



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะ
วางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา”

โดย ดร.ศรรัตน์ มหาศรานนท์ และคณะ

พฤศจิกายน 2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะ วางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา”

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดร.ศรรัตน์ มหาศรานนท์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อู่ดี	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3. ผศ.ดร.ภัสสุรีย์ ชีพสมนต์	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
4. นายสมบัติ บุญขวาง	หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาล พุทธชินราช

ชุดโครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วย
โรคมะเร็ง”

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย รหัสโครงการ RDG5750113 ที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำชิ้นงานและการทดสอบชิ้นงาน ตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลอง ขอขอบคุณภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบการประยุกต์ใช้หุ่นจำลองสำหรับจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อผู้ใช้งานหุ่นจำลอง

รายงานการวิจัยนี้มีความสมบูรณ์โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านจากหน่วยงานดังกล่าวข้างต้นมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร.....	10
ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	10
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
ผลการดำเนินงาน	11
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	11
สรุปผลการวิจัย	12
ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม.....	12
ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	12
ABSTRACT.....	15
บทที่ 1	16
ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	16
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	17
บทที่ 2	18
ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย	18
บทที่ 3	33
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
สมมติฐานการวิจัย	33
ระเบียบวิธีวิจัย.....	33
บทที่ 4	45
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	45
บทที่ 5	88
สรุปผล.....	88
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom	19
ภาพที่ 2	หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom.....	20
ภาพที่ 3	หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom	20
ภาพที่ 4	หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)	21
ภาพที่ 5	การจัดท่าของผู้ป่วยบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า Triangular wedge หรือ Breast board.....	26
ภาพที่ 6	แสดงเทคนิคการฉายรังสีของเต้านมบริเวณ Chest wall, Supraclavicular lymph nodes field และ Internal mammary field	28
ภาพที่ 7	แสดงเทคนิคการฉายรังสี lateral tangential field ของเต้านม ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาแบบ conventional 2D tangential field.....	28
ภาพที่ 8	แสดงเทคนิคการจำลองการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009).....	29
ภาพที่ 9	แสดงการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)	29
ภาพที่ 10	แสดงภาพเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)	30
ภาพที่ 11	การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ (Barrett, et al., 2009).....	30
ภาพที่ 12	ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของเต้านม	32
ภาพที่ 13	เครื่องมือทดสอบความแข็งชนิด Durometer Hardness Tester	36
ภาพที่ 14	เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึงชนิด Tensile Testing.....	37
ภาพที่ 15	Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing.....	38
ภาพที่ 16	Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermalgravimeitric Analysis (TGA).....	40
ภาพที่ 17	การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200-6,000 cGy.....	42
ภาพที่ 18	แม่แบบหุ่นจำลองจากดินเหนียวตั้งแต่ส่วนคอถึงสะโพก	45
ภาพที่ 19	ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ.....	46
ภาพที่ 20	Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ.....	47
ภาพที่ 21	Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	48
ภาพที่ 22	Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	48

ภาพที่ 51 การฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV อัตราปริมาณรังสี 300 cGy/minute ปริมาณรังสีตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy	66
ภาพที่ 52 เปรียบเทียบความแข็งแรงด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	67
ภาพที่ 53 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	68
ภาพที่ 54 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	69
ภาพที่ 55 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	69
ภาพที่ 56 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	70
ภาพที่ 57 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน	71
ภาพที่ 58 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรงออกจากดินเหนียว	72
ภาพที่ 59 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรงอกที่ทำจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์	73
ภาพที่ 60 ผลการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ด้านหลัง	73
ภาพที่ 61 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ที่สามารถประกบกันอย่างพอดี	74
ภาพที่ 62 หุ่นจำลองทรงอกยาวพาราก่อนการตกแต่งและทำสีที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซิน	74
ภาพที่ 63 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นปอดจำลองจากปูนปลาสเตอร์	75
ภาพที่ 64 แม่พิมพ์ปอดที่สร้างจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์	75
ภาพที่ 65 การยัดแม่พิมพ์ปอดจำลองทั้งสองซีกให้แน่นสนิทด้วยน็อต	76
ภาพที่ 66 ปอดจำลองยาวพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์	76
ภาพที่ 67 การประเมินค่าความสม่ำเสมอหุ่นจำลองทรงอกจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา	77
ภาพที่ 68 การประเมินค่าความสม่ำเสมอภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาหุ่นจำลองทรงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านม	78
ภาพที่ 69 การประเมินค่าความสม่ำเสมอจากภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา	79
ภาพที่ 70 การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา Pinnacle ทิศทางลำรังสี medial และ lateral tangential fields จุดหมุนระหว่างลำรังสีอยู่ในกึ่งกลางลำรังสีซึ่งเป็นตำแหน่งหัววัดรังสี (ลูกศรชี้)	80

ภาพที่ 71 การวางแผนการรักษาที่ใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge ขนาด 15 องศาเพื่อชดเชยส่วนของเนื้อเยื่อเต้านม (หัวลูกศรสีเหลืองแสดง wedge ทั้งสองทิศทาง).....	80
ภาพที่ 72 ภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal view) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal view).....	82
ภาพที่ 73 ภาพหุ่นจำลองทรวงอกในลักษณะภาพ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางกำหนดลำรังสี.....	82
ภาพที่ 74 การใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก่อนมะเร็ง	83
ภาพที่ 75 การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ของเทคนิคการแผนการรักษาแบบ 3 มิติ	83
ภาพที่ 76 ผลการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร.....	84
ภาพที่ 77 การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ	85
ภาพที่ 78 ช่องเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีบริเวณใต้ราวนมขวาของหุ่นจำลอง ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสีอยู่ตำแหน่งจุดหมุนอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี	86
ภาพที่ 79 การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกในทิศทาง lateral และ medial tangential ด้วยเครื่องอนุภาค ..	86

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง ปี 2550–2554 (ภัทรไพบูลย์ชัย, 2554)	22
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	23
ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (วิจิตชลชัย, 2550).....	35
ตารางที่ 4 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา	35
ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่อเต้านมชนิดต่างๆ.....	39
ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมของปอดและเนื้อเยื่อ.....	39
ตารางที่ 7 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ	41
ตารางที่ 8 เวลาการเริ่มจับตัวของน้ำยางของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนา.....	46
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ.....	51
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ	58
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ.....	67
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองทรวงอก	78

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะวางแผนการรักษา
มะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาอังกฤษ) Development of Thorax Phantom for Radiation Treatment
Planning Practice of Breast Cancer

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ผู้เสนอ : ดร. ศรรัตน์ มหาศรานนท์

หน่วยงานต้นสังกัด : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

หน่วยงานร่วมโครงการ : คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช
ภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร

ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

โรคมะเร็งเต้านมพบมากที่สุดในผู้หญิงทั่วโลกและเป็นสาเหตุการตายเป็นอันดับสองรองจากมะเร็งปอด การฉายรังสีด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นการรักษาที่สามารถกำจัดการก่อตัวและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายหลักของรังสีรักษาได้แก่การบรรเทาอาการหรือเพื่อรักษาให้หายขาดจากการเป็นโรคมะเร็ง การให้รังสีปริมาณสูงในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมยังต้องการความถูกต้องสูงเพื่อป้องกันภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยหากเกิดการผิดพลาดจากการให้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าปกติอาจส่งผลให้ไม่สามารถรักษามะเร็งหายขาดและมีโอกาสเกิดเป็นซ้ำได้อีก ในทางกลับกันหากให้ปริมาณรังสีที่มากเกินไปอาจทำให้อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ขึ้นได้

การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีความสำคัญในกระบวนการจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งก่อนการรักษาและในขณะที่ทำการรักษาได้ การฉายรังสีเพื่อการรักษามะเร็งเต้านมโดยปกติแล้วใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงระดับ 6 MV และปริมาณรังสีที่ให้ค่อนข้างสูงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการรักษาให้หายขาดหรือประคับประคองอาการ การกำหนดปริมาณรังสีเพื่อการรักษาก่อนมะเร็งต้องการความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมากเพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการฉายรังสี การตรวจสอบปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากหุ่นจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีดังกล่าวที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์มีราคาแพงมากทำให้ประเทศไทยมีใช้เฉพาะในหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาหุ่นจำลองดังกล่าวขึ้นใช้เองในราคาถูกเพื่อประเมินค่าปริมาณรังสีจะช่วยให้การรักษามะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษาในหน่วยงานต่างๆ ทั่วประเทศมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้ป่วยจะมีโอกาสหายและลดภาวะแทรกซ้อนจากการรักษาได้เป็นอย่างมาก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีในขั้นตอนการวางแผนการรักษาและจำลองการรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านม
2. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งชนิดอื่นๆ ในงานรังสีรักษา

ผลการดำเนินงาน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นเพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัว โดยได้ทำการหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ SSF ที่สามารถทำให้หุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการ ทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพาราด้านความหนาแน่น (Density) ความแข็ง (Hardness) การทนแรงดึง (Tensile strength) ทดสอบทนแรงฉีกขาด และทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ทำการทดสอบหาคุณสมบัติของน้ำขึ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยนำหุ่นยางพาราไปฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) บริษัท Varian รุ่น 2100CD ปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน

ทำการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองจากหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวประกอบด้วยอวัยวะส่วนคอถึงเอวเพื่อสร้างเป็นหุ่นจำลองทรวงอก แม่พิมพ์สร้างจากไฟเบอร์ผสมเรซิน สำหรับการสร้างแม่พิมพ์ปอดจำลองใช้วิธีการเดียวกันกับหุ่นจำลองทรวงอก การขึ้นรูปหุ่นจำลองทรวงอกใช้วิธีบรรจุปอดภายในแม่พิมพ์ทรวงอกจากนั้นเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีลงในแม่พิมพ์ โดยระหว่างการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

การวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับแผนการรักษาประกอบด้วยการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ การทดสอบวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกเพื่อประเมินความสามารถในการนำหุ่นจำลองไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษา จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อฉายรังสี จัดตำแหน่งการฉายรังสีของหุ่นจำลองตามแผนการรักษาและใส่หัววัดรังสีในช่องใส่หัววัดรังสีซึ่งอยู่ในเต้านมขวา ทำการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค นำค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของการออกแบบหุ่นจำลองและสร้างแม่แบบด้วยดินเหนียวทำให้ได้แม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ที่มีความคงทนและแข็งแรงสามารถประกบกันได้อย่างพอดี ขอบและบริเวณรอยต่อมีความสมดุลซึ่งจะทำให้ไม่ปรากฏเห็นเป็นขอบรอยต่อที่ตัวหุ่นยางพาราภายหลังจากการขึ้นรูป บริเวณรอยต่อที่ประกบกันบนแม่พิมพ์จะถูกยึดด้วยนอตโดยรอบเพื่อให้แม่พิมพ์คงรูปอยู่ได้ขณะทำการเทน้ำยางพารา ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกทั้งเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เมื่อนำค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาพบว่าค่าความแตกต่างปริมาณรังสีเท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการปลดปล่อยปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคและการคำนวณค่าปริมาณรังสีของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ซึ่งส่งผลให้การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากหากกำหนดปริมาณรังสีให้ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องส่งผลให้สามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้ดีและเนื้อเยื่อปกติได้รับปริมาณรังสีน้อยทำให้ลดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีได้ดี นอกจากนี้หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถจัดตำแหน่งสำหรับการฉายรังสีได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกจากยางพาราสำหรับใช้ในการตรวจสอบและวัดค่าปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการฉายรังสีเอกซ์พลังงานสูงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกทำให้ได้หุ่นจำลองตามขนาดที่ต้องการ โดยมีสัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว รอบเอว 34 นิ้ว ภายในหุ่นจำลองบรรจุปอดเพื่อให้สามารถทำการวางแผนการรักษาได้เหมือนกับมนุษย์จริง และเจาะรูให้มีขนาดเท่ากับหัววัดรังสีที่ไดนามิควาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอก สำหรับการสร้างแม่พิมพ์สำหรับหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมด้วยวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์พบว่าสามารถใช้ในการหล่อแบบได้ดี โดยผิวของหุ่นจำลองมีความเรียบเนียน การยึดแม่พิมพ์ที่ประกบกันด้วยน็อตสามารถช่วยลดการรั่วไหลของน้ำยางพาราขณะเทเพื่อหล่อแบบได้อย่างดี

สำหรับการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับสร้างหุ่นจำลองด้วยการทดสอบตัวอย่างยางจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นสรุปได้ว่าปริมาณการเติม SSF ในตัวอย่างยางเพื่อให้ยางจับตัวและอบแห้งได้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง โดยพบว่า การเติม SSF ในตัวอย่างยางปริมาณมากขึ้นทำให้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวเร็วขึ้น และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลง หุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่น 0.87 g/cm^3 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อ ผลการทดสอบการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นด้วยการฉายรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคของการรักษาเทคนิคการรักษาสองมิติและสามมิติ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% สำหรับเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติตามลำดับ ผลความแตกต่างมีค่าไม่เกินข้อกำหนด 3% ทำให้สรุปได้ว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นจากยางพาราในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการตรวจสอบความถูกต้องของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคตามแผนการรักษา การตรวจสอบค่าปริมาณรังสีดังกล่าวเป็นการประกันคุณภาพเครื่องมือและแผนการรักษาเพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระบวนการรักษาด้วยรังสีรักษาที่มีพลังงานสูงมีความถูกต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดภาวะแทรกซ้อนจากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาดได้

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองทรวงอกยางพาราที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์สามารถนำไปใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงสำหรับตรวจสอบการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม ผลที่ได้จากการตรวจสอบปริมาณรังสีเป็นการประกันคุณภาพการรักษาเพื่อให้การกำหนดปริมาณรังสีสำหรับการรักษามีความถูกต้องแม่นยำและป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากความผิดพลาดที่เกิดจากอวัยวะปกติได้รับรังสีส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปใช้ในการฝึกหัดทักษะเพื่อเพิ่มทักษะให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา เช่น นิสิตแพทย์ นิสิตฟิสิกส์การแพทย์ นิสิตรังสีเทคนิค หรือนิสิตพยาบาล เป็นต้น นอกจากนี้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าปริมาณรังสีโรคมะเร็งปอดและมะเร็งตับได้ โดยการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีที่ปอดและตับเพื่อศึกษาปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้เนื่องจากหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นและคุณสมบัติเหมือนมนุษย์ตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

เผยแพร่ให้ผู้สนใจโดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษาและหน่วยงานการศึกษาที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความ

ถูกต้องของการรักษาด้วยการฉายรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับโรคมะเร็งเต้านม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฝึกทักษะการปฏิบัติงานทางรังสีรักษาเพื่อการรักษาโรคมะเร็งและเพื่อการเรียนการสอนจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมได้

บทคัดย่อ

โรคมะเร็งเต้านมพบมากในหญิงไทยและมีแนวโน้มเพิ่มจำนวนมากขึ้น การรักษาด้วยวิธีรังสีรักษามีบทบาทที่สำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นวิธีการรักษาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่การให้ปริมาณรังสีที่สูงเพื่อการรักษาจำเป็นที่จะต้องระมัดระวังอย่างมากเพื่อให้การรักษาโรคมะเร็งมีความถูกต้องสูง อย่างไรก็ตามสามารถทำการตรวจสอบปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกเพื่อประเมินความถูกต้องการปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างหุ่นจำลองทรวงอกผู้ป่วยสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งเต้านม โดยสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกซึ่งออกแบบให้มีรูปร่างตามขนาดมาตรฐานหญิงไทยและหุ่นจำลอง Alderson Rando Phantom แม่พิมพ์ผลิตจากเรซินผสมไฟเบอร์กลาส งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรน้ำยาพาราฟินสำหรับสร้างหุ่นจำลองทรวงอกจากน้ำยาพาราฟินผสมสารเคมีและสารตัวเติมซึ่งหุ่นจำลองประกอบเนื้อเยื่อและปอดที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยเนื้อเยื่อมีความหนาแน่น 0.87 g/cm^3 สำหรับกระบวนการขึ้นรูปยาพาราฟินหลังจากผสมน้ำยาพาราฟินกับสารเคมีและตัวเติมต่างๆ ลงไปในแม่พิมพ์แล้วทำการอบให้ความร้อน หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถคงสภาพอยู่ได้ตามแบบที่ต้องการ มีความแข็ง และมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและการฉายรังสีในปริมาณ 200-6,000 cGy โดยทำการทดสอบความคงทนต่อการฉายรังสีประเมินด้วยการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน ผลการศึกษาวิจัยพบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งเต้านมได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีแผนการรักษา 2 และ 3 มิติมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ หุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกได้จริง นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมยาพาราฟินของประเทศไทยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ได้

คำสำคัญ หุ่นจำลองทรวงอก วางแผนการรักษา มะเร็งเต้านม รังสีรักษา น้ำยาพารา

Abstract

Breast cancer is the most common form of female cancer in Thailand and it has still increasing very rapidly. Radiation therapy is an essential part of the treatment of breast cancer because it is high efficiency treatment. The use of high dose radiation therapy requires appropriate patient setup to ensure the desired accuracy of the dose to the tumor. However, the accuracy of radiation dose has to verify in thorax phantom. Consequently, the purpose of this study was to develop thorax phantom for verification of radiation treatment in breast cancer. A mold of the thorax phantom was designed by using reference Thai women standard body size and Alderson Rando phantom. This mold was made from polyester resin-fiber glass. In this research, formulation of the latex rubber was developed to produce this phantom, which composed of 2 parts, which was soft tissue and a lung, and each part had different mass density, with the soft tissue part having density of 0.87 g/cm^3 . In a subsequent stage, the developed formulation used the latex rubber with vulcanizing agent, additives and filler to produce the phantom at 100°C , 2-3 hours. The phantom product has a high tensile strength and good resistance to aging and radiation resistance in range of 200-6,000 cGy. The results of the radiation resistance testing have shown in terms of the mechanical properties and thermal property. As the result, the thorax phantom could be used for dose verification in clinical practice for breast cancer treatment planning. Furthermore, it could be used for dose verification in breast cancer treatment. The percentage of dose difference between measured and calculated of 2D and 3D treatment planning were 2.3% and 1.8%, respectively. In conclusion, thorax phantom play an important role for treatment planning dose verification, and it can be used practically. Additionally, the natural latex rubber can be used to produce medical phantoms perfectly.

Keywords Thorax Phantom, Radiation Treatment Planning, Breast Cancer, Radiation Therapy, Latex Rubber

บทที่ 1

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

มะเร็งเต้านมเป็นโรคที่พบบ่อยมากในประเทศไทยโดยเฉพาะในเพศหญิง จากข้อมูลของสถาบันมะเร็งแห่งชาติปี พ.ศ. 2552 ถึงปัจจุบัน พบว่ามะเร็งเต้านมเป็นมะเร็งที่พบบ่อยที่สุดในผู้หญิงทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยและเป็นสาเหตุการตายจากมะเร็งเป็นอันดับสองรองจากมะเร็งปอด (ศรีมนินทร์นิมิต, 2555) เท่านั้น อัตราการเกิดโรคของผู้หญิงทั่วไปมีโอกาสที่จะเป็นมะเร็งได้ถึง 1 ใน 10 ในช่วงหนึ่งของชีวิต (ชมรมฟื้นฟูสุขภาพมะเร็ง, 2553; ทวีศรี, สุวดีพิงศ์, ตันตะพลิน, กุลตวนิช, & สกุรัตน์; โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์) ด้วยเหตุนี้รัฐบาลจึงได้มีการตื่นตัวและให้ความสำคัญต่อการตรวจวินิจฉัยและการรักษาโรคมะเร็งเต้านมมากยิ่งขึ้น เพื่อลดปัญหาจากการสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจและสังคมไทย จากสถานการณ์มะเร็งเต้านมที่นับวันจะมีจำนวนที่มากขึ้นการรักษาด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก (Podgorsak, 2005) ปัจจุบันการรักษามะเร็งเต้านมมีหลายวิธีการได้แก่ การผ่าตัด การฉายรังสี การใช้ยาเคมีบำบัด และการรักษาด้วยฮอร์โมน จากการรักษาด้วยวิธีการต่างๆ นั้น การฉายรังสีด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นการรักษาที่มีประสิทธิภาพโดยสามารถกำจัดก้อนเนื้อและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายหลักของรังสีรักษาได้แก่การบรรเทาอาการหรือเพื่อรักษาให้หายขาดจากการเป็นโรคมะเร็ง (หล่อวิทยา, เทพมงคล, พรหมรัตน์พงศ์, & เทชะพิบูล, 2544)

กระบวนการทางรังสีรักษาประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนซึ่งแต่ละขั้นตอนมีวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อน (Barrett, Dobbs, Morris, Roques, & Harrowven, 2009; Podgorsak, 2005) ทั้งนี้เพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะขั้นตอนการวางแผนการรักษาและการจำลองการรักษาซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีรายละเอียดมากและเข้าใจได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการรักษา นอกจากนี้การให้รังสีปริมาณที่สูงในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมนั้นมีข้อควรระวังมาก ซึ่งหากเกิดการผิดพลาดจากการให้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าปกติอาจส่งผลให้ไม่สามารถรักษามะเร็งหายขาดและมีโอกาสเกิดเป็นซ้ำได้อีก ในทางกลับกันหากให้ปริมาณรังสีที่มากเกินไปอาจทำให้อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ขึ้นได้

การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมที่จะเกิดขึ้นในปีที่ 2 มีความสำคัญในกระบวนการจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมเป็นอย่างมากเนื่องจากทำให้สามารถประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งก่อนการรักษาและในขณะทำการรักษาได้ การฉายรังสีเพื่อการรักษามะเร็งเต้านมโดยปกติแล้วใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงระดับ 6 MV หรือ 10 MV และปริมาณรังสีที่ให้ค่อนข้างสูงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการรักษาให้หายขาดหรือประคับประคองอาการ ตามมาตรฐานสากลที่กำหนดโดยคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านหน่วยและการวัดทางรังสี (International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU) ได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของปริมาณรังสีตลอดขั้นตอนการรักษาจะต้องไม่เกิน $\pm 5\%$ เนื่องจากการฉายรังสีบริเวณเต้านมมีอวัยวะที่สำคัญ (Critical organ) ที่ต้องระวังไม่ให้ได้รับปริมาณรังสีมากเกินไปที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะปอด (lung) และหัวใจ ตลอดจนการกำหนดปริมาณรังสีไปยังก้อนมะเร็งจะต้องมีความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมากเพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการฉายรังสี ดังนั้นการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากหุ่นจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีดังกล่าวที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์มีราคาแพงมากทำให้ประเทศไทยมีใช้เฉพาะในหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาหุ่นจำลองดังกล่าวขึ้นใช้เองในราคาถูกลงเพื่อประเมินค่าปริมาณรังสีจะช่วยให้การรักษามะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษาในหน่วยงานต่างๆ ทั่วประเทศมี

ประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้ป่วยจะมีโอกาสหายและลดภาวะแทรกซ้อนจากการรักษาด้วยรังสีรักษาได้เป็นอย่างมาก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีในขั้นตอนการวางแผนการรักษาและจำลองการรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านม
2. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งชนิดอื่นๆ ในงานรังสีรักษา

บทที่ 2

ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย

หุ่นจำลอง (Model) (เรื่องวิทย์, 2556)

หุ่นจำลอง หมายถึง วัสดุสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบของจริงด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถใช้ของจริงเพื่อประกอบการเรียนการสอนได้ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะและตำแหน่งของอวัยวะภายในร่างกายของคนหรือสัตว์ ในทางรังสีวิทยาหุ่นจำลองยังอาจหมายถึงหุ่นที่ลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ซึ่งอาจนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพในงานรังสีวินิจฉัยและการวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) รวมทั้งการวัดปริมาณและการกระจายของรังสีในหุ่นจำลองเทียบเท่าผู้ป่วยจริงในอวัยวะต่างๆ (Dose Measurement and Dose distribution) ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาทางรังสีรักษา หุ่นจำลอง (เรื่องวิทย์, 2556) สามารถทำการแบ่งเป็นประเภทดังนี้

- หุ่นรูปทรงภายนอก (Solid Model) เป็นหุ่นจำลองที่ต้องการแสดงรูปร่างหรือรูปทรงภายนอกเท่านั้น โดยในเรื่องของน้ำหนัก ขนาด สีหรือพื้นผิว ลวดลายและมาตราส่วนจะผิดไปจากของจริง

- หุ่นเท่าของจริง (Exact Model) มีขนาดและรูปร่างรายละเอียดทุกอย่างเท่าของจริงทุกประการสามารถใช้แทนของจริงได้เป็นอย่างดี

- หุ่นจำลองแบบขยายหรือแบบย่อ (Enlarge, Reduce Model) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหุ่นจำลองแบบมาตราส่วน โดยอาจมีการย่อหรือขยายให้เล็กหรือใหญ่ โดยยังคงเป็นสัดส่วนกับของจริงทุกส่วนและยังสามารถช่วยให้ทราบรายละเอียดและความสัมพันธ์กับของจริงได้

- หุ่นจำลองแบบผ่าซีก (Cut Away Models) เป็นหุ่นจำลองที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะภายใน โดยตัดพื้นผิวบางภายนอกบางส่วนออก

- หุ่นจำลองแบบเคลื่อนไหวทำงานได้ (Working Models) หุ่นจำลองแบบนี้สามารถแสดงให้เห็นส่วนที่เคลื่อนไหวที่เป็นการทำงานของวัตถุหรือเครื่องจักร โดยนอกจากนี้ยังมีหุ่นจำลองอีกหลายประเภทอาทิเช่น หุ่นจำลองเลียนของจริง (mockup Models) และหุ่นจำลองแบบแยกส่วน (Build up Models) เป็นต้น

สำหรับคณะกรรมการระหว่างชาติด้วยหน่วยและการวัดรังสี (The International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อและหุ่นจำลองไว้ดังนี้ “วัสดุสมมูลสมมูลเนื้อเยื่อคือวัสดุใดๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อในแง่ของการทำปฏิกิริยากับรังสีชนิดก่อไอออน” และ “หุ่นจำลอง คือโครงสร้างใดๆ ที่บรรจุด้วยวัสดุที่แทนเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น และใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาของรังสีในร่างกายมนุษย์” โดยหุ่นจำลองมักถูกนำมาทดสอบมาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Image Equipment) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีและการลดทอนรังสีในเนื้อเยื่อมนุษย์ (กาแดง, แสนอินทร์ตะ, & ทรัพย์พร้อม, 2553)

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา (Podgorsak, 2005)

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำมาเพื่อใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการทางรังสีรักษาทั้งในเรื่องของการตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสี การตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือต่างๆ และการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำผู้ป่วยเพื่อทำการฉายรังสีสำหรับการรักษา เช่น การควบคุมคุณภาพการเคลื่อนที่ของ Multi-leaf Collimator (MLC Quality Assurance), การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) และการวัดปริมาณรังสี (Dose Measurement) ของเครื่องเร่งอนุภาค รวมทั้งยังใช้สำหรับวัดการกระจายรังสี (Dose distribution) หรือการคำนวณปริมาณรังสี (Dose Calculation) ให้กับ

ผู้ป่วยเพื่อทำการรักษามะเร็งชนิดต่างๆ ในขั้นตอนของการวางแผนการรักษา (Treatment Planning) หุ่นจำลองที่ใช้ทางรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำจากวัสดุผสมเนื้อเยื่อเพื่อให้มีความสมจริงคล้ายมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และความเหมือนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยหุ่นจำลองทางรังสีรักษาอาจทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin), ซิลิโคน (Silicone), ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass), พอลิยูรีเทน (Polyurethane), พอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) หรือ อะคริลิก (Acrylics) ซึ่งวัสดุต่างๆ เหล่านี้มีราคาแพงและบางชนิดเป็นสารอันตรายเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถแบ่งประเภทของหุ่นจำลองทางรังสีรักษาตามลักษณะองค์ประกอบภายในได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองอย่างง่ายที่ภายในมีองค์ประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดและมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์มีได้หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom หรือหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom

ทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซินมีความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิด Ionization Chamber ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีชนิด Photon และ Electron มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีทั้งขนาด 20 x 20 เซนติเมตร และ 40 x 40 เซนติเมตร และมีความหนาแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งานประเภทต่างๆ (Center) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom

จาก <http://www.cnmcco.com/> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom เป็นหุ่นจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพโดยทั่วไป การตรวจสอบความคงตัวของลำรังสี การควบคุมคุณภาพของ Multi-leaf collimator ติดตั้งและใช้งานได้ง่าย มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำประมาณ 1% (Phantoms) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom

จาก <http://www.supertechx-ray.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีการออกแบบสำหรับการวัดปริมาณรังสี ตรวจสอบการวางแผนการรักษา วัดการกระจายของรังสีแบบ 2 มิติ มีขนาด 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร ภายในมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 0.5% สามารถนำมาใช้สำหรับการฉายรังสีที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 50 KeV ถึง 25 MeV (Phantoms) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom

จาก <http://www.supertechx-ray.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีความซับซ้อนกว่าแบบแรก ภายในมีองค์ประกอบที่ใช้แทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอาจมีรูปร่างที่คล้ายกับร่างกายมนุษย์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของลำรังสี เช่น Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) ดังภาพที่ 4 เป็นหุ่นจำลองที่เป็นที่นิยมใช้มากในทางรังสีวิทยามาเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 30 ปี และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก โดยหุ่นจำลองประเภทนี้ได้รับการตกแต่งและปรับปรุงจนมีคุณสมบัติที่ความเหมาะสมกับการใช้งาน ผลิตจากวัสดุที่สมมูลกับเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ กล้ามเนื้อ (Muscle), กระดูก (Bone), ปอด (Lung) และอากาศ

หุ่นจำลองชนิดนี้ได้สร้างให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยตัดให้เป็นสไลด์ตามขวางเพื่อประโยชน์ในการใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีสำหรับการประเมินค่าปริมาณรังสีภายในร่างกาย นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานทางรังสีรักษาตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงการตรวจสอบการรักษา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเต้านมที่สามารถถอดออกได้และมีหลายขนาด เช่น ปริมาตร 200, 400, 600 และ 900 มิลลิลิตร เป็นต้น (Phantoms)



ภาพที่ 4 หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)

จาก <http://www.supertechx-ray.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

ยางพารา (Para rubber) (สุขประเสริฐ, 2548)

