target volume) ซึ่งอาจมีความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นเนื้อเยื่อ (heterogeneity) สูง จึงทำให้แผนการรักษามีความซับซ้อน ส่งผลต่อความแม่นยำในการส่งปริมาณรังสี และเพิ่มความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA)

Field Width 2.5 cm (OR 0.25, 95% CI 0.07-0.91) ขนาด field width ที่กว้างระดับกลาง (2.5 cm) อาจช่วยให้การส่งรังสีมีความเสถียรน้อยลงใน

ความซับซ้อน เมื่อเทียบกับขนาดเล็ก เช่น 1 cm ซึ่งมี modulation สูงกว่า

Beam on time (sec) (OR 0.99, 95% CI 0.99-0.99) ค่า beam on time ที่สั้นลงอาจบ่งบอกถึงการส่งปริมาณรังสีที่เร็วมาก ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการส่งปริมาณรังสี โดยเฉพาะในแผนการรักษาที่มีความซับซ้อนสูงหรือ modulation สูง และอาจเพิ่มโอกาสของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าคำนวณกับค่าที่วัดได้จริง

Couch speed (mm/sec) (OR 0.14, 95% CI 0.03-0.60) ความเร็วของเตียงที่ลดลงอาจสัมพันธ์กับการฉายรังสีที่แม่นยำขึ้น หากความเร็วสูงเกินไปอาจเกิดการเคลื่อนไหวที่ส่งผลต่อความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ส่งออกไป

Leaf open time (mode) (OR 0.99, 95% CI 0.99-1.00) และ Leaf open time (std) (OR 1.02, 95% CI 1.01-1.04) ตัวแปรเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวเปิดของ multileaf collimator (MLC) โดยค่าที่เบี่ยงเบนมาก (std สูง) อาจบ่งชี้ว่ามีความไม่สม่ำเสมอในการเปิด MLC ซึ่งอาจนำไปสู่ความไม่แม่นยำในการส่งลำรังสี โดยเฉพาะในแผนการรักษาที่มี modulation complexity สูง รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

นอกจากนี้ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถพยากรณ์ความล้มเหลวของการทำประกันคุณภาพของการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีพื้นที่ใต้โค้ง ROC (AUC) เท่ากับ 0.784 (78.4%) แสดงในภาพที่ 3 แสดงถึงความสามารถในการจำแนกแผนการรักษาที่มีแนวโน้มการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวออกจากแผนการรักษาที่ผ่านการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีได้ในระดับ “ดี” ทั้งนี้ ได้มีการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองด้วยการตรวจสอบภายใน (internal validation) โดยใช้วิธี bootstrapping จำนวน 1,000 ครั้ง ซึ่งให้ค่า AUC หลังการปรับความเอนเอียง (optimism-corrected AUC) เท่ากับ 0.768 แสดงถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี

Treatment planning parameters	DQA Fail (n=78)	DQA Pass (n=1,839)	p-value
	n (%)	n (%)	
Treatment sites			
Head and Neck	17 (21.8)	784 (42.6)	<0.001 ¹
Brain	11 (14.1)	122 (6.6)	
Chest	16 (20.5)	458 (24.9)	
Abdomen	2 (2.6)	23 (1.3)	
Pelvis	32 (41.0)	452 (24.6)	
Fraction dose (cGy), mean±SD	204.7±20.4	208.2±24.5	0.221 ²
Target volume, median [IQR]	1009.9 [479.1, 1378.9]	1144.5 [842.0, 1467.1]	0.008 ³
Field Width			
1 cm.	6 (7.7)	37 (2.0)	<0.001 ¹
2.5 cm.	19 (24.4)	1095 (59.5)	
5 cm.	53 (67.9)	707 (38.4)	
Pitch, mean±SD	0.3±0.1	0.4±0.1	0.011 ²
MF planning, mean±SD	2.6±0.8	2.4±0.8	0.097 ²
MF actual, mean±SD	2.0±0.5	1.9±0.4	0.019 ²
Gantry rotations, mean±SD	16.0±5.2	19.9±7.0	<0.001 ²
Gantry periods (sec), mean±SD	15.2±5.7	14.8±5.5	0.511 ²
Beam on time (sec), mean±SD	242.6±97.9	293.1±116.2	<0.001 ²
Couch travel (mm), mean±SD	209.8±84.9	223.9±63.1	0.057 ²
Couch speed (mm/sec), median [IQR]	0.9 [0.7, 1.1]	0.8 [0.6, 0.9]	0.006 ³
Fraction MUs, median [IQR]	3231.2 [2710.3, 4093.6]	3723.1 [3136.5, 5076.5]	<0.001 ³
Leaf open time (max) (ms), median [IQR]	257.8 [243.9, 328.1]	258.8 [239.0, 308.0]	0.633 ³
Leaf open time (min) (ms), mean±SD	18.0±0.2	18.5±7.5	0.610 ²
Leaf open time (mean) (ms), median [IQR]	144.8 [126.0, 172.3]	151.2 [131.5, 176.3]	0.097 ³
Leaf open time (mode) (ms), median [IQR]	242.5 [147.5, 277.5]	247.5 [232.5, 292.5]	0.041 ³
Leaf open time (std) (ms), mean±SD	74.6±34.4	76.5±30.1	0.582 ²

