

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

การศึกษานี้ได้ดำเนินงานที่หน่วยรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

3.1.1 เครื่องเร่งอนุภาค

เป็นเครื่องฉายรังสีชนิดเร่งอนุภาค (Siemens รุ่น Primus 6 MV) ให้รังสีโฟตอนขนาดพลังงาน 6 ล้านโวลต์ (รูป 3.1) มีระบบจำกัดลำรังสีปฐมภูมิ (Y jaw) ประกอบด้วย Y1 jaw และ Y2 jaw ซึ่งอยู่ตรงข้ามกันโดย Y2 jaw อยู่ทางด้านข้างของกึ่งกลางลำรังสีที่ใกล้กับ electron gun ส่วนระบบจำกัดลำรังสีทุติยภูมิเป็นแบบมัลติลีฟ (X jaw) มีการเคลื่อนที่ต่างจากกับระบบจำกัดลำรังสีปฐมภูมิ ซึ่งประกอบด้วยลีฟ 2 แถว คือ X1 bank และ X2 bank



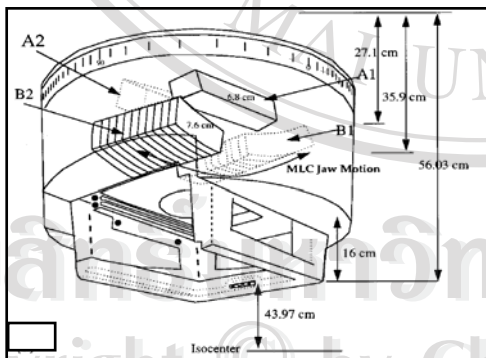
รูป 3.1 เครื่องเร่งอนุภาค (Siemens รุ่น Primus 6 MV)

3.1.2 ระบบจำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟ

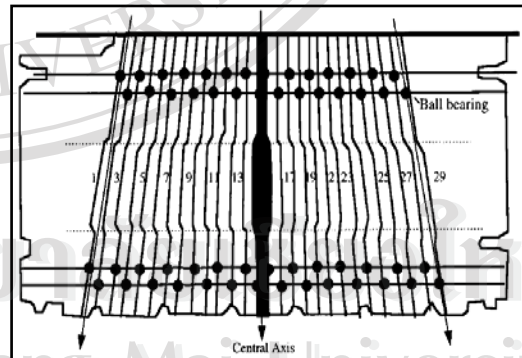
ระบบจำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟของเครื่องเร่งอนุภาค Primus, Siemens (รูป 3.2) ประกอบด้วย ลีฟ 29 คู่ คู่ที่ 1 และ 29 มีขนาด 6.5 เซนติเมตร ขณะที่คู่ที่ 2 ถึงคู่ที่ 28 มีขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ที่ระยะ 100 เซนติเมตร จากแหล่งกำเนิดรังสี ลีฟทั้ง 29 คู่ สามารถเคลื่อนที่ผ่านกึ่งกลางลำรังสีได้มากที่สุดเท่ากับ 10 เซนติเมตร และมีการออกแบบเป็น double-focused สำหรับงานวิจัยนี้ใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ เป็นอุปกรณ์ในการแปรความเข้มของการฉายรังสีแปรความเข้มด้วยเทคนิค step and shoot

3.1.3 โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาสามมิติของบริษัท Philips รุ่น Pinnacle³ version 6.2 (รูป 3.3) สำหรับวางแผนรังสีรักษาสามมิติแบบดั้งเดิม และแบบแปรความเข้ม โดยคำนวณปริมาณและการกระจายรังสีจากการจำลองฉายรังสีลงบนภาพซีทีของผู้ป่วยหรือของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ แล้วส่งผ่านข้อมูลที่ใช้ในการฉายรังสีไปยังโปรแกรมบันทึกและทวนสอบข้อมูล (LANTIS) ทางระบบเครือข่าย สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เป็นเครื่องมือศึกษาการจำลองลำรังสีและทวนสอบปริมาณรังสี

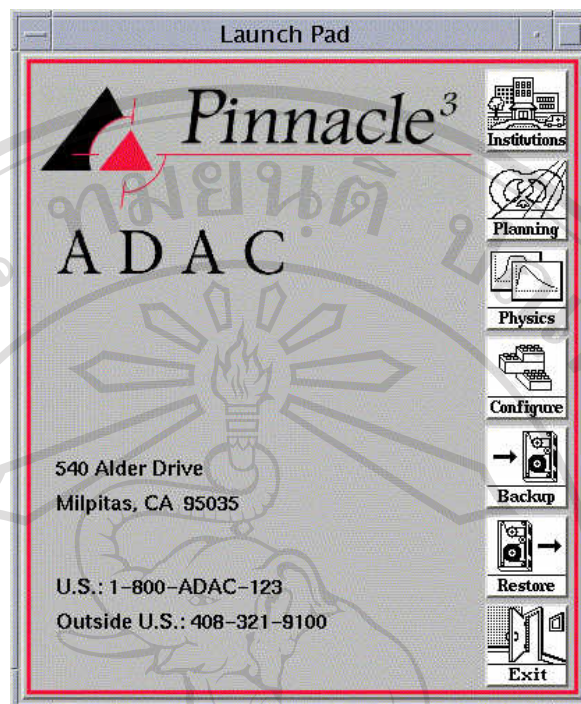


(ก)



(ข)

รูป 3.2 ลักษณะระบบจำกัดลำรังสี (รูป ก) และการออกแบบมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (รูป ข) ของเครื่องเร่งอนุภาค Primus, Siemens (Das and others, 1998)



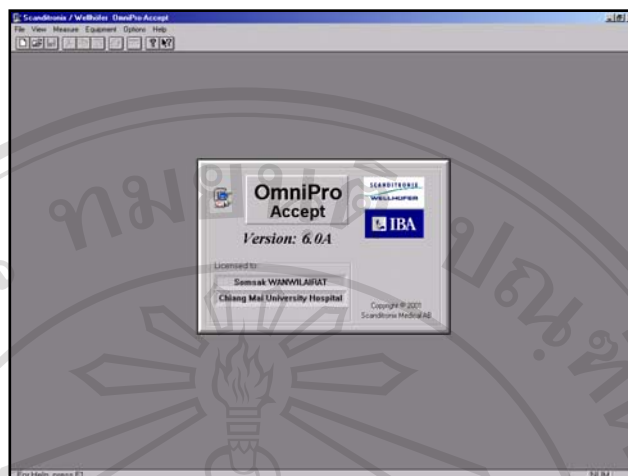
รูป 3.3 โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาสามมิติ Pinnacle³ version 6.2, Philips

3.1.4 ระบบควบคุมการฉายรังสีแปรความเข้ม SIMTEC (Siemens Intensity Modulation Technology)

เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการฉายรังสีให้เป็นอย่างต่อเนื่องในแต่ละพื้นที่รังสีย่อยที่ได้จากการวางแผนรังสีรักษาด้วยเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้ม โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Primeview ซึ่งใช้สำหรับแบ่งกลุ่มของพื้นที่รังสีย่อยตามมุมที่ฉายรังสีและเรียงลำดับให้มีการฉายรังสีในแต่ละกลุ่มอย่างต่อเนื่อง

3.1.5 โปรแกรมวัดและวิเคราะห์ลำรังสี (OmniPro-Accept)

โปรแกรม OmniPro-Accept (Scanditronix Wellhofer รุ่น 6.0A) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดรังสี (เช่น Blue phantom) เพื่อวัดและวิเคราะห์ปริมาณรังสีสำหรับการประกันคุณภาพและการป้อนข้อมูลของลำรังสีเข้าสู่ระบบวางแผนรังสีรักษา โดยสามารถใช้กับระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows ได้ (รูป 3.4) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัดและวิเคราะห์ปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี (depth dose และ dose profile) โดยเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการป้อนเข้าสู่โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา



รูป 3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ OmniPro-Accept

3.1.6 หัววัดรังสีชนิดไอออนในเซชัน

3.1.4.1 หัววัดรังสีชนิดไอออนในเซชันแบบ CC01 (Scanditronix Wellhofer) ใช้

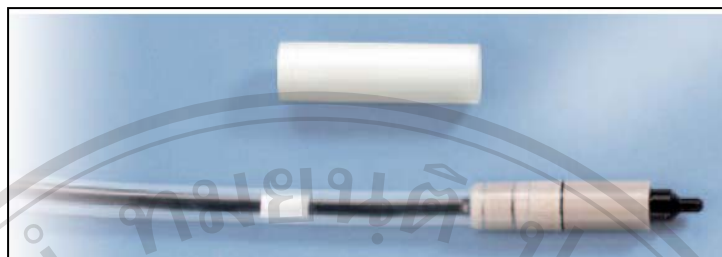
สำหรับวัดปริมาณรังสีของพื้นที่รังสีขนาดเล็กและบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีอย่างรวดเร็ว และสามารถใช้วัดได้ทั้งในอากาศ วัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อแบบของแข็งและแบบน้ำ โดยมีปริมาตรในการแตกตัว (active volume) เท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร ความยาว 3.6 มิลลิเมตร (รูป 3.5) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ศึกษาขนาดของหัววัดรังสีที่มีผลต่อการวัดปริมาณรังสีด้วยการฉายรังสีแปรความเข้ม และวัดปริมาณรังสีเพื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณกับปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด

3.1.4.2 หัววัดรังสีชนิดไอออนในเซชันแบบ CC13 (Scanditronix Wellhofer) ใช้

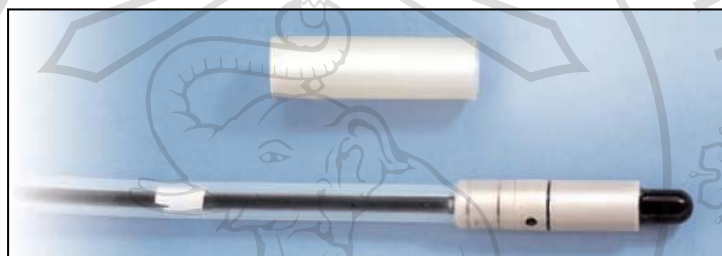
สำหรับวัดปริมาณรังสีได้ทั้งในอากาศ วัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อแบบของแข็งและแบบน้ำ โดยมีปริมาตรในการแตกตัว (active volume) เท่ากับ 0.13 ลูกบาศก์เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 มิลลิเมตร เป็นแบบทรงกลมสมมาตร (รูป 3.6) ความสามารถในการวัดปริมาณรังสีจึงไม่ขึ้นกับทิศทางของลำรังสีที่วัด สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัด output factor ปริมาณรังสีแบบสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและปริมาณรังสีแบบสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี

3.1.4.3 หัววัดรังสีชนิดไอออนในเซชันแบบ FC65-P (Scanditronix Wellhofer) มี

ปริมาตรในการแตกตัวเท่ากับ 0.65 ลูกบาศก์เซนติเมตร ยาว 6.2 มิลลิเมตร (รูป 3.7) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ศึกษาขนาดของหัววัดรังสีที่มีผลต่อการวัดปริมาณรังสีด้วยการฉายรังสีแปรความเข้ม



รูป 3.5 หัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชันแบบ CC01



รูป 3.6 หัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชันแบบ CC13



รูป 3.7 หัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชันแบบ FC65-P

3.1.7 เครื่องวัดประจุไฟฟ้า (Electrometer WELLHOFER Dose1)

เครื่องวัดประจุไฟฟ้า Dose1 วัดได้ทั้งประจุ และกระแสไฟฟ้า ปริมาณรังสี อัตราปริมาณรังสี รวมทั้งอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการวัด (รูป3.8) ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับวัดค่า output, output factor และปริมาณรังสีจากการฉายรังสีแปรความเข้ม