ต้นยางพารามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติชนิดนี้ประชาชนทั่วไปเรียกว่ายางพาราหรือต้นยางพารา (Para rubber) โดยยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากเป็นพืชยุทธศาสตร์ในการพัฒนาการเกษตรและประเทศไทยมีแนวโน้มในการหันมาใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์มากขึ้น จากข้อมูลปี 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากถึง 3,776,957 ตัน จากการส่งออกทั้งในรูปของวัตถุดิบพร้อมทำผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา คิดเป็นมูลค่ากว่า 647,906 ล้านบาท ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่ถือว่ามียอดขายสูง อีกทั้งมีโอกาที่จะพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ยางพาราได้หลากหลาย โดยยางธรรมชาติเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแล้วสามารถนำมาจำหน่ายได้ในราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่ดีหากมีการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางให้มีระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถสร้างผลผลิต และผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างมีคุณภาพและมีมาตรฐาน (กรมวิชาการเกษตร, 2556) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ผ่านการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ เช่น กระดุกเทียม, ยางวงจัดฟัน, ยางนวดเหยือก, ดินประดิษฐ์สำหรับเด็ก ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์, แผ่นยางคลุมดิน และกระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำยางพารามาใช้เป็นหุ่นจำลองทางการแพทย์มีค่อนข้างน้อยทั้งๆ ที่เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานโดยการนำยางพารามาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศไทยในช่วง ปี 2550–2554 (ภัทรไพบูลย์ชัย, 2554)

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณการใช้ (%)
ยางยานพาหนะ	50
ยางยืดและยางรัด	28.2
ถุงมือยางทางการแพทย์	17.8
รองเท้าและอุปกรณ์กีฬา	2.6
สายพานลำเลียง	0.4
ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำ	0.1
สื่อการเรียนการสอน	0.01
ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง	0.87
ยางพาราผสมยางมะตอย	0.001

องค์ประกอบของยางพารา (จิตต์ลัดดา, 2553; วราภรณ์, 2549)

น้ำยางพาราหลังจากการกรีดยังมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 6 มีค่าแรงดึงผิวประมาณ 40.5 ดายน์ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์ มิลลิเมตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ ohms-cm น้ำยางจะมีสีขาวขุ่น เมื่อปั่นด้วยความเร็วรอบสูงๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำยางเกิดการแยกชั้นดังแสดงภาพที่ 5 โดยแบ่งได้เป็นสามส่วนหลักๆ ดังนี้

1. ส่วนเนื้อยาง (Rubber Phase) เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวซึ่งอยู่ชั้นบนสุด คิดเป็นประมาณ 30-36% โดยอนุภาคของยางพาราจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน เป็นทรงกลม ที่ผิวล้อมรอบไปด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน ทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียรแต่หลังจากการกรีดยไม่ถึงชั่วโมง แบคทีเรียและเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมันได้ถ้าปราศจากการเติมสารเคมีที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียซึ่งสามารถทำให้น้ำยางเสียความเสถียรได้

2. ส่วนชั้นน้ำหรือซีรัม (Serum Phase) คิดเป็นประมาณ 44-45 % โดยในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยสารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน โปรตีนบางชนิด คาร์โบไฮเดรต เอนไซม์ และไอออนของโลหะ เป็นต้น

3. ส่วนตกตะกอน (Bottom Phase) เป็นส่วนที่อยู่ชั้นล่างสุดคิดเป็นประมาณ 15-20% ส่วนประกอบที่สำคัญในชั้นนี้คืออนุภาคลูทอยด์ (Lutoid particle) เป็นของที่มีความหนืดมาก รูปร่างกลม น้ำหนักมากกว่าอนุภาคของยาง ในน้ำยางที่ไม่ได้ถูกกำจัดเอาอนุภาคลูทอยด์ออก มักจะเกิดการจับตัวเองตามธรรมชาติหรือที่เรียกว่า Spontaneous Coagulation

สำหรับองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำยางพาราสดที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
นิวทรอลลิปิด	1.0
ไกลโคลิปิดและฟอสโฟลิปิด	0.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
สารอนินทรีย์	0.5
น้ำ	58.5
อื่น ๆ	0.4

คุณสมบัติทางเคมี (จิตต์ลัดดา, 2553; วราภรณ์, 2549)

ยางพาราเป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบไปด้วยคาร์บอนอะตอม 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส (Linea cis 1,4 polyisoprene) จำนวน 3,000 ถึง 5,000 หน่วย โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(C_5H_8)_n$ มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ทำให้อย่างมีสมบัติยืดหยุ่นซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปที่ดี

คุณสมบัติโดยทั่วไปของยางพารา (จิตต์ลัดดา, 2553)

- 1. ความยืดหยุ่น (Elasticity)** ยางพารามีความยืดหยุ่นได้ดี สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว
- 2. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)** ยางพารามีความทนทานต่อแรงดึงมาก เนื่องจากสามารถเกิดการตกลึกเมื่อได้รับแรงดึง
- 3. ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)** ยางพารามีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง โดยผลึกจะเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ส่งผลให้ด้านการฉีกขาดที่จะเกิดขึ้น
- 4. การกระด้างกระดอน (Rebound resilience)** ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางจะมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยมาก และมีการสะสมความร้อนที่ต่ำด้วยเช่นกันทำให้ยางมีคุณสมบัติที่การกระด้างกระดอนที่สูงมาก
- 5. ความทนทานต่อการขัดถู (Rebound resilience)** ยางพารามีคุณสมบัติทนการขัดถู ทนต่อแรงเสียดทานที่ดี
- 6. ความเหนียว (Tack)** ยางพาราสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
- 7. ความเป็นฉนวน (Insulation)** ยางพารามีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ โอห์ม - ซม

8. ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical Resistant) เนื่องจากโครงสร้างของยางที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทำให้สามารถถูกละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วจำพวก เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluence) และเฮกเซน (Hexane) ได้ แต่จะสามารถทนได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน (Acetone) และ แอลกอฮอล์ (Alcohol)

9. คุณสมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging Property) ยางพารามีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป

การแปรรูปน้ำยางพารา (สุขประเสริฐ, 2548)

การแปรรูปน้ำยางพาราด้วยการเติมสารเคมีชนิดต่างๆ ในน้ำยางพาราจะทำให้ยางพาราที่ได้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรการผสมอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน หลักการและขั้นตอนของการออกสูตรการผสมน้ำยางกับสารเคมีนั้นปกติจะต้องคำนึงถึงประโยชน์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตและต้นทุน

สารเคมีที่นำมาใช้ในการผสมน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มหลักๆ 5 กลุ่ม ดังนี้

1. สารทำน้ำยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ทำให้งามีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากอ่อน เหนียว ไปเป็นยางคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

2. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูปให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ระหว่างกำมะถันและยางนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปช้ามากและต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่สูงมาก

3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เป็นสารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากยางจะเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วในอุณหภูมิที่สูง หรืออยู่ในภาวะที่ปนเปื้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะ ทองแดง หรือ แมงกานีส เป็นต้น

4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

5. สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มระยะเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยาง สารหน่วงปฏิกิริยา

6. สารอื่นๆ เช่น การเติมสารที่ทำให้เกิดสี, กลิ่น และฟอง เป็นต้น

การสร้างนวัตกรรมสื่อการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้และเข้าใจได้ง่าย โดยเฉพาะการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่บุคลากรทางการแพทย์จะต้องทำความเข้าใจบทเรียนต่างๆ อย่างถ่องแท้และลึกซึ้ง ในขณะที่เนื้อหาการเรียนค่อนข้างยากและส่วนใหญ่การศึกษาในตำราเพียงอย่างเดียวทำให้ผู้เรียนไม่สามารถจินตนาการตามได้โดยง่าย การสร้างสื่อวัสดุสามมิติด้วยการพัฒนาหุ่นจำลองมนุษย์รูปแบบต่างๆ จึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก นอกจากจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นยังช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจและเป็นการเพิ่มทักษะให้กับผู้เรียนก่อนการปฏิบัติงานกับผู้ป่วยจริง ปัจจุบันหุ่นจำลองจากยางพาราธรรมชาติแทนวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากยางพารามีประโยชน์ที่หลากหลายดังกล่าวไปแล้วข้างต้น โดยมีการพัฒนาหุ่นจำลองเพื่อการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพจำนวนมาก เช่น พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์ (สุขประเสริฐ, 2548) การสร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย (ต้นตพันธ์, 2554) การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา (ดวงรัตน์ et al., 2552) การสร้างหุ่นใบหน้า

จำลองปากแหงเพดานโหว่โดยใช้วัสดุที่ทำด้วยยางพารา ไม้และซิลิโคนที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (ประดัมวงษ์, โกวิท, สิมะลี, & เซวณชื่น, 2554) โดยหุ่นจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีและที่สำคัญสามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจเพิ่มมากขึ้น เกิดการเรียนรู้และเข้าใจได้ง่ายกว่าการเรียนการสอนรูปแบบเดิม โดยสามารถนำไปใช้งานแทนหุ่นจำลองที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้

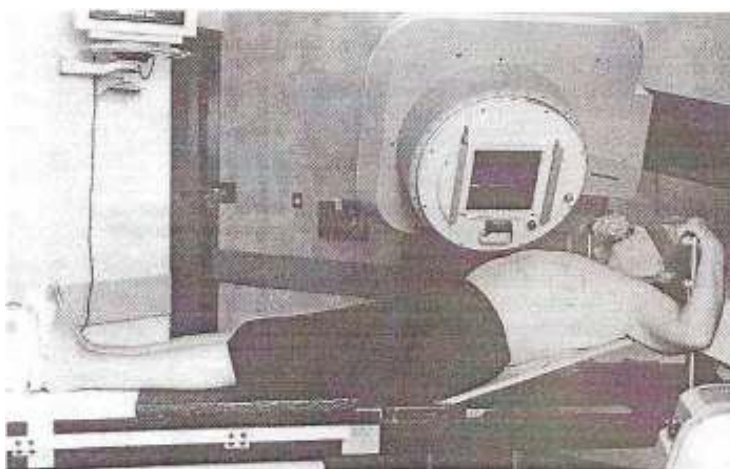
ประสิทธิภาพของการรักษาทางรังสีรักษา (Radiation Therapy) นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเป้าหมายหลักของรังสีรักษาเป็นการให้ปริมาณรังสีสูงสุดที่ก้อนมะเร็งในขณะที่อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงจะต้องได้รับปริมาณรังสีต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการพัฒนาทักษะและประสบการณ์ในการทำงาน โดยเฉพาะขั้นตอนการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด นอกจากนี้ระหว่างรักษาด้วยการฉายรังสีนั้นนักรังสีการแพทย์จำเป็นต้องมีการจัดทำที่ถูกต้องร่วมกับการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดท่ารูปแบบต่างๆ อันนำไปสู่การรักษาที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากระหว่างการรักษานั้นจะเป็นการปฏิบัติงานของนักรังสีการแพทย์เพียงคนเดียวเท่านั้น เปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดจะลดลงได้ถึง 82% หากมีการประสานงานกันของนักรังสีการแพทย์ นอกจากจะตรวจสอบการจัดท่าผู้ป่วยให้ถูกต้องและสม่ำเสมอแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการกำหนดและวางขอบเขตของลำรังสีที่จะฉายในบริเวณที่สนใจ และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรักษา อาทิเช่น Gantry, Collimator angle, Monitoring unit และการกำหนดเวลาในการฉายรังสี เป็นต้น (Seymour, Khan, & Roger, 1992)

รังสีรักษาสำหรับมะเร็งเต้านม (หล่อวิทยา, et al., 2544)

การรักษามะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษามีเป้าหมายเพื่อควบคุมและลดการกระจายของโรคไปยังส่วนอื่นๆ ของร่างกาย การรักษาอาจใช้วิธีร่วมกันระหว่างการผ่าตัด การใช้ยาเคมีบำบัดหรือฮอร์โมนบำบัดและการใช้รังสีรักษา ถึงแม้ว่ามีวิธีการรักษาที่ดีเพียงใดก็อาจทำให้มีการกลับเป็นซ้ำได้อีกโดยเฉพาะบริเวณ Chest wall และ Regional lymph node ซึ่งอาจก่อให้เกิดภาวะแทรกซ้อนตามมา เช่น แผลเลือดออก เกิดการติดเชื้อ มีอาการปวด และแขนบวม Brachial plexus compression อันเป็นการบั่นทอนคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย และจะเป็นแหล่งของการเกิดการแพร่กระจายของโรคต่อไป สำหรับจุดประสงค์ของการฉายรังสีหลังผ่าตัดนั้นเพื่อทำลาย Microscopic disease ที่อาจหลงเหลืออยู่ที่บริเวณ Chest wall และ Peripheral Lymphatics โดยในปัจจุบันการพิจารณา Posterior chest wall irradiation หลังจากการทำMRM แล้วไม่ได้ใช้เป็น Routine ทุกราย แต่จะเลือกให้เฉพาะในรายที่เป็น high risk (มี local-regional recurrence มากกว่า 15% หรือ 20%) เท่านั้น การทำการผ่าตัดแบบสงวนเต้านมเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยเฉพาะมะเร็งเต้านมในระยะเริ่มแรก (Stage I-II) แต่การทำการผ่าตัดด้วยวิธีนี้เพียงอย่างเดียวอาจทำให้เกิดภาวะ Locoregional recurrence สูงได้ถึงร้อยละ 35-40 มีการศึกษาต่างๆ มากมายโดยเฉพาะการศึกษาของ NSABP B-06 พบว่า การผ่าตัดแบบสงวนเต้านมแล้วตามด้วยการฉายรังสีที่เต้านมจะได้ผลทั้งควบคุมโรคและอัตราการรอดชีวิตเท่ากับการทำ mastectomy

เทคนิคทางรังสีรักษา (Radiotherapy technique)

การฉายรังสีรักษามะเร็งเต้านมในแต่ละบริเวณ ผู้ป่วยจะต้องนอนอยู่ในท่าเดิมตลอด ดังนั้น หากผู้ป่วยนอนราบมักจะพบว่าหน้าอกส่วนบนจะลาดลง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการให้ผู้ป่วยนอนเอาศีรษะและไหล่อยู่บนกระดานสามเหลี่ยมรูปลิ้ม (Triangular wedge) เพื่อยกศีรษะและหน้าอกส่วนบนให้สูงขึ้นจนเป็นแนวราบ ยกแขนข้างเดียวกับหน้าอกที่จะทำการฉายรังสี ทางออกเป็นมุมฉาก จับยึดกับเสาที่สามารถจัดระยะและระดับให้คงที่ได้ทุกวัน หรืออาจจะให้สอดมีไว้ใต้ศีรษะของผู้ป่วยเอง ตะแคงหน้าไปด้านตรงข้าม นอกจากนี้ อาจจะสอดหมอนข้างไว้ใต้เข้าทั้งสองข้างของผู้ป่วย เพื่อจะได้นอนในท่าที่สบาย ไม่เกร็งเกินไป จะได้ไม่มีการขยับเขยื้อนตัวขณะฉายรังสีดังแสดงภาพที่ 5 การจัดทำของผู้ป่วยในลักษณะนี้ทำให้ขั้นตอนการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษามีความยุ่งยากและต้องการการฝึกทักษะที่ดีเพียงพอ เนื่องจากอาจเกิดความผิดพลาดในการให้ปริมาณรังสีได้ค่อนข้างมากและเกิดภาวะแทรกซ้อนตามมาได้



ภาพที่ 5 การจัดทำของผู้ป่วยบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า Triangular wedge หรือ Breast board

จาก http://nci.cu.edu.eg/lectures/Book%20Breast%20Cancer%20PDF/Ch_8.pdf

สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

เทคนิคการให้ลำรังสีสำหรับการรักษามะเร็งเต้านมประกอบด้วยเทคนิคการฉายรังสีบริเวณ Chest wall เทคนิคการฉาย Supraclavicular lymph nodes field และ เทคนิคการฉาย Internal mammary field ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7

เทคนิคการฉายรังสีบริเวณ chest wall หรือ intact breast

การฉายรังสีบริเวณ Chest wall หลังการผ่าตัดหรือการฉาย intact breast กรณีที่ทำการผ่าตัดแบบสงวนเต้านม การฉายรังสีจะใช้เทคนิคการให้ลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential portals โดยครอบคลุม chest wall หรือตัวเต้านมทั้งหมดและพยายามให้ถูกเนื้อปอดน้อยที่สุด บริเวณฉายรังสีควรจะกินพื้นที่ปอดเพียง 2-3 เซนติเมตร เป็นอย่างมากเพื่อลดภาวะแทรกซ้อนจากปริมาณรังสีที่บริเวณปอดโดยมีขอบเขตของลำรังสีดังต่อไปนี้

- Upper margin- ขอบบนของ field อยู่ระดับของขอบล่างของ head of clavicle
- Medial margin- อยู่ที่ midline หรือข้าม midline ไปทางด้านตรงข้ามประมาณ 1 เซนติเมตร
- Lateral margin- ปกติใช้ mid axillary line หรือประมาณ 2 เซนติเมตร จาก palpable of breast tissue
- Inferior margin- 1-2 เซนติเมตร ใต้ต่อ infra-mammary fold

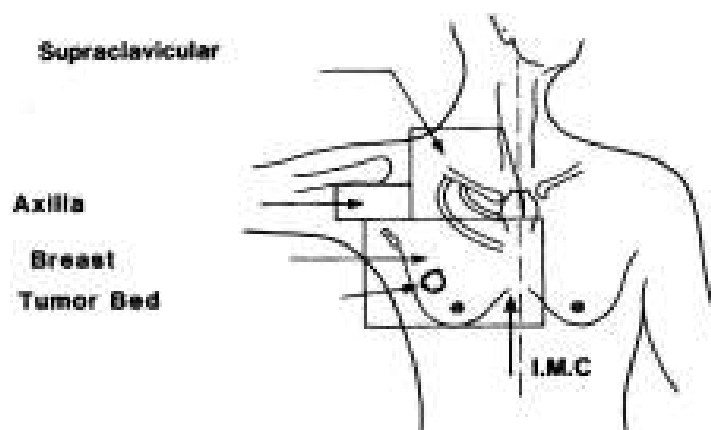
เทคนิคการฉาย Supraclavicular lymph nodes field

การใช้เทคนิคการให้ปริมาณรังสีลักษณะนี้ใช้ในกรณีที่ต้องการฉายเฉพาะ apex ของ axilla โดยมีขอบเขตของลำรังสีดังต่อไปนี้

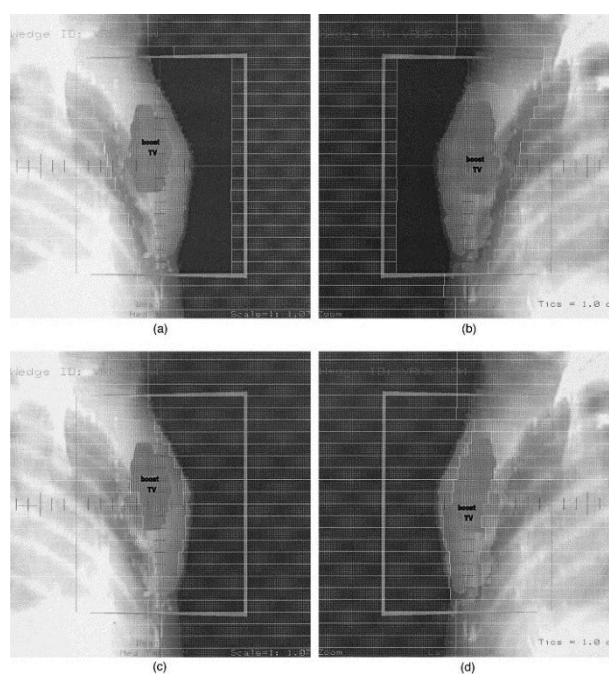
- Inferior border – 1st หรือ 2nd intercostal space ขนานกับ upper margin ของ chest wall field
- Medial border-1 เซนติเมตร จาก midline ลากขึ้นไปตามขอบในของ sternocleidomastoid muscle ถึง thyrocricoid groove
- Superior border – ที่ระดับของ thyroid groove
- Lateral border – vertical line ที่ระดับ lateral edge ของ Coracoid process เป็นการฉายคลุมเฉพาะ Axillary apex และ Supraclavicular nodes ควรฉายรังสีทำมุมไปทาง lateral ประมาณ 10-15 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ลำรังสีตกกระทบบริเวณหลอดลม หลอดอาหารและไขสันหลัง

เทคนิคการฉาย Internal mammary field มีขอบเขตการฉายดังนี้

- Medial border – อยู่ที่แนวกลางลำตัว
- Lateral border – 5 -6 เซนติเมตรถัดออกด้านนอกต่อแนวกลางลำตัว
- Inferior border- ที่ระดับของ Xiphoid
- Superior border – ขนานกับ Inferior border ของ Supraclavicular field



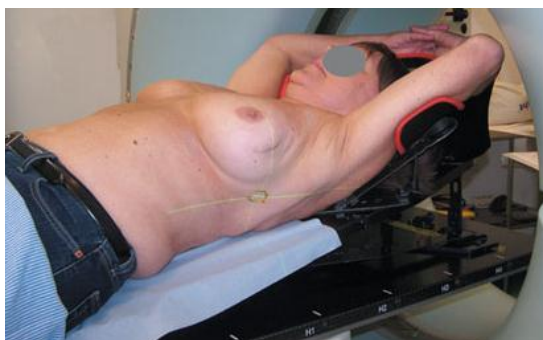
ภาพที่ 6 แสดงเทคนิคการฉายรังสีของเต้านมบริเวณ Chest wall, Supraclavicular lymph nodes field และ Internal mammary field



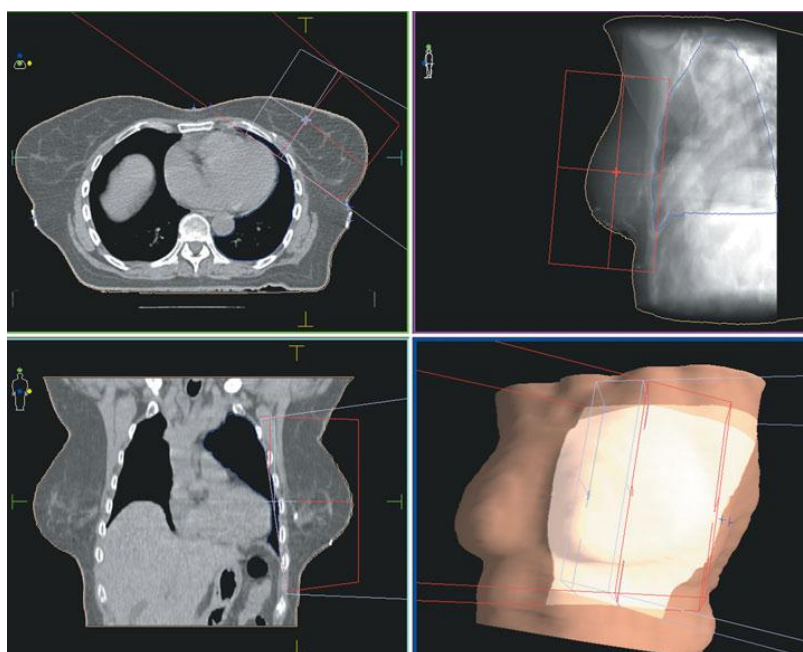
ภาพที่ 7 แสดงเทคนิคการฉายรังสี lateral tangential field ของเต้านม ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาแบบ conventional 2D tangential field

การจำลองการรักษา (Treatment Simulation) (Seymour, et al., 1992)

การรักษาด้วยรังสีรักษานั้นจะได้ผลได้ดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอในการรักษา การให้ปริมาณรังสีมากที่สุดกับบริเวณที่สนใจปริมาณรังสีน้อยที่สุดในเนื้อเยื่อรอบข้าง ดังนั้นความถูกต้องของให้ทิศทางลำรังสีในขั้นตอนการจำลองการรักษาจึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อช่วยให้การรักษามีประสิทธิภาพและบรรลุเป้าหมาย เนื่องจากการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาจะส่งผลต่อเทคนิคการฉายรังสีในขั้นตอนการรักษา ได้แก่ การจัดทำผู้ป่วยและการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดทำ สำหรับเทคนิคและขั้นตอนการจำลองการรักษาที่ห้องจำลองการรักษาประกอบด้วยการจัดทำและทิศทางการให้ลำรังสีบนตัวผู้ป่วยดังแสดงในภาพที่ 8 การกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญและการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญรวมทั้งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังแสดงในภาพที่ 9



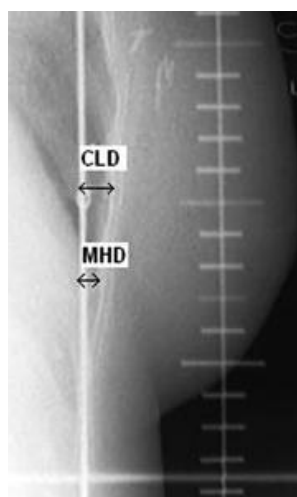
ภาพที่ 8 แสดงเทคนิคการจำลองการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)



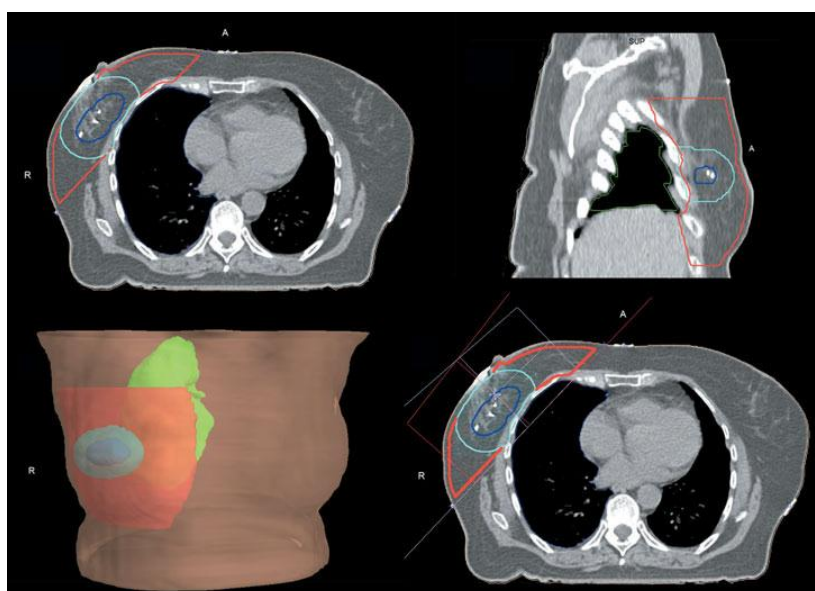
ภาพที่ 9 แสดงการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)

ระบบวางแผนการรักษา (Treatment Planning System) (Seymour, et al., 1992)

ระบบการวางแผนการรักษาเป็นการทำงานประสานกันระหว่างรังสีทางด้านรังสีรักษา นักฟิสิกส์การแพทย์และนักคำนวณปริมาณรังสี สำหรับขั้นตอนการวางแผนการรักษาเริ่มต้นจากการตรวจสอบข้อมูลผู้ป่วยและศึกษาแผนการรักษา ตลอดจนเทคนิคที่ต้องใช้ในการรักษาหลังจากผ่านการจำลองการรักษาทั้งหมดอย่างละเอียด อันประกอบด้วยเทคนิคในการฉายรังสี ตำแหน่งฉายรังสี (Anatomical site) ระยะลึกของก้อนมะเร็ง (Depth) ตรวจสอบปริมาณรังสีที่ฉายในแต่ละวัน (Daily dose) เส้นปริมาณรังสีที่แพทย์เลือก (Selected isodose) พลังงานรังสีที่ใช้และขนาดพื้นที่รังสีตามที่แพทย์กำหนดดังแสดงในภาพที่ 10 เพื่อให้การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 10 แสดงภาพเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)



ภาพที่ 11 การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ (Barrett, et al., 2009)

กายวิภาคศาสตร์ของเต้านม (Seymour, et al., 1992; ธีรรัตน์, 2556)

เต้านม คือ อวัยวะที่อยู่บริเวณผนังทรวงอกด้านหน้า (Chest wall) ทั้ง 2 ข้าง มีรูปร่างคล้ายกรวย ยึดจากขอบด้านข้างของกระดูกหน้าอก (Sternum) ไปยังแนวที่เรียกเรียกว่า Anterior Axillary line โดยตำแหน่งอยู่ระหว่างซี่โครง (Rib) ที่ 2 ถึง 6 โดยวางอยู่บนกล้ามเนื้อหน้าอกที่มีชื่อว่า Pectoralis Muscle ต่ำกว่ากระดูกไหปลาร้า (Clavicle) โดยลักษณะการวางตัวของเนื้อเยื่อเต้านมจะยื่นจากแนว Mid line ไปยังด้านข้างถึงของของกล้ามเนื้อ Latissimus dorsi บริเวณที่อยู่ติดกับส่วนของฐานเต้านมเรียก Retromamary Space โดยส่วนที่หนาที่สุดของเต้านมจะอยู่บริเวณด้านบนและด้านนอก (Upper outer quadrant) ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยต่อมต่าง ๆ ของเต้านมที่มากกว่าบริเวณอื่น โดยมีส่วนที่เรียกว่า Axillary tail ที่เป็นบริเวณที่พบมีการก่อตัวของก้อนเนื้อจำพวก Mass และ Primary tumor ได้บ่อยที่สุด องค์ประกอบของเต้านม ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ ผิวหนัง, ไขมันใต้ผิวหนังและเนื้อเยื่อเต้านม โดยเนื้อเยื่อเต้านมยังประกอบไปด้วยเนื้อเยื่ออีก 3 ชนิด ได้แก่

1. Fibrous Tissue หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Connective Tissue เป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่อยู่บนเต้านม อาทิเช่น Cooper ligament
2. Adipose tissue เป็นไขมันที่กระจายตัวอยู่ภายในโดยรอบ
3. Adipose Tissue เป็นส่วนที่ผลิตน้ำนม ซึ่งฝังตัวอยู่ใน Adipose tissue ต่อม้าน้ำนม (Mammary gland) เป็นต่อมเหงื่อ (Modifier sweat Gland) มีลักษณะเป็นกลีบ (Lobe) โดยเต้านมแต่ละข้างจะมีจำนวน 15-20 Lobe และแต่ละ Lobe ยังแบ่งออกเป็น 20-40 กลีบ ซึ่งแต่ละ Lobe จะมีท่อน้ำนม (Lactiferous Duct) มาเปิดออกที่หัวนม (Nipple) โดยในแต่ละส่วนขององค์ประกอบภายในเต้านมจะถูกกั้นแบ่งออกเป็นส่วนๆ ด้วย Fibrous tissue หรือ Connective tissue