¹Exact probability test

²Student's t-test

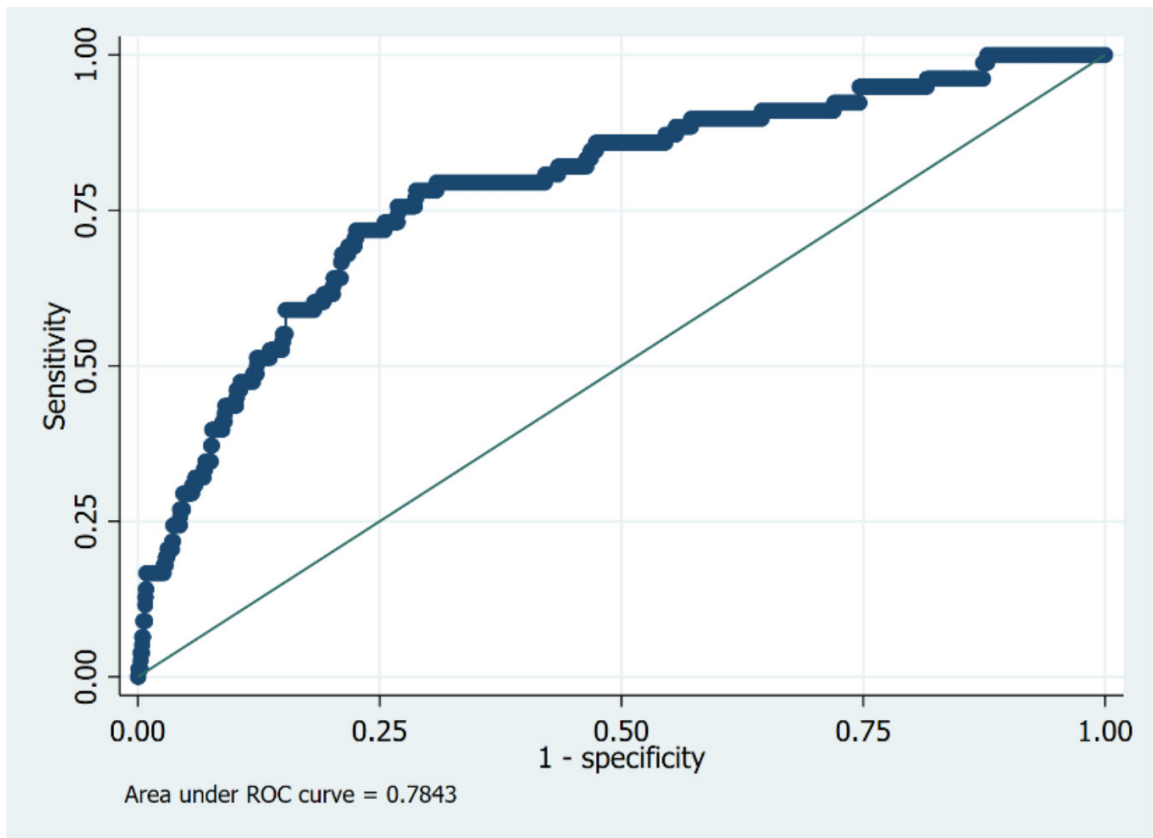
³Wilcoxon rank sum test

ตารางที่ 2 วิเคราะห์ตัวแปรทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลวด้วย Multivariable logistic regression ผ่านวิธี Stepwise Selection