รูป 3.8 เครื่องวัดประจุไฟฟ้า Dose1

3.1.8 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ

3.1.8.1 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำ (Blue Phantom, Wellhofer, IBA) ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์ค่ารังสีจากเครื่องฉายรังสี ซึ่งมีลักษณะคล้ายถังน้ำมีปริมาตรในการกวาดวัดรังสี 48x48x41 ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูป3.9) ในงานวิจัยนี้ใช้วัด output factor ปริมาณรังสีแบบสัมผัสพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและปริมาณรังสีแบบสัมผัสพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี



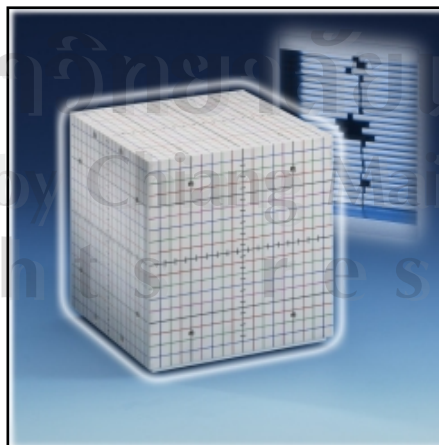
รูป 3.9 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำ (Blue Phantom)

3.1.8.2 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบของแข็ง (PMMA) ที่มีการออกแบบให้สามารถวัดปริมาณรังสีได้ทั้งฟิล์มและหัววัดรังสีชนิดแตกตัว มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่จัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร จำนวน 20 แผ่น โดยแต่ละแผ่นหนา 1 เซนติเมตร (รูป3.10) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้หัววัดรังสีชนิดเฉพาะของมัลติลีฟกอลลิเมเตอร์



รูป 3.10 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบของแข็ง (PMMA)

3.1.8.3 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy Cube (University of Hamburg in Germany) เป็นวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบของแข็ง มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จัตุรัส ขนาดภายนอก 18x18x18 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดภายใน 16 x16x16 ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูป3.11) สร้างจากวัสดุที่สมมูลกับน้ำ มีการออกแบบให้สามารถวัดปริมาณรังสีได้ทั้งฟิล์มและหัววัดรังสีชนิดแตกตัวและปรับตำแหน่งในการวัดได้ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ในการวางแผนรังสีรักษาและวัดปริมาณรังสีจากการฉายรังสีแปรความเข้ม



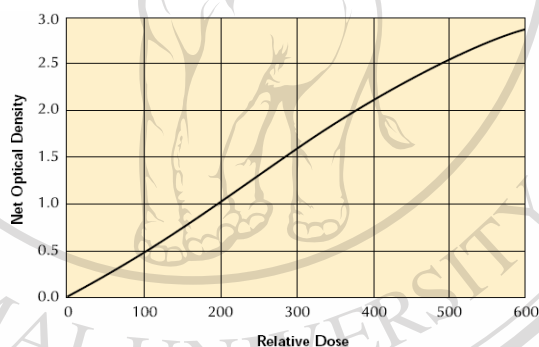
รูป 3.11 วัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy Cube

3.1.9 फिल्मวัดรังสีชนิดอีดีอาร์ 2 (Extended Dose Range Film, KODAK)

ฟิล์มวัดรังสีชนิดอีดีอาร์ 2 (EDR 2) เป็นฟิล์มวัดรังสีที่มีช่วงการตอบสนองต่อรังสีที่กว้างและค่อนข้างเป็นเส้นตรงในช่วงปริมาณรังสีที่ใช้รักษาผู้ป่วยประจำวัน (25-400 cGy) (รูป 3.12) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ศึกษาลักษณะรังสีคณิตเฉพาะของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์และการทวนสอบการกระจายปริมาณรังสีจากการฉายรังสีแปรความเข้ม

3.1.10 เครื่องอ่านค่าความดำฟิล์ม (X-Rite 301 Black & White Transmission Densitometer)

เครื่องอ่านค่าความดำฟิล์ม X-Rite 301 สามารถอ่านค่าความดำอยู่ในช่วง 0-5.0 แสดงผลด้วยเลขดิจิทัล (รูป 3.13) ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับวัดความดำของฟิล์มวัดรังสีชนิดอีดีอาร์ 2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและวิธีการที่มีผลต่อฟิล์มในการทวนสอบการกระจายรังสีในเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้ม



รูป 3.12 กราฟการตอบสนองต่อรังสีของฟิล์มวัดรังสีชนิดอีดีอาร์ 2



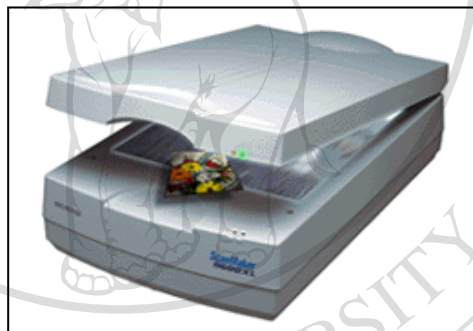
รูป 3.13 เครื่องอ่านค่าความดำฟิล์ม X-Rite 301

3.1.11 เครื่องสแกนฟิล์ม (Microtek Lab, Inc.)

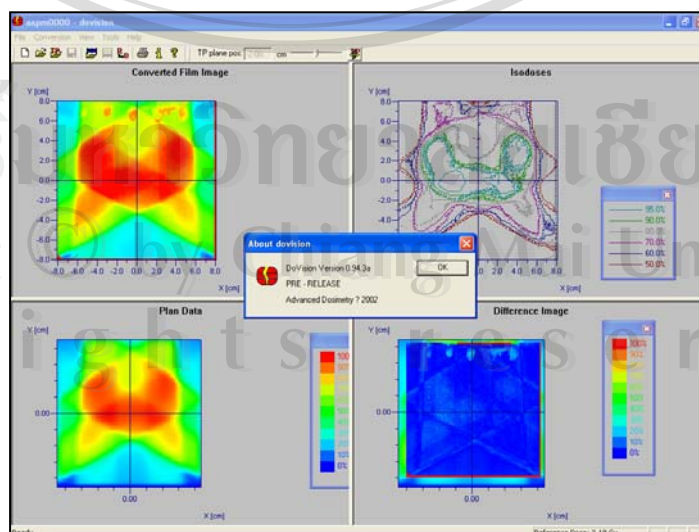
เครื่องสแกนรุ่น Microtek ScanMarker 9600XL มีความละเอียดในการสแกนได้มากถึง 9600x9600 จุด ใช้สำหรับสแกนภาพรังสี (รูป 3.14) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สแกนฟิล์มอีดีอาร์ 2 ในการศึกษาลักษณะรังสีกณิตเฉพาะของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์และการทวนสอบการกระจายปริมาณรังสี

3.1.12 โปรแกรมวิเคราะห์รังสีกณิต (Dovision, Advanced Dosimetry company)

โปรแกรม Dovision สามารถแสดงผลรังสีกณิตที่ได้จากฟิล์มทั้งหนึ่งมิติ (dose profile) สองมิติ (dose distribution) เปรียบเทียบกับการกระจายปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนรังสีรักษากับการวัดด้วยฟิล์ม (รูป 3.15) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิเคราะห์ฟิล์มเพื่อหาค่าปริมาณรังสีทะลุผ่านแบบสัมผัส ขนาดของเงามัว ความถูกต้องของตำแหน่งลีฟ และเปรียบเทียบการกระจายปริมาณรังสีระหว่างการคำนวณกับการวัดด้วยเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้มด้วยค่าดัชนีแกมมา



รูป 3.14 เครื่องสแกนรุ่น Microtek ScanMarker 9600XL (บริษัท Microtek)



รูป 3.15 โปรแกรม Dovision

3.2 การกำหนดค่าเชิงกายภาพของเครื่องฉายในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

ป้อนข้อมูลทางกายภาพของเครื่องฉายรังสีโฟตอนพลังงาน 6 ล้านโวลต์ (Primus6MV, Siemens) ตู้โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา (Pinnacle, Philips) ข้อมูลทางกายภาพของเครื่องฉายรังสี (รายละเอียดอ่านเพิ่มเติมได้ใน ภาคผนวก ก) ได้แก่

1. ข้อมูลเครื่องฉายรังสี
2. ข้อมูลมุมของเตียง มุมของตัวจำกัดลำรังสี และมุมของลำรังสีที่เข้า
3. ข้อมูลระบบจำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟ (MLC)
4. ข้อมูลการจำกัดลำรังสีระหว่างโปรแกรมวางแผนรังสีรักษากับระบบบันทึกและทวนสอบข้อมูลฉายรังสี

3.3 การทดสอบคำนวณปริมาณรังสีและการจำลองลำรังสีของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle

3.3.1 ขั้นตอนวิธีการคำนวณปริมาณรังสีในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

การคำนวณปริมาณรังสีสำหรับเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มมีพื้นฐานแบบเดียวกับการคำนวณในการฉายรังสีตามมิติ ซึ่งในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle ใช้ขั้นตอนวิธีการ Convolution Superposition แบบ Collapsed Cone Convolution Superposition คำนวณปริมาณรังสีในผู้ป่วย โดยพิจารณาคุณสมบัติเชิงกายภาพของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันของผู้ป่วยที่มีผลต่อการคำนวณปริมาณรังสีของทั้งรังสีปฐมภูมิและรังสีทุติยภูมิ เทคนิคการคำนวณปริมาณรังสีนี้สามารถคำนวณปริมาณรังสีในบริเวณที่ไม่เป็น electronic equilibrium ได้อย่างถูกต้องเช่น บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับอากาศหรือเนื้อเยื่อกับกระดูก ในขณะที่เทคนิค Convolution อื่น คำนวณปริมาณรังสีโดยนำผลของลักษณะเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันของผู้ป่วยที่มีต่อรังสีปฐมภูมิเท่านั้น โดยไม่พิจารณาผลต่อรังสีทุติยภูมิ (ADAC Laboratories, 2004) ขั้นตอนวิธีการคำนวณปริมาณรังสี Convolution Superposition ในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

3.3.1.1 การจำลอง Energy fluence ของเครื่องเร่งอนุภาค เป็นการจำลองลักษณะของความเข้มรังสีที่ออกมาจากหัวเครื่องเร่งอนุภาค โดยขั้นแรกกำหนดให้ Energy fluence มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ จากนั้นนำผลของ flattening filter และอุปกรณ์แปรความเข้ม (block, wedge และ compensator) ที่มีต่อ Energy fluence มาปรับค่าของ Energy fluence บนระนาบที่กำหนดไว้ในขั้นตอนแรก

3.3.1.2 การคำนวณ TERMA (Total Energy Released per unit Mass) ทำโดยฉาย Energy fluence ผ่านปริมาตรย่อย (voxel) ที่มีข้อมูลความหนาแน่นของผู้ป่วย (จากภาพซีที) และใช้เทคนิคเรย์เทรซิง (ray tracing) บันทึกข้อมูล Energy fluence ที่ลดทอนตามแนวเส้นรังสี จากจุด

กำหนดรังสีถึงระนาบที่รังสีตกกระทบ การคำนวณ TERMA ในแต่ละปริมาตรย่อยที่เส้นรังสีผ่าน ต้องใช้ค่า Energy fluence ที่ลดทอนตามแนวเส้นรังสี และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีโดยมวล (mass attenuation coefficient) ของปริมาตรย่อยนั้น โดยเปิดค่าจากตารางที่บันทึกไว้ในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา ตารางที่ใช้ในการเปิดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีโดยมวลนี้ เป็นตารางสามมิติที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่น, radiological depth และ off-axis angle ลักษณะเนื้อเยื่อของผู้ป่วยเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่น รังสีที่ผ่านผู้ป่วยเป็นฟังก์ชันของ radiological depth และการลดลงของ energy spectrum ตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีเป็นฟังก์ชันของ off-axis angle