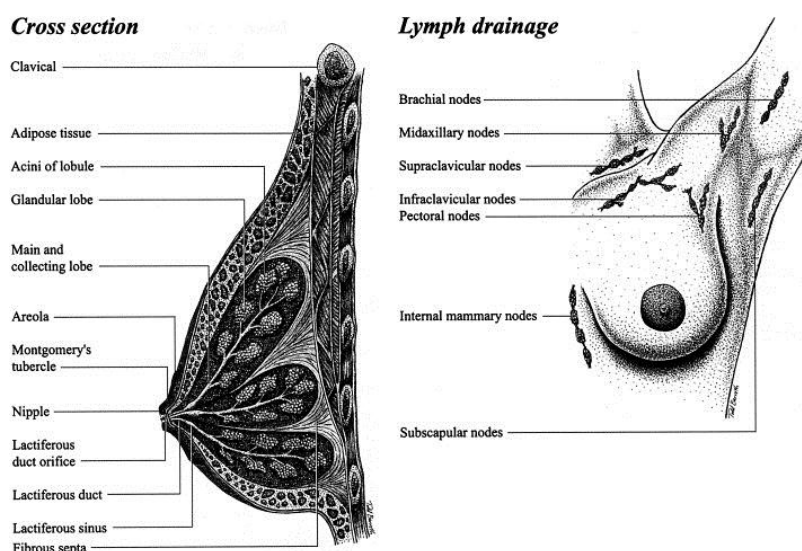
ในส่วนของระบบทางเดินน้ำเหลืองของเต้านมนั้นจะรวมไปถึงทางเดินน้ำเหลืองในบริเวณใกล้เคียงที่อยู่บริเวณหน้าอกและรักแร้ โดยเป็นการรวมกันของต่อมน้ำเหลืองที่อยู่ติดกับ Internal jugular vein และ Subclavian vein ลงไปถึงฐานของลำคอใต้ต่อจุดเกาะปลายของกล้ามเนื้อ Sternocleidomastoid ถึงส่วนต้นของกระดูกไหปลาร้า โดยมีตำแหน่งของ Lymphatic trunk ที่สำคัญ 3 ตำแหน่งคือ Subclavian trunk บริเวณรักแร้, Jugular trunk บริเวณลำคอถึงด้านบนของกระดูกไหปลาร้าและ Bronchomediastinal trunk ซึ่งทั้งสามแห่งจะเชื่อมต่อกันในหลายทิศทาง ทางด้านซ้ายของร่างกายจะมีการเชื่อมต่อกันของต่อมน้ำเหลืองเพียงระยะสั้นๆ เท่านั้น ท่อน้ำเหลือง (Lymphatic duct) ทั้งด้านซ้ายและขวาจะทำหน้าที่ลำเลียงน้ำเหลืองเข้าสู่หลอดเลือดดำ Internal jugular vein หรือท่อน้ำเหลืองส่วนนอก (Thoracic duct)

Axillary lymph node ต่อมมน้ำเหลืองบริเวณรักแร้ สามารถแบ่งออกได้ 3 ระดับ ดังนี้

- ระดับที่ 1 ต่อมมน้ำเหลืองที่อยู่ต่ำกว่าส่วนล่างของกล้ามเนื้อ Pectoralis minor
- ระดับที่ 2 ต่อมมน้ำเหลืองที่อยู่ใต้กล้ามเนื้อ Pectoralis minor
- ระดับที่ 3 ต่อมมน้ำเหลืองที่อยู่สูงกว่ากล้ามเนื้อ Pectoralis minor

ต่อมน้ำเหลืองเหล่านี้ถือว่าเป็นต่อมน้ำเหลืองหลักที่มีการระบายน้ำเหลืองภายในเนื้อเยื่อเต้านมซึ่งในขณะเดียวกันก็เป็นบริเวณที่พบมีการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็งมากที่สุด

Internal mammary node เป็นกลุ่มของต่อมน้ำเหลืองขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-5 มิลลิเมตร โดยทั่วไปมักพบอยู่ในขอบเขต 3 เซนติเมตรถัดจากกระดูกหน้าอก และบางครั้งอาจพบที่อยู่ต่ำกว่าชายโครง (Costal margin) ต่อมมน้ำเหลืองเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ใน Endothoracic fascia ระหว่างช่องว่างของ Costal cartilage ที่ส่วนมากจะพบอยู่ใน Intercostal space ที่ 1 ถึง 3 ทั้งด้านซ้ายและขวา ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของเต้านม

จาก <http://ars.els-cdn.com/> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

การสร้างนวัตกรรมสื่อการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้และเข้าใจได้ง่าย โดยเฉพาะการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่จะต้องทำความเข้าใจบทเรียนต่างๆ อย่างถ่องแท้และลึกซึ้ง การสร้างสื่อวัสดุสามมิติโดยการพัฒนาหุ่นจำลองมนุษย์รูปแบบต่างๆ จึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก นอกจากจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจได้ง่ายยังช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจและเป็นการเพิ่มทักษะก่อนการปฏิบัติงานกับผู้ป่วยจริง ปัจจุบันหุ่นจำลองจากยางพาราธรรมชาติแทนวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเป็นที่ต้องการอย่างมากเนื่องจากยางพารามีประโยชน์ที่หลากหลายดังกล่าวไปแล้วข้างต้น โดยมีการพัฒนาหุ่นจำลองเพื่อการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพจำนวนมาก เช่น พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์ (สุขประเสริฐ, 2548) การสร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย (ตันตพันธ์, 2554) การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา (ดวงรัตน์, et al., 2552) การสร้างหุ่นใบหน้าจำลองปากเหง้าเพดานโหว่โดยใช้วัสดุที่ทำด้วยยางพารา ไม้และซิลิโคนที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (ประดับวงศ์, et al., 2554) โดยหุ่นจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับผลประโยชน์ความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีและที่สำคัญสามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจเพิ่มมากขึ้น เกิดการเรียนรู้และเข้าใจได้ง่ายกว่าการเรียนการสอนรูปแบบเดิม โดยสามารถนำไปใช้งานแทนหุ่นจำลองที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้

นอกจากนี้ยังมีการสร้างหุ่นจำลองสำหรับงานรังสีวินิจฉัยเพื่อใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจากการตรวจทางรังสีวินิจฉัย (อุทุมมา & ขวัญชัย, 2549) สำหรับการสร้างหุ่นจำลองทางรังสีรักษานั้นได้มีการพัฒนาหุ่นจำลองเต้านมเพื่อประเมินค่าการกระจายของปริมาณรังสีในเต้านมผู้ป่วยได้รับการรักษามะเร็งเต้านม (Seymour, et al., 1992) (Curtis B, 1989 ; Howlett & Kron, 2002) และเพื่อเป็นสื่อสำหรับการเรียนการสอนให้กับแพทย์โดยผลิตจากซิลิโคน (Ashlie, Lynn, Elizabeth, Martina, & http://trace.tennessee.edu/utk_chanhonoproj/1450, 2011) สำหรับการสร้างหุ่นจำลองยางพารานั้นสามารถพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตให้มีลักษณะที่หลากหลายตามการใช้งาน เช่น ยางฟองน้ำที่เกิดจากการเติมสาร CaCO_3 ปริมาณ 5 phr ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ (ประกายมณีวงศ์, ระนอง, วิชิตชลชัย, พัฒนากุล, & แจ่มเสมือน, 2552) โดยยางฟองน้ำดังกล่าวสามารถนำมาใช้สร้างเป็นปอดในหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยการฉายรังสีระยะไกลได้

ขอบเขตงานวิจัย

พัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกรังสีรักษาเพื่อการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านมโดยใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักในหุ่นจำลอง การศึกษาประกอบด้วยการออกสูตรยางพาราเพื่อหาส่วนผสมและวิธีการที่เหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมเพศหญิงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับของจริงโดยออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงหุ่นจำลอง Alderson Rando Phantom ศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับเต้านมและมะเร็งเต้านม การประยุกต์การใช้งานตรวจสอบปริมาณรังสีทางด้านรังสีรักษา การทดสอบความทนทานและทดสอบสมบัติเชิงกลของหุ่นจำลอง

ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองเต้านมและทรวงอกในเพศหญิง

จากการศึกษาและสืบค้นข้อมูลสัดส่วนของผู้หญิงไทยด้วยเทคโนโลยี "3D Body Scanning" และจากผลการสำรวจการวัดสัดส่วนของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) พบว่าสัดส่วนของผู้หญิงไทยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนัก 57.4 กิโลกรัมและมีสัดส่วนดังต่อไปนี้รอบอก 36.0 นิ้ว รอบเอว 31.5 นิ้ว และรอบสะโพก 38.0 นิ้ว การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกเพศหญิงให้มีส่วนของร่างกายตั้งแต่ส่วนคอถึงสะดือ โดยภายในหุ่นจำลองประกอบด้วยปอดเพื่อความเหมือนจริงของภาพถ่ายรังสีโดยเฉพาะในขั้นตอนจำลองการรักษาซึ่งต้องกำหนดทิศทางการวางลำรังสีที่เหมาะสมเพื่อป้องกันอวัยวะปกติข้างเคียงได้รับปริมาณรังสีเกินกำหนด การสร้างหุ่นจำลองได้ทำการออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงกับสัดส่วนของหญิงไทยมีความสูง 63 เซนติเมตร สัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว และรอบเอว 34 นิ้ว การพัฒนาหุ่นจำลองจะต้องคำนึงถึงการจัดทำผู้ป่วยในการฉายรังสีผู้ป่วยมะเร็งเต้านมที่ผู้ป่วยจะต้องนอนบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า Breast Broad หรือ Triangle Wedge เพื่อยกศีรษะและหน้าอกขึ้นเป็นแนวราบ ยกแขนข้างเดียวกับหน้าอกที่จะทำการถ่ายภาพรังสี กางออกเป็นมุมฉาก จับยึดกับเสาที่สามารถจัดระยะและระดับให้คงที่

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

การพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการวางแผนการรักษามะเร็งเต้านมในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกยางพาราเพื่อพัฒนาหุ่นจำลองเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย ราคาถูก เมื่อแข็งตัวแล้วสามารถคงสภาพอยู่ได้ และมีความยืดหยุ่นที่ดี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความเหมือนของธาตุดังประกอบใกล้เคียงกับมนุษย์

2.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้อมูลด้านคุณสมบัติของยางพาราทั้งในด้านเคมีและด้านกายภาพ พบว่าสามารถประยุกต์เพื่อเป็นหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมทางด้านรังสีรักษาได้ โดยจะต้องทำการพิจารณาความหนาแน่นของหุ่นจำลองในหน่วยกรัมต่อมิลลิเมตร อีกทั้งหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจะต้องมีความสมจริงและใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์มากที่สุด และศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเคมีที่ผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับใช้เติมน้ำยางพาราเพื่อการทดสอบคุณสมบัติของยางพาราก่อนการหล่อแบบจริง

จากการศึกษางานวิจัยของพรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ (พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ & และคณะ, 2552) ระบุว่า การเตรียมสารเคมีที่ใช้เติมน้ำยางพารานั้นจะต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของของเหลว ก่อนการนำไปใช้ โดยการเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของของเหลวนั้นจะขึ้นกับสถานะของสารนั้นๆ หมายถึง หากสารเคมีสามารถละลายน้ำได้ให้เตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) สำหรับสารเคมีเป็นของแข็งที่ไม่สามารถละลายน้ำให้เตรียมในรูปที่เป็นสารที่กระจายตัวในน้ำ (dispersion) โดยอัตราส่วนสารเคมีและน้ำยางชั้นมีสูตรมาตรฐานดังตารางที่ 3

จากการเตรียมชิ้นงานยางพาราตามสูตรในตารางที่ 3 ด้วยเทคนิคการหล่อเข้าเบา (Casting process) พบว่าการเทน้ำยางแต่ละชั้นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบนานถึง 3 - 4 ชั่วโมง น้ำยางแต่ละชั้นจึงจะแห้ง ดังนั้นการสร้างหุ่นจำลองทั้งตัวหากใช้เทคนิคการหล่อโดยการเทน้ำยางทีละชั้นคงต้องใช้เวลานานมดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทดสอบนำสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัว โดยงานวิจัยของวรภรณ์และคณะ ได้ใช้ SSF ในการทำให้น้ำยางผสมสารเคมีจับตัวในการผลิตดอกไม้ประดิษฐ์จากน้ำยางด้วยเทคนิคแบบหล่อเข้าพิมพ์ ซึ่งจะช่วยให้ทำให้น้ำยางจับตัวได้เร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐาน (ตามตารางที่ 3) ซึ่งเป็นสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นแสดงดังตารางที่ 4 เพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง โดยได้ทำการหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ SSF ที่สามารถทำให้น้ำยางพาราที่สร้างขึ้นนั้นอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานสมบัติของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 1) สมบัติความแข็ง (Hardness) ไม่ต่ำกว่า 23 (Hardness by shore A)
- 2) สมบัติการทนแรงดึง (Tensile strength) ค่า Stress จะต้องไม่ต่ำกว่า 150 kN/m²
ค่า Strain จะต้องไม่ต่ำกว่า 0.4 และค่า Modulus จะต้องไม่ต่ำกว่า 300 kN/m²
- 3) สมบัติการทนแรงฉีกขาด (Tear strength) ไม่ต่ำกว่า 1.0 kN/m

ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (วิจิตชลชัย, 2550)

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนัก (กรัม)	
	แห้ง	เปียก
60% น้ำยางข้น (Latex)	100	167
10% เทอริก เอ 16 (Teric 16A 16)	0.2	2
50% กำมะถัน (Sulfur)	2.5	5
50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	1.5	3
50% แซดอีดีซี (ZEDC)	1.5	3
50% วิงสเตย์แอล (WingStay L)	1.0	2
50% ดีตาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)	2.5	5
50% แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	1.0	20

หมายเหตุ : ดีตาเนียมไดออกไซด์เป็นสารทำให้มีสีขาวซึ่งอาจไม่ใส่กรณีต้องการให้หุ่นจำลองเปลี่ยนเป็นสีอื่น

ตารางที่ 4 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา

รายการ	น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนัก (กรัม)		การกำหนดสัญลักษณ์
		แห้ง	เปียก	ชิ้นงานยางพารา
1	60% น้ำยางข้น (Latex)	100	167	
2	10% เทอริก เอ 16 (Teric 16A 16)	0.2	2	
3	50% กำมะถัน (Sulfur)	2.5	5	
4	50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	1.5	3	
5	50% แซดอีดีซี (ZEDC)	1.5	3	
6	50% วิงสเตย์แอล (WingStay L)	1.0	2	
7	12.5% โซเดียม ซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF)	0.0	0	Non SSF
		2.0	16	16 g. SSF
		2.5	20	20 g. SSF
		3.0	24	24 g. SSF

ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีผสมในน้ำยางพาราเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการสำหรับการสร้างหุ่นจำลองจากยางพารามีดังต่อไปนี้

2.2.1 ตวงน้ำยางพาราและสารเคมี (รายการที่ 1-6) ตามสูตรยางที่ใช้ดังตารางที่ 4

2.2.2 บ่มน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีต่างๆ จากข้อที่ 2.2.1 ในถังที่ควบคุมอุณหภูมิได้ตลอดเวลา มีการกวนน้ำยางพาราอย่างช้าๆ ความเร็วรอบประมาณ 20-40 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนน้ำยางพาราเกิดการคงรูปบางส่วนซึ่งทำการทดสอบด้วย Chloroform ประมาณคลอโรฟอร์มเบอร์ 2.5 นั่นคือโมเลกุลของยางคงรูปปานกลาง ยางจะมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ไม่เหนียว

2.2.3 จากนั้นเติม 12.5 % SSF ตามปริมาณต่างๆ ในแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 4

2.2.4 กรองน้ำยางพาราในข้อที่ 2.2.3 ลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปสี่เหลี่ยม ขนาด 200 * 200 * 60 มิลลิเมตร โดยการเทลงในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ

2.2.5 ตั้งแม่พิมพ์ที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้ เพื่อให้น้ำยางพาราเกิดการเซตตัวหรือน้ำยางจับตัวกัน โดยในขั้นตอนนี้จะทำการจับเวลาเพื่อหาเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัว

2.2.6 นำน้ำยางพาราที่เทลงในแม่พิมพ์แล้วไปทำการอบให้น้ำยางพาราเกิดการคงรูปด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก

2.2.7 แกะแม่พิมพ์ออก นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง

2.2.8 ทำการทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางที่เตรียมได้จากข้อ 2.2.7 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3 การทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางพาราเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3.1 ความหนาแน่น

นำชิ้นงานตัวอย่างยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2.7 มาชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง วัดความกว้างและความยาวของชิ้นตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Calipers) จากนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นทั้งหมด 5 ค่า นำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ความหนาแน่นของชิ้นยางในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรคำนวณจากสมการ

$$D = M/V$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (Density) หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ทำการทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D2240-03 (ASTM, 2003) โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2.7 จำนวน 5 ชิ้น มาทดสอบหาค่าความแข็งด้วยเครื่อง Durometer Hardness Tester แสดงดังภาพที่ 13 จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 13 เครื่องมือทดสอบความแข็งชนิด Durometer Hardness Tester

2.3.3 การทนแรงดึง (Tensile strength)

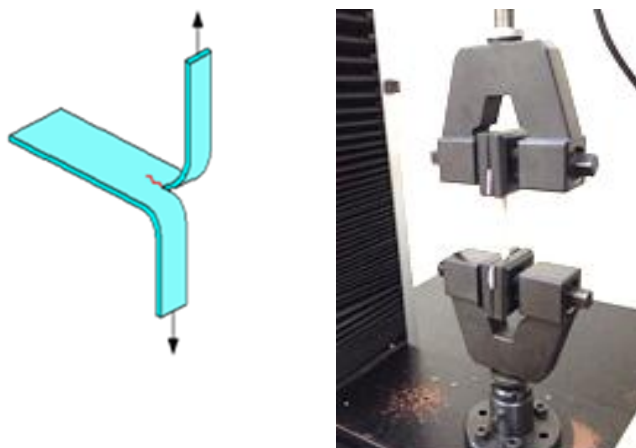
การทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยทำการทดสอบการทนแรงดึงด้วยการใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 14 การทดสอบใช้วิธีการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปดัมเบลจำนวน 7 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานดังกล่าวจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim ด้วย load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเค้นจุดขาด (Stress at Break) ความเครียดจุดขาด (Strain at Break) และค่ามอดูลัสที่จุดขาด (Modulus at Break)



ภาพที่ 14 เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึงชนิด Tensile Testing

2.3.4 ทดสอบทนแรงฉีกขาด

ทำการทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D624-00 โดยทำการทดสอบการทนแรงฉีกขาดใช้การทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 15 การทดสอบใช้วิธีการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูป Trouser Test Specimen จำนวน 7 ชิ้น โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tear Strength



ภาพที่ 15 Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing

2.3.5 ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging)

ทำการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging การทดสอบความต้านทานความเสื่อมสภาพนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2.7 มาเร่งบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างยาง มาทดสอบสมบัติเชิงกลตามวิธีในข้อที่ 2.3.2, 2.3.3 และ 2.3.4

2.4 การพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพารา

พิจารณาตัวอย่างชิ้นงานยางพาราในข้อที่ 2.2.7 จากการปรับเปลี่ยนปริมาณ SSF เพื่อช่วยให้ยางจับตัว คงรูปได้และอบแห้ง โดยทำการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ตัวอย่างชิ้นงานเกิดการเซตตัวเพื่อให้มีความเป็นไปได้ในการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลอง และทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการอบยางพาราที่เหมาะสม โดยที่สมบัติของยางคงรูปแล้วยังมีระดับความแข็งของยางเป็นไปตามที่ต้องการ มีลักษณะความยืดหยุ่นคล้ายกับผิวหนังและเต้านมในเพศหญิง รวมทั้งความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อทรวงอก

2.5 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานยางพารา

ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้กับความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อเยื่อเต้านมปอดและเนื้อเยื่อมนุษย์ดังตารางที่ 5 และ 6 จากนั้นทำการวัดค่าเลขซีที (CT number) ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (CT simulator) เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่อและวัดค่า electron density ของชิ้นงานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นกับเนื้อเยื่อ โดยค่า electron density ของเนื้อเยื่อปกติมีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่อเต้านมชนิดต่างๆ

Density of breast tissue	
Breast tissue type	Density (กรัมต่อมิลลิลิตร)
Mammary tissue	
Fibroglandular fat	1.035
Adipose tissue	0.93
Skin	1.09
Average Breast	0.98

ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมของปอดและเนื้อเยื่อ

Tissue type	เลขอะตอม (Z)	Density (กรัมต่อมิลลิลิตร)
Lung	7.4	0.32
Tissue	6.3	0.91

2.6 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพารา

ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพารา จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาสูตรน้ำยางพาราที่มีปริมาณสารเคมียาง และเวลาในการเร่งบ่มที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติของยางพาราตามเป้าหมายที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบเพื่อหาค่า glass transition (Tg) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Decomposition Temperature ด้วยเทคนิค Thermalgravimeitric Analysis (TGA) จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จาก ขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.2.7, ข้อที่ 2.3.5 และขั้นตอนที่ 4 มาทดสอบหาค่า glass transition (Tg) ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) หา Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimeitric Analysis (TGA) แสดงดังภาพที่ 16 โดยมีสภาวะในการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ดังนี้ ขึ้นแรกลดอุณหภูมิจาก 25 °C ไปที่อุณหภูมิ -90 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นขั้นตอนที่สองทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก -90 °C ไปที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกัน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 6-10 มิลลิกรัม สำหรับการทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั้น กำหนดให้มีสภาวะดังต่อไปนี้ เพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °C ไปยังอุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม



ภาพที่ 16 Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermalgravimeitric Analysis (TGA)

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยนำหุ่นยางพาราไปฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU และปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy ดังแสดงในภาพที่ 17 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน จากสูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นในการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกในครั้งนี้ได้มีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยสูตรยางเดียวกันตามตารางที่ 4 ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในวิธีดำเนินการวิจัย 2.2 ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในการทดสอบสมบัติแต่ละค่าได้อธิบายรายละเอียดในการเตรียมชิ้นงาน จำนวนชิ้นงาน ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และวิธีการคำนวณไว้ใน 2.3 ขั้นตอนที่ 2 และเพื่อให้เป็นการง่ายในการเรียกชื่อชิ้นงาน ตัวอย่างจึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ

ชื่อใช้แทน ตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
Non x-Ray	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางโดยใช้ SSF ขนาด 20 กรัม น้ำหนักเปียก (20g. SSF) ดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีเวลาการจับตัว ค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) ที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างหุ่นจำลอง โดยกำหนดให้ชิ้นงานนี้ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี
Aging	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองซึ่งชิ้นงานนี้จะทำการทดสอบการต้านต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน ดังข้อที่ 2.3.5
x-ray 200 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 200 cGy
x-ray 400 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 400 cGy
x-ray 600 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 600 cGy
x-ray 800 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 800 cGy
x-ray 1,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 1,000 cGy
x-ray 2,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 2,000 cGy
x-ray 3,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 3,000 cGy
x-ray 4,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 4,000 cGy
x-ray 5,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 5,000 cGy
x-ray 6,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองที่ฉายรังสีปริมาณ 6,000 cGy



ภาพที่ 17 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200-6,000 cGy

ขั้นตอนที่ 5 การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านม

หุ่นจำลองทางรังสีรักษาทั้งหุ่นจำลองทรวงอกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองต้นแบบจากดินเหนียวที่ประกอบด้วยอวัยวะส่วนคอถึงกระบังลมจากอาจารย์ภาควิชาออกแบบ คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นหุ่นมนุษย์ โดยมีขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองดังนี้

1. สร้างแม่พิมพ์ด้วยการหล่อหุ่นจำลองต้นแบบด้วยดินเหนียวเพื่อให้มีรายละเอียดสูงและเพื่อให้คงรูปอยู่ได้
2. ตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์และเก็บรายละเอียดผิวหนังของหุ่นจำลองต้นแบบที่ทำจากดินเหนียวก่อนการหล่อแบบ
3. แบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นด้านหน้าและด้านหลังเพื่อสร้างแม่พิมพ์เพื่อนำมาประกบกันขึ้นขั้นตอนการเทน้ำยาง โดยแต่ละด้านกันด้วยดินน้ำมันและแผ่นฟิล์มเพื่อให้ง่ายต่อการแยกแม่พิมพ์ออกจากกัน
4. วางแผ่นไฟเบอร์ผสมเรซินบนแบบหุ่นดินเหนียวที่ละด้านแล้วรอให้เรซินแข็งตัวเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์
5. นำหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวออกและตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย
6. เจาะรูสำหรับใส่น็อตเพื่อยึดตรึงแม่พิมพ์ด้านหน้าหลัง จากนั้นทำการประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน พร้อมทั้งตรวจสอบรอยร้าวบริเวณรอยต่อของแม่พิมพ์
7. สร้างแม่พิมพ์ปอดจำลองสำหรับหุ่นทรวงอกด้วยด้วยวิธีการเดียวกันกับหุ่นจำลองทรวงอกในข้อ 1-7 จากนั้นหล่อแบบด้วยวิธีการเดียวกันกับลำตัวหุ่นจำลองแต่ใช้สูตรการผสมแบบยางพองน้ำ (ประกายมณีวงศ์, et al., 2552) (ประกายมณีวงศ์, et al., 2552)
8. การสร้างหุ่นจำลองใช้สูตรยางที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 4 โดยเติม SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียก สำหรับวิธีการผสมน้ำยางและสารเคมีนั้น ดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.1 - 2.2

9. แม่พิมพ์หุ่นจำลองที่ประกบไว้รอการเทน้ำยางนั้น จะมีการบรรจุปอดที่เตรียมไว้จากข้อที่ 7 ลงไปก่อน จากนั้นจึงเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีไว้แล้ว ลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลอง โดยการกรองผ่านตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ
10. ตั้งแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่มีน้ำยางพาราทึบไว้ เพื่อให้ น้ำยางพาราเกิดการเซตตัวหรือน้ำยางจับตัว จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก
11. แกะแม่พิมพ์ออก จากนั้นนำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง
12. เติมน้ำและตกแต่งหุ่นจำลองให้มีความสมจริงมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองยางพารา

หุ่นจำลองยางพาราที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีแทนผู้ป่วยจริงจะต้องมีความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อตัวของหุ่นจำลอง (AAPM, 2002) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการประเมินความสม่ำเสมอ (Uniformity) ในหุ่นจำลองจากค่าเลขซีที (CT number) ภายในหุ่นจำลองทรวงอกซึ่งประเมินจากภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา โดยทำการประเมินคุณสมบัติค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองที่เป็นบริเวณเนื้อเยื่อ (Soft tissue) ใช้วิธีการประเมินด้วยเลขซีทีเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าที่เหมาะสมจะอยู่ภายใน ± 50 HU วิธีการทดสอบความสม่ำเสมอของภาพหุ่นจำลองประกอบด้วย

1. ทำการสร้างภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ 16 สไลด์ บริษัท Philips รุ่น Brilliance Big Bore กำหนดค่าความต่างศักย์หลอดเท่ากับ 120 kVp ค่ากระแสหลอดคูณเวลาเท่ากับ 300 mAs และความหนาสไลด์ (slice thickness) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้งานจริงสำหรับการสร้างภาพตัดขวางผู้ป่วย
2. ทำการวัดค่าเลขซีทีที่ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองทรวงอกด้วยการกำหนดบริเวณที่สนใจ (Region of interest) จำนวน 5 ตำแหน่งบนภาพให้ครอบคลุมทั่วทั้งตัวหุ่นจำลอง โดยกำหนดพื้นที่ในการวัดขนาดประมาณ 60-100 ตารางมิลลิเมตร จากนั้นวัดค่าเฉลี่ยเลขซีทีในภาพตัดขวางหุ่นจำลองที่ระดับเต้านมและช่องท้อง
3. บันทึกค่าที่ได้ในแต่ละตำแหน่งจากนั้นนำมาคำนวณหาเลขซีทีเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในบริเวณที่สนใจ
4. ส่งภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกไปยังระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความสม่ำเสมอด้วยการสร้างโปรไฟล์ (Profile) ในแนวขวางของภาพ

ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบการวัดปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบความถูกต้องการวางแผนการรักษา

7.1 การวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

วางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผน (Computerized Treatment Planning System) โดยวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมที่ฉายรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคบริษัท Varian รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV อัตราปลดปล่อยรังสี (Dose rate) เท่ากับ 300 cGy/MU และค่าปริมาณรังสีรวมที่ก่อนมะเร็ง 5,400 cGy เพื่อทำการฉายรังสีตามแผนการรักษา สำหรับแผนการรักษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ประกอบด้วยแผนการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ จากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา Pinnacle ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการวางแผนการรักษาทั้ง 2 แบบ ประกอบด้วยค่ามุมเตียงผู้ป่วย (couch) มุมของแกนตรี (Gantry) มุมคอลลิเมเตอร์ (Collimator) ทิศทางลำรังสีแบบ medial และ lateral tangential fields เปิดลำรังสีให้มีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็ง (PTV) โดยแผนการรักษาแบบ 2 มิติ ใช้คอลลิเมเตอร์ และแผนการรักษาแบบ 3 มิติใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (multileaf collimator) ร่วมกับคอลลิเมเตอร์สำหรับกำหนดขอบเขตพื้นที่การฉายรังสี (field size) กำหนดตำแหน่งจุดหมุนระหว่างลำรังสีทั้งสองทิศทางที่ตำแหน่งของหัววัดรังสีซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นบริเวณกึ่งกลางลำรังสี

7.2 ทดสอบการวัดปริมาณรังสีหุ่นจำลองทรวงอก

การทดสอบวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ในหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นเพื่อประเมินความสามารถในการนำหุ่นจำลองไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมทั้งการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการให้ลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields เพื่อหลบหลีกการฉายลำรังสีเข้าปอดและหัวใจผู้ป่วยโดยตรง ตรวจสอบและประเมินผลแผนการรักษาด้วยนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทางรังสีรักษา จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกตามแผนการรักษ จัดตำแหน่งการฉายรังสีของหุ่นจำลองตามแผนการรักษาและใส่หัววัดรังสีในช่องใส่หัววัดรังสีซึ่งอยู่ในเต้านมซ้าย ทำการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV และอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU

7.3 การเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี

นำค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference) จากสมการ

$$\text{Percent difference} = \frac{D_{\text{mea}} - D_{\text{TPS}}}{D_{\text{TPS}}} \times 100$$

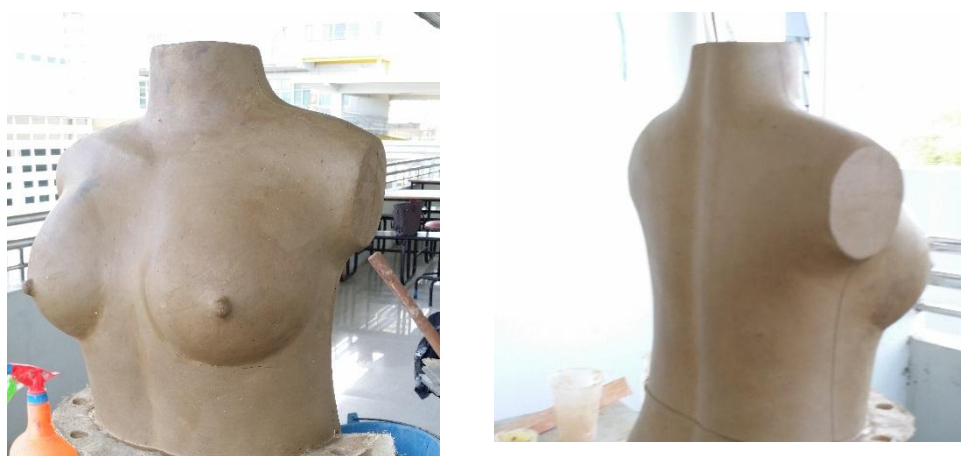
เมื่อ D_{mea} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการวัด D_{TPS} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา หากค่าที่วัดได้เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสีได้ และมีคุณสมบัติทางด้านความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองทรวงอก

การออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบด้วยการอ้างอิงสัดส่วนขนาดหุ่นจำลองตามมาตรฐานที่พบในหญิงไทย โดยการออกแบบใช้วิธีการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองจากดินเหนียวที่มีเนื้อละเอียดทำให้ได้สัดส่วนของหุ่นจำลองทั้งตัวตั้งแต่ส่วนคอถึงสะดือดังต่อไปนี้ รอบอก 37 นิ้ว และรอบเอว 34 นิ้ว ผลการปั้นหุ่นแม่แบบด้วยดินเหนียวจากผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นหุ่นมนุษย์แสดงดังภาพที่ 18 จากนั้นทำการสร้างแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์จากหุ่นจำลองต้นแบบสำหรับนำไปสร้างเป็นหุ่นจำลองทรวงอก



ภาพที่ 18 แม่แบบหุ่นจำลองจากดินเหนียวตั้งแต่ส่วนคอถึงสะโพก

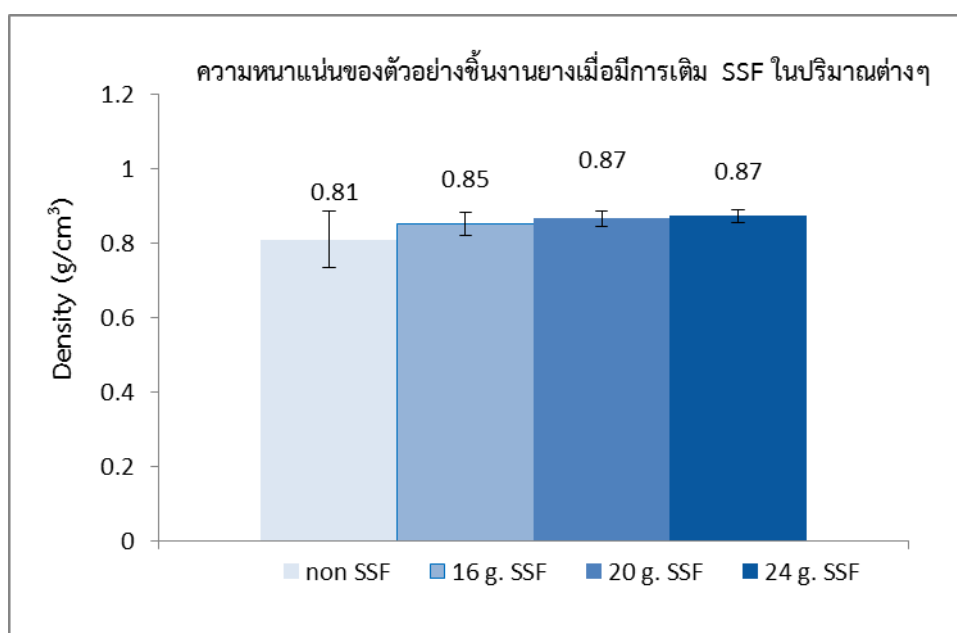
ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลอง

2.1 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นในข้อ 2.2.7 จากการพัฒนาสูตรยาง เพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา โดยการเติมสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยาง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาปริมาณของ SSF ที่เหมาะสม เพื่อให้หุ่นจำลองยางๆที่จะสร้างขึ้นสามารถคงรูปและอบแห้งได้ จากการหาเวลาการเซตตัวหรือจับตัวของน้ำยาง เมื่อมีการใช้ปริมาณของ SSF ที่เพิ่มขึ้น พบว่าเวลาการเซตตัวหรือจับตัวของน้ำยางจะเร็วขึ้นแสดงดังตารางที่ 8 ส่วนความหนาแน่นของตัวอย่างยางเมื่อมีการใช้ปริมาณ SSF ในการเตรียมชิ้นงานเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นแสดงดังภาพที่ 19 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.81-0.87 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสามารถนำไปใช้เทียบเคียงกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่อมนุษย์เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการฉายรังสีที่บริเวณเต้านมได้

ตารางที่ 8 เวลาการเริ่มจับตัวของน้ำยางของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนา

สูตรยางที่พัฒนา	เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัว (นาท)	
	Average	SD
16 g. SSF	63.80	3.42
20 g. SSF	27.60	2.51
24 g. SSF	5.40	1.52



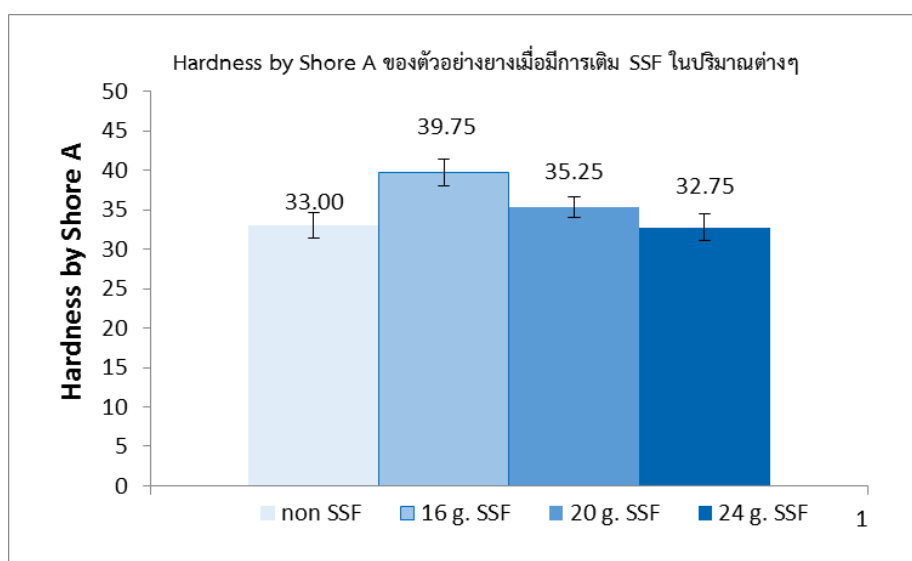
ภาพที่ 19 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

2.2 สมบัติเชิงกลของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

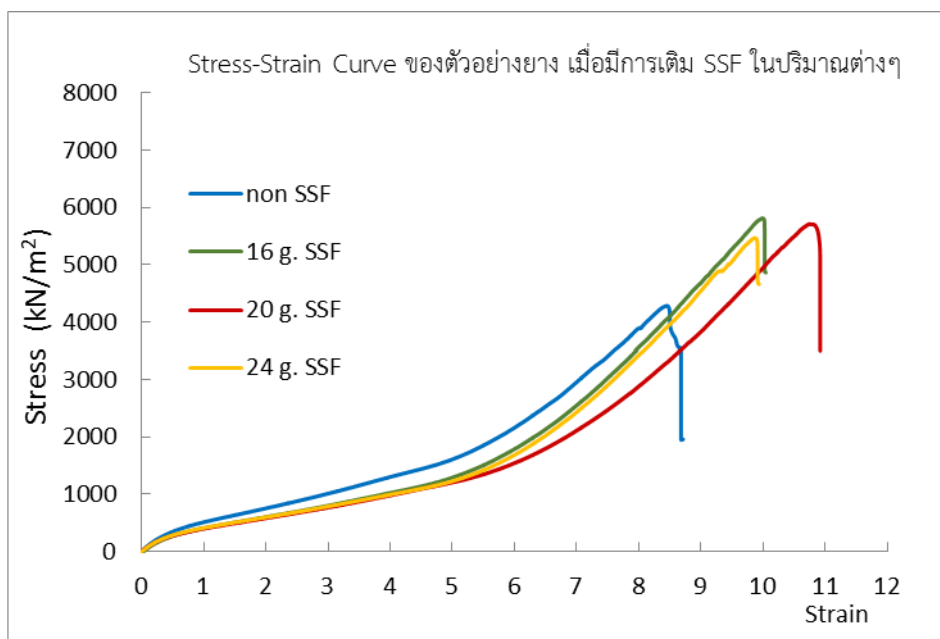
จากชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยาง เพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษาในข้อ 2.2.7 นั้น ได้นำมาทดสอบหาสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาด ตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.8 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) แสดงดังภาพที่ 20 จะพบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าความแข็งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานความแข็งที่ตั้งไว้คือไม่ต่ำกว่า 23 และพบว่าปริมาณการเติม SSF มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยาง นั่นคือตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียก มีค่าความแข็งสูงสุด แต่เมื่อตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (20 และ 24 กรัม น้ำหนักเปียก) นั้น จะพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างยางที่เติม SSF ขนาด 24 กรัม น้ำหนักเปียก จะมีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF

สำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing นั้นจะแสดงผลการทดสอบเป็น Stress – Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation แสดงดังภาพที่ 21, 22, 23 และ 24 ซึ่งพบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าต่างๆเหล่านี้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ และผลการทดสอบจะเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความแข็ง โดยตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียก จะแสดงผลการทดสอบที่มีค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (Stress at Yield) สูงสุด (5811.30 kN/m²) ส่วนตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 20 กรัม น้ำหนักเปียกนั้นจะมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าเล็กน้อย (5704.88 kN/m²) แต่มีระยะที่ยืดออก (Strain at Break) มากที่สุด มีค่าความแข็งแรงหรือแข็งแรงต่ำที่สุด นั่นคือ มีความสามารถในการยืดหยุ่น (Modulus at 100% Elongation) น้อย หรือกล่าวได้ว่ามีความเป็นอีลาสติก (elastic property) มากกว่าตัวอย่างยางอื่นๆ นั้นเอง แต่สำหรับตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (24 กรัม น้ำหนักเปียก) นั้น จะพบว่าค่าความทนแรงดึงและระยะที่ยืดออก มีแนวโน้มที่ลดลง

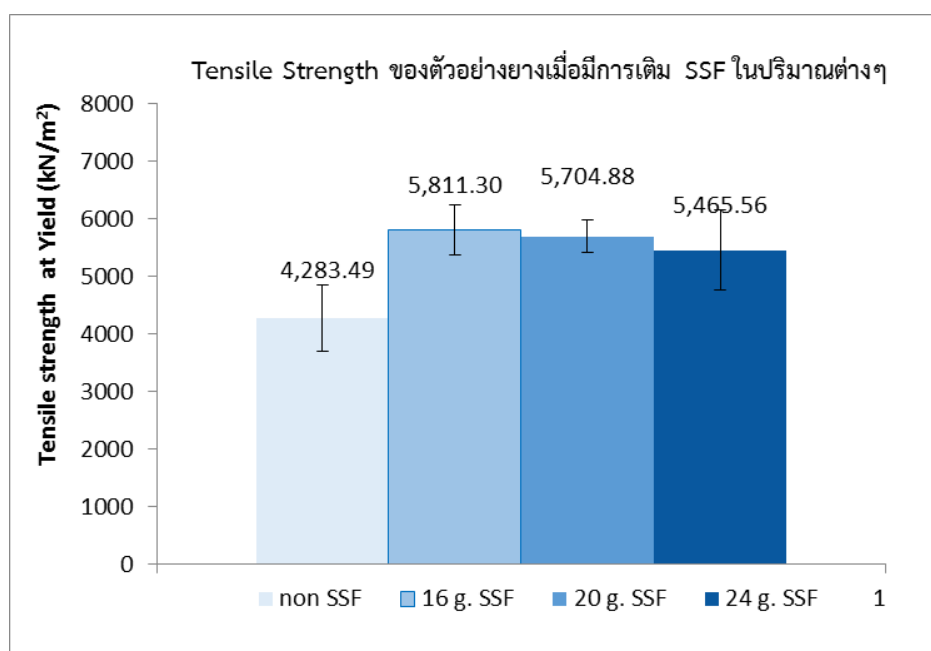
สำหรับผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดแสดงดังภาพที่ 24 พบว่าค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานหุ่นจำลองที่ตั้งไว้เช่นเดียวกับสมบัติเชิงกลค่าอื่นๆ และพบว่าผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดจะเป็นไปในทำนองเดียวกับสมบัติเชิงกลอื่นข้างต้น โดยตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นโดยมีการเติม SSF ในปริมาณ 16 และ 20 กรัม น้ำหนักเปียก มีค่าสูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF แต่เมื่อมีการเติม SSF สูงถึง 24 กรัม น้ำหนักเปียก มีค่า Tear Strength ที่ต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่เติม SSF



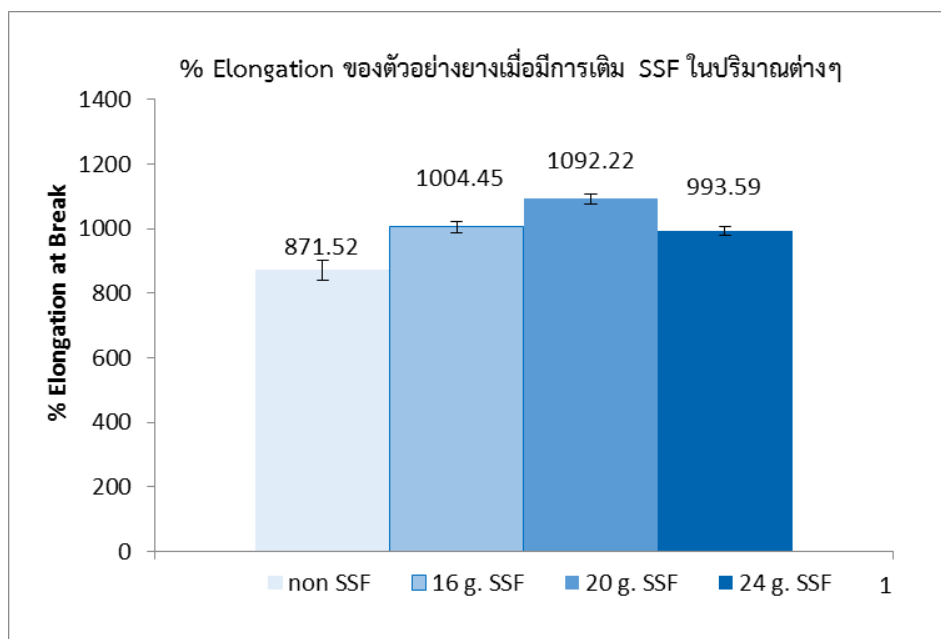
ภาพที่ 20 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



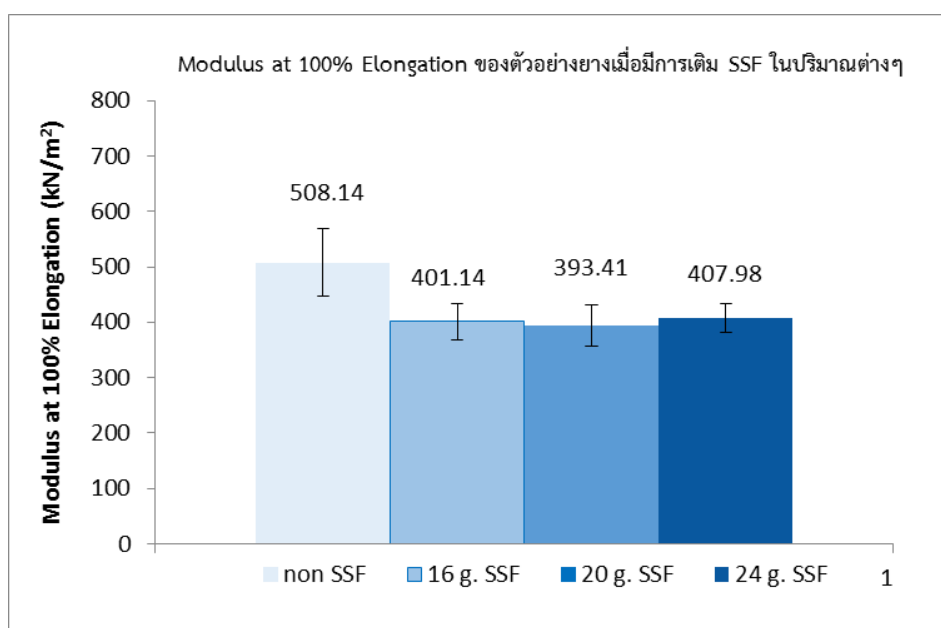
ภาพที่ 21 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



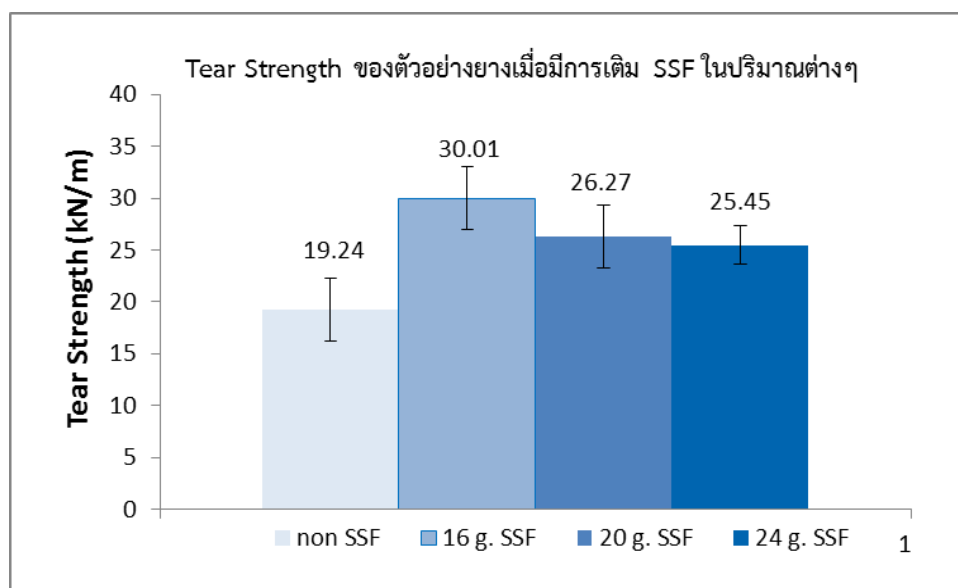
ภาพที่ 22 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 23 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 24 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 25 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

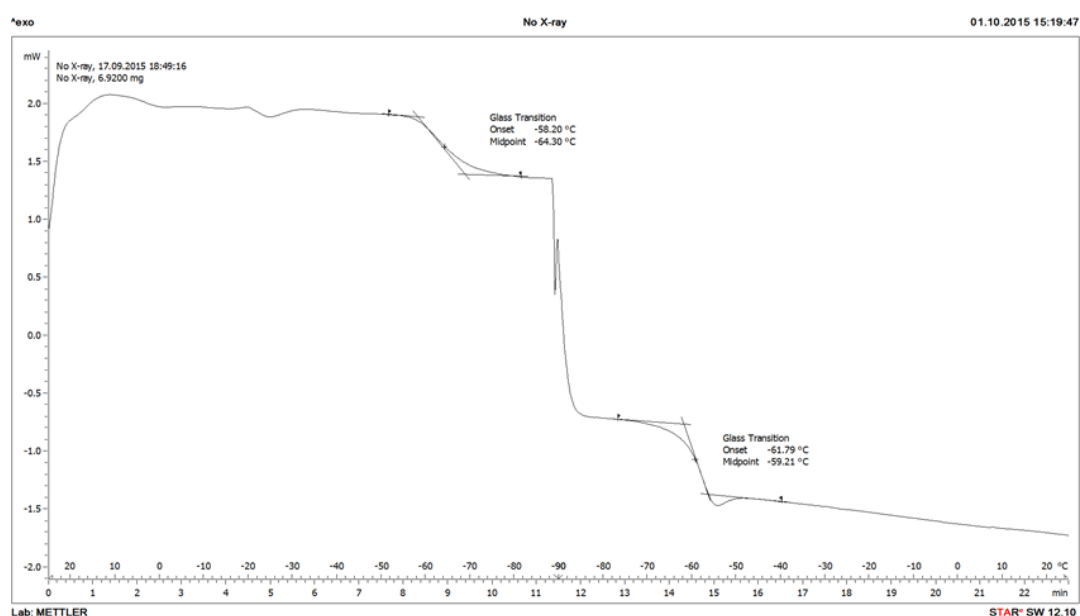
ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 (ตารางที่ 8) มาทำการทดสอบเพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) หาค่า Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimeitric Analysis (TGA) ซึ่งจะแสดงผลค่าต่างๆเหล่านี้เปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging และชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy (ชิ้นงานยางจากขั้นตอนที่ 4)

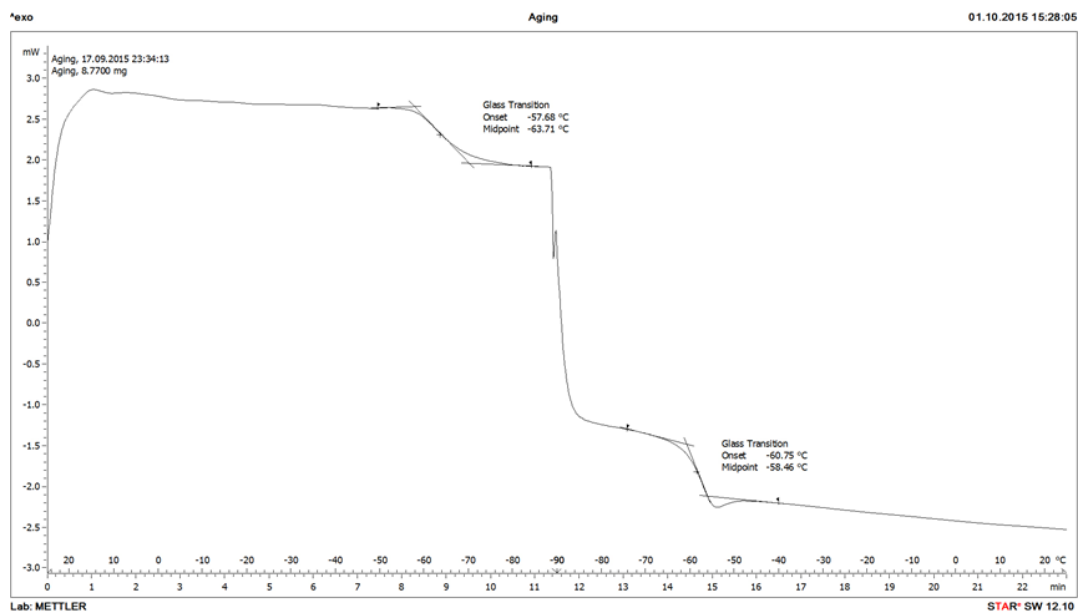
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย DSC จะวิเคราะห์หาค่า T_g ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสี แสดงดังตารางที่ 8 และโครมาโตแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 26-37 ซึ่งพบว่าค่า $T_{g \text{ onset}}$ ทั้งชิ้นแรก ที่ลดอุณหภูมิจาก 25 °C ไปยังอุณหภูมิ -90 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และในขั้นตอนที่สอง เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 °C ไปที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกันนั้น มีค่า $T_{g \text{ onset}}$ ใกล้เคียง มีค่าในช่วง -56.40 °C ถึง -61.79 °C ซึ่งมีค่าต่างกันเล็กน้อยเพียง 1-5 °C เท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ยางได้ จากการฉายรังสี x-ray ในช่วง 200 - 6,000 cGy นั้น ไม่มีผลทำให้สายโซ่โครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้นี้เปลี่ยนแปลง นั่นคือไม่มีเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลหรือเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อน และหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ

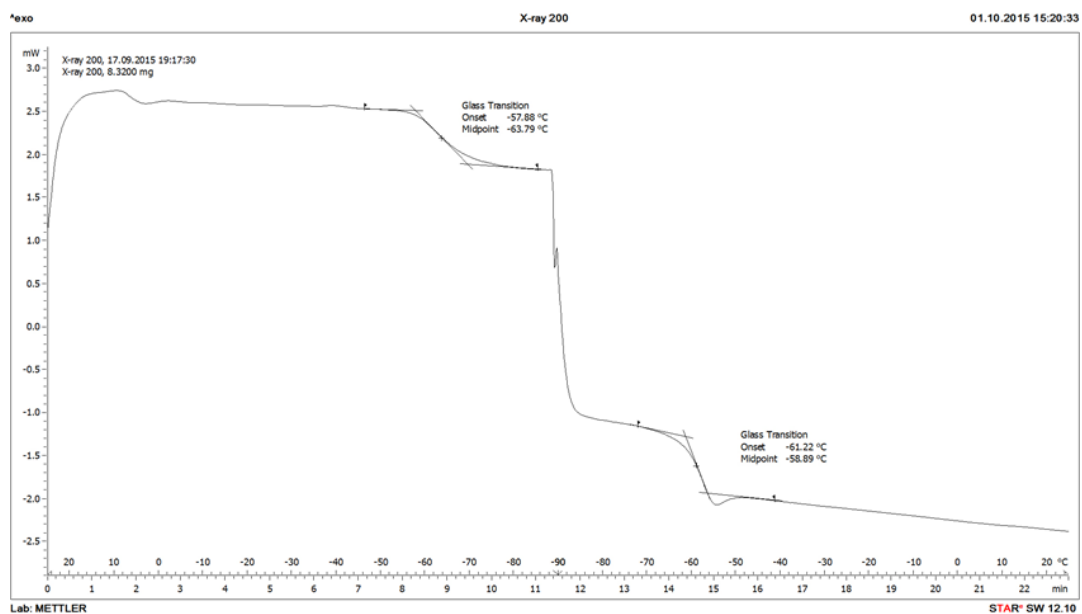
ตัวอย่างชิ้นงาน ฉายและไม่ฉายรังสี	T_g onset ($^{\circ}\text{C}$)	
	1 st ลดอุณหภูมิจาก 25 $^{\circ}\text{C}$ ถึง -90 $^{\circ}\text{C}$	2 nd เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 25 $^{\circ}\text{C}$
Non x-ray	-58.20	-61.79
Aging	-57.68	-60.75
x-ray 200 cGy	-57.88	-61.22
x-ray 400 cGy	-57.81	-60.73
x-ray 600 cGy	-56.40	-61.65
x-ray 800 cGy	-57.83	-61.56
x-ray 1,000 cGy	-57.84	-61.60
x-ray 2,000 cGy	-56.96	-60.49
x-ray 3,000 cGy	-56.71	-60.24
x-ray 4,000 cGy	-56.94	-60.46
x-ray 5,000 cGy	-56.98	-61.26
x-ray 6,000 cGy	-57.35	-60.14



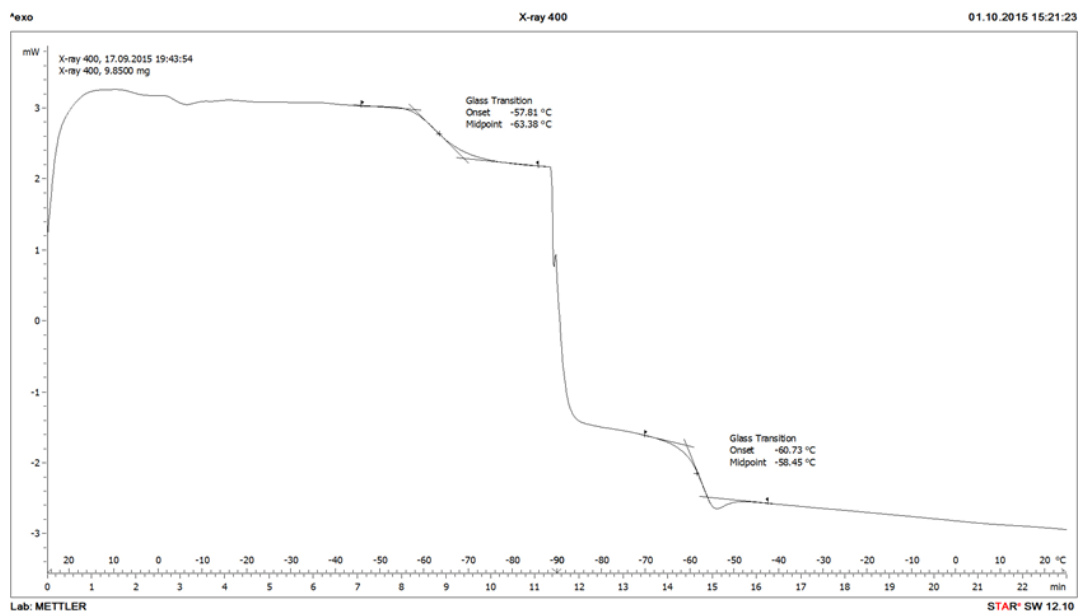
ภาพที่ 26 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray



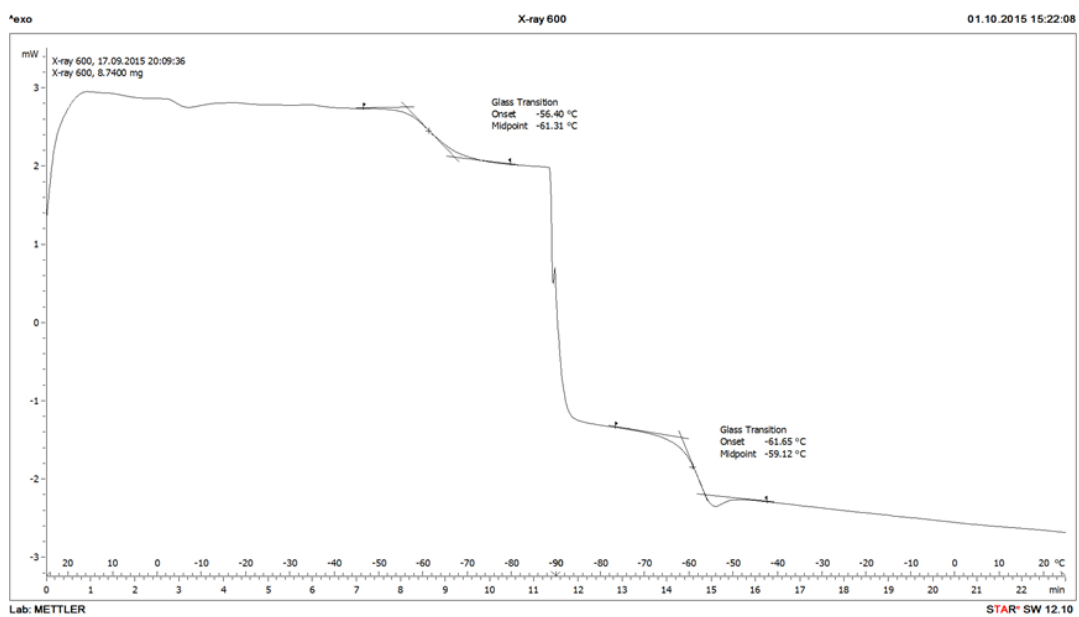
ภาพที่ 27 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging



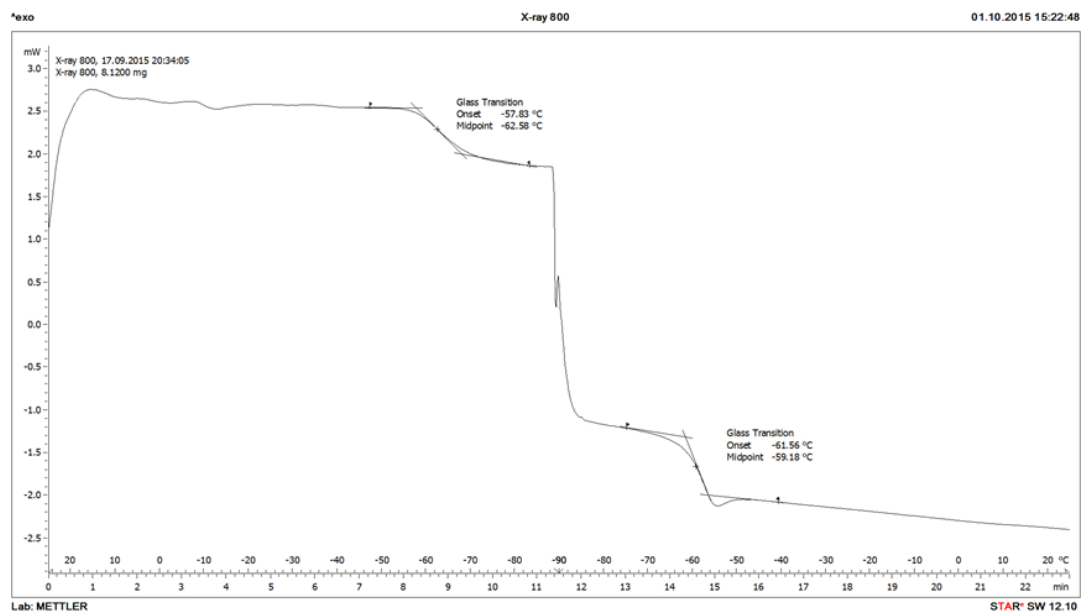
ภาพที่ 28 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 200 cGy



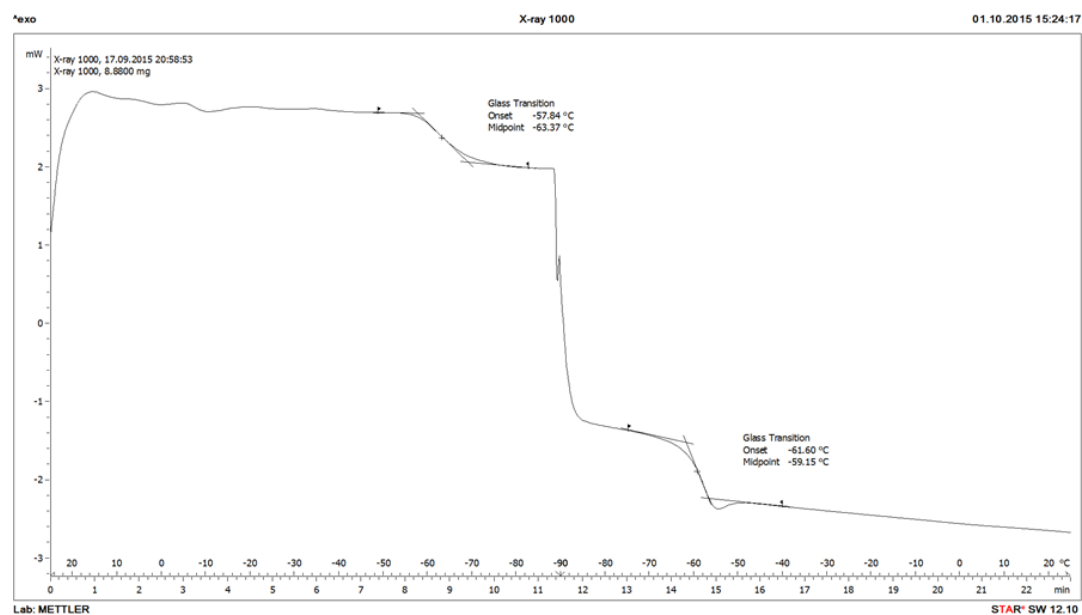
ภาพที่ 29 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 400 cGy



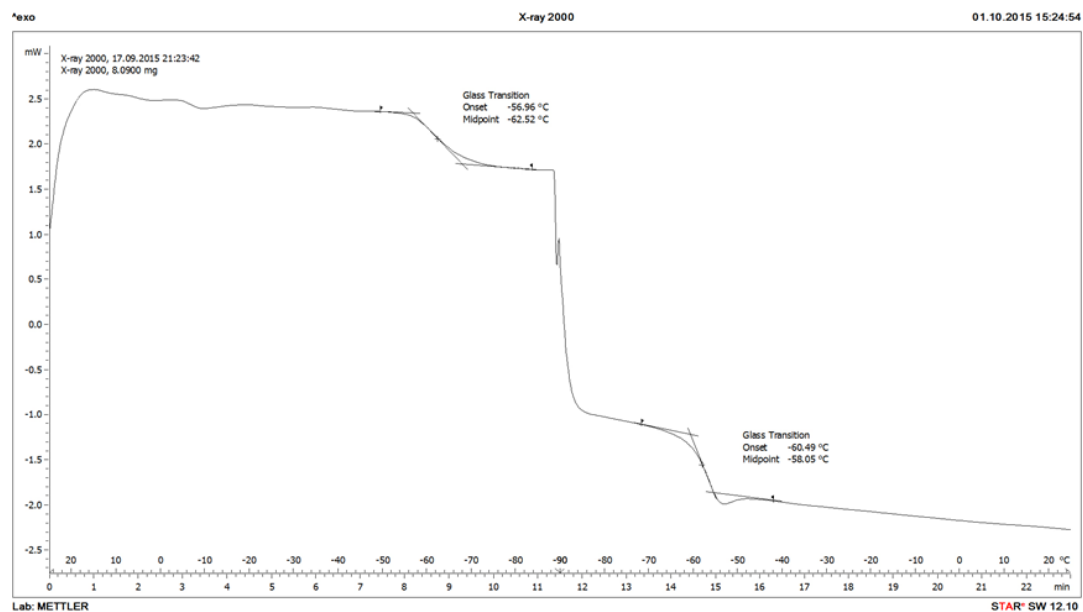
ภาพที่ 30 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 600 cGy



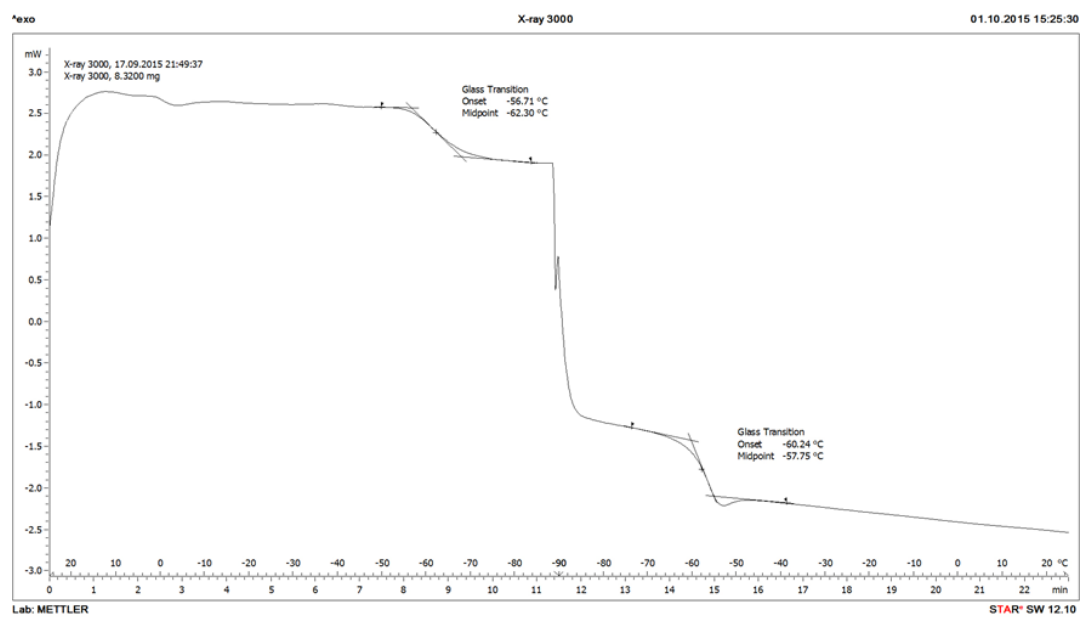
ภาพที่ 31 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 800 cGy



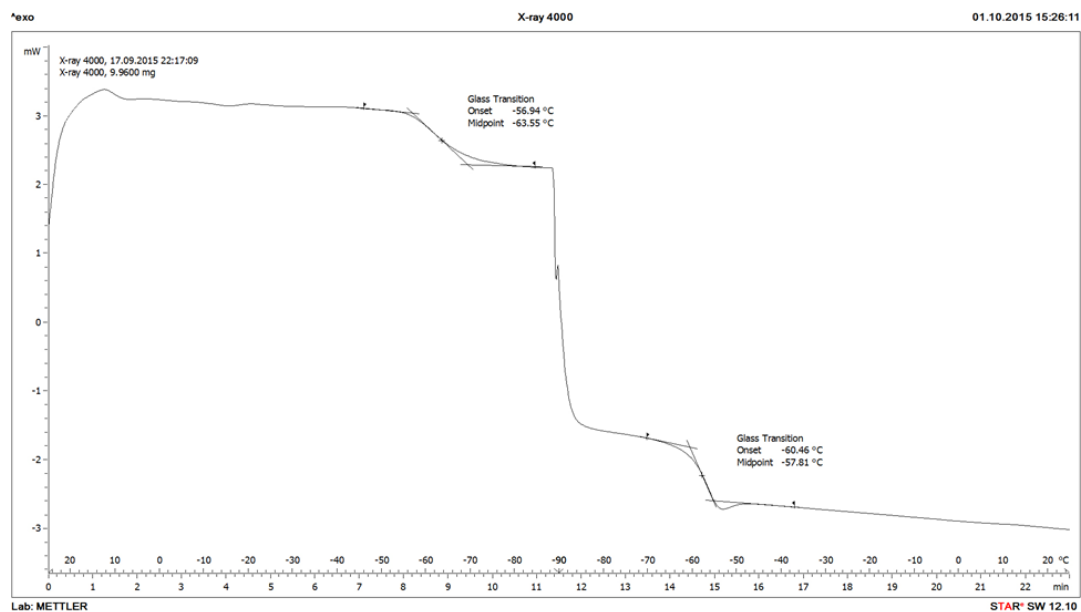
ภาพที่ 32 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 1000 cGy



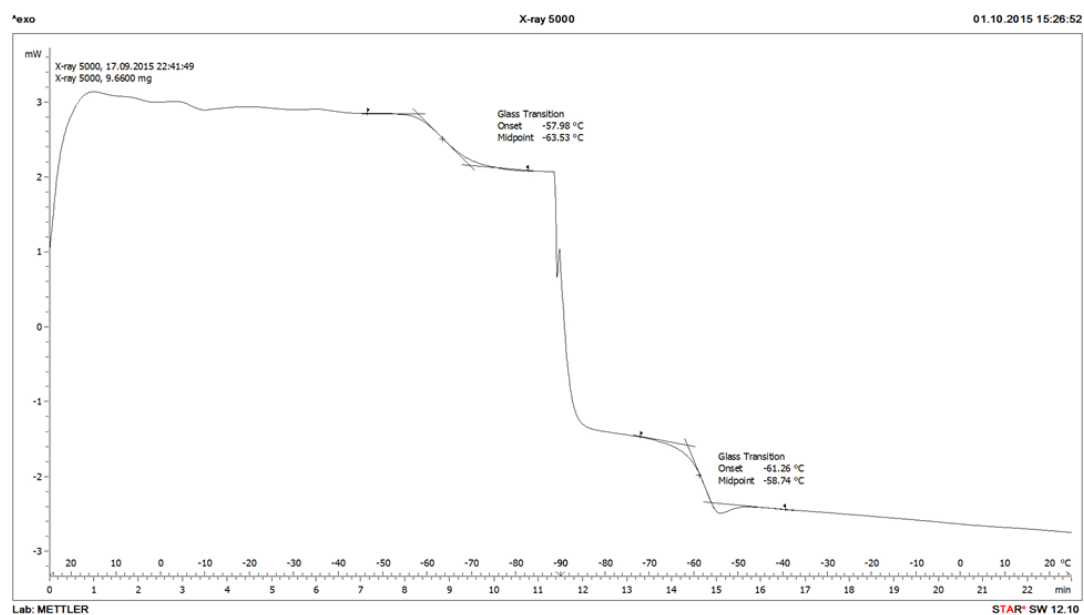
ภาพที่ 33 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 2000 cGy



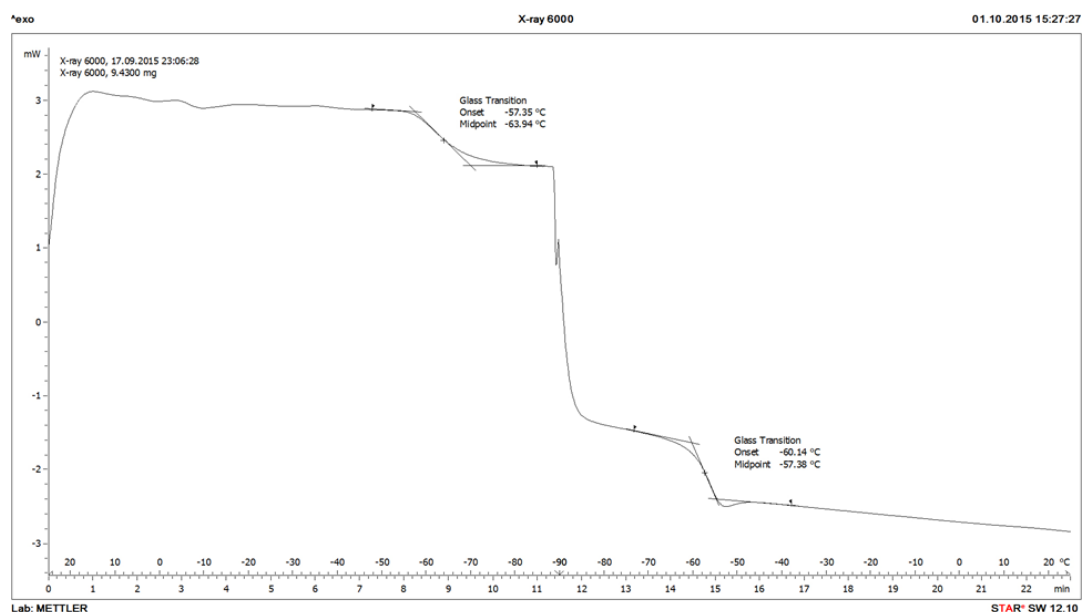
ภาพที่ 34 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 3000 cGy



ภาพที่ 35 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 4000 cGy



ภาพที่ 36 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 5000 cGy

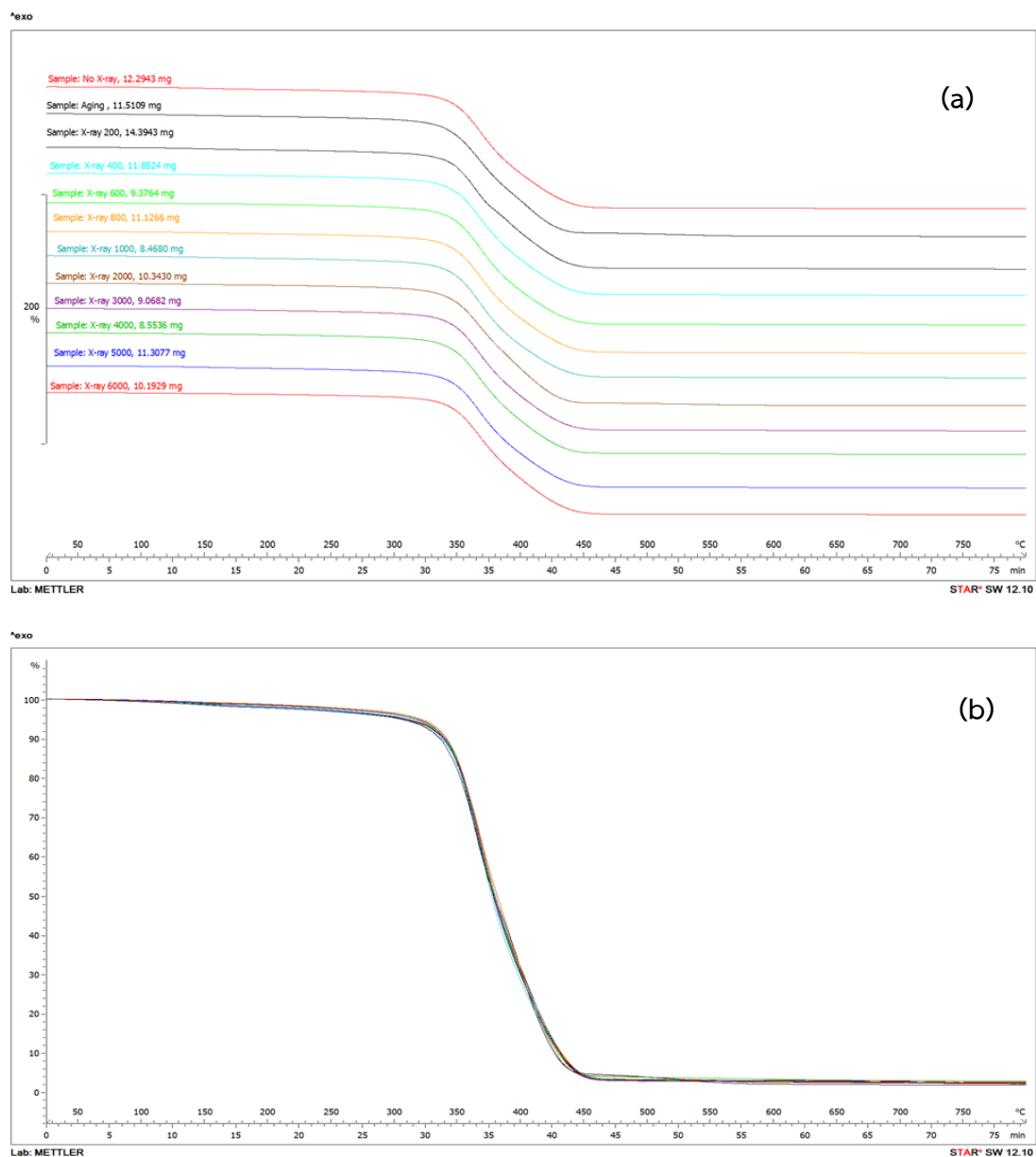


ภาพที่ 37 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 6000 cGy

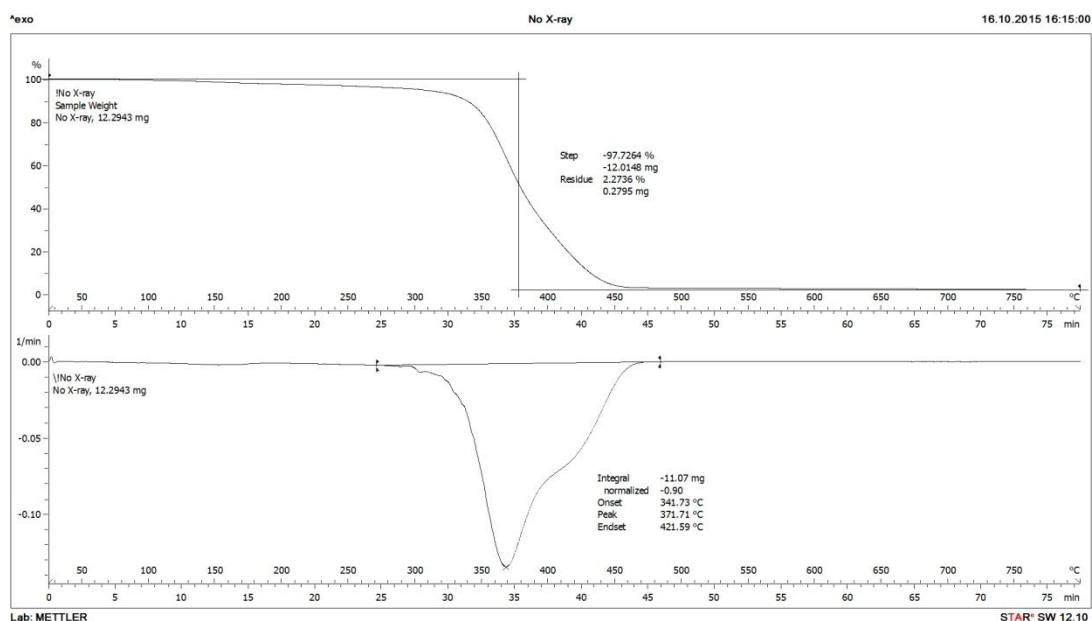
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จะวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงาน Yang ที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 10 และโครมาโตแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 38 ซึ่งพบว่าค่า $T_{d \text{ onset}}$ ประมาณ 335.91 – 341.73 °C และ $T_{d \text{ peak}}$ ประมาณ 365.21 – 371.71 °C ส่วนการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงาน Yang เหล่านี้ จะพบว่ามี 2 องค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบแรกมีอุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้น จะมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ 97.15 – 98.28 % และที่เหลือจะเป็น residue 1.72 – 2.85 % ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงาน Yang ที่ผ่านการ Aging และหลังการฉายรังสี จะมีค่า $T_{d \text{ onset}}$ และ $T_{d \text{ peak}}$ ต่ำกว่าชิ้นงาน Yang ที่ไม่ได้ฉายรังสีประมาณ 2-5 °C และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงาน Yang ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีให้แก่ชิ้นงาน Yang ในช่วง 200 – 6,000 cGy นี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของ Yang ในลักษณะดังนี้คือ เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลในโครงสร้าง Yang ให้สั้นลงในบางสายโซ่โมเลกุล ซึ่งเป็นผลจากค่า T_d ที่ลดลงและพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงาน Yang ที่ Aging ชิ้นงาน Yang ที่ ฉายรังสี 200 และ 2,000 cGy มีลักษณะพิกซ้อนกันอยู่สองพิกแสดงดังภาพที่ 40, 41 และ 46 และมีการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้าง Yang เนื่องจากปรากฏอุณหภูมิสลายตัวนั้นมีช่วงการสลายตัวที่กว้างของชิ้นงาน Yang ที่ฉายรังสี 600, 4,000 และ 6,000 cGy โดยพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG แสดงดังภาพที่ 43, 48 และ 50

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง
ก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ

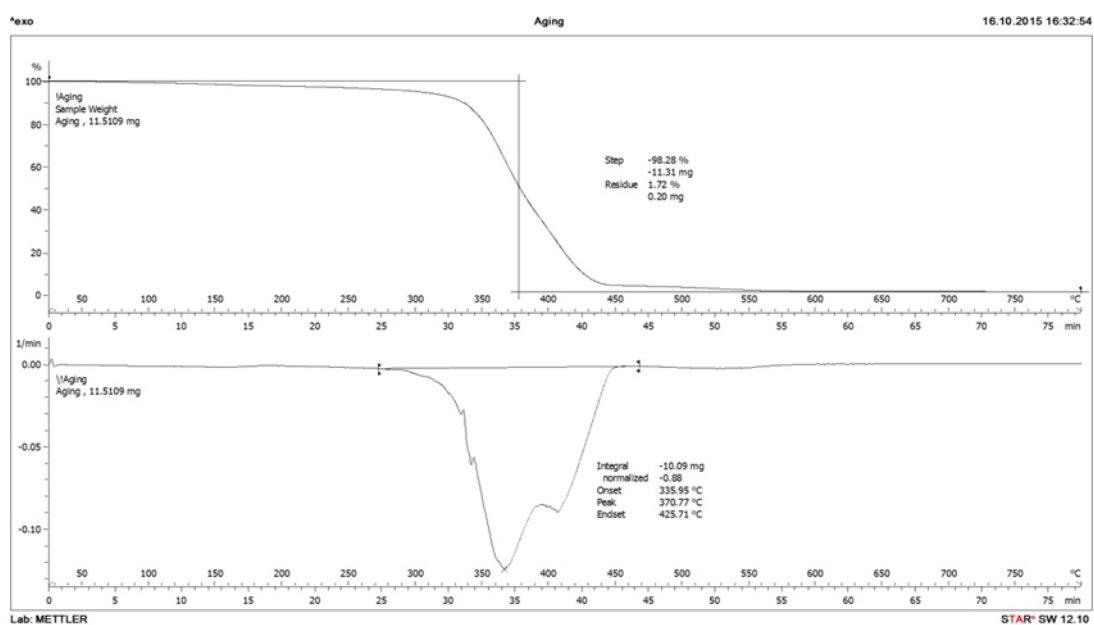
ตัวอย่าง	Decomposition Temperature, T_d ($^{\circ}\text{C}$) for 1 st composition		Composition	
			1 st composition	2 nd composition
	$T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d \text{ peak}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	(%w/w)	(Residue) (%w/w)
Non x-ray	341.73	371.71	97.73%	2.27%
Aging	335.95	370.77	98.28%	1.72%
x-ray 200 cGy	309.84	365.21	97.60%	2.40%
x-ray 400 cGy	341.55	370.38	97.75%	2.25%
x-ray 600 cGy	339.53	371.59	97.82%	2.18%
x-ray 800 cGy	338.96	370.88	97.49%	2.51%
x-ray 1,000 cGy	338.45	370.69	97.86%	2.14%
x-ray 2,000 cGy	336.97	370.60	97.86%	2.14%
x-ray 3,000 cGy	338.06	369.28	97.99%	2.01%
x-ray 4,000 cGy	335.53	367.25	97.15%	2.85%
x-ray 5,000 cGy	338.91	369.92	97.72%	2.28%
x-ray 6,000 cGy	308.26	368.52	97.73%	2.27%



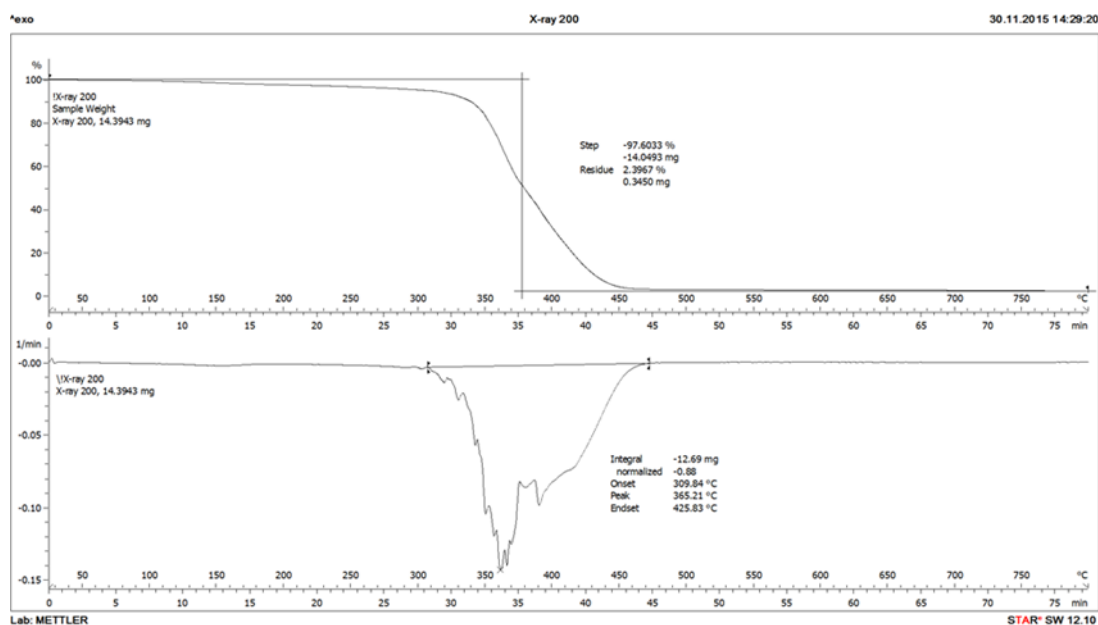
ภาพที่ 38 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ (a) และกราฟที่ overlay (b)



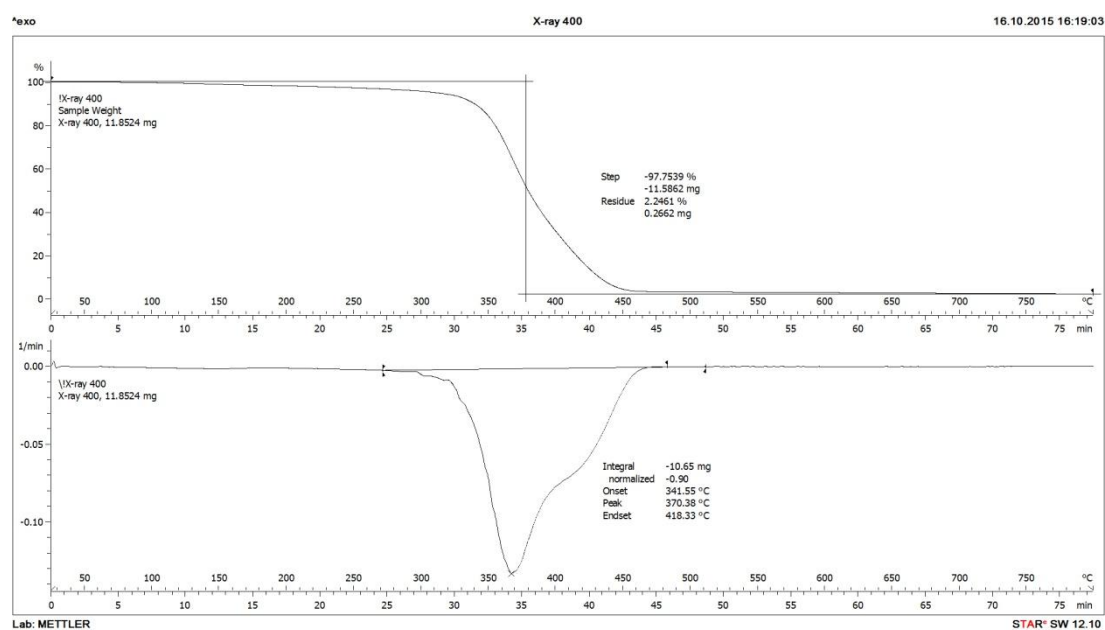
ภาพที่ 39 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray



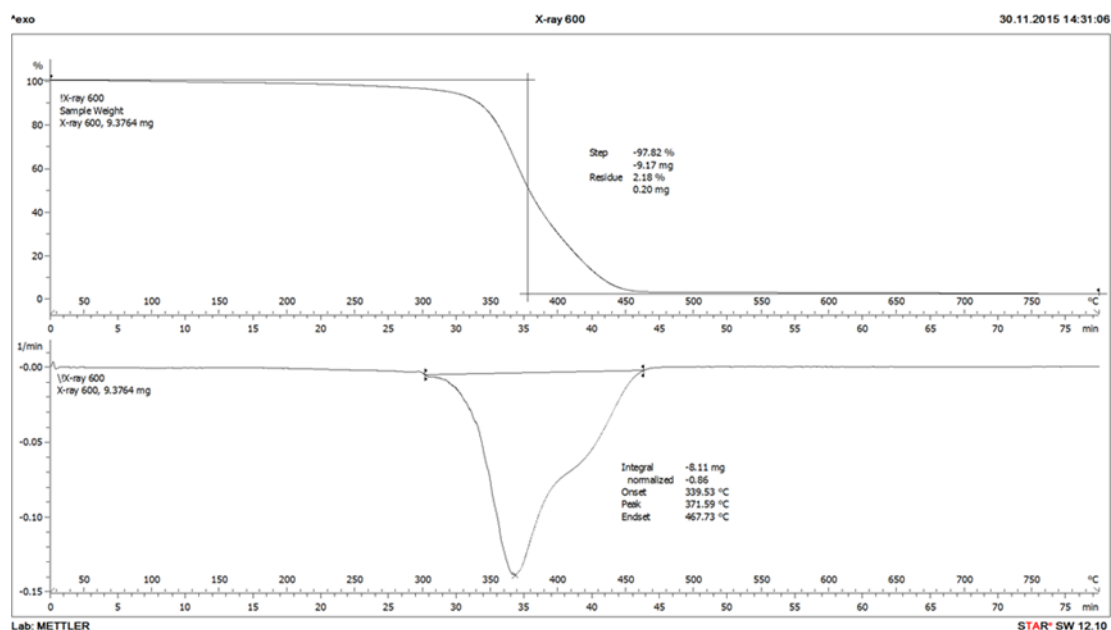
ภาพที่ 40 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging



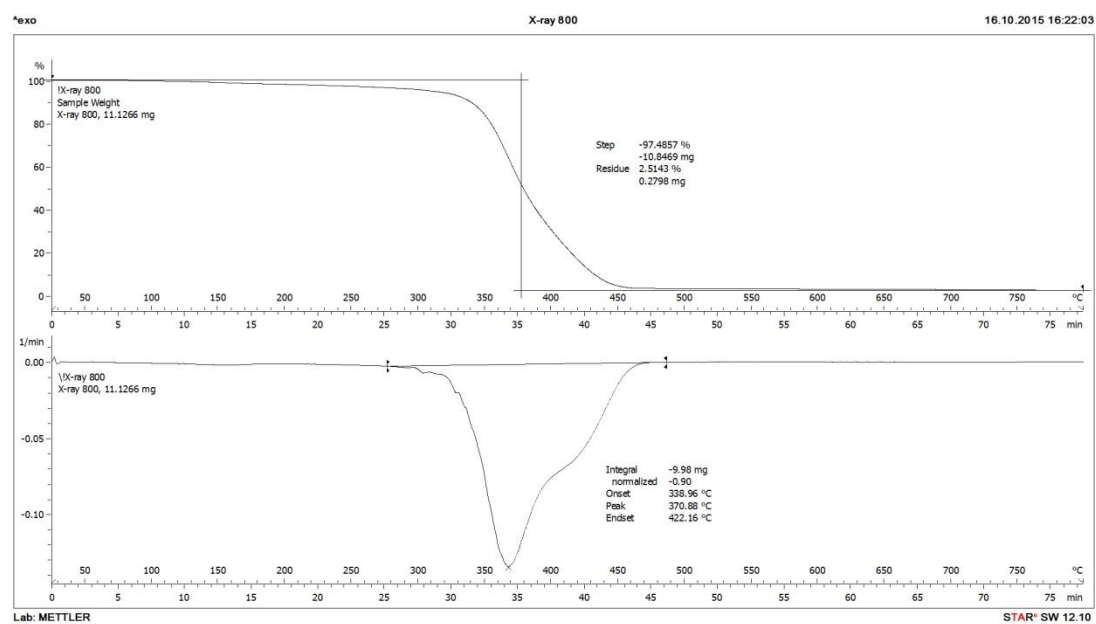
ภาพที่ 41 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 200 cGy



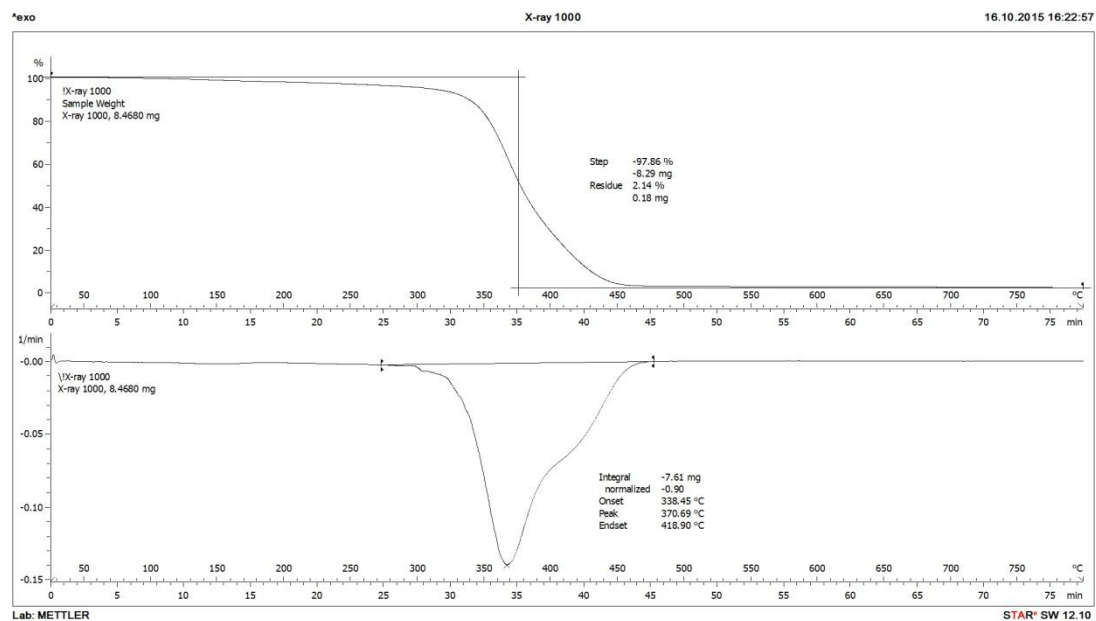
ภาพที่ 42 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 400 cGy



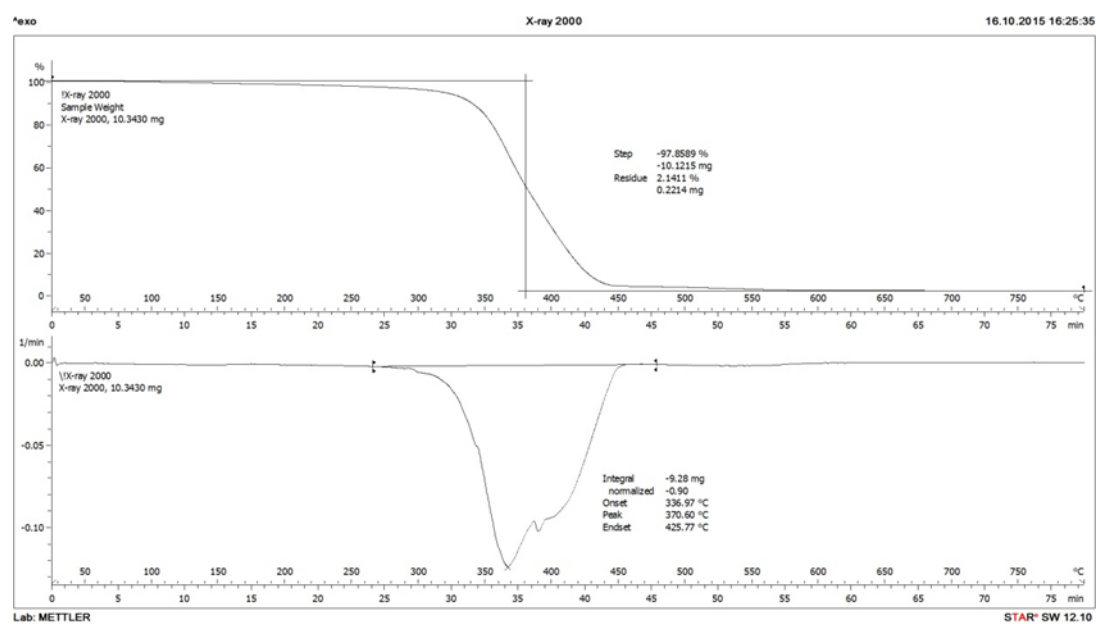
ภาพที่ 43 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 600 cGy



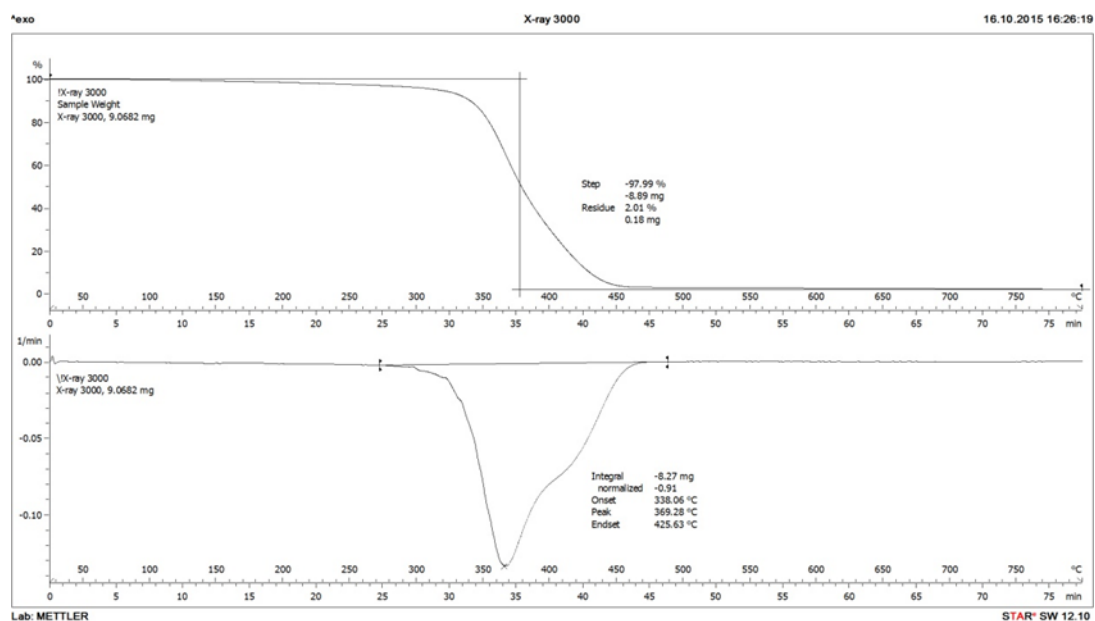
ภาพที่ 44 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 800 cGy



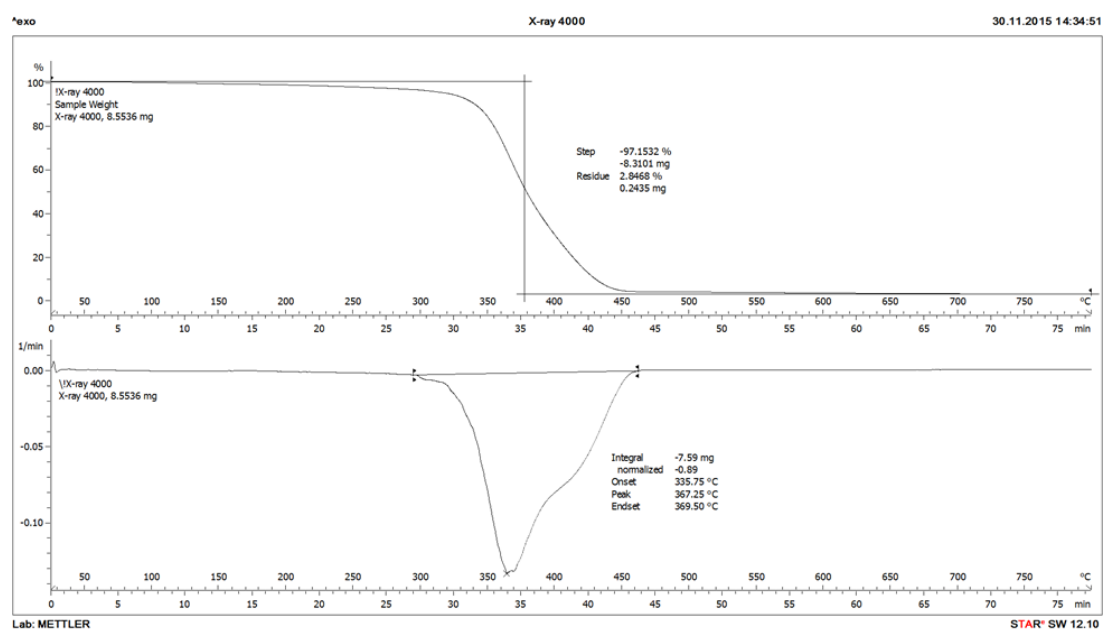
ภาพที่ 45 โคโรนาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 1,000 cGy



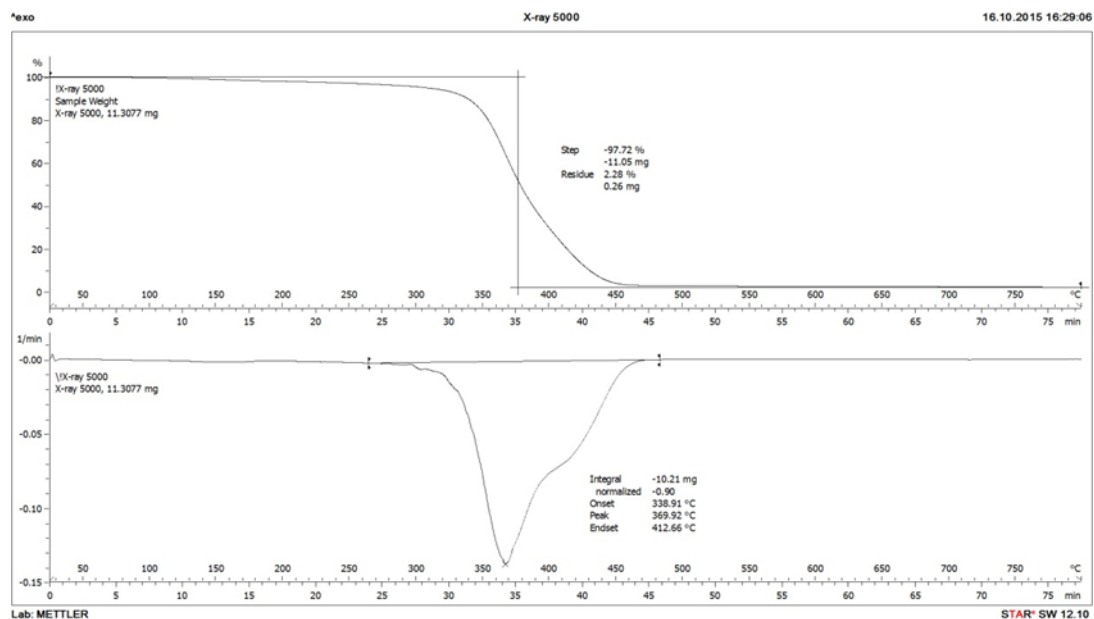
ภาพที่ 46 โคโรนาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 2,000 cGy



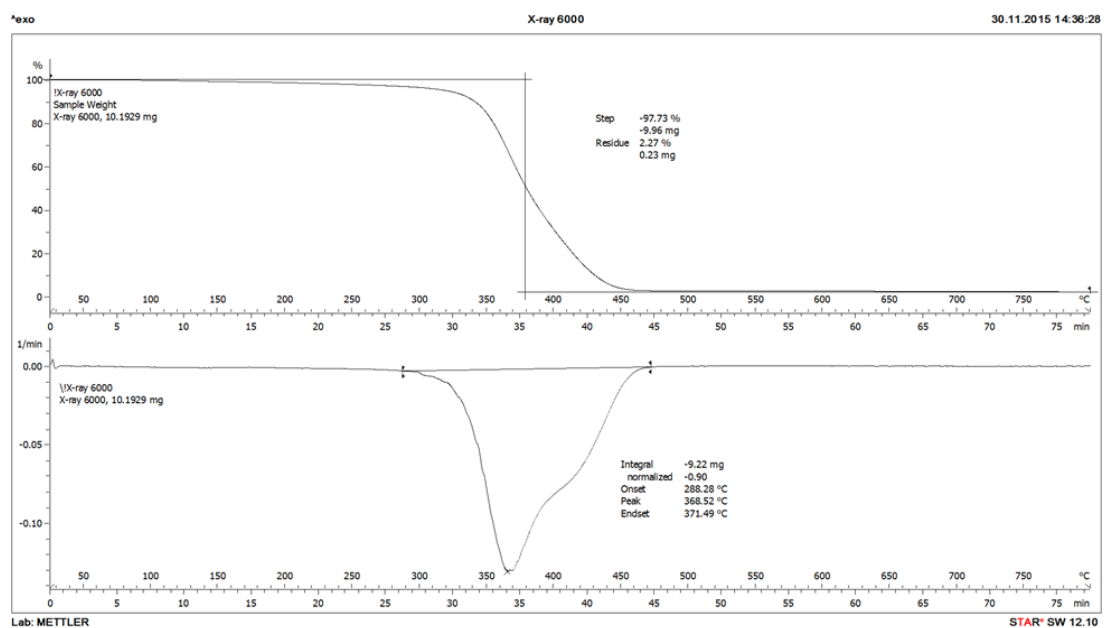
ภาพที่ 47 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 3,000 cGy



ภาพที่ 48 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 4,000 cGy



ภาพที่ 49 โคโรมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 5,000 cGy



ภาพที่ 50 โคโรมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 6,000 cGy

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

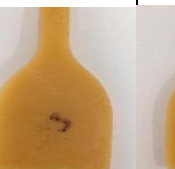
สูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นในการสร้างหุ่นจำลองจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้มีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยสูตรยางเดียวกันและใช้เทคนิคการขึ้นรูปดังที่ได้แสดงรายละเอียดในวิธีดำเนินการวิจัย โดยชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นได้ถูกนำมาทดสอบการทนต่อรังสีด้วยการนำชิ้นงานตัวอย่างไปทำการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy อัตราการให้ปริมาณรังสี (dose rate) เท่ากับ 300 cGy/MU ด้วยเทคนิค SAD ที่ระดับความลึกจากผิวเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร (Dmax) โดยวางชิ้นงานบน solid water phantom ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร เพื่อให้เกิด full back-scattered ดังภาพที่ 51 จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาดตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.8

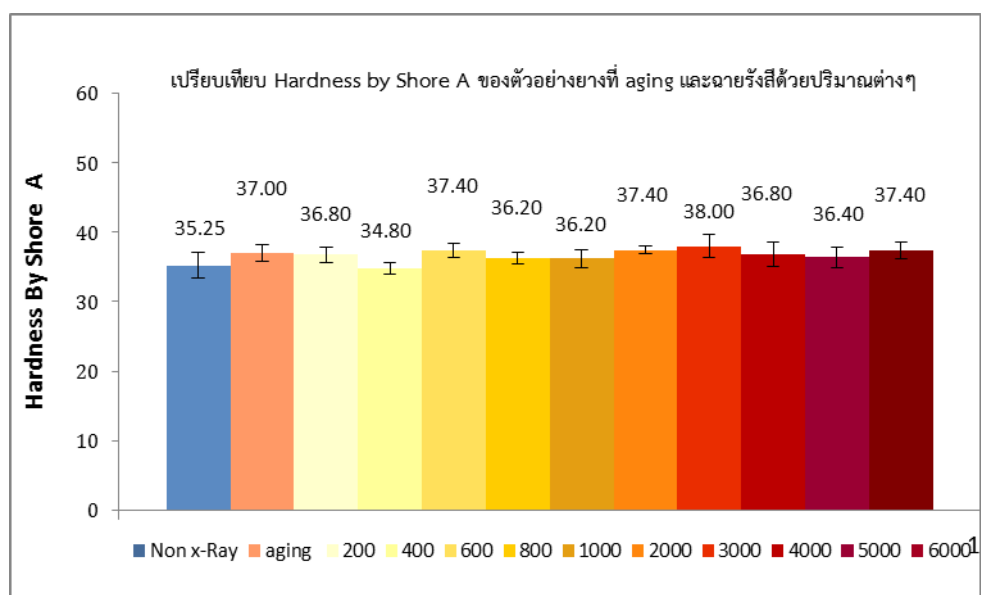


ภาพที่ 51 การฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV อัตราปริมาณรังสี 300 cGy/minute ปริมาณรังสีตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy

ผลการประเมินลักษณะทางกายภาพชิ้นงานยางพาราเมื่อทำการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 11 ซึ่งแสดงภาพถ่ายชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ aging, ชิ้นงานตัวอย่างยางที่ก่อนและหลังการฉายรังสีปริมาณต่างๆ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางยังมีสีเหลืองน้ำตาล โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเมื่อสัมผัสด้วยตาเปล่า เมื่อมีการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C (Aging) และการรับปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy โดยการฉายรังสีด้วยค่าดังกล่าวทำให้เกิดปริมาณความร้อนมีเพียงเล็กน้อยจึงไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

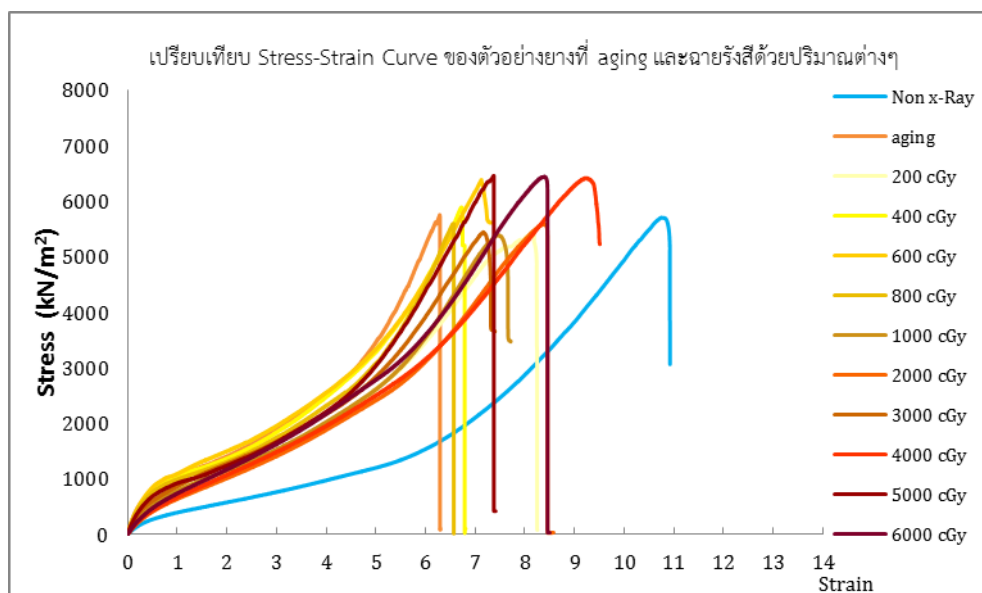
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการฉายรังสีด้วยปริมาณ
ต่างๆ

ตัวอย่าง	Non x- ray	Aging	x-ray 200 cGy	x-ray 400 cGy	x-ray 600 cGy	x-ray 800 cGy
ภาพถ่าย ชิ้นงาน						
ลักษณะที่ สังเกตเห็น	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล
ภาพถ่าย ชิ้นงาน						
ลักษณะที่ สังเกตเห็น	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลืองน้ำตาล

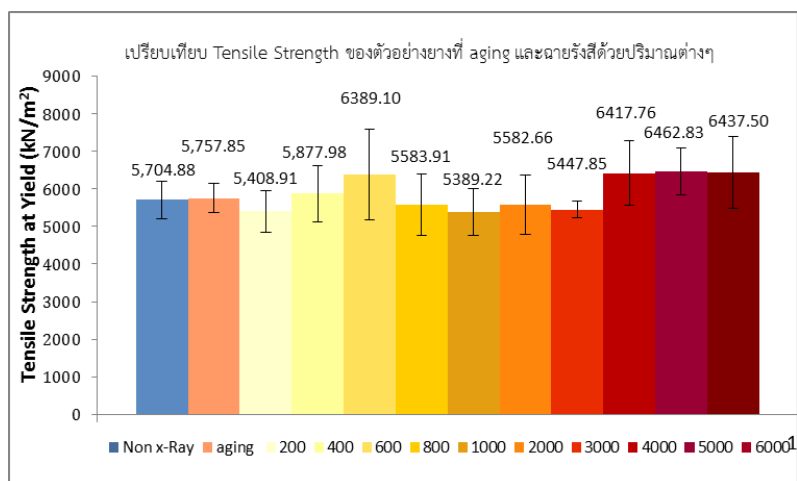


ภาพที่ 52 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน

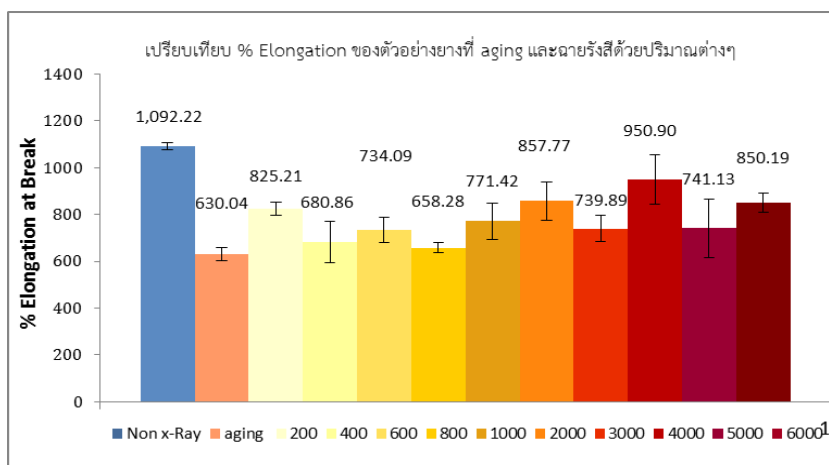
จากภาพที่ 52 ค่าความแข็ง Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองทั้ง non x-ray, Aging และการฉายรังสี x-ray ขนาด 200, 400, 600, 800, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 6,000 cGy มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วง 34.80-38.00 ซึ่งแสดงว่า ถึงแม้ให้ปริมาณสูงถึง 6,000 cGy ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยางที่ทดสอบ



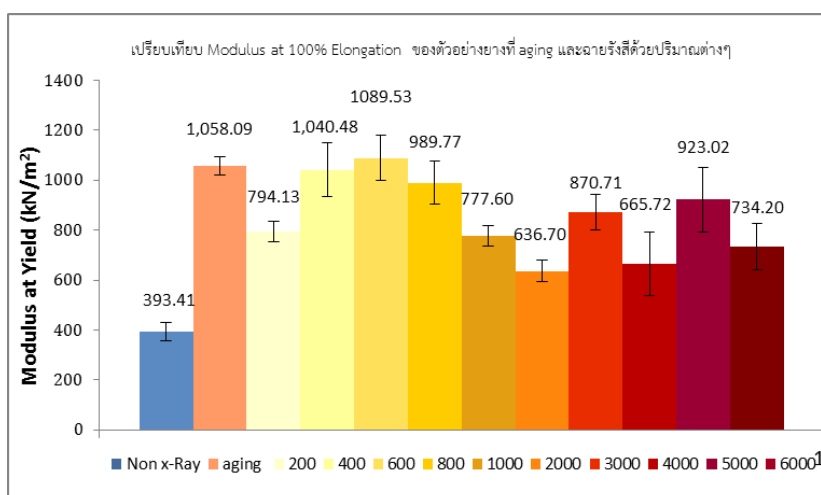
ภาพที่ 53 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

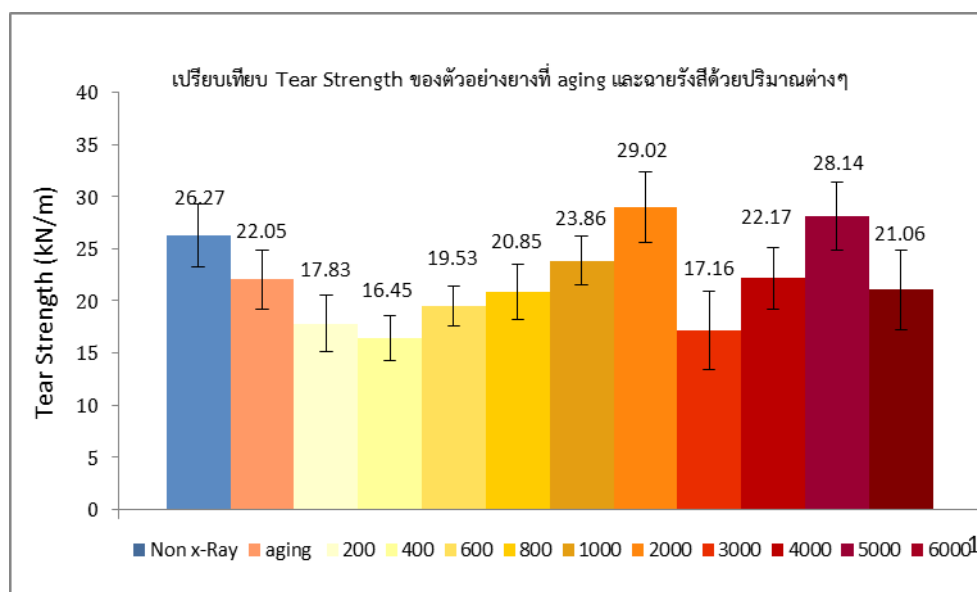


ภาพที่ 55 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่าน และผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน

จากภาพที่ 53, 54, 55 และ 56 แสดง Stress - Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 200, 800, 1,000, 2,000 และ 3,000 cGy (มีค่า 5389.22 - 5583.91 kN/m²) มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างยาง non x-ray เล็กน้อย (มีค่า 5704.88 kN/m²) นั่นคือมีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ส่วนชิ้นงานยางที่ Aging และ x-ray ขนาด 400 cGy (มีค่า 5757.85 - 5877.98 kN/m²) จะมีค่าสูงกว่า non x-ray เล็กน้อย แต่ชิ้นงานยางที่ x-ray ขนาด 600, 4,000 และ 6,000 cGy (มีค่า 6389.10 - 6462.83 kN/m²) มีค่าสูงกว่ายาง non x-ray เนื่องจากชิ้นงานยางที่นำมาทดสอบนี้เมื่อได้รับความร้อนจากการฉายรังสี มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง โดยเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานตัวอย่างยางที่ฉายรังสีมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า % Elongation (ภาพที่ 55) และ ค่า Modulus at 100% Elongation (ภาพที่ 56) นั่นคือ ค่า % Elongation ของชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray มีค่าต่ำกว่ายาง non x-ray ส่วนค่า Modulus at 100% Elongation ชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray (มีค่า 636.70 - 1089.53 kN/m²) มีค่าสูงกว่ายาง non x-ray (มีค่า 393.41 kN/m²) อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก Stress-Strain Curve จะเห็นเส้นกราฟของชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray มีค่าความชันสูงกว่ายาง non x-ray อย่างเด่นชัด แสดงดังภาพที่ 53 นั่นคือชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray จะมีความยืดหยุ่นลดลงนั่นเอง

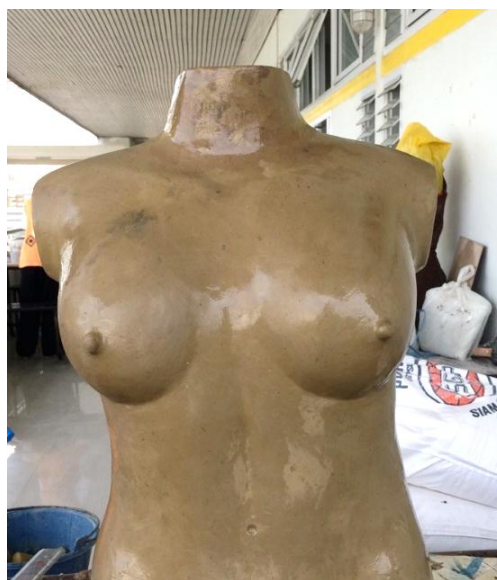


ภาพที่ 57 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน

จากภาพที่ 57 แสดง Tear Strength ของของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า Tear Strength ของชิ้นงานยางที่ Aging และผ่านการฉายรังสี 200 – 6,000 cGy (มีค่า 16.45 – 23.86 kN/m) มีค่าที่ต่ำกว่าชิ้นงานยาง non x-ray (มีค่า 26.27 kN/m) นั่นคือชิ้นงานยางที่นำมาทดสอบที่ผ่านการฉายรังสี x-ray มีค่าการทนต่อแรงฉีกขาดลดลง ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ฉายรังสี x-ray 2,000 มีค่า Tear Strength เท่ากับ 29.02 kN/m และชิ้นงานยาง x-ray 5,000 cGy มีค่า Tear Strength เท่ากับ 28.14 kN/m จะเห็นว่ามีค่า Tear Strength สูงกว่าชิ้นงานยาง non x-ray เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 5 การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านม

ผลของการออกแบบหุ่นจำลองและสร้างแม่แบบหุ่นทรวงอกและเต้านมด้วยดินเหนียวได้หุ่นจำลองแม่แบบจากดินเหนียวแสดงดังภาพที่ 58 เมื่อนำแม่แบบหุ่นทรวงอกดินเหนียวมาทำการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์แสดงดังภาพที่ 59 แม่พิมพ์หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นแบ่งออกเป็นซีกด้านหน้าและด้านหลังสามารถประกบกันได้อย่างพอดีแสดงดังภาพที่ 60 แม่พิมพ์ดังกล่าวใช้สำหรับเทน้ำยางพาราผสมสารเคมีเป็นแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกที่มีความคงทนและแข็งแรง สามารถคงรูปอยู่ได้หลังจากเทน้ำยางพารา เนื่องจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำยางพาราที่มีปริมาณมากถึง 20-30 กิโลกรัมต่อหุ่นจำลองแต่ละชิ้น แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกทั้งซีกด้านหน้าและด้านหลังสามารถประกบกันอย่างพอดีแสดงดังภาพที่ 61 ทำให้ขอบและบริเวณรอยต่อมีความสมดุลซึ่งจะทำให้ไม่ปรากฏเห็นเป็นขอบรอยต่อที่ตัวหุ่นยางพาราภายหลังการขึ้นรูปแล้ว บริเวณรอยต่อที่ประกบกันบนแม่พิมพ์จะถูกยึดด้วยนอตโดยรอบเพื่อให้แม่พิมพ์คงรูปอยู่ได้ขณะทำการเทน้ำยางพารา ผลการขึ้นรูปหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมจากยางพาราด้วยแม่พิมพ์เรซินทำให้ได้หุ่นจำลองยางพาราสำหรับวัดปริมาณรังสีแสดงดังภาพที่ 62



ภาพที่ 58 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรวงอกจากดินเหนียว



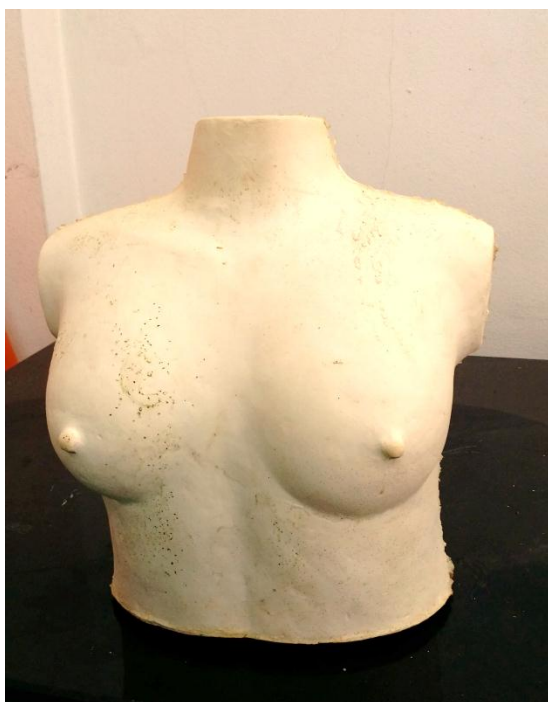
ภาพที่ 59 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรงอกที่ทำจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์



ภาพที่ 60 ผลการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ด้านหลัง



ภาพที่ 61 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ที่สามารถประกบกันอย่างพอดี



ภาพที่ 62 หุ่นจำลองทรงออกยาราก่อนการตกแต่งและทำสีที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซิน

สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างปอดจำลองใช้การขึ้นรูปแม่แบบด้วยปูนปลาสเตอร์ดังภาพที่ 63 จากนั้นสร้างแม่พิมพ์ด้วยเรซินผสมไฟเบอร์และเจาะรูเพื่อยึดแม่พิมพ์ให้แนบสนิทด้วยน็อตเพื่อให้ประกบกันได้พอดีและป้องกันน้ำยางพารารั่วออกขณะเทยางพาราเช่นเดียวกับการสร้างหุ่นจำลองทรงอกและเต้านมดังแสดงในภาพที่ 64 และ 65 ตามลำดับ ผลการสร้างปอดจำลองจากยางพาราแสดงดังภาพที่ 66 โดยปอดจำลองที่ได้มีผิวเรียบสม่ำเสมอและมีรูปทรงคงที่สามารถนำไปจัดวางในหุ่นจำลองทรงอกยางพาราได้



ภาพที่ 63 ผลการสร้างแม่แบบหุ่นปอดจำลองจากปูนปลาสเตอร์



ภาพที่ 64 แม่พิมพ์ปอดที่สร้างจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์



ภาพที่ 65 การยึดแม่พิมพ์ปอดจำลองทั้งสองซีกให้แนบสนิทด้วยน็อต



ภาพที่ 66 ปอดจำลองยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองยางพารา

การทดสอบความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา แสดงดังภาพที่ 67 โดยผลการประเมินค่าความสม่ำเสมอจากค่าเลขซีทีเฉลี่ยบริเวณเนื้อเยื่อระดับเต้านมและช่องท้องแสดงดังภาพที่ 68 และตารางที่ 12 ผลการประเมินค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองยางพาราบริเวณเนื้อเยื่อระดับเต้านมจำนวน 5 ตำแหน่งได้ค่าเลขซีทีเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งอยู่ภายในช่วง -11.1 ถึง -18.3 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 4.6 ถึง 7.5 โดยมีค่าเฉลี่ยเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่งเท่ากับ -14.38 สำหรับความสม่ำเสมอบริเวณเนื้อเยื่อระดับช่องท้องจำนวน 6 ตำแหน่ง ค่าเลขซีทีเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งอยู่ภายในช่วง -11.4 ถึง 8.3 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 5.0 ถึง 11.8 โดยมีค่าเฉลี่ยเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่งเท่ากับ -3.6



ภาพที่ 67 การประเมินค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา

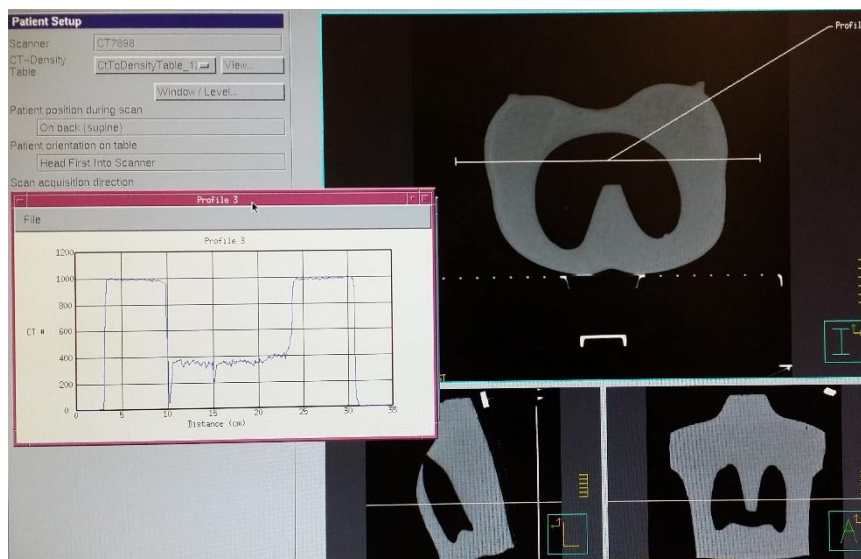


ภาพที่ 68 การประเมินค่าความสม่ำเสมอภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านม

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบค่าความความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองทรวงอก

ตำแหน่ง	ตำแหน่ง ROI	ค่าเฉลี่ยซีที (HU)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
ระดับเต้านม	1	-11.1	4.6
	2	-18.3	6.3
	3	-12.2	7.1
	4	-17.2	5.3
	5	-13.1	7.5
ค่าเฉลี่ยเลขซีที		-14.38	
ระดับช่องท้อง	1	-6.7	8.0
	2	1.7	7.7
	3	-3.8	17.8
	4	-11.4	5.0
	5	-9.9	15.4
	6	8.3	9.2
ค่าเฉลี่ยเลขซีที		-3.6	

สำหรับการประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ด้วยการสร้างโปรไฟล์แนวขวางหุ่นจำลองทรวงอกได้ผลการประเมินแสดงดังภาพที่ 41 พบว่าหุ่นจำลองมีความสม่ำเสมอดีตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง นอกจากนี้ยังพบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่เหมือนมนุษย์โดยปอดอยู่ภายในหุ่นจำลองและรูปร่างภายนอกคล้ายกับมนุษย์จริงสามารถแสดงภาพตัดขวางแนว axial, sagittal และ coronal views ได้ดังภาพที่ 69



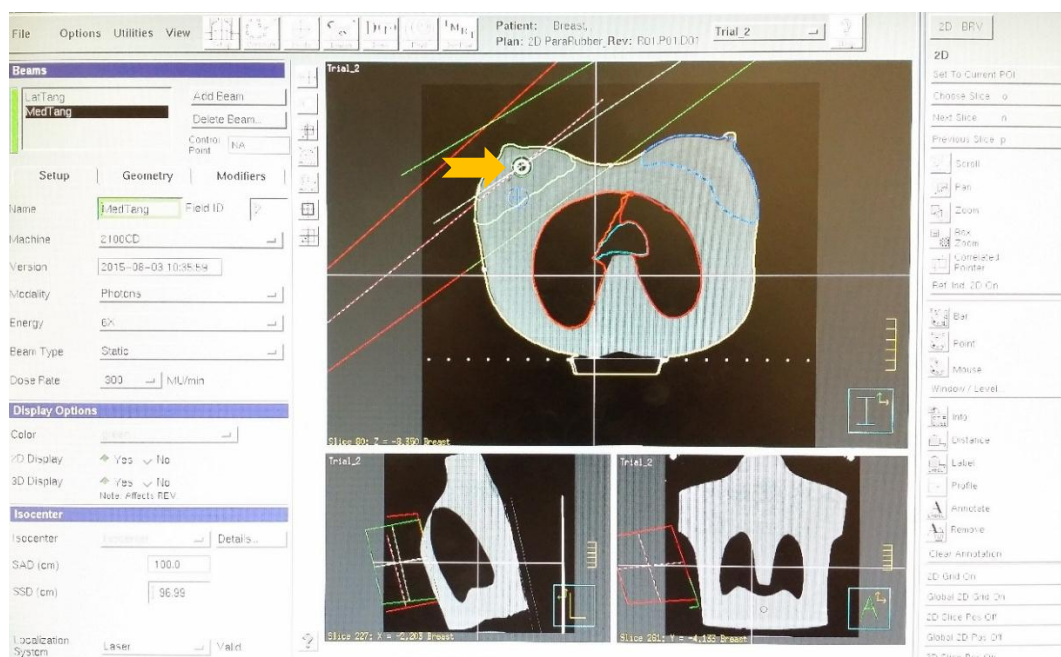
ภาพที่ 69 การประเมินค่าความสม่ำเสมอจากภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบการวัดปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบความถูกต้องการวางแผนการรักษา

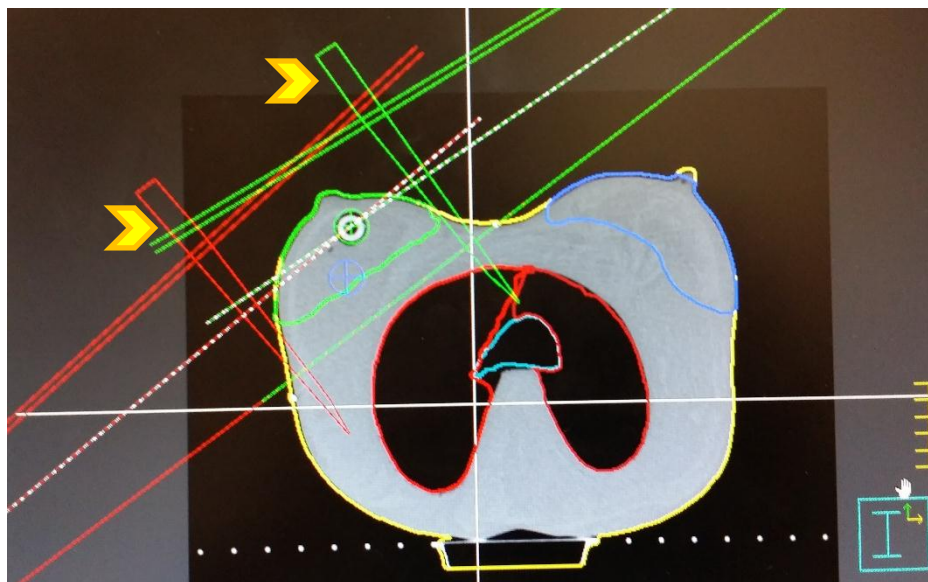
7.1 การวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมในวิธีการประเมินด้วยการส่งแผนการรักษาไปยังเครื่องเร่งอนุภาคบริษัท Varian รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV และอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU เพื่อทำการฉายรังสีตามแผนการรักษา จากนั้นทำการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกยาวพาราที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber เพื่อประเมินความถูกต้องของแผนการรักษา โดยทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาและการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีในหุ่นจำลอง สำหรับแผนการรักษาประกอบด้วยแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ จากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ดังแสดงดังภาพที่ 70 สำหรับพารามิเตอร์ที่ได้จากการวางแผนการรักษาทั้ง 2 แบบในครั้งนี้ ประกอบด้วยค่าตำแหน่งการหมุนของเตียงผู้ป่วย (couch) เท่ากับ 0 องศา มุมของแกนทรี (Gantry) เท่ากับ 50.5 และ 230.5 องศา สำหรับลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields ตามลำดับ มุมคอลลิเมเตอร์ (Collimator) เท่ากับ 348.7 องศา เปิดลำรังสีให้มีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งด้วยพื้นที่ 10x17 ตารางเซนติเมตร กำหนดตำแหน่งจุดหมุนระหว่างลำรังสีทั้งสองทิศทางที่ตำแหน่งของหัววัดรังสีซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นบริเวณกึ่งกลางลำรังสีแสดงดังภาพที่ 43 สำหรับการฉายรังสีเต้านมบนพื้นที่ฉายรังสีที่ระนาบไม่ตั้งฉากกับลำรังสีเนื่องจากความโค้งของเต้านมส่งผลให้ปริมาณรังสีภายในเต้านมไม่ครอบคลุมก้อนมะเร็งทั้งหมด โดยสามารถใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge เพื่อชดเชยส่วน

ของเนื้อเยื่อเต้านมได้แสดงดังภาพที่ 71 การวิจัยครั้งนี้ใช้ wedge ขนาด 15 องศาทั้งสองทิศทางลำรังสีตั้งแสดงในภาพที่ 71 (หัวลูกศรแสดง wedge ทั้งสองทิศทาง)



ภาพที่ 70 การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา Pinnacle ทิศทางลำรังสี medial และ lateral tangential fields จุดหมุนระหว่างลำรังสีอยู่ในกึ่งกลางลำรังสีซึ่งเป็นตำแหน่งหัววัดรังสี (ลูกศรชี้)



ภาพที่ 71 การวางแผนการรักษาที่ใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge ขนาด 15 องศาเพื่อลดความเสี่ยงของเนื้อเยื่อเต้านม (หัวลูกศรชี้แสดง wedge ทั้งสองทิศทาง)

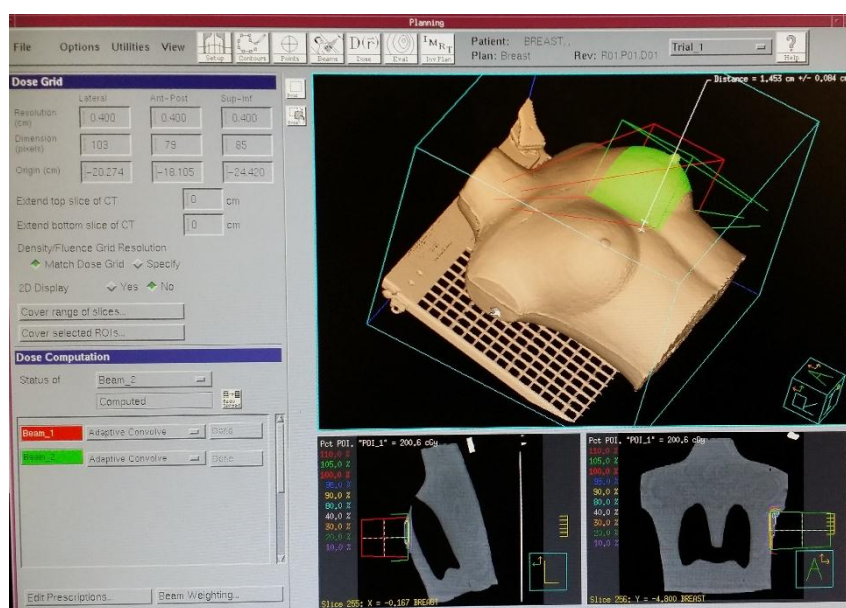
การวางทิศทางลำรังสีทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติใช้วิธีการประเมินภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal views) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal views) ดังภาพที่ 72 (a) และ 72 (b) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกให้เป็นภาพ 3 มิติ เพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางลำรังสีได้ดียิ่งขึ้นแสดงดังภาพที่ 73 การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติใช้การเปิดพื้นที่ลำรังสีด้วยคอลลิเมเตอร์ในลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้ลำรังสีเปิดเป็นพื้นที่กว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งและเนื้อเยื่อเต้านมปกติรอบก้อนมะเร็งนั้น สำหรับการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติเป็นเทคนิคการรักษาที่พัฒนาขึ้นจากเทคนิค 2 มิติ โดยจำกัดขอบเขตลำรังสีให้ครอบคลุมเฉพาะเต้านมเพื่อลดปริมาณรังสีที่เนื้อเยื่อเต้านมปกติด้วยการใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็งดังภาพที่ 74 นอกจากนี้การวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักการให้ปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ได้ดังแสดงในภาพที่ 75 ผลการปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักการให้ปริมาณรังสีที่ให้แผนการรักษาที่เหมาะสมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เปอร์เซ็นต์ค่าน้ำหนักปริมาณรังสีทิศทาง lateral และ medial tangential เท่ากับ 46.5% และ 53.5% ตามลำดับ



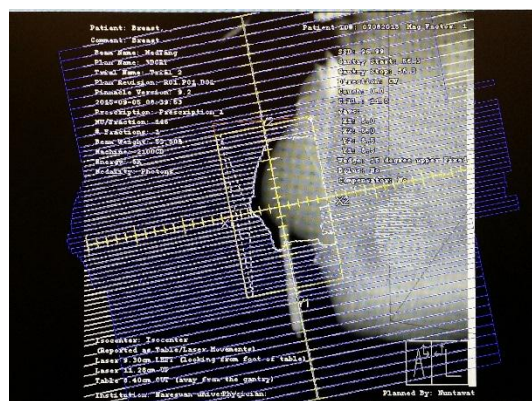
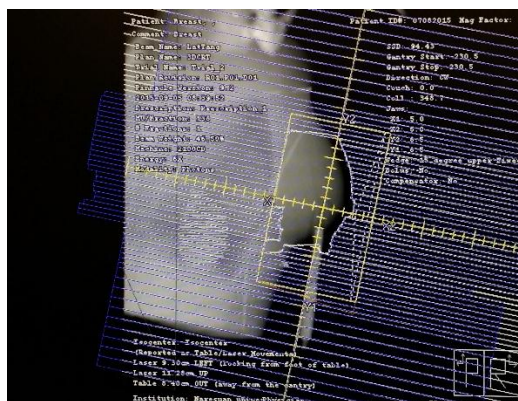
a) ภาพตัดขวาง sagittal views

b) ภาพตัดขวาง coronal view

ภาพที่ 72 ภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal view) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal view)



ภาพที่ 73 ภาพหุ่นจำลองทรวงอกในลักษณะภาพ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางในการกำหนดลำรังสี

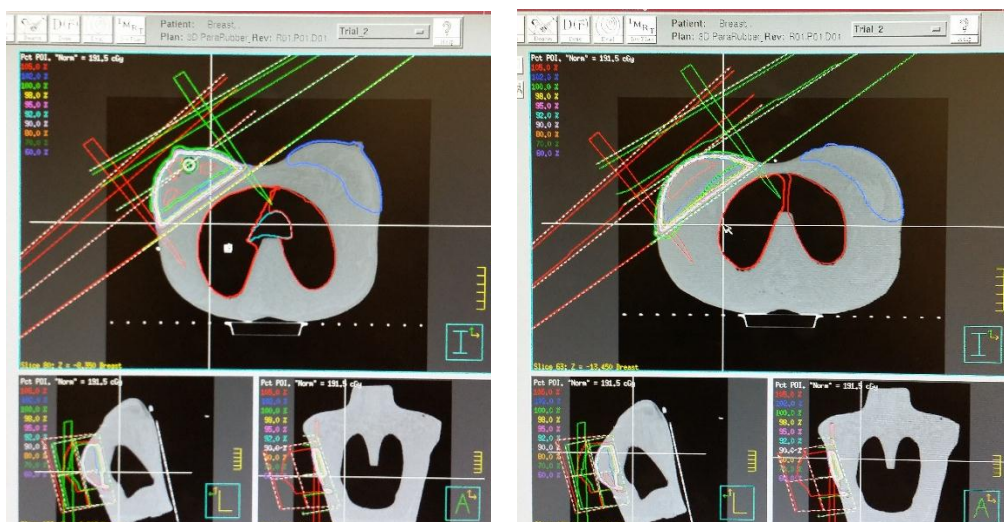


ภาพที่ 74 การใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็ง



ภาพที่ 75 การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ของเทคนิคการแผนการรักษาแบบ 3 มิติ

ผลการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกได้การกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) แสดงดังภาพที่ 76 ซึ่งเป็นการกระจายปริมาณรังสีในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร ผลการวางแผนการรักษาพบว่า การกระจายปริมาณรังสีครอบคลุมก้อนมะเร็งดี การใช้ wedge ขนาด 15 องศาสามารถลดผลที่เกิดจากการโค้งงอของเต้านมได้ดี โดยค่าปริมาณรังสีสูง (hot spot) ไม่เกิน 105% ตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดค่าปริมาณรังสี (Normalization point) มีค่าปริมาณรังสีเท่ากับ 191.5 cGy แผนการรักษาที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาจะถูกตรวจสอบและประเมินผลโดยนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทางรังสีรักษา จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังห้องฉายรังสีเพื่อทำการวัดค่าปริมาณรังสี



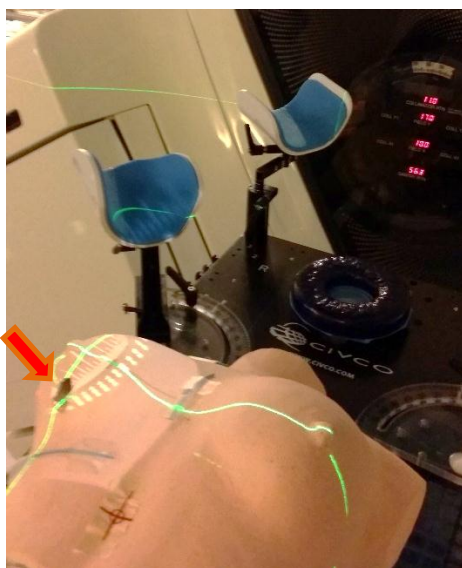
ภาพที่ 76 ผลการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร

7.2 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองทรวงอก

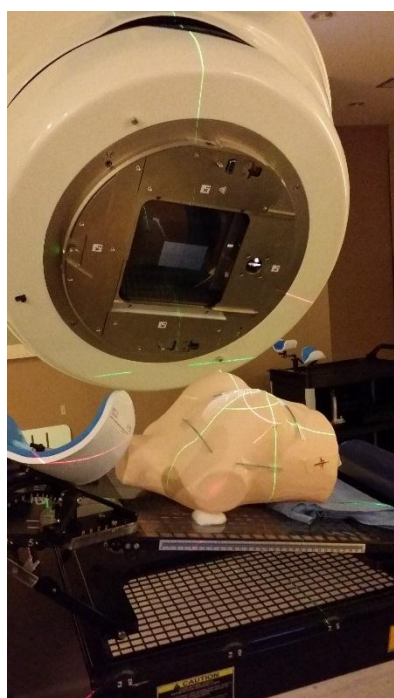
แผนการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาถูกส่งเข้าระบบเครื่องเร่งอนุภาคทำให้สามารถตำแหน่งการฉายรังสีของหุ่นจำลองตามแผนการรักษาซึ่งประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์สำหรับจัดตำแหน่งการฉายรังสีประกอบด้วยค่าตำแหน่งเตียง การหมุนของหัวเครื่อง การหมุนคอลิเมเตอร์ และพื้นที่ฉายรังสี สำหรับการฉายรังสีใช้วิธีการแบ่งฉาย (fractionation) ตามการรักษาจริงด้วยการกำหนดค่าปริมาณรังสีครั้งละ 200 cGy ที่ตำแหน่งจุดหมุนเครื่อง (isocenter) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่วางหัววัดรังสี การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV แสดงดังภาพที่ 77 สำหรับการวัดค่าปริมาณในหุ่นจำลองทรวงอกใช้วิธีการใส่หัววัดรังสีชนิด ionization chamber ขนาด 0.6 cc ลงในช่องที่เจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีซึ่งอยู่ใต้ราวนมขวา ดังแสดงในภาพที่ 78 โดยตำแหน่ง sensitive volume ของหัววัดรังสีอยู่ใต้หัวนมหุ่นจำลองระดับลึกใต้ผิวหนัง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าปริมาณรังสีเพื่อการรักษา (prescription dose) หัววัดรังสีสามารถวางในช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกได้อย่างแนบสนิทเพื่อลดอิทธิพลจาก scattered radiation ซึ่งเกิดจากช่องอากาศระหว่างหัววัดรังสีและหุ่นจำลองที่ทำให้ค่าปริมาณรังสีเกิดความผิดพลาดได้ การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกทิศทาง lateral และ medial tangential แสดงดังภาพที่ 79



ภาพที่ 77 การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ



ภาพที่ 78 ช่องเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีบริเวณใต้ราวนมขวาของหุ่นจำลอง ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสีอยู่ตำแหน่งจุดหมุนอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี



ภาพที่ 79 การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกในทิศทาง lateral และ medial tangential ด้วยเครื่องอนุภาค

7.3 การเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี

ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกจำนวน 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่วัดได้ทั้งเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เมื่อนำค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาพบว่าค่าความแตกต่างปริมาณรังสีของแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างปริมาณรังสีระหว่างการคำนวณและวัดจริงมีค่าน้อยกว่า 3% ทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการปลดปล่อยปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคและการคำนวณค่าปริมาณรังสีของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ซึ่งส่งผลให้การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากหากกำหนดปริมาณรังสีให้ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องส่งผลให้สามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้ดีและเนื้อเยื่อปกติได้รับปริมาณรังสีน้อยทำให้ลดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีได้ดี นอกจากนี้ หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถจัดตำแหน่งสำหรับการฉายรังสีได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผล

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกจากยางพาราสำหรับใช้ในการตรวจสอบและวัดค่าปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา และการฉายรังสีเอกซ์พลังงานสูงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV โดยการศึกษาวิจัยประกอบด้วย การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกให้มีสัดส่วนใกล้เคียงกับหญิงไทยและหุ่นจำลองมาตรฐาน การพัฒนาสูตรยางพาราสำหรับสร้างหุ่นจำลองยางพาราให้มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์ การประเมินความหนาแน่นของหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสีเพื่อประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีและการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค

ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกทำให้ได้หุ่นจำลองตามขนาดที่ต้องการ โดยมีสัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว รอบเอว 34 นิ้ว ประกอบด้วยส่วนคอ ส่วนลำตัว และส่วนท้อง ภายในตัวหุ่นจำลองได้ออกแบบให้มีปอด เพื่อให้สามารถทำการวางแผนการรักษาได้เหมือนกับมนุษย์จริง และเจาะรูให้มีขนาดเท่ากับ หัววัดรังสีชนิด ionization chamber ที่เต้านมขวาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอก สำหรับการสร้างแม่พิมพ์สำหรับหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมด้วยวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์พบว่าสามารถใช้ในการหล่อแบบได้ดี โดยผิวของหุ่นจำลองมีความเรียบเนียนดี การยึดแม่พิมพ์ที่ประกบกันด้วยน็อตสามารถช่วยลดการรั่วไหลของน้ำยางพาราขณะเทเพื่อหล่อแบบได้อย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการใช้แม่พิมพ์เพื่อการอบยางพาราในขั้นตอนการขึ้นรูปเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงติดต่อกันเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงต่อครั้งและใช้ในการสร้างหุ่นจำลองมากกว่า 10 ครั้งจะทำให้แม่พิมพ์เริ่มเกิดการแตกร้าวในบางส่วนแต่สามารถซ่อมแซมได้

สำหรับการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับสร้างหุ่นจำลองด้วยการทดสอบตัวอย่างยางจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณการเติม SSF ในตัวอย่างยางเพื่อทำให้น้ำยางจับตัวและอบแห้งได้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง โดยพบว่าการเติม SSF ในตัวอย่างยางปริมาณมากขึ้นทำให้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวเร็วขึ้น และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลง ดังนั้นควรคำนึงถึงปริมาณการใช้ SSF ที่เหมาะสมเพื่อให้ยางสามารถจับตัวและอบแห้งได้โดยที่ยังคงสมบัติเชิงกลอยู่ในระดับค่าที่ยอมรับได้ ตัวอย่างยางที่เติม SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียกใช้ระยะเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวประมาณ 27.60 นาที ซึ่งเป็นเวลาเหมาะสมที่สามารถเทน้ำยางปริมาณมากอย่างช้าๆ ลงในแม่พิมพ์ของหุ่นจำลองก่อนน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อน และ SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียกที่เติมลงในน้ำยาง ยังมีระดับค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) สูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้สร้างหุ่นจำลองทรวงอกจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 4 โดยใช้ปริมาณ SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียก

หุ่นจำลองยางพาราที่ได้จากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่น 0.87 g/cm^3 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ ผลการทดสอบหุ่นจำลองยางพาราด้านการทนต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ด้วยความร้อนและการทนทานต่อรังสีที่ปริมาณ 200 – 6,000 cGy พบว่าสมบัติทางกายภาพลักษณะพื้นผิวและสีไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยังคงมีผิวเรียบและสีเหลืองน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานยางที่ aging, ชิ้นงานยางที่ก่อนและหลังฉายรังสี พบว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานที่ aging และชิ้นงานยางที่ฉายรังสีลดลงเล็กน้อย และช่วงของอุณหภูมิการ

สลายตัวกว้างขึ้นเล็กน้อย ($T_{d\text{ onset}}$ ถึง $T_{d\text{ end}}$) ซึ่งแสดงว่าความร้อนจากการ aging และฉายรังสีมีผลให้โครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดทั้งการตัดสายโซ่โมเลกุลยางให้สั้นลงและเกิดแบบเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งเป็นเกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณไม่มากนัก จากผลการทดสอบหาจำนวนองค์ประกอบชิ้นงานยางก่อนและหลังการฉายรังสีแสดงถึง 2 องค์ประกอบหลักที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ aging, ชิ้นงานยางที่ก่อนและหลังฉายรังสีพบว่าค่าความแข็ง Shore A ใกล้เคียงกัน แต่ค่าการทนแรงฉีกขาดของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังฉายรังสีต่ำกว่าชิ้นงานก่อนฉายรังสีเล็กน้อย ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength at Yield) และค่าโมดูลัส (Modulus at 100% Elongation) ของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังการฉายรังสี มีค่าสูงกว่าชิ้นงานก่อนฉายรังสี ในขณะที่ค่าการยืดออก (Elongation at Break) ของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังการฉายรังสีมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนฉายรังสี ซึ่งสรุปได้ว่ายางที่ผ่านการให้ความร้อน (aging) และการฉายรังสีมีความยืดหยุ่นลดลงหรือความเป็นอีลาสติกลดลงนั่นเอง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นของหุ่นจำลองยางพารา สรุปได้ว่าการฉายรังสี 200 – 6,000 cGy ทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของหุ่นจำลองยางพารามีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ผลการประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่ระดับเนื้อเยื่อระดับเต้านมและช่องท้องพบว่าค่าเฉลี่ยของเลขซีทิมี่ค่า -14.38 และ -11.4 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการประเมินพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์จริงซึ่งมีค่าเลขซีทิมี่ตั้งแต่ -100 ถึง 100 (Fat and Soft tissue) สำหรับผลการทดสอบการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นด้วยการฉายรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ด้วยแผนการรักษาที่ได้จากการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเทคนิคการรักษาสองมิติและสามมิติที่มีลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% สำหรับเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติ ตามลำดับ ผลความแตกต่างมีค่าไม่เกินข้อกำหนด 3% ทำให้สรุปได้ว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นจากยางพาราในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการตรวจสอบความถูกต้องของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคตามแผนการรักษา การตรวจสอบค่าปริมาณรังสีดังกล่าวเป็นการประกันคุณภาพเครื่องมือและแผนการรักษาเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการะบวนการรักษาด้วยรังสีรักษาที่มีพลังงานสูงมีความถูกต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดภาวะแทรกซ้อนจากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาดได้

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองทรงอกยางพาราที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์สามารถนำไปใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงสำหรับตรวจสอบการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม ผลที่ได้จากการตรวจสอบปริมาณรังสีเป็นการประกันคุณภาพการรักษาเพื่อให้การกำหนดปริมาณรังสีสำหรับการรักษามีความถูกต้องแม่นยำและป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากความผิดพลาดที่เกิดจากอวัยวะปกติได้รับรังสีส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปใช้ในการฝึกหัดทักษะเพื่อเพิ่มทักษะให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา เช่น นิสิตแพทย์ นิสิตฟิสิกส์การแพทย์ นิสิตรังสีเทคนิค หรือนิสิตพยาบาลเป็นต้น นอกจากนี้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าปริมาณรังสีโรคมะเร็งปอดและมะเร็งตับได้ โดยการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีที่ปอดและตับเพื่อศึกษาปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้เนื่องจากหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นและคุณสมบัติเหมือนมนุษย์ตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง

สำหรับแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจากเรซินผสมไฟเบอร์ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ทราบว่า การใช้วัสดุดังกล่าวสำหรับสร้างแม่พิมพ์สามารถสร้างหุ่นจำลองที่มีความสวยงาม ผิวเรียบ ไม่เกิดรอยต่อบริเวณที่ประกบกัน และระหว่างเหนืายางพาราก่อนการอบด้วยความร้อนไม่เกิดการรั่วไหลของน้ำยางพารา อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 ได้มีการแก้ปัญหาข้อจำกัดในเรื่องของการสร้างแม่พิมพ์จากปูนปลาสเตอร์จากการวิจัยในปีที่ 1 เนื่องจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ไม่สามารถทนการอบความร้อนได้ การศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 จึงแก้ไขด้วยการใช้แม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ที่นอกจากไม่เกิดการสีกกร่อนจากน้ำยางพาราผสมสารเคมีและมีน้ำหนักเบา แต่แม่พิมพ์ดังกล่าวมีข้อจำกัดการใช้งานเนื่องจากหากทำการอบด้วยความร้อนสูงเป็นเวลานานและบ่อยครั้งส่งผลให้แม่พิมพ์เกิดการแตกหักเสียหายได้แต่ยังสามารถ ดังนั้นหากสร้างแม่พิมพ์ด้วยวัสดุประเภทอื่นที่สามารถทนความร้อนได้ดี เช่น โลหะ อาจทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- AAPM. (2002). Quality control in diagnostic radiology. *Report No. 74*,
- Ashlie, D. C., Lynn, M. K., Elizabeth, C. G., Martina, H. E., & http://trace.tennessee.edu/utk_chanhonoproj/1450. (2011). *Feasibility of a touch sensitive breast phantom for use in the training of physicians in clinical breast examination*. Unpublished University of Tennessee Honors Thesis Projects., University of Tennessee Honors Thesis Projects.
- ASTM. Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams *Annual Book of ASTM Standards: American Society for Testing and Materials International, ASTM D3574-95*.
- ASTM. (2003). Standard Test Methods for Rubber Property- Durometer Hardness, *ASTM D 2240-03*. Annual Book of ASTM Standards: American Society for Testing and Materials International.
- Barrett, A., Dobbs, J., Morris, S., Roques, T., & Harrowven, J. (2009). *Practical Radiotherapy Planning* (Fourth ed.). London Hodder Arnold.
- Center, C. s. N. M. Solid Water Phantom materials. Retrieved 11 เมษายน 2556, from http://www.cnmcco.com/dosimetry/PDFdocs/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf
- Curtis B, C., Martin J. Yaffe (1989). Development of an anthropomorphic breast phantom. *Medical Physics*, 17(2).
- Howlett, S. J., & Kron, T. (2002). Monitor unit calculation for tangential breast treatments: verification in an anthropomorphic phantom. *J Appl Clin Med Phys*, 3(3), 235-240.
- Phantoms, R. T. Q. C. Retrieved 11 เมษายน 2556, from <http://www.supertechx-ray.com/QualityControlPhantoms/RadiationTherapyQC.html>
- Podgorsak, E. B. (2005). Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. from http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf
- Seymour, H., Khan, F. M., & Roger, A. (1992). Levitt and Taplay's technological basis of radiation therapy : practiceal clinical application. (2), 1-36,232-247.
- กรมวิชาการเกษตร, ค. ส. (2556). ยางพารา. [รายงาน]. *Para rubber electrnic bulletin* 1.
- กาแดง, น., แสนอินทร์ตะ, ย., & ทรัพย์พร้อม, ส. (2553). การออกแบบ และ ประดิษฐ์หุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบคุณภาพของเอกซเรย์เต้านม *The Design and Invention of Mammographic Image Quality Evaluation Phantom* (1 ed.). พิษณุโลก: ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- จิตต์ลัดดา, ศ. (2553). เทคโนโลยียางพารา *Natural Rubber Technology* (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคโนโลยีปิโตรเคมีภัณฑ์ จำกัด

- ชมรมฟื้นฟูสุขภาพมะเร็ง. (2553). มะเร็งเต้านม. Retrieved 9 เมษายน, 2556, from <http://www.siamca.com/knowledge-id52.html>
- ดวงรัตน์, บ., ยันตรปกรณ, อ., จิรสินธิปก, ธ., สยอวรรณ, ว., รตนวิบูลย์สุข, น., & สาลีเพ็ง, น. (2552). การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา. วารสารสาธารณสุขและการพัฒนา, 7(1).
- ต้นทพันธ์, ก. (2554). หุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย. Retrieved 16 มีนาคม, 2556, from <http://library.dip.go.th/multim5/News/2554/N05975.pdf>
- ทวิชศรี, น., สุวดีพิงศ์, ช., ตันตะผลิน, ป., กุลตวนิช, ก., & สกฤตต์, ๒. ความรู้เรื่องมะเร็งเต้านม. Retrieved 12 เมษายน 2556, 2556, from http://www.academiccafe2010.com/breastscreen/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=17
- ธัญรัตน์, ช. (2556). การตรวจเอกซเรย์เต้านม (Mammography). [เอกสารประกอบการสอน]. สาขารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ประกายมณีวงศ์, พ., ระนอง, น. ณ., วิจิตชลชัย, ณ., พัฒนากุล, ว., & แจ่มเสมือน, ส. (2552). การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.
- ประดับวงศ์, ส., โกวิท, ว., สิมมะลี, ก., & เขาวนัชน, บ. (2554). การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. ศรีนครินทร์เวชสาร, 26(4).
- พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์, & และคณะ. (2552). การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.
- ภัทรไพบูลย์ชัย, อ. (2554). การวิจัยเพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติ. Retrieved 12 เมษายน, 2556, from <http://www.mtec.or.th/nnrc2011/images/pdf/24june/08.pdf>
- เรืองวิทย์, น. (2556). สื่อวัสดุสามมิติ. Retrieved 30 มีนาคม 2558, from <http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355201/p32-3.html>
- โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์, ส. ฝ. มะเร็งเต้านม. Retrieved 8 เมษายน, 2556, from http://www.chulacancer.net/newpage/information/breast_cancer5.html
- วรารณ, ช. (2549). ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน *Natural Rubber : Production and Application* (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนวิจัย (สกว.).
- วิจิตชลชัย, ณ. (2550). “เอกสารประกอบบทปฏิบัติการ หลักสูตร การผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง”. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร
- ศรีมนิพนธ์นิมิต, ว. (2555). มะเร็งเต้านม พบเร็ว รอดสูง. Retrieved 3 เมษายน, 2556, from www.tsc.or.th/knowledge/healthtoday/Health_Today_May_12.pdf
- สุขประเสริฐ, อ. (2548). การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์. [รายงานการวิจัย]. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 1-24.
- หล่อวิทยา, ว., เทพมงคล, ไ., พรหมรัตนพงศ์, ป., & เทศะพิบูล, ช. (2544). *Manual of Radiation Oncology* (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุทุมมา, ม., & ขวัญชัย, ร. (2549). การออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่, 39, 54-63.

รหัสโครงการ	R	D	G	5	7	5	0	1	1	3
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

การรายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

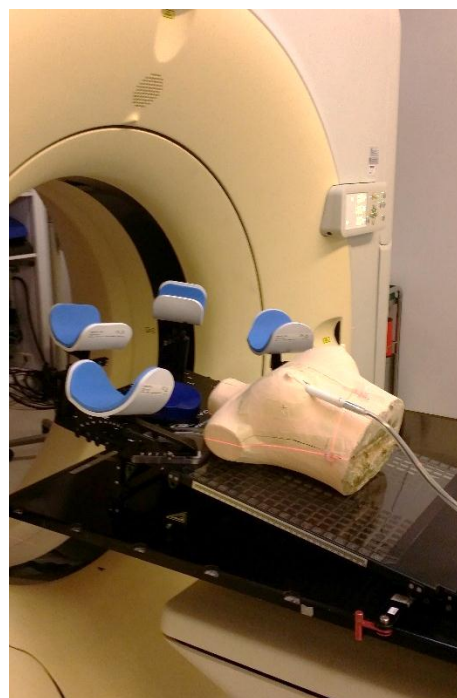
๑. ชื่อโครงการ การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะวางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา
๒. ชื่อนักวิจัย ดร.ศรรัตน์ มหาศรานนท์², ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อู่อุต¹ ผศ.ดร.ภัสสรีย์ ชีพสมนต์¹ และนายสมบัติ บุญขวาง
๓. งบประมาณที่ได้รับการสนับสนุน ๓๗๘,๐๐๐.บาท
๔. ปีงบประมาณที่ดำเนินการ ๒๕๕๗
๕. การนำผลผลิตจากงานวิจัยไปสู่การใช้ประโยชน์ ☒ มีการนำไปใช้ประโยชน์ ☐ ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์
๖. ช่วงเวลาที่งานวิจัยได้นำไปสู่การใช้ประโยชน์.....ปี 2558.....
๗. เป้าหมายดำเนินการ การนำหุ่นจำลองทรวงอกไปใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งและการฉายรังสีจริงด้วยเทคนิค 3 มิติของเครื่องเร่งอนุภาครุ่น TrueBeam พลังงาน 6.MV
๘. พื้นที่การใช้ประโยชน์ งานรังสีรักษา โรงพยาบาลจุฬารัตน์
๙. รูปแบบการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยตามข้อ ๗ และ ๘ (สามารถเลือกได้มากกว่า ๑ รูปแบบ เนื่องจากถ้าเป็นเรื่องเดียวกันสามารถนำไปใช้มากกว่า ๑ มิติได้)
 - ☐ ๙.๑. การใช้ประโยชน์มีนโยบาย โดย ได้แก่ การนำข้อมูลไปประกอบการตัดสินใจในการบริหาร / กำหนดนโยบาย โดย
 - ☐ ได้รับหนังสือขอข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในเรื่องใดเรื่องหนึ่ง
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ / กำหนดนโยบาย
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....
 - ☐ ๙.๒. การใช้ประโยชน์มีมติเศรษฐกิจ / พาณิชย์ โดย
 - ☐ ได้รับหนังสือหรือหลักฐานอื่น แสดงความสนใจเพื่อเจรจาธุรกิจ
 - ☐ มีการซื้อ - ขาย เทคโนโลยีระหว่างนักวิจัยและผู้นำไปใช้ประโยชน์
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....
 - ☐ ๙.๓. การใช้ประโยชน์มีมติการพัฒนาสังคม / ชุมชน / ท้องถิ่น โดย
 - ☐ การถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้รับจากงานวิจัยในชุมชน / ท้องถิ่น (อบรม , คู่มือ , แผ่นพับ , โปสเตอร์ , เว็บไซต์ ฯลฯ)
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ความรู้จากชุมชน / องค์กร / หน่วยงานในพื้นที่ต่างๆ
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....
 - ☒ ๙.๔. การใช้ประโยชน์มีวิชาการ โดย
 - ☐ ได้มีการอ้างอิงผลงานที่ตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับประเทศ / ระดับนานาชาติ
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญเป็นวิทยากรเพื่อให้ความรู้ในกรอบของผลงานวิจัยจากหน่วยงานต่างๆ
 - ☒ อื่นๆ(โปรดระบุ) นำการนำหุ่นจำลองทรวงอกไปใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งและการฉายรังสีจริงด้วยเทคนิค 3 มิติของเครื่องเร่งอนุภาครุ่น TrueBeam พลังงาน 6.MV.งานรังสีรักษา.โรงพยาบาลจุฬารัตน์

๑๐. รายละเอียดผลการดำเนินงานตามข้อ ๙ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการนำผลผลิตจากงานวิจัยไปใช้อย่างไร

ผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาครุ่น TrueBeam พลังงาน 6 MV ที่ได้วางแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยได้ทำการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออนในเซชันขนาด 6 cc ในเต้านม ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทำให้สามารถประเมินความถูกต้องของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและเครื่องเร่งอนุภาคได้อย่างดี โดยพบว่าค่าความแตกต่างระหว่างการวัดปริมาณรังสีที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคและที่คำนวณได้จากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้งเทคนิค 3 มิติ และ FIF หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นรูปธรรม สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงซึ่งผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยช่วยให้ประสิทธิภาพการรักษาที่มากขึ้นเนื่องจากสามารถตรวจสอบแผนการรักษาได้อย่างดี

๑๑. รูปภาพประกอบกิจกรรมหรือ รูปภาพแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบก่อน - หลังการนำผลผลิตจากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ (พร้อมคำบรรยายกิจกรรมโดยย่อ ที่แสดงถึงวัน เดือน ปี ที่จัดกิจกรรม)

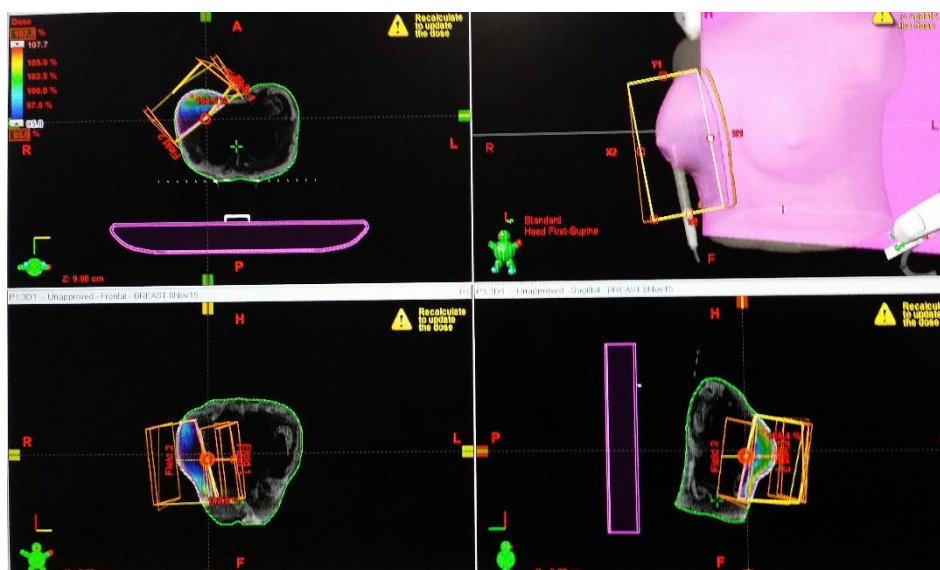
หุ่นจำลองทรวงอกยาร่างที่พัฒนาขึ้นจากโครงการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในงานทางรังสีรักษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องของการรักษาโรคมะเร็งเต้านมด้วยรังสีพลังงานสูง โดยระหว่างเดือนตุลาคม-ธันวาคม 2558 ที่ผ่านมามีได้นำหุ่นจำลองทรวงอกยาร่างที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีในการรักษาโรคมะเร็งเต้านมที่ทางรังสีรักษา โรงพยาบาลจุฬารัตน์ ซึ่งการใช้งานหุ่นจำลองเป็นการทดสอบตรงตามขั้นตอนการรักษาประกอบด้วยการจำลองการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (CT simulator) เพื่อถ่ายภาพตัดขวางและสร้างภาพหุ่นจำลองแบบ 3 มิติเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการรักษาแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นการนำหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นไปสร้างเป็นภาพตัดขวางด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา หุ่นจำลองทรวงอกสามารถใส่หัววัดรังสีเพื่อสร้างภาพแสดงตำแหน่งหัววัดรังสีสำหรับกำหนดปริมาณรังสีในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ หุ่นจำลองทรวงอกสามารถทำการระบุพิกัดตำแหน่งอ้างอิงการจัดหุ่นจำลองเพื่อให้สามารถจัดตำแหน่งได้ตรงกับห้องฉายรังสี



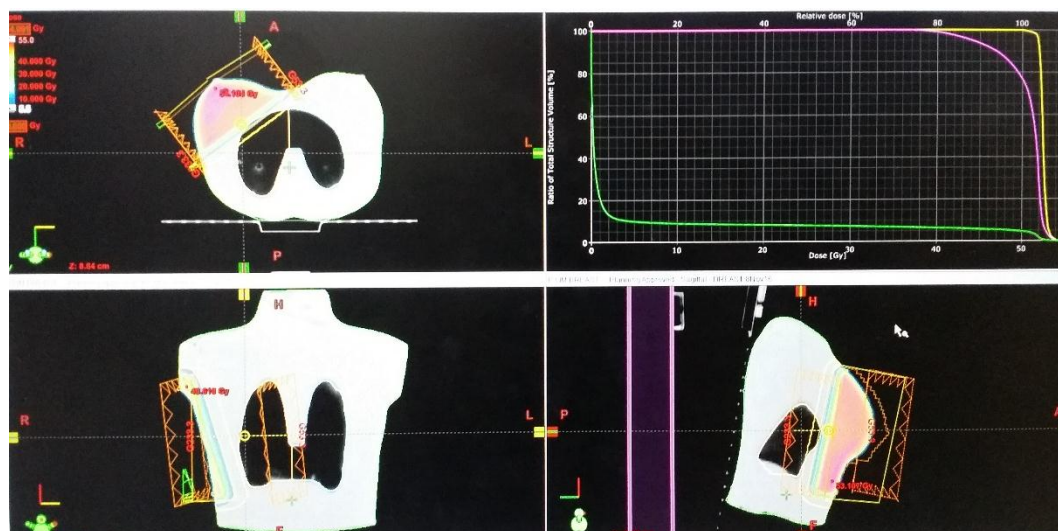
แสดงการจัดตำแหน่งและระบุพิกัดสำหรับการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาหุ่นจำลองทรวงอก

สำหรับขั้นตอนการวางแผนการรักษาได้ทำการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองด้วยวิธีการรักษาโรคมะเร็งเต้านม โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาซึ่งหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนผู้ป่วยมะเร็งเต้านมได้อย่างดี สามารถกำหนดตำแหน่งและทิศทางการให้

ลำรังสีตลอดจนคำนวณปริมาณรังสีทั้งภายในเต้านม เนื้อเยื่อโดยรอบ และปอดได้ ดังแสดงดังภาพที่ 2 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการประเมินการกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) ภายในหุ่นจำลองเพื่อการประเมินความเหมาะสมของแผนการรักษาได้จากการสร้าง (Dose Volume Histogram; DVH) แสดงดังภาพที่ 3

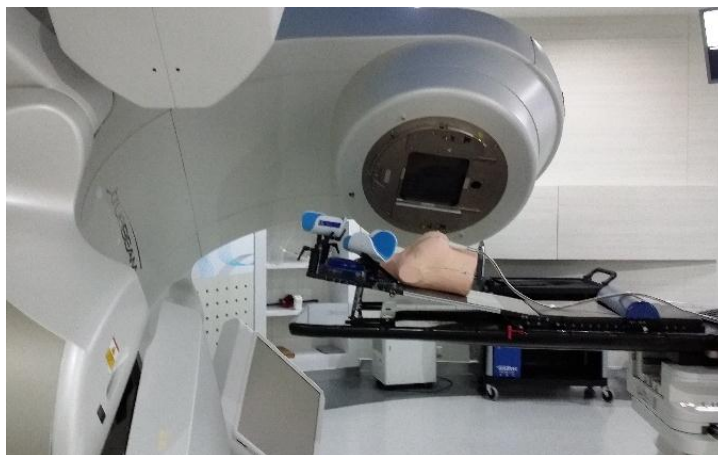


ภาพที่ 2 แสดงผลการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยสามารถกำหนดตำแหน่งและทิศทางทำให้ลำรังสีตลอดจนคำนวณปริมาณรังสีทั้งภายในเต้านม เนื้อเยื่อโดยรอบ และปอดได้



ภาพที่ 3 แสดงการประเมินการกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) ภายในหุ่นจำลองเพื่อการประเมินความเหมาะสมของแผนการรักษาได้จากการสร้าง (Dose Volume Histogram; DVH)

หุ่นจำลองทรวงอกยางพาราสามารถนำไปใช้ในการประเมินความถูกต้องของแผนการรักษาได้ด้วยการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาครุ่น TrueBeam พลังงาน 6 MV ตามแผนการรักษาที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการวัดค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการฉายรังสีที่หุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชันขนาด 0.6 cc ดังภาพที่ 4 ผลการประเมินพบว่าค่าปริมาณรังสีจากแผนการรักษามีความถูกต้องโดยความแตกต่างระหว่างการวัดปริมาณรังสีจริงและการวางแผนการรักษามีค่าไม่เกิน 1% ผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าเครื่องเร่งอนุภาคและแผนการรักษามีความถูกต้องเพียงพอต่อการใช้งานรักษาผู้ป่วย โดยข้อกำหนดมาตรฐานของ ICRU ได้กำหนดให้ความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณจะต้องไม่เกิน 3% โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการรักษาที่มีความซับซ้อนเช่นการรักษาด้วยแผนการรักษา 3 มิติ



ภาพที่ 4 แสดงการวัดค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ในหุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชันขนาด 0.6 cc

แบบฟอร์มสรุปผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะวางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา

(ภาษาอังกฤษ) Development of Thorax Phantom for Radiation Treatment Planning Practice of Breast Cancer

โดย (ชื่อนักวิจัย) ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์², ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อุดี¹ ผศ.ดร.ภัสสุรีย์ ชีพสมนัต¹ และ นายสมบัติ บุญขวาง³

(หน่วยงานที่สังกัด) ¹ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช

ประเด็นปัญหาก่อนการวิจัย

โรคมะเร็งเต้านมพบมากที่สุดในผู้หญิงทั่วโลกและเป็นสาเหตุการตายเป็นอันดับสองรองจากมะเร็งปอด อัตราการเกิดโรคมะเร็งพบได้ 1 ใน 10 ของผู้หญิง จากสถานการณ์มะเร็งเต้านมที่นับวันทวีจำนวนมาก ขึ้นการรักษาผู้ป่วยด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จะต้องเป็นอย่างมาก ปัจจุบันการรักษามะเร็งเต้านมมีหลายวิธีการ ได้แก่ การผ่าตัด การฉายรังสี การใช้ยาเคมีบำบัด และการรักษาด้วยฮอร์โมน การฉายรังสีด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นการรักษาที่สามารถกำจัดการก่อตัวและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายหลักของรังสีรักษาได้แก่การบรรเทาอาการหรือเพื่อรักษาให้หายขาดจากการเป็นโรคมะเร็ง กระบวนการทางรังสีรักษาประกอบไปด้วยขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน รายละเอียดมากและเข้าใจได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการรักษา นอกจากนี้การให้รังสีปริมาณสูงในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมยังต้องการความถูกต้องสูงเพื่อป้องกันภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยหากเกิดการผิดพลาดจากการให้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าปกติอาจส่งผลให้ไม่สามารถรักษามะเร็งหายขาดและมีโอกาสเกิดเป็นซ้ำได้อีก ในทางกลับกันหากให้ปริมาณรังสีที่มากเกินไปอาจทำให้อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ขึ้นได้

การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีความสำคัญในกระบวนการจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งก่อนการรักษาและในขณะทำการรักษาได้ การฉายรังสีเพื่อการรักษามะเร็งเต้านมโดยปกติแล้วใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงระดับ 6 MV และปริมาณรังสีที่ให้ค่อนข้างสูงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการรักษาให้หายขาดหรือประคับประคองอาการ ตามมาตรฐานสากลที่กำหนดโดยคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านหน่วยและการวัดทางรังสี (International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU) ได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของปริมาณรังสีตลอดขั้นตอนการรักษาจะต้องไม่เกิน 5% เนื่องจากการฉายรังสีบริเวณเต้านมมีอวัยวะที่สำคัญ (Critical organ) ที่ต้องระวังไม่ให้ได้ปริมาณรังสีมากเกินไปที่กำหนดไว้ การกำหนดปริมาณรังสีเพื่อการรักษาก่อนมะเร็งต้องการความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมากเพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการฉายรังสี การตรวจสอบปริมาณรังสีที่ได้จากการ

วางแผนการรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากหุ่นจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีดังกล่าว ที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์มีราคาแพงมากทำให้ประเทศไทยมีใช้เฉพาะในหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาหุ่นจำลองดังกล่าวขึ้นใช้เองในราคาถูกเพื่อประเมินค่าปริมาณรังสีจะช่วยให้การรักษามะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษาในหน่วยงานต่างๆ ทั่วประเทศมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้ป่วยจะมีโอกาสหายและลดภาวะแทรกซ้อนจากการรักษาได้เป็นอย่างมาก

การแก้ไขปัญหายาโดยใช้ผลงานวิจัย

หุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นจากยางพาราในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการตรวจสอบความถูกต้องของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคตามแผนการรักษา การตรวจสอบค่าปริมาณรังสีดังกล่าวเป็นการประกันคุณภาพเครื่องมือและแผนการรักษาเพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระบวนการรักษาด้วยรังสีรักษาที่มีพลังงานสูงมีความถูกต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดภาวะแทรกซ้อนจากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาดได้