Treatment planning parameters	mOR	95% CI	p-value
Treatment sites			
Head and neck	Ref.		
Brain	1.30	0.48 - 3.52	0.598
Chest	1.80	0.75 - 4.28	0.186
Abdomen	1.96	0.39 - 9.88	0.415
Pelvis	2.91	1.52 - 5.57	0.001
Field width			
1 cm.	Ref.		
2.5 cm.	0.25	0.07 - 0.91	0.036
5 cm.	1.56	0.30 - 8.10	0.595
Beam on time (sec)	0.99	0.98 - 0.99	<0.001
Couch speed (mm/sec)	0.14	0.03 - 0.60	0.008
Leaf open time (mode) (ms)	0.99	0.99 - 1.00	0.002
Leaf open time (std) (ms)	1.02	1.01 - 1.04	0.003

mOR: multivariable Odds Ratio

CI: Confidence Interval



ภาพที่ 3 แสดงพื้นที่ใต้โค้ง ROC

นำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรทำนาย การทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลว ไปสร้าง โปรแกรมคำนวณโอกาสทำนายการทำประกันคุณภาพ ก่อนการฉายรังสีล้มเหลว โดยใช้ตัวแปร treatment sites: head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis, field width: 1 cm, 2.5 cm, 5 cm, beam on time, couch speed, leaf open time (mode) และ leaf open time (std) แสดง QR Code ใช้งาน โปรแกรมทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี ดังภาพที่ 4

บทวิจารณ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองที่สามารถ ทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการ ฉายรังสี (Pre-Treatment Delivery Quality Assurance: DQA) สำหรับการฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (Helical Tomotherapy: HT) โดยการใช้ข้อมูล จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแผนการรักษา เช่น treatment sites: head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis, fraction dose, target volume, field width: 1 cm, 2.5 cm, 5 cm, pitch,



ภาพที่ 4 แสดง QR Code ใช้งานโปรแกรมทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA)

A screenshot of a web-based application titled "DQA Delivery Quality Assurance Prediction". The interface is dark-themed with yellow and white text. It includes input fields for "Treatment Sites" (set to "Wanwisa Bumrungrad, MP"), "Field Width" (set to "FW 2.5 cm"), "Beam on time (sec)" (229.8), "Couch speed (mm/sec)" (0.5), "Leaf open time (mode) (ms)" (257.5), and "Leaf open time (STD) (ms)" (80.7). A "Calculate Probability" button is present, along with a warning: "***Probability $\geq 4\%$ = Failure". The result displayed is "Probability DQA failure is: 7.60%". The footer mentions "Buddachinaraj Phitsanulok Hospital".

Parameter	Value
Treatment Sites	Wanwisa Bumrungrad, MP
Field Width	FW 2.5 cm
Beam on time (sec)	229.8
Couch speed (mm/sec)	0.5
Leaf open time (mode) (ms)	257.5
Leaf open time (STD) (ms)	80.7
Probability DQA failure	7.60%

ภาพที่ 5 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการใช้งานส่วนของ treatment sites และ field width สามารถเลือกได้จากตัวแปรที่กำหนด ส่วน beam on time, couch speed, leaf open time (mode) และ leaf open time (std) เติมตัวเลขที่ได้จากการวางแผนการรักษา และการแปลผลของโปรแกรมถ้า Probability DAQ failure มากกว่า 4% ถือว่าการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ล้มเหลว

MF planning (ค่าที่กำหนดโดยผู้วางแผน), MF actual (Modulation Factor), gantry rotations, gantry period, beam on time, couch travel, couch speed, fraction MUs, leaf open time (max), leaf open time (min), leaf open time (mean), leaf open time (mode) และ leaf open time (std) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ล้วนมีผลต่อความซับซ้อนของแผนการรักษาและความแม่นยำในการส่งปริมาณรังสี การวิเคราะห์ด้วย multivariable logistic regression โดยใช้วิธี stepwise backward selection พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความล้มเหลวของการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมี AUC เท่ากับ 0.784 และผ่านการตรวจสอบภายในด้วยวิธี bootstrapping จำนวน 1,000 ครั้ง ได้ AUC ปรับแล้วเท่ากับ 0.768 สะท้อนถึงความเสี่ยงและความแม่นยำของโมเดลพยากรณ์ นอกจากนี้ยังประเมินจุดตัดที่ระดับความเสี่ยง 4% ซึ่งให้ความไว (sensitivity) 78.2% และความจำเพาะ (specificity) 69.5% เหมาะแก่การใช้งานทางคลินิก ในสถานการณ์ที่ไม่สามารถทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ที่กล่าวถึงความสำคัญของการพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ความสำคัญของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ในการฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (HT) สำหรับการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษาก่อนที่จะนำไปใช้กับผู้ป่วยจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคนิคที่มีความซับซ้อน เช่น IMRT, VMAT, SBRT และ HT ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำสูงเพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณรังสีที่ส่งออกมานั้นสอดคล้องกับแผนการรักษาอย่างแท้จริง^[17]