3.3.1.3 การซ้อนทับ (Superposition) ของ TERMA กับ Energy deposition kernel

การกระจายปริมาณรังสีสามมิติในผู้ป่วย ได้จากการนำค่า TERMA ซึ่งปริมาตรมาซ้อนทับกับ Energy deposition kernel ซึ่ง Energy deposition kernel เป็นค่าแสดงการกระจายพลังงานจากบริเวณที่โฟตอนปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยาไปยังปริมาตรข้างเคียง การซ้อนทับอาศัยเทคนิคเรย์เทรซิง เช่นเดียวกับที่ใช้ในการคำนวณ Energy fluence ผ่านผู้ป่วย กล่าวคือค่า TERMA ในแต่ละปริมาตรย่อยถูกบันทึกตามเส้นรังสีที่ลากผ่านและถูกนำไปซ้อนทับกับ Energy deposition kernel ที่ระยะ radiological ตามเส้นรังสีนั้น

3.3.1.4 การจำลองการปนเปื้อนอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่ปนเปื้อนมากับลำรังสีโฟตอน

ถูกจำลองด้วย exponential falloff โดยปริมาณรังสีของอิเล็กตรอนจะถูกรวมเข้ากับปริมาณรังสีโฟตอน

นอกจากการคำนวณปริมาณรังสีแบบ Collapsed Cone Convolution Superposition ที่โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle ใช้คำนวณปริมาณรังสีในผู้ป่วยแล้ว ในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle ยังได้คิดค้นการคำนวณปริมาณรังสีแบบ Adaptive Convolution Superposition อีกด้วย ซึ่งแตกต่างจากกันเล็กน้อยคือความเร็วของ Adaptive Convolution Superposition จะเพิ่มขึ้นโดยการปรับความละเอียดของการคำนวณ ซึ่งการคำนวณปริมาณรังสีจะถูกปรับให้มีความละเอียดมากขึ้น เมื่อค่า TERMA และการกระจายรังสีมีการเปลี่ยนแปลงสูง แต่ถ้าวการเปลี่ยนแปลงค่า TERMA และการกระจายรังสีต่ำ ความละเอียดของการคำนวณปริมาณรังสีจะถูกปรับให้มีความละเอียดลดลง

3.3.2 การจำลองลำรังสีของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

การจำลองลำรังสีในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle เป็นกระบวนการจำลองการกระจาย fluence ปฐมภูมิที่ออกจากหัวของเครื่องเร่งอนุภาค โดยสร้างกราฟผลการคำนวณปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์ตามระยะลึก และกราฟผลการคำนวณปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์

ตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี ผลการคำนวณนี้ได้จากการปรับค่าตัวแปรของลำรังสี เปรียบเทียบผลการจำลองกับเส้นกราฟจากการวัดปริมาณรังสีในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำ ค่าตัวแปรจะถูกปรับซ้ำจนกระทั่งผลการคำนวณปริมาณรังสีแบบสัมผัสตามระยะลึก และปริมาณรังสีแบบสัมผัสตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี ใกล้เคียงกับค่าของการวัด (รายละเอียดการปรับค่าตัวแปรที่ใช้จำลองลำรังสีศึกษาจาก Tome, W.A.(2002) และ Starkchall, G. กับคณะ (2000)) ลักษณะของลำรังสีที่จำลองประกอบด้วย

3.3.2.1 Energy spectrum คือจำนวนโฟตอนสัมผัสในแต่ละช่วงพลังงานที่ออกมาจากหัวของเครื่องเร่งอนุภาค โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาจำลอง Energy spectrum โดยแสดงปริมาณรังสีสัมผัสตามระยะลึกที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟ สามารถปรับจำนวนโฟตอนสัมผัสในแต่ละช่วงพลังงาน เพื่อให้ปริมาณรังสีสัมผัสตามระยะลึกที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับข้อมูลการวัด

3.3.2.2 อิเล็กตรอนปนเปื้อน โปรแกรมวางแผนรังสีรักษานำปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่ปนมากับลำรังสีโฟตอน (Electron contamination) เพิ่มให้กับปริมาณรังสีโฟตอน โดยการจำลองปริมาณรังสีอิเล็กตรอนแบบ modified exponential curve (รูป 3.16) คือปริมาณรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงที่ระยะต้นๆ เพื่อป้องกันปริมาณรังสีอิเล็กตรอนมากเกินไปที่ผิว ในขณะที่ระยะลึกลงไปปริมาณรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นโค้งตามปริมาณรังสีสัมผัสตามระยะลึกในแนวกึ่งกลางลำรังสี ค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับจำลองอิเล็กตรอนที่ปนเปื้อนกับลำรังสีโฟตอนได้แก่

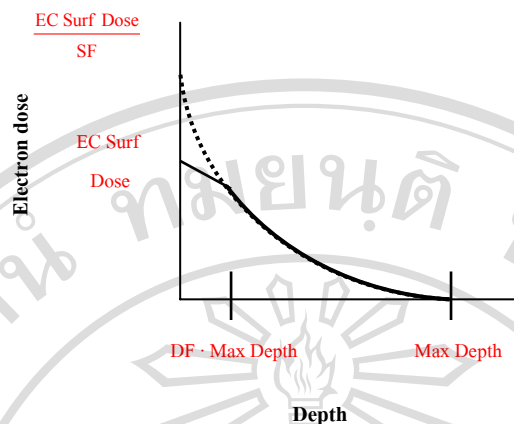
1. *Max Depth* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดระยะลึกมากที่สุดของปริมาณรังสีอิเล็กตรอน

2. *EC Surface Dose* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่ผิว

3. *Depth Coefficient* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดอัตราการลดลงอย่างรวดเร็ว (fall-off) ของปริมาณรังสีอิเล็กตรอนตามความลึก

4. *DF (Depth Fraction)* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดระยะลึกมากที่สุดที่ปริมาณรังสีมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงตามความลึกและกำหนดระยะเริ่มต้นที่ปริมาณรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นโค้ง exponential

5. *SF (Scale Fraction)* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดอัตราส่วนที่ปรับให้ปริมาณรังสีอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงตามความลึกบริเวณที่ใกล้กับผิวแทนที่จะเป็นเส้นโค้งของ exponential



รูป 3.16 modified exponential curve ที่ใช้สำหรับจำลองปริมาณรังสีอิเล็กตรอน

6. *Off-Axis Coefficient Electron Contamination* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่ลดลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี

7. *EC Field Size Dependence* (C_1, C_2, C_3) เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดพื้นที่รังสี สมการที่ใช้คือ

$$F_{FS}(fs) = ECD_{10 \times 10} + C_1 \cdot (fs - 10) + C_2 \cdot (e^{-C_3 \cdot 10} - e^{-C_3 \cdot fs}) \quad (3.1)$$

เมื่อ

fs = ขนาดพื้นที่รังสี

$ECD_{10 \times 10}$ = EC Surface Dose ของพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร

C_1, C_2, C_3 = ค่าตัวแปรที่ได้จากการปรับเทียบกับข้อมูลการวัด

3.3.2.3 *ปริมาณรังสีในพื้นที่รังสี* ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณรังสีในพื้นที่รังสีคือ flattening filter attenuation ซึ่งมีผลต่อลำรังสี ดังนี้

ก. พลังงานสัมพัทธ์ของโฟตอนในลำรังสีมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ผลของ flattening filter attenuation ส่วนนี้จะถูกจำลองด้วยค่าตัวแปร Fluence Increase/cm และ Cone Radius

ข. จำนวนโฟตอนที่มีพลังงานสูงมีการลดลงเมื่อเทียบกับจำนวนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ผลของ flattening filter attenuation ส่วนนี้จะถูกจำลองด้วยค่าตัวแปร Spectral Off-Axis Softening

1. *Spectral Off-Axis Softening* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดการลดลงของ spectrum weight ตามมุมของรังสีที่ทำกับกึ่งกลางลำรังสี (W_i') ดังสมการ (3.2)

$$W_i' = W_i \times \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{E_i}{E_{\max}} \right)^{OffAxisSofteningParam \times \theta}} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ W_i = spectrum weight ของพลังงาน E_i
 θ = off-axis angle โดยคำนวณจากสมการ (3.3)

$$\theta = \text{atan} \left(\frac{OffAxisDist}{SAD} \right) \quad (3.3)$$

โดยที่ $OffAxisDist$ = ระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสีในระนาบ isocenter ที่ตั้งฉากกับลำรังสี

2. *Cone Radius* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสีที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลง fluence

3. *Fluence Increase/cm* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดอัตราการเพิ่ม energy fluence แบบสัมพัทธ์ตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสีที่เพิ่มขึ้นในช่วงก่อนถึงระยะที่เป็น Cone Radius

3.3.2.4 ปริมาตรรังสีนอกพื้นที่รังสี ค่าตัวแปรสำหรับจำลองบริเวณนอกพื้นที่รังสี ได้แก่

1. *Effective Source Size* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนด FWHM (Full Width at Half Maximum) ของกราฟ Gaussian ที่ใช้ลด incident fluence เพื่อจำลองบริเวณเงามัวของลำรังสีใน แกนที่ตั้งฉาก (X) และขนาน (Y) กับแนวกึ่งกลางลำรังสี

2. *Flattening Filter Scatter Source* เป็นค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับจำลองโฟตอน ที่กระเจิงมาจาก flattening filter ซึ่งมีผลต่อปริมาณรังสีบริเวณที่อยู่นอกพื้นที่รังสีในภาคตัดขวาง การ จำลองของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาจะนำโฟตอนที่กระเจิงซึ่งจำลองด้วยกราฟ Gaussian รวมเข้ากับลำรังสีในภาคตัดขวางทั้งหมด โดย *Gaussian Height* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดอัตราส่วน ของ energy fluence ที่กึ่งกลางลำรังสีซึ่งกระเจิงมาจาก flattening filter เพื่อใช้เป็นค่าสำหรับสอบ เทียบในกราฟ Gaussian ส่วน Gaussian Width เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดความกว้างของกราฟ Gaussian ที่ใช้จำลองการกระเจิงของโฟตอนเนื่องจาก flattening filter

3. *Jaw Transmission* เป็นค่าตัวแปรที่กำหนดอัตราส่วนของ energy fluence ที่ทะลุ ผ่านตัวกำบังลำรังสี

3.3.3 จำลองลำรังสีโฟตอนในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

วิธีการคำนวณปริมาณรังสีโฟตอนในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle อยู่บนพื้นฐานของการจำลองลำรังสี โดยข้อมูลของลำรังสีที่วัดใช้เพื่อกำหนดลักษณะของลำรังสี การจำลองลำรังสีโฟตอนประกอบด้วย

3.3.3.1 วัดและนำเข้าข้อมูลสำหรับจำลองลำรังสีของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

วัดข้อมูลลำรังสีของเครื่องเร่งอนุภาคโฟตอนพลังงาน 6 ล้านโวลต์ ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำ ซึ่งประกอบด้วย

1. ปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกของพื้นที่รังสีขนาด 3x3, 4x4, 5x5, 7x7, 10x10, 15x15, 20x20, 25x25, 30x30, 20x5, 5x20 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร และพื้นที่รังสีขนาด 5x5, 10x10 และ 20x20 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะ SSD 90 เซนติเมตร จากผิวของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำถึงระยะลึก 35 เซนติเมตร

2. ปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะจากกึ่งกลางลำรังสี (dose profile) ของในพื้นที่รังสีและนอกพื้นที่รังสีขนาด 3x3, 4x4, 5x5, 7x7, 10x10, 15x15, 20x20, 25x25, 30x30, 20x5, 5x20 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะ SSD 100 เซนติเมตร และพื้นที่รังสีขนาด 5x5, 10x10 และ 20x20 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะ SSD 90 เซนติเมตร ที่ระยะลึก d_m , 5, 10 และ 20 เซนติเมตร

นำชุดข้อมูลปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะจากกึ่งกลางลำรังสีที่ได้จากการวัดเข้าสู่โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาเพื่อใช้สำหรับการจำลองลำรังสี (รายละเอียดอ่านเพิ่มเติมได้ใน ภาคผนวก ข)

3.3.3.2 จำลองลำรังสีโฟตอนในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา จำลองลำรังสีใน

โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาโดยใช้การจำลองลำรังสีแบบอัตโนมัติ (Auto modeling) ปรับค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการจำลองลำรังสี (รายละเอียดอ่านเพิ่มเติมได้ใน ภาคผนวก ค)

3.3.4 วิธีทดสอบการคำนวณปริมาณรังสี

เปรียบเทียบปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์แต่ละจุดบนกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ระหว่างผลการคำนวณของโปรแกรมกับข้อมูลจากการวัด เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (root mean square error) ของการคำนวณของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาโดยมีพื้นฐานจากการจำลองลำรังสี (beam modeling) โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการคำนวณกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี (RMS profile) และค่าความ

คลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการคำนวณปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึก (RMS depth dose) หาได้จากสมการ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

$$\text{RMS error profile} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{cal} - D_{meas}}{D_{meas, central axis}} \right)_i^2}{n}} \quad (3.4)$$

และ

$$\text{RMS error depth dose} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{cal} - D_{meas}}{D_{meas, max dose}} \right)_i^2}{n}} \quad (3.5)$$

เมื่อ D_{cal} = ปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณจุดที่ i
 D_{meas} = ปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดจุดที่ i
 $D_{meas, central axis}$ = ปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของลำรังสี
 $D_{meas, max dose}$ = ปริมาณรังสีแบบสัมพัทธ์สูงสุดที่ได้จากการวัดในกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึก

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของปริมาณรังสีแต่ละจุดบนกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึก และ กราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ระหว่างผลการคำนวณของโปรแกรมกับข้อมูลจากการวัดมีกำหนดเกณฑ์ดังนี้ กราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึก ที่ระยะลึกจากผิวถึงระยะลึกปริมาณรังสีสูงสุดต้องไม่เกิน 10% และที่ระยะลึกมากกว่าระยะลึกปริมาณรังสีสูงสุดไม่เกิน 2% ส่วนกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ทั้งแกน X และแกน Y ที่กึ่งกลางของลำรังสีของทั้งภายในพื้นที่รังสีและนอกพื้นที่รังสีต้องไม่เกิน 3% ขณะที่บริเวณเงามัวของกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ค่าที่อยู่ในเกณฑ์กำหนดต้องไม่เกิน 10%

3.3.5 การคำนวณ Output factor ของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle

3.3.5.1 การคำนวณค่า Output factor output factor คือปริมาณรังสีต่อหนึ่ง Monitor Unit ของพื้นที่รังสีที่กำหนด หาค่าด้วยปริมาณรังสีต่อหนึ่ง Monitor Unit ของพื้นที่รังสีอ้างอิง (10x10 ตารางเซนติเมตร) ในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle คำนวณ output factor ของลำรังสีโฟตอนที่กระเจิงเนื่องจากคอลลิเมเตอร์ (collimator scatter factor, OF_c) และ output factor ของลำรังสีโฟตอนที่กระเจิงเนื่องจากเนื้อเยื่อของผู้ป่วยหรือวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (phantom

scatter factor, OF_p) หลังจากจำลองลำรังสี และป้อนข้อมูล output factor โดยรวม (OF) จากการวัดเข้าสู่โปรแกรมวางแผนรังสีรักษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว การคำนวณ Output factor ของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle มีขั้นตอนโดยย่อดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle จะคำนวณปริมาณรังสีของพื้นที่รังสีอ้างอิง 10×10 ตารางเซนติเมตร ณ จุดที่ใช้สอบเทียบ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดของพื้นที่รังสีอ้างอิง 10×10 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่าง incident energy fluence ที่ได้จากการวัดกับ incident energy fluence ที่ได้จากการคำนวณ (absolute calibration factor) โดยอัตราส่วนนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับทุกขนาดของพื้นที่รังสีเมื่อมีการสร้าง incident energy fluence image

ขั้นตอนที่ 2 โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle จะคำนวณปริมาณรังสี ณ จุดที่กำหนดในลำรังสีจากการนำ incident energy fluence image คูณด้วย absolute calibration factor ปริมาณรังสีที่คำนวณได้จะถูกใช้คำนวณหาค่า phantom scatter factor ดังสมการ (3.6)

$$OF_p = \frac{\frac{D}{\mu}(\text{Prescription})_{OF_c=1}}{\frac{D}{\mu}(\text{Reference})_{OF_c=1}} \quad (3.6)$$

เมื่อ $\frac{D}{\mu}(\text{Prescription})_{OF_c=1}$ และ $\frac{D}{\mu}(\text{Reference})_{OF_c=1}$ คือปริมาณรังสีต่อหนึ่ง Monitor Unit ซึ่งถูกคำนวณขึ้นจากการจำลองการกระเจิงของลำรังสีโฟตอนในปริมาตรผู้ป่วยหรือวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อของพื้นที่รังสีที่กำหนดและของพื้นที่รังสีอ้างอิง (10×10 ตารางเซนติเมตร) ตามลำดับ โดยที่ปริมาณรังสีที่ได้จากการกระเจิงของรังสีเนื่องจากคอลลิเมเตอร์ของพื้นที่รังสีที่กำหนดและของพื้นที่รังสีอ้างอิงถูกกำหนดให้เท่ากัน ($OF_c=1.0$)

ขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle จะคำนวณ collimator scatter factor จาก total output factor ที่ได้จากการวัด และ phantom scatter factor ที่ได้จากการคำนวณของพื้นที่รังสีขนาด i ดังสมการ (3.7)

$$OF_c(i) = \frac{OF(i)}{OF_p(i)} \quad (3.7)$$

3.3.5.2 วัดและนำเข้าสู่ข้อมูลของปริมาณรังสีที่จุดสอบเทียบ (calibration output)

และ *total output factor* โดยวัดข้อมูลลำรังสีของเครื่องฉายรังสีโฟตอนพลังงาน 6 ล้านโวลต์ ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อแบบน้ำที่ระยะ SAD 100 เซนติเมตร ระยะลึก 10 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วย

1. ปริมาณรังสีต่อ monitor unit ของพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร (calibration output)
2. Total output factor ของพื้นที่รังสีขนาด 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7, 8x8, 9x9, 10x10, 11x11, 12x12, 13x13, 14x14, 15x15, 20x20, 25x25, 30x30, 35x35, 40x40 ตารางเซนติเมตร

นำข้อมูลปริมาณรังสีต่อ monitor unit ของพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร และ *total output factor* ที่ได้จากการวัดเข้าสู่โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle (ภาคผนวก ง)

3.3.5.3 *คำนวณ output factor* ของรังสีโฟตอนที่กระเจิงจากคอลลิเมเตอร์และจากวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ คำนวณ *output factor* ของรังสีโฟตอนที่กระเจิงจากคอลลิเมเตอร์และจากวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อจาก *total output factor* ที่วัดได้จากการใช้โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา (รายละเอียดวิธีการตรวจรับอ่านเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ง)

3.4 ทวนสอบความถูกต้องของการส่งผ่านข้อมูลฉายรังสี

ตรวจสอบความถูกต้องของระบบการส่งผ่านข้อมูลฉายรังสีระหว่างการเชื่อมต่อข้อมูล จากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาไปยังระบบบันทึกและทวนสอบข้อมูลการฉายรังสี (Lantis) และจากระบบบันทึกและทวนสอบข้อมูลการฉายไปยังเครื่องฉายรังสี (Primus, Siemens) โดยการใช้ลักษณะพื้นที่รังสีเป็นรูปตัว L

3.5 ตรวจรับข้อมูลเครื่องฉายรังสีและลำรังสีที่จำลอง

ตรวจรับ (commission) เครื่องฉายรังสีและลำรังสีที่จำลองสำหรับใช้วางแผนรังสีรักษา (รายละเอียดวิธีการตรวจรับอ่านเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก จ) หลังจากป้อนข้อมูลทางฟิสิกส์ของเครื่องฉายรังสีและของพลังงานรังสีโฟตอน จำลองลำรังสี คำนวณปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะลึกและระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี และคำนวณค่า *output factor* แล้วกระบวนการตรวจรับจะย้ายเครื่องฉายรังสีที่จำลองจากฐานข้อมูล Physics Machine ไปยังฐานข้อมูล Planning Machine และบันทึกวันและเวลาที่ทำการตรวจสอบไว้ จากนั้นจึงจะสามารถนำมาใช้ในการวางแผนรังสีรักษาได้

3.6 ทวนสอบการคำนวณ Monitor Unit ของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle

3.6.1 การคำนวณ Monitor Unit ของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา และตัวแปรที่ใช้ในการ

คำนวณ

โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle คำนวณ monitor unit ของปริมาณรังสีที่กำหนดบนพื้นฐานของสมการ (3.8)

$$MU = \frac{D(\text{Prescription})}{\frac{D}{\mu}(\text{Prescription})} \quad (3.8)$$

เมื่อ $D(\text{Prescription})$ = ปริมาณรังสีที่กำหนดโดยแพทย์รังสี
 $\frac{D}{\mu}(\text{Prescription})$ = ปริมาณรังสีต่อหนึ่ง monitor unit ที่ได้จากการคำนวณของ

โปรแกรมวางแผนรังสีรักษา ณ จุดที่กำหนด ดังแสดงในสมการ (3.9)

$$\frac{D}{\mu}(\text{Prescription}) = ND(\text{Prescription}) \times OF_c \times \text{Tray} \times \text{Wedge} \times \frac{D}{\mu}(\text{Calibration}) \quad (3.9)$$

เมื่อ OF_c = Output factor ของลำรังสีโฟตอนที่กระเจิงเนื่องจากคอลลิเมเตอร์ ซึ่งได้จากการคำนวณของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle

Tray = tray factor

Wedge = wedge factor

$\frac{D}{\mu}(\text{Calibration})$ = ปริมาณรังสีต่อหนึ่ง monitor unit ที่ได้จากการวัดที่จุดอ้างอิงของการ

สอบเทียบ

$ND(\text{Prescription})$ = ปริมาณรังสีที่สอบเทียบต่อหนึ่ง monitor unit โดยใช้ขั้นตอนวิธี

Convolution Superposition ในโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา Pinnacle คำนวณปริมาณรังสีที่สอบเทียบจากการจำลองรังสีวิ่งผ่านตัวกลางแล้วเกิดอันตรกิริยาของรังสีปฐมภูมิและรังสีทุติยภูมิ (อนุภาคที่มีประจุและอนุภาคโฟตอนที่กระเจิง) กับตัวกลาง ดังสมการ (3.10)

$$ND = \frac{\frac{D}{\Psi_0}(\text{Prescription})}{\frac{D}{\Psi_0}(\text{Calibration})} \quad (3.10)$$

เมื่อ $\frac{D}{\Psi_0}(\text{Prescription})$ = ปริมาณรังสีต่อหนึ่งหน่วยของ energy fluence ที่จุดที่กำหนด

$\frac{D}{\Psi_0}(\text{Calibration})$ = ปริมาณรังสีต่อหนึ่งหน่วยของ energy fluence ที่จุดอ้างอิงของการสอบ

เทียบ

3.6.2 วิธีการทดสอบการคำนวณ Monitor Unit ของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

ทวนสอบการคำนวณ Monitor Unit ของการฉายรังสีสามมิติด้วยการวัดปริมาณรังสีแบบจุด โดยวางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube แล้วกำหนดให้พื้นที่รังสีที่ฉายเป็นพื้นที่รังสีที่เหลี่ยมจัตุรัสและพื้นที่รังสีไม่ปกคลุม จากนั้นวัดปริมาณรังสีในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อที่ใช้ในการวางแผนด้วยหัววัดรังสีชนิดแตกตัวเทียบกับปริมาณรังสีที่คำนวณได้ที่ตำแหน่งเดียวกันจากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.7 วางแผนรังสีรักษาแบบ inverse planning

วางแผนรังสีรักษาเพื่อฉายรังสีด้วยเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้มแบบ step and shoot โดยใช้ระบบวางแผนรังสีรักษา Pinnacle ที่ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำข้อมูลภาพซีทีของผู้ป่วยเข้าสู่โปรแกรมเพื่อเก็บไว้ในฐานข้อมูล และสร้างแฟ้มข้อมูลของผู้ป่วยสำหรับวางแผนรังสีรักษา

ขั้นตอนที่ 2 สร้างปริมาตรที่สนใจของก้อนเป้าหมายและอวัยวะที่สำคัญลงบนภาพซีทีของผู้ป่วยในการวางแผนรังสีรักษา

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดจำนวน ทิศทาง และจุดหมุนของลำรังสี มุมของคอลลิเมเตอร์และเตียง ขนาดของลำรังสีในแต่ละมุม

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตของการคำนวณปริมาณรังสี (dose grid) และเส้น isodose ที่ต้องการแสดง

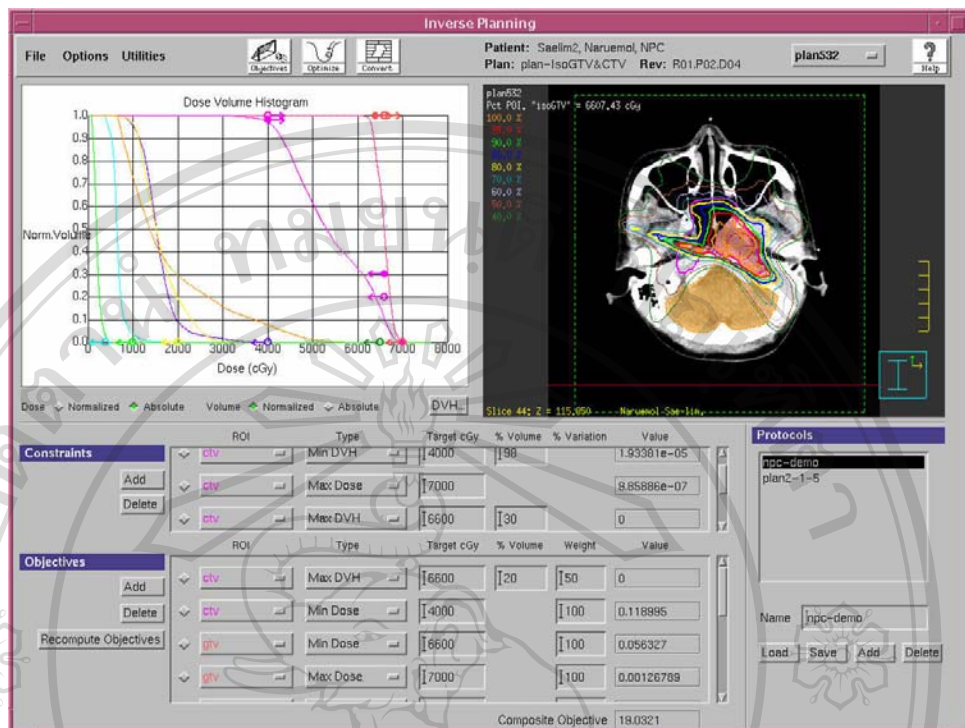
ขั้นตอนที่ 5 กำหนด DVHs ของปริมาตรที่สนใจที่ต้องการแสดงในขณะที่อยู่ในกระบวนการ inverse planning

ขั้นตอนที่ 6 กำหนด objectives และ constraints ของแผนรังสีรักษา (รูป 3.17)

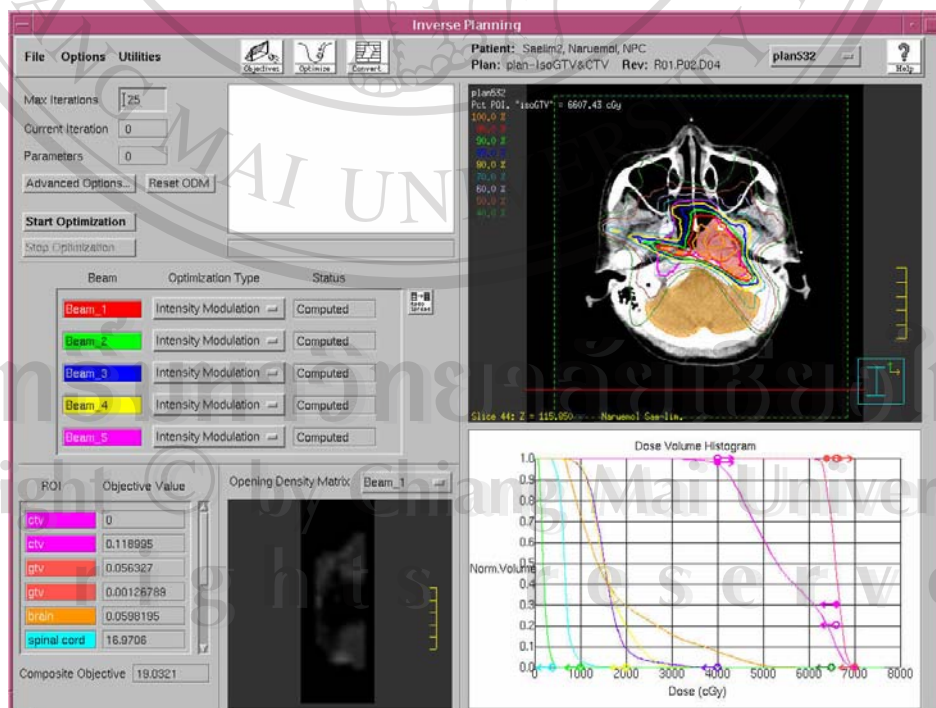
ขั้นตอนที่ 7 กำหนดค่าตัวแปรสำหรับการ optimization และเริ่มต้นการ Optimize แผนรังสีรักษา (รูป 3.18)

ขั้นตอนที่ 8 สร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติฟคอลลิเมเตอร์จาก ODM ของแต่ละลำรังสีที่ได้จากการ optimize ที่สามารถนำไปฉายได้จริง (conversion) (รูป 3.19)

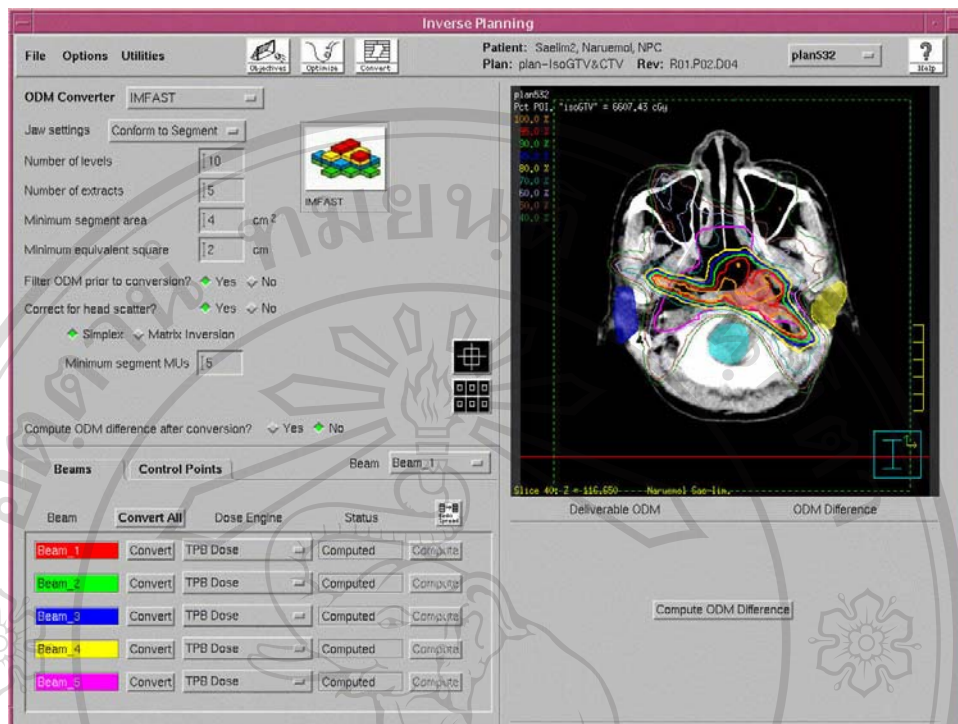
ขั้นตอนที่ 9 คำนวณปริมาณรังสีสุดท้ายที่ได้หลังจากสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติฟคอลลิเมเตอร์



รูป 3.17 หน้าต่างของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาที่ใช้กำหนด objectives และ constraints ของแผนรังสีรักษา



รูป 3.18 หน้าต่างของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาที่ใช้กำหนดค่าตัวแปรสำหรับการ optimization และเริ่มต้นการ Optimize แผนรังสีรักษา



รูป 3.19 หน้าต่างของโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาที่ใช้กำหนดค่าตัวแปรสำหรับสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติฟลอคอลิเมเตอร์และคำนวณปริมาณรังสีสุดท้ายที่ได้หลังจากสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติฟลอคอลิเมเตอร์

3.7.1 ศึกษาโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา

ศึกษาโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาที่เกี่ยวกับลักษณะเฉพาะหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องใน inverse planning

3.7.2 ศึกษาอิทธิพลของจำนวนทิศทางของลำรังสีที่มีต่อการกระจายปริมาณรังสี

ศึกษาผลของจำนวนทิศทางของลำรังสีที่ใช้ในการวางแผนรังสีรักษาที่มีต่อการกระจายปริมาณรังสี จากแผนรังสีรักษาที่ได้จากกระบวนการ optimization

3.7.3 ศึกษาอิทธิพลของการกำหนดจำนวน Monitor Unit น้อยที่สุด

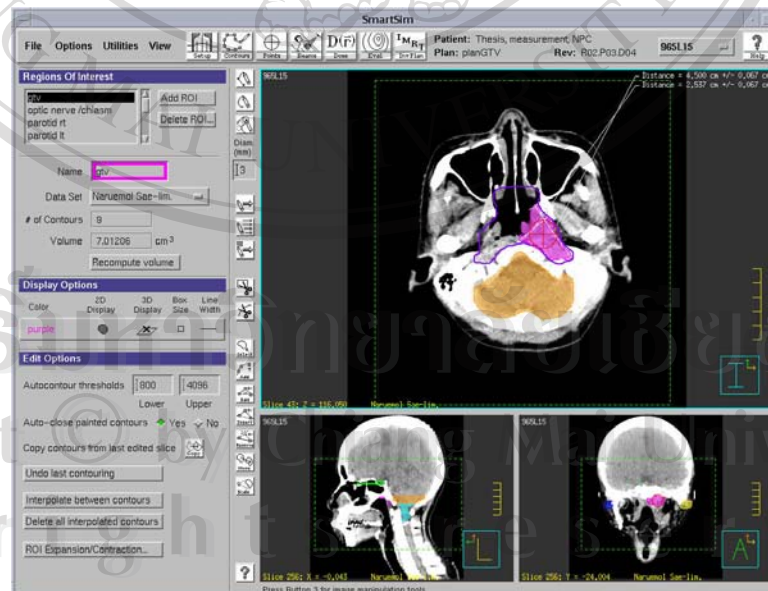
ศึกษาผลของจำนวนของ Monitor Unit น้อยที่สุดที่ใช้ในการฉายในแต่ละพื้นที่รังสีย่อยที่มีต่อจำนวนพื้นที่รังสีย่อยและลักษณะของปริมาณรังสีที่ก้อนเป้าหมายและอวัยวะสำคัญได้รับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.7.3.1 วางแผนรังสีรักษาในผู้ป่วยที่เป็น nasopharyngeal โดยรังสีแพทย์ กำหนดให้ก้อนมะเร็งปฐมภูมิ (GTV) ได้รับปริมาณรังสี 6600 เซนติเกรย์ CTV ให้ได้รับปริมาณ รังสี 4000 เซนติเกรย์ โดยที่อวัยวะสำคัญที่ประกอบด้วย parotid gland, optic nerve spinal cord และ brain ให้ได้รับปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า 2000, 500, 400 และ 4000 เซนติเกรย์ ตามลำดับ (รูป 3.20)

3.7.3.2 รังสีแพทย์เลือกแผนรังสีรักษาที่ได้หลังจาก optimization

3.7.3.3 นำแผนรังสีรักษาที่รังสีแพทย์เลือกมาสร้างพื้นที่รังสีย่อยที่จะใช้ในการฉาย โดยใช้จำนวนของ Monitor Unit น้อยที่สุดที่ใช้ในการฉายในแต่ละพื้นที่รังสีย่อยจำนวน 4 ค่า (1, 5, 7 และ 10) ในขั้นตอนสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติลีฟคอลลิมิเตอร์จาก ODM ของแต่ละลำรังสี ที่ได้จากการบวนการ optimization

3.7.3.4 วิเคราะห์ผลของจำนวนของ Monitor Unit ที่กำหนดที่มีต่อ (1) จำนวน พื้นที่รังสีย่อย (2) การกลบกลืนของการกระจายปริมาณรังสีในก้อนเป้าหมายโดยประเมินจาก ผลต่างของปริมาณรังสีที่น้อยที่สุดที่ 95% กับ 5% ของปริมาณของก้อนมะเร็งปฐมภูมิได้รับ (D_{95-5}) (3) ปริมาณรังสีของก้อนเป้าหมายที่ได้รับปริมาณรังสีต่ำกว่าและสูงกว่าที่รังสีแพทย์กำหนดโดย ประเมินจากเปอร์เซ็นต์ของปริมาณของก้อนเป้าหมายที่ได้รับปริมาณรังสีน้อยกว่า 95% ($GTV_{95\%}$) และมากกว่า 105% ($GTV_{105\%}$) ของปริมาณรังสีที่กำหนดตามลำดับ และ (4) ปริมาณรังสีที่อวัยวะ สำคัญได้รับโดยประเมินจากเปอร์เซ็นต์ของปริมาณของอวัยวะสำคัญที่ได้รับปริมาณรังสี



รูป 3.20 แสดงปริมาณที่สนใจของก้อนเป้าหมายและอวัยวะที่สำคัญลงบนภาพซีทีของผู้ป่วยใน การวางแผนรังสีรักษา (พื้นที่สีม่วงแสดงขนาดของก้อนมะเร็งปฐมภูมิประมาณ 7 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)

3.7.4 ศึกษาอิทธิพลของการกำหนดขนาดพื้นที่รังสีอย่างน้อยที่สุด

ศึกษาผลของขนาดของพื้นที่รังสีอย่างน้อยที่สุดที่ใช้ในการฉายในแต่ละพื้นที่รังสี
น้อยที่มีต่อจำนวนพื้นที่รังสีย่อยและลักษณะของปริมาณรังสีที่ก้อนเป้าหมายและอวัยวะสำคัญได้รับ
โดยมีขั้นตอนเหมือนกับการศึกษาผลของจำนวนของ Monitor Unit น้อยที่สุดที่ใช้ในการฉายในแต่ละ
พื้นที่รังสีย่อย โดยใช้ขนาดของพื้นที่รังสีย่อยจำนวน 4 ขนาดคือ 1, 4, 9, 16 ตารางเซนติเมตรใน
ขั้นตอนสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์จาก ODM ของแต่ละลำรังสีที่ได้จาก
กระบวนการ optimization

3.7.5 ศึกษาอิทธิพลของการกำหนดระดับ fluence (discrete fluence level) ของพื้นที่ รังสีย่อย

ศึกษาผลของระดับ fluence (discrete fluence level) ที่ต้องการได้จากพื้นที่รังสีย่อย
ที่สร้างขึ้น ที่มีต่อจำนวนพื้นที่รังสีย่อยและลักษณะของปริมาณรังสีที่ก้อนเป้าหมายและอวัยวะ
สำคัญได้รับ โดยมีขั้นตอนเหมือนกับการศึกษาผลของจำนวนของ Monitor Unit ที่น้อยที่สุดที่ใช้ใน
การฉายในแต่ละพื้นที่รังสีย่อย โดยใช้ระดับความเข้มของ fluence 4 ระดับ (5, 7, 10 และ 15) ใน
ขั้นตอนสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์จาก ODM ของแต่ละลำรังสีที่ได้จาก
กระบวนการ optimization

3.7.6 ศึกษาผลการกระจายปริมาณรังสีของขั้นตอนวางแผน (optimization plan) กับการ ฉายรังสีจริง (convert plan)

เปรียบเทียบการกระจายปริมาณรังสีที่ได้จากกระบวนการ optimization กับการ
กระจายปริมาณรังสีที่ได้หลังจากการสร้างชุดข้อมูลตำแหน่งของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ของระบบ
วางแผนรังสีรักษา

3.8 ศึกษาลักษณะรังสีเฉพาะของระบบจำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟที่มีผลต่อเทคนิคการฉายรังสีแปร ความเข้ม (Bayouth and Morrill, 2003)

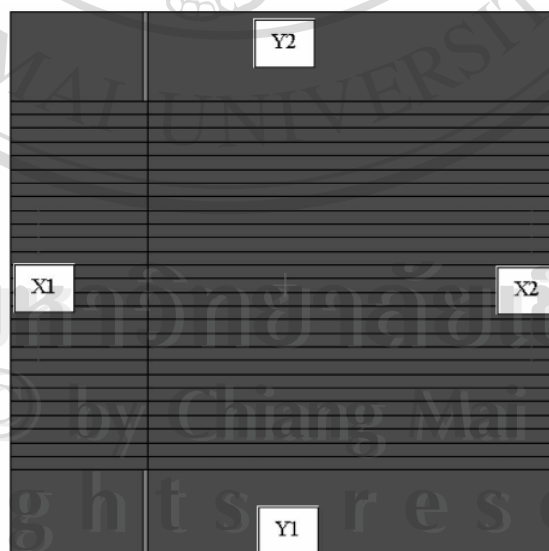
ทำการทดลองศึกษาลักษณะเฉพาะของระบบจำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟ (MLC) โดยใช้
ฟิล์มอีดีอาร์2 วางในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อขนาด 30x30x20 เซนติเมตร โดยระนาบของฟิล์มตั้งฉากกับ
แนวกึ่งกลางลำรังสี ที่ระยะลึก 5 เซนติเมตร ระยะ SAD 100 เซนติเมตร ลักษณะเฉพาะของระบบ
จำกัดลำรังสีแบบมัลติลีฟที่ศึกษาประกอบด้วย

3.8.1 ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (intra-leaf transmission) และ ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านรอยต่อระหว่างมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (inter-leaf transmission)

วัดปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านลิฟและปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านรอยต่อระหว่างลิฟโดยใช้ฟิล์ม 2 แผ่น ฟิล์มแผ่นที่ 1 ฉายรังสีพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร 200 monitor units

ฟิล์มแผ่นที่ 2 ฉายรังสีโดยให้ Y jaw อยู่ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีข้างละ 13.6 เซนติเมตร และลิฟคู่ที่ 1 และคู่ที่ 29 ที่กว้าง 6.5 เซนติเมตร ให้มีช่องว่างระหว่างลิฟที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ส่วนลิฟคู่ที่ 2 ถึงคู่ที่ 28 ที่กว้าง 1 เซนติเมตร ให้ปลายชนกัน ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี ทาง X1 bank มา 10 เซนติเมตร (รูป 3.21) ฉายรังสี 4000 monitor units

ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ นำฟิล์มแผ่นที่ 2 วัดกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ ที่ระยะห่างกันทีละ 2 เซนติเมตร จากระยะห่างจาก กึ่งกลางลำรังสีไปทาง X1 bank เท่ากับ 9 เซนติเมตร จนถึงที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีไปทาง X2 bank เท่ากับ 9 เซนติเมตร จากการใช้โปรแกรม Dovision เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านโดยสอบเทียบเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีที่ได้จากพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะลึกและ monitor unit ที่เท่ากัน



รูป 3.21 แสดงลักษณะรูปร่างของมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ เพื่อวัดปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านลิฟและที่ทะลุผ่านรอยต่อระหว่างลิฟ (Bayouth and Morrill, 2003)

3.8.2 ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านปลายลิฟของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์

วัดปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านปลายลิฟโดยใช้ฟิล์ม 4 แผ่นคือ

ฟิล์มแผ่นที่ 1 ฉายรังสีพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร 200 monitor units

ฟิล์มแผ่นที่ 2, 3, 4 ฉายรังสีโดยให้ Y jaw อยู่ในระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีข้างละ 13.6 เซนติเมตร และลิฟคู่ที่ 1 และคู่ที่ 29 ที่กว้าง 6.5 เซนติเมตร ให้มีช่องว่างระหว่างลิฟที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ส่วน ลิฟคู่ที่ 2 ถึงคู่ที่ 28 ที่กว้าง 1 เซนติเมตร ให้ปลายชนกัน ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีมาทาง X1 bank 10 เซนติเมตร (ฟิล์มแผ่นที่ 2), X2 bank 5 เซนติเมตร (ฟิล์มแผ่นที่ 3), และ 0 เซนติเมตร (ฟิล์มแผ่นที่ 4) แต่ละตำแหน่งที่ปลายของลิฟคู่ที่ 2 ถึงคู่ที่ 28 ชนกัน ใช้ฟิล์ม 1 แผ่น ฉายรังสี 4000 monitor units

ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ สร้างกราฟปริมาณรังสีสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ที่แนวกึ่งกลางของแต่ละลิฟซึ่งขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์ จากฟิล์มทั้ง 3 แผ่น (ฟิล์มแผ่นที่ 2, 3, 4) และสอบเทียบปริมาณรังสีทะลุผ่านเป็นอัตราส่วนร้อยละของปริมาณรังสีที่ได้จากพื้นที่รังสีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะลึกและ monitor unit ที่เท่ากันจากการใช้โปรแกรม Dovision

3.8.3 เงามัว (penumbra) ของพื้นที่รังสีเนื่องจากขอบด้านข้างของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์

วัดเงามัวของพื้นที่รังสีเนื่องจากขอบด้านข้างของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์โดยใช้ฟิล์ม 5 แผ่น แต่ละแผ่นฉายรังสี 300 monitor units โดยให้ Y jaw อยู่ในระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีข้างละ 13.6 เซนติเมตร และลิฟคู่ที่ 1 และคู่ที่ 29 ที่กว้าง 6.5 เซนติเมตร ให้มีช่องว่างที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ส่วนลิฟที่กว้าง 1 เซนติเมตร ให้ปลายชนกัน ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีมาทาง X1 bank 10 เซนติเมตร

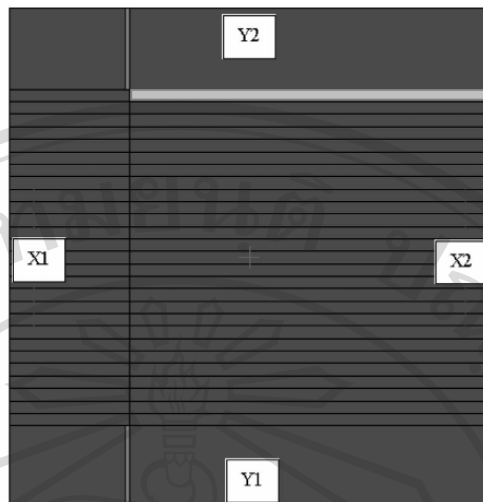
ฟิล์มแผ่นที่ 1 เปิดลิฟตัวที่ 2 (รูป 3.22)

ฟิล์มแผ่นที่ 2 เปิดลิฟตัวที่ 8

ฟิล์มแผ่นที่ 3 เปิดลิฟตัวที่ 15

ฟิล์มแผ่นที่ 4 เปิดลิฟตัวที่ 22

ฟิล์มแผ่นที่ 5 เปิดลิฟตัวที่ 28



รูป 3.22 แสดงการเปิดลิฟต์ตัวที่ 2 ทางด้าน X2 bank ในมัลติลิฟต์คอลลิเมเตอร์ (ดัดแปลงจาก Bayouth and Morrill, 2003)

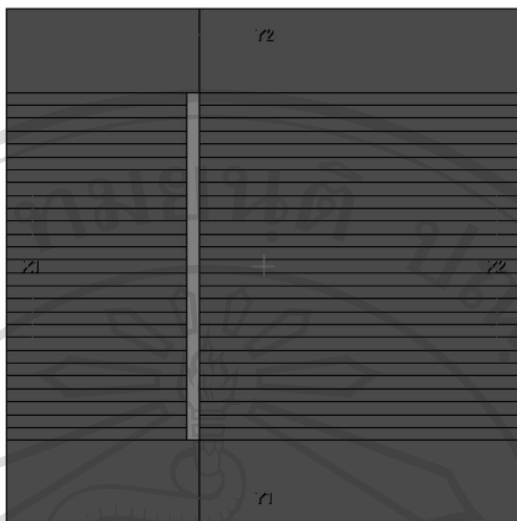
โดยแต่ละลิฟต์ที่เปิดมีระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีมาทาง X2 bank 20 เซนติเมตร
 ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ ใช้โปรแกรม Dovision สร้างกราฟปริมาณรังสีสัมผัสที่
 เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมัลติ
 ลิฟต์คอลลิเมเตอร์ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีไปทาง X1 bank เท่ากับ 9 เซนติเมตร จนถึงที่
 ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีไปทาง X2 bank เท่ากับ 5 เซนติเมตร หาเงามัวจากระยะระหว่าง
 ปริมาณรังสี 80 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณรังสีที่กึ่งกลางลำรังสีในแต่ละกราฟ

3.8.4 เงาของพื้นที่รังสีเนื่องจากปลายของมัลติลิฟต์คอลลิเมเตอร์

วัดเงามัวของพื้นที่รังสีเนื่องจากปลายของมัลติลิฟต์คอลลิเมเตอร์ โดยใช้ฟิล์ม 3
 แผ่น แต่ละแผ่นฉาย 300 monitor units โดยให้ Y jaw อยู่ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีข้างละ 13.6
 เซนติเมตร และลิฟต์ที่ 1 และที่ 29 ที่กว้าง 6.5 เซนติเมตร ให้ปลายชนกัน ส่วนลิฟต์ที่กว้าง 1
 เซนติเมตร ให้มีช่องว่างระหว่างปลายลิฟต์ที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยที่

ฟิล์มแผ่นที่ 1 ช่องว่างระหว่างปลายลิฟต์อยู่ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี มาทาง
 X1 bank 10 เซนติเมตร (รูป 3.23)

ฟิล์มแผ่นที่ 2 ช่องว่างระหว่างปลายลิฟต์อยู่ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี มาทาง
 X2 bank 5 เซนติเมตร



รูป 3.23 แสดงปลายลิฟของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์ ที่อยู่ตรงข้ามกันซึ่งห่างกัน 1 เซนติเมตร มีระยะจากแนวกึ่งกลางลำรังสีมาทาง X2 bank เป็นระยะ 10 เซนติเมตร (Bayouth and Morrill, 2003)

ฟิล์มแผ่นที่ 3 ช่องว่างระหว่างปลายลิฟอยู่ที่กึ่งกลางลำรังสี

ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ ใช้โปรแกรม Dovision สร้างกราฟปริมาณรังสีสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ที่แนวกึ่งกลางของแต่ละลิฟซึ่งขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์ จากฟิล์มทั้ง 3 แผ่น หาแนวโน้มจากระยะระหว่างปริมาณรังสี 80 ถึง 20 เปอร์เซนต์ของปริมาณรังสีที่กึ่งกลางลำรังสีในแต่ละกราฟ

3.8.5 ความถูกต้องของตำแหน่งมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์

ความถูกต้องของตำแหน่งมัลติลิฟคอลลิเมเตอร์ สามารถหาได้จากการฉายรังสีโดยใช้ฟิล์ม 1 แผ่น โดยกำหนดให้ Y jaw อยู่ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสีข้างละ 13.6 เซนติเมตร และลิฟคู่ที่ 1 และคู่ที่ 29 ที่กว้าง 6.5 เซนติเมตร ให้ปลายชนกัน ส่วนลิฟที่กว้าง 1 เซนติเมตร ให้มีช่องว่างระหว่างลิฟที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ที่แนวตั้งจากการเคลื่อนที่ 5 ตำแหน่ง คือที่ระยะห่างจากกึ่งกลางลำรังสี มาทาง X1 bank 10 เซนติเมตร, 5 เซนติเมตร, 0 เซนติเมตร และทาง X2 bank 10 เซนติเมตร, 5 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งฉายรังสี 100 monitor units

ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ ใช้โปรแกรม Dovision สร้างกราฟปริมาณรังสีสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของลำรังสี ที่แนวกึ่งกลางของแต่ละลิฟซึ่ง

ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมัลติสปีคอลลิเมเตอร์ หาค่าหนึ่งแต่ละสปีคจากตำแหน่งกึ่งกลางที่อยู่ระหว่างปริมาณรังสี 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณรังสีที่กึ่งกลางลำรังสีในแต่ละกราฟ

3.9 ศึกษาขนาดของหัววัดปริมาณรังสีที่มีผลต่อการทวนสอบปริมาณรังสีในเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้ม

ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีและขนาดพื้นที่รับรังสีต่อขนาดของหัววัดรังสีชนิดแตกตัว โดยวางหัววัดรังสีชนิดแตกตัวที่มีขนาด 0.6 และ 0.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy Cube ที่กึ่งกลางลำรังสี วัดปริมาณรังสีที่ฉายรังสีด้วย monitor unit และพื้นที่รังสีที่แตกต่างกัน

3.10 ศึกษาคุณสมบัติและวิธีการที่มีผลต่อฟิล์มในการทวนสอบการกระจายรังสีในเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้ม

ทำการทดลองศึกษาคุณสมบัติ วิธีการที่มีอิทธิพลกระทบต่อประสิทธิภาพของฟิล์มเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างกระบวนการใช้ฟิล์มในการทวนสอบปริมาณและการกระจายรังสีในการรักษาด้วยเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มประกอบด้วย

3.10.1 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงวิธีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดำของฟิล์มและปริมาณรังสี

ใช้ฟิล์มอีดีอาร์ 2 วัดรังสีโฟตอนพลังงาน 6 ล้านโวลต์ ที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (Siemens, Primus) ใส่ฟิล์มในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube โดยระนาบของฟิล์มตั้งฉากกับแนวกึ่งกลางลำรังสีที่ระยะลึก 5 เซนติเมตร (รูป 3.24) ฉายรังสีฟิล์มด้วยปริมาณรังสีรวมที่ทราบค่าต่าง ๆ กันเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดำของฟิล์มอีดีอาร์ 2 กับปริมาณรังสี ด้วยวิธีฉายรังสีต่างกัน 2 เทคนิค คือเทคนิค step wedge และเทคนิค single film

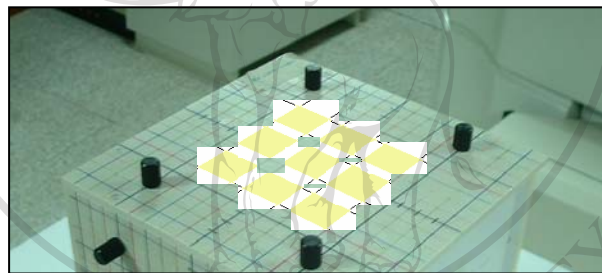
3.10.1.1 เทคนิค step wedge ใช้ฟิล์ม 2 แผ่น แต่ละแผ่นฉายรังสีด้วยพื้นที่ 10 x 10, 8 x 10, 6 x 10, 4 x 10 และ 2 x 10 เซนติเมตร ด้วยปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน

3.10.1.2 เทคนิค single film ฉายรังสีฟิล์มด้วยพื้นที่ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร จำนวน 9 ตำแหน่ง (3 แถว 3 คอลัมน์) บนฟิล์ม 1 แผ่นโดยมีระยะห่างกัน 1 เซนติเมตร (รูป 3.25)

ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ อ่านค่าความดำ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดำและปริมาณรังสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการ



รูป 3.24 แสดงการฉายรังสีโดยใช้ฟิล์มอีดีอาร์ 2 วัดรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาค (Primus, Siemens) ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube



รูป 3.25 แสดงการฉายรังสีโดยเทคนิค single film โดยใช้ฟิล์มอีดีอาร์ 2 วัดในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube (สีเหลืองแสดงพื้นที่รังสีที่ฉายในแต่ละตำแหน่ง)

3.10.2 ศึกษาผลของระยะเวลาระหว่างฉายรังสีฟิล์มต่อความดำของฟิล์ม

ใช้ฟิล์มอีดีอาร์ 2 วัดในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube ด้วยพื้นที่รังสี 10 x 10 เซนติเมตร จำนวน 10 ครั้ง แต่ครั้งฉายรังสี 20 Monitor Unit โดยระยะของฟิล์มตั้งฉากกับแนวกึ่งกลางลำรังสี โดยฟิล์มแผ่นแรกฉายอย่างต่อเนื่อง ส่วนฟิล์มแผ่นที่สองฉายรังสีแต่ละครั้งห่างกัน 2 นาที ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ อ่านค่าความดำ เปรียบเทียบค่าความดำของฟิล์มทั้ง 2 แผ่น

3.10.3 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงทิศทางระนาบของฟิล์มกับแนวตั้งกลางลำรังสี

ใช้ฟิล์มอีดีอาร์ 2 วัดในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube ฉายรังสีด้วยวิธี step wedge โดยระนาบของฟิล์มตั้งฉากและขนาน (parallel orientation) กับแนวตั้งกลางลำรังสี แต่ละระนาบใช้ฟิล์ม 2 แผ่นด้วยปริมาณรังสีที่ต่างกัน แต่ละแผ่นฉายรังสีด้วยพื้นที่ 10 x 10, 8 x 10, 6 x 10, 4 x 10 และ 2 x 10 เซนติเมตร ล้างฟิล์มด้วยเครื่องล้างฟิล์มอัตโนมัติ อ่านค่าความดำ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดำและปริมาณรังสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางระนาบของฟิล์มกับแนวตั้งกลางลำรังสี

3.11 ศึกษาการทวนสอบปริมาณและการกระจายรังสีสำหรับเทคนิคการฉายรังสีแปรความเข้ม

ทวนสอบการคำนวณ monitor unit สำหรับเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้ม ด้วยการวัดแบบจุดโดยใช้หัววัดรังสีชนิดแตกตัว และด้วยการวัดแบบการกระจายปริมาณรังสีโดยใช้ฟิล์มเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรมวางแผนรักษา

การประเมินแผนรังสีรักษาของการฉายรังสีแปรความเข้มด้วยการวัดปริมาณรังสีแบบจุด การทวนสอบแผนรังสีรักษาด้วยการวัดปริมาณรังสีแบบจุด ใช้วิธีการคำนวณความแตกต่างของปริมาณรังสีระหว่างการวัดแบบจุดกับการคำนวณจากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาดังสมการ (3.11) (Dong and others, 2003)

$$Dose_{dif} = \frac{Dose_{calc} - Dose_{meas}}{Dose_{meas}} \times 100 \quad (3.11)$$

เมื่อ $Dose_{dif}$ = ความแตกต่างของปริมาณรังสีระหว่างการวัดและการคำนวณ

$Dose_{calc}$ = ปริมาณรังสีที่ได้การคำนวณในตำแหน่งที่วางหัววัดรังสี

$Dose_{meas}$ = ปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดและการคำนวณโดยใช้สมการ (3.12)

$$Dose_{meas} = \sum_i^n R_i (cGy) \times TPC_{IMRT} \times DF \quad (3.12)$$

เมื่อ R_i = ค่าที่อ่านได้จากหัววัดรังสีเมื่อฉายพื้นที่รังสีย่อย i โดย n คือจำนวนพื้นที่รังสีย่อยทั้งหมด

TPC_{IMRT} = temperature and pressure correction factor สำหรับการฉายรังสีแปรความเข้ม

DF = ion chamber dose factor โดยหาได้จากสมการ (3.13)

$$DF = \frac{CDO \times TMR_d \times MU_{10 \times 10}}{TPC_{10 \times 10} \times R_{10 \times 10}} (cGy / Rdg) \quad (3.13)$$

โดย CDO = ปริมาณรังสีต่อ monitor unit (cGy/MU) ที่เครื่องฉายรังสีถูกสอบเทียบไว้ที่ระยะลึกที่มีปริมาณรังสีสูงสุดของพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร ที่ SAD = 100 เซนติเมตร

TMR_d = ค่า tissue maximum ratio ของระยะลึกที่วางหัววัดรังสี

$MU_{10 \times 10}$ = ค่า monitor unit ที่ใช้ฉายรังสีของพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร

TPC_{IMRT} = ค่า temperature and pressure correction factor สำหรับการฉายรังสีของพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร

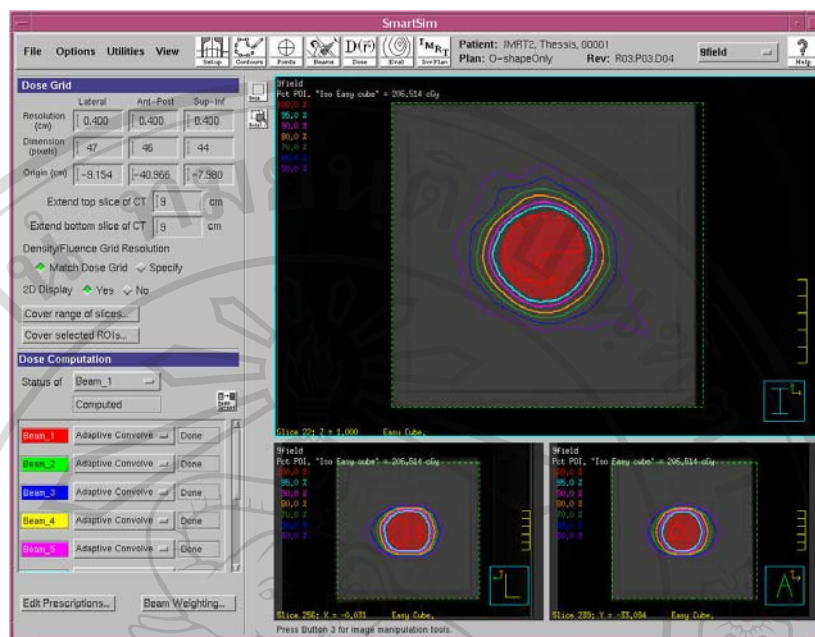
$R_{10 \times 10}$ = ค่าที่อ่านได้จากหัววัดรังสีเมื่อฉายพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร

การประเมินแผนรังสีรักษาของการฉายรังสีแปรความเข้มด้วยการกระจายปริมาณรังสี

การทวนสอบแผนรังสีรักษาด้วยการวัดการกระจายปริมาณรังสี ใช้วิธีการคำนวณค่าดัชนีแกมมา (γ) โดยกำหนดเกณฑ์การยอมรับสำหรับระยะห่างระหว่างการกระจายปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเทียบกับการกระจายปริมาณรังสีที่เท่ากันที่ได้จากการวัดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเทียบกับปริมาณรังสีที่ตำแหน่งเดียวกันกับการวัดเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยถ้า $\gamma(r_m) \leq 1$ แสดงการคำนวณผ่านเกณฑ์การยอมรับ แต่ถ้า $\gamma(r_m) > 1$ แสดงการคำนวณไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับ (Low and others, 1998; Buccioli and others, 2004)

3.11.1 ทวนสอบปริมาณรังสีโดยการวัด

วางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube ด้วยเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มแบบ step and shoot อย่างง่าย โดยกำหนดให้รูปร่างของเป้าหมายบนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเป็นรูปใด ๆ (รูป 3.26) จากนั้นวัดปริมาณรังสีในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อที่ใช้ในการวางแผนด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชัน เทียบกับปริมาณรังสีที่คำนวณได้ที่ตำแหน่งเดียวกันจากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาจำนวน 10 แผนการรักษา วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



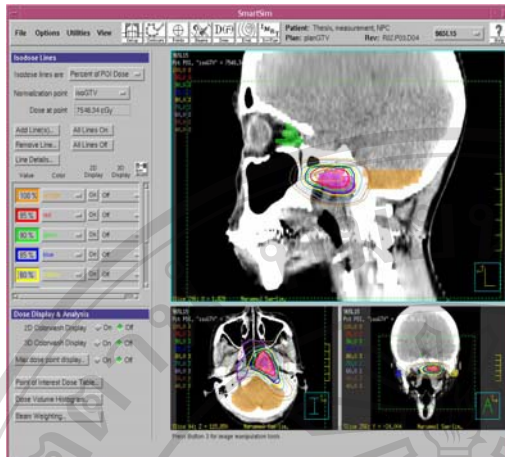
รูป 3.26 การวางแผนรังสีรักษาโดยการกำหนดรูปร่างของเป้าหมายบนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเป็นรูปทรงกลม

3.11.2 ทวนสอบการกระจายปริมาณรังสีโดยฟิล์ม

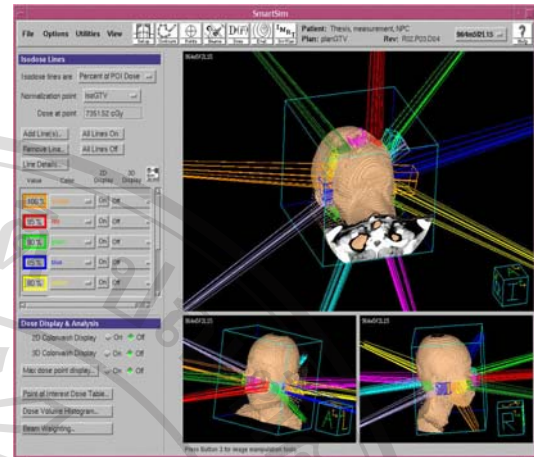
วางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube ด้วยเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มแบบ step and shoot โดยทำการวัดการกระจายรังสีด้วยฟิล์มอีดีอาร์ 2 ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อที่ใช้ในการวางแผน เปรียบเทียบกับการกระจายรังสีที่คำนวณได้จากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษา โดยกำหนดให้รูปร่างของเป้าหมายบนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเป็นรูปใด ๆ จำนวน 10 แผนการรักษา ประเมินความแตกต่างระหว่างการวัดและคำนวณการกระจายรังสีทางสถิติด้วยค่าดัชนีแกมมาในบริเวณที่มีการกระจายปริมาณรังสีมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และน้อยกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณรังสีที่วัดได้จากกึ่งกลางฟิล์มโดยใช้โปรแกรม Dovision

3.11.3 ทวนสอบปริมาณรังสีของแผนรังสีรักษาผู้ป่วยโดยการวัด

วางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของผู้ป่วยด้วยเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มแบบ step and shoot (รูป 3.27) คัดลอกแผนรังสีรักษาผู้ป่วยลงบนวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube (รูป 3.28) จากนั้นวัดปริมาณรังสีในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อที่ใช้ในการวางแผนด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชัน เทียบกับปริมาณรังสีที่คำนวณในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อที่ตำแหน่งเดียวกันจากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาจำนวน 10 แผนการรักษา วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

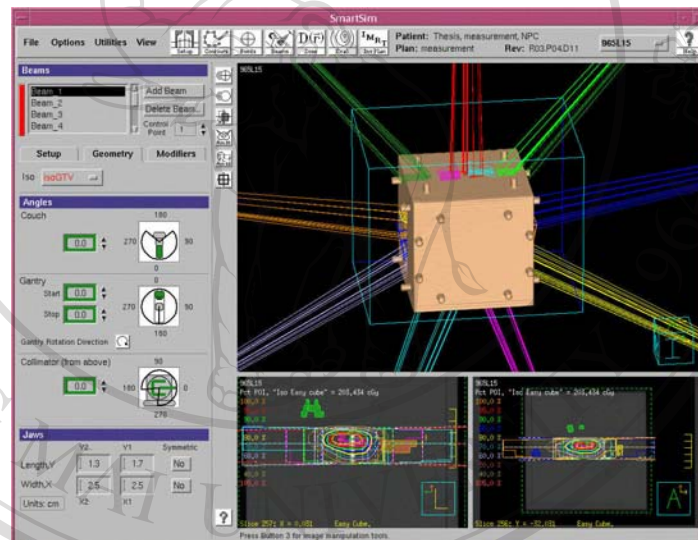


(ก)



(ข)

รูป 3.27 แสดงการวางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของผู้ป่วยด้วยภาพ 2 มิติ (ก) และ 3 มิติ (ข)



รูป 3.28 แสดงแผนรังสีรักษาผู้ป่วยที่คัดลอกกลบนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube

3.11.4 ทวนสอบการกระจายปริมาณรังสีของแผนรังสีรักษาผู้ป่วยโดยฟิล์ม

วางแผนรังสีรักษาบนภาพซีทีของผู้ป่วยด้วยเทคนิคฉายรังสีแปรความเข้มแบบ step and shoot คัดลอกการวางแผนรังสีรักษาผู้ป่วยลงบนวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อ Easy cube จากนั้นวัดการกระจายรังสีด้วยฟิล์มอิตีอาร์ 2 ในวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อที่ใช้ในการวางแผน เพื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายรังสีที่คำนวณได้จากโปรแกรมวางแผนรังสีรักษาจำนวน 10 แผนการรักษา ประเมินความแตกต่างระหว่างการวัดและคำนวณการกระจายรังสีทางสถิติด้วยค่าดัชนีเกมมาโนบริเวณที่มีการกระจายปริมาณรังสีมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และน้อยกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณรังสีที่วัดได้จากกึ่งกลางฟิล์ม