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับค่า pitch ที่สูงขึ้นสามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการส่งออกรังสีได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการปรับ pitch มีผลโดยตรงต่อความละเอียดของการกระจายรังสี และ

ประสิทธิภาพในการควบคุมความเข้มของรังสี (Modulation Factor, MF)^[18] งานวิจัยที่ใช้หลักการเดียวกันนี้ในการปรับปรุงกระบวนการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) โดยการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายความล้มเหลวของ DQA ได้จากข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนการรักษา เช่น field width, pitch, และ modulation factor (MF) ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของแผนการรักษา^[19]

การประเมินและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี โดยใช้เทคนิคการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติเพื่อกำหนดช่วงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการวางแผนการรักษา และพบว่าการปรับค่า Field Width ให้เหมาะสมกับพื้นที่ฉายรังสีสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งรังสีได้อย่างมีนัยสำคัญ^[20]

ในงานวิจัยนี้ การพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น treatment sites: head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis, field width: 1 cm, 2.5 cm, 5 cm, beam on time, couch speed, leaf open time (mode) และ leaf open time (std) เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายโอกาสการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) จะล้มเหลวเป็นบทเรียนจากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เหล่านี้กับผลลัพธ์การประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) โดยการใช้โมเดลพยากรณ์การประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ Machine Learning และ Artificial Intelligence (AI) สามารถเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้พัฒนาโมเดลซึ่งสามารถทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้จากตำแหน่งของ MLC^[21]

การศึกษานี้ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) โดยการใช้โปรแกรมคำนวณสถิติสำเร็จรูปวิเคราะห์

แบบการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis) เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้ค่อนข้างแม่นยำ (พื้นที่ใต้โค้ง ROC = 0.784) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ใช้การรวมข้อมูลจากหลายแหล่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA)^[22]

การศึกษานี้ได้นำเสนอแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) โดยใช้ข้อมูลจากพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับแผนการรักษา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เน้นความสำคัญของพารามิเตอร์เหล่านี้ในการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ยังสนับสนุนแนวคิดข้างต้นโดยศึกษาพารามิเตอร์จากแผนการรักษาในระบบการฉายรังสีแบบเกลียวหมุน (HT) และพบว่า leaf open time (LOT), beam on time, field width, couch speed และตำแหน่งของเป้าหมาย (treatment sites) เป็นตัวแปรที่สามารถทำนายความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างแม่นยำ ด้วย AUC จากสมการพหุคูณสูงถึง 0.82 และพบว่าความเสี่ยงของการล้มเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ LOT ต่ำกว่า 100 ms เกิน 30% ของแผนการรักษาทั้งหมด^[14] ซึ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาใช้ในการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจในงานประกันคุณภาพรังสีรักษาได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ระบบ Accuray Precision ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์สัดส่วน LOT ที่ต่ำกว่า 100 ms ได้โดยตรง จึงเลือกใช้ค่าทางสถิติ ได้แก่ mode และ std แทน ซึ่งพบว่า LOT (std) มีนัยสำคัญในโมเดลนี้ สะท้อนว่าความแปรปรวนของการเคลื่อนที่ของ MLC อาจมีผลต่อความแม่นยำในการส่งปริมาณรังสีได้จริง

นอกจากนี้ พารามิเตอร์บางตัว เช่น pelvis target, beam on time ที่ต่ำ, Field width 2.5 cm และ couch speed ที่สูง ล้วนมีความสัมพันธ์กับโอกาสการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ล้มเหลว โดยสอดคล้องกับหลักการทางฟิสิกส์ เช่น target ที่มี anatomical variation สูงมักทำให้แผนมีความซับซ้อน และ beam on time ที่สั้นเกินไปอาจสะท้อนการส่งรังสีที่เร่งเกินไปจนเกิดความคลาดเคลื่อนในการส่งปริมาณรังสี

แม้แบบจำลองนี้จะสามารถระบุปัจจัยเสี่ยงต่อการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ล้มเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังไม่มีการติดตามผลหลังจากการปรับแผนการรักษาตามคำแนะนำของแบบจำลอง ผู้วิจัยจึงเสนอให้มีการทดสอบในอนาคตเพื่อประเมินว่าโมเดลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการบอกถึงความล้มเหลวของการประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้จริงหรือไม่ การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบย้อนหลัง อาจมีข้อจำกัดด้านการควบคุมตัวแปร และการใช้ข้อมูลจากสถาบันเดียวอาจยังไม่เพียงพอ ซึ่งอาจจำกัดการนำผลลัพธ์ไปใช้ในบริบทของศูนย์รังสีรักษาอื่นที่มีเทคนิคหรืออุปกรณ์แตกต่างกัน ควรทำการทดสอบโมเดลนี้ด้วยการทดสอบในลักษณะการศึกษาไปข้างหน้า และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากข้อมูลภายนอกในหลายสถาบัน (Multicenter External Validation)

ข้อสรุป

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากตัวแปรสำคัญ ได้แก่ treatment sites (head and neck, brain, chest, abdomen และ pelvis), field width (1 cm, 2.5 cm, 5 cm), beam-on time, couch speed, leaf open time (mode) และ leaf open time (std) สามารถใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อคัดกรองความเสี่ยงของแผนการรักษาที่มีแนวโน้มล้มเหลวในการทำประกัน

คุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ศักยภาพของแบบจำลองนี้ ช่วยลดความจำเป็นในการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ขั้นตอนที่ล้มเหลว ลดภาระงานนักฟิสิกส์การแพทย์ ลดระยะเวลา รอคอยของผู้ป่วยในการวางแผนการรักษาใหม่ เพิ่มความเร็วในการตัดสินใจ โดยเฉพาะในกรณีเร่งด่วนที่ไม่สามารถรอผลการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ได้ ใช้เป็นเครื่องมือที่สามารถบูรณาการเข้าสู่ขั้นตอนการวางแผนการรักษา โดยใช้เพื่อประเมินโอกาสการล้มเหลวในการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสี (DQA) ควบคู่กับการกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นก่อนการวางแผนการรักษา แบบจำลองนี้ได้ถูกนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมทำนายความเสี่ยงแบบออนไลน์ ซึ่งสามารถใช้งานได้ผ่านการสแกน QR code ที่แสดงไว้ในบทความ โดยสามารถใช้งานได้กับแผนการรักษาที่วางแผนด้วยระบบ Accuray Precision สำหรับวางแผนการฉายรังสีแบบ Helical Tomotherapy ของหน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก

ข้อดีของแบบจำลองนี้ คือใช้งานง่าย ใช้ตัวแปรที่สามารถดึงจากแผนการรักษาได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดเพิ่มเติม และสามารถให้คำตอบในรูปแบบโอกาสทำนายการทำประกันคุณภาพก่อนการฉายรังสีล้มเหลว (Probability DAQ failure) ได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้ ได้แก่ การพัฒนาและตรวจสอบเบื้องต้นในข้อมูลจากสถาบันเดียว อาจมีข้อจำกัดในการนำไปใช้กับศูนย์อื่นที่มีอุปกรณ์หรือรูปแบบการวางแผนการรักษาที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรมีการตรวจสอบภายนอก (external validation) แบบหลายศูนย์ (multicenter) เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองในการนำไปใช้ในบริบทที่หลากหลายต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ ศ.ดร.นพ. ชัยนัฏธร ปทุมานนท์, ดร.นพ. ธานินทร์ โลเกศกระวี, นพ. ศุภชัย ลวณะสกล, นพ. ภาคภูมิ วงษ์ยี่กุล และ นพ. ศกุนี อินเกต สำหรับการสนับสนุนและความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ตลอดการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Mackie TR, Balog J, Ruchala K, Shepard D, Aldridge S, Fitchard E, et al. Tomotherapy. Seminars in radiation oncology. 1999;9:108–17.
2. Chang KH, Ji Y, Kwak J, Kim SW, Jeong C, Cho B, et al. Clinical Implications of High Definition Multileaf Collimator (HDMLC) Dosimetric Leaf Gap (DLG) Variations. Prog Med Phys. 2016;27:111.

3. Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective. Radiat Oncol J. 2018;31;36: 1–10.
4. Chang KH, Lee S, Jung H, Choo YW, Cao YJ, Shim JB, et al. Development of a 3D optical scanner for evaluating patient-specific dose distributions. Physica Medica. 2015;31:553–9.

5. Thiyagarajan R, Nambiraj A, Sinha SN, Yadav G, Kumar A, Subramani V, et al. Analyzing the performance of ArcCHECK diode array detector for VMAT plan. *Rep Pract Oncol Radiother*. 2016;21:50–6.
6. Cao YJ, Lee S, Chang KH, Shim JB, Kim KH, Park YJ, et al. Patient performance–based plan parameter optimization for prostate cancer in tomotherapy. *Medical Dosimetry*. 2015;40:285–9.
7. Shimizu H, Sasaki K, Tachibana H, Tomita N, Makita C, Nakashima K, et al. Analysis of modulation factor to shorten the delivery time in helical tomotherapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2017;18:83–7.
8. Skórska M, Piotrowski T. Optimization of treatment planning parameters used in tomotherapy for prostate cancer patients. *Physica Medica*. 2013;29: 273–85.
9. De Kerf G, Van Gestel D, Mommaerts L, Van den Weyngaert D, Verellen D. Evaluation of the optimal combinations of modulation factor and pitch for Helical TomoTherapy plans made with TomoEdge using Pareto optimal fronts. *Radiat Oncol*. 2015;10:191.
10. Binny D, Lancaster CM, Harris S, Sylvander SR. Effects of changing modulation and pitch parameters on tomotherapy delivery quality assurance plans. *J Appl Clin Med Phys*. 2015;16: 87–105.
11. Thomas SJ, Geater AR. Implications of leaf fluence opening factors on transfer of plans between matched helical tomotherapy machines. *Biomed Phys Eng Express*. 2017;4:017001.
12. Boyd R, Jeong K, Tomé WA. Determining efficient helical IMRT modulation factor from the MLC leaf-open time distribution on precision treatment planning system. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20:64–74.
13. Binny D, Lancaster CM, Byrne M, Kairn T, V. Trapp J, Crowe SB. Tomotherapy treatment site specific planning using statistical process control. *Physica Medica*. 2018;53:32–9.
14. Chang KH, Lee YH, Park BH, et al. Statistical analysis of treatment planning parameters for prediction of delivery quality assurance failure for helical tomotherapy. *Technol Cancer Res Treat*. 2020; 19:1533033820979692.
15. Valdes G, Scheuermann R, Hung CY, Olszanski A, Bellerive M, Solberg TD. A mathematical framework for virtual IMRT QA using machine learning. *Med Phys*. 2016;43:4323–4334.
16. Lam D, Zhang X, Li H, Yang D, Schott B, Zhao T, et al. Predicting gamma passing rates for portal dosimetry–based IMRT QA using machine learning. *Med Phys*. 2019;46:4666–4675.

17. Bresciani S, Miranti A, Di Dia A, Maggio A, Bracco C, Poli M, Di Spirito D, Gabriele P, Stasi M. A pre-treatment quality assurance survey on 384 patients treated with helical intensity-modulated radiotherapy. *Radiother Oncol*. 2016;119 :60–65.
18. Westerly DC, Soisson E, Chen Q, Woch K, Schubert L, Olivera G, Mackie TR. Treatment planning to improve delivery accuracy and patient throughput in helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2009;74:1290–1297.
19. Kim J, Kay CS, Jang HS, Kang YN. Analysis of the Effect of Tomotherapy Plan Parameters on Patient-Specific Delivery Quality Assurance (DQA). *J Korean Phys Soc*. 2019;75:1043–1047.
20. Binny D, Lancaster CM, Byrne M, Kairn T, Trapp JV, Crowe SB. Tomotherapy treatment site specific planning using statistical process control. *Phys Medica*. 2018; 53:32–39.
21. Levin R, Aravkin AY, Kim M. Patient-specific Quality Assurance Failure Prediction with Deep Tabular Models. *medRxiv*. 2022 Oct 4.
22. Cavinato S, Bettinelli A, Dusi F, Fusella M, Germani A, Marturano F, Paiusco M, Pivato N, Rossato MA, Scaggion A. Prediction models as decision-support tools for virtual patient-specific quality assurance of helical tomotherapy plans. *Physics and Imaging in Radiation Oncology*. 2023;26:100435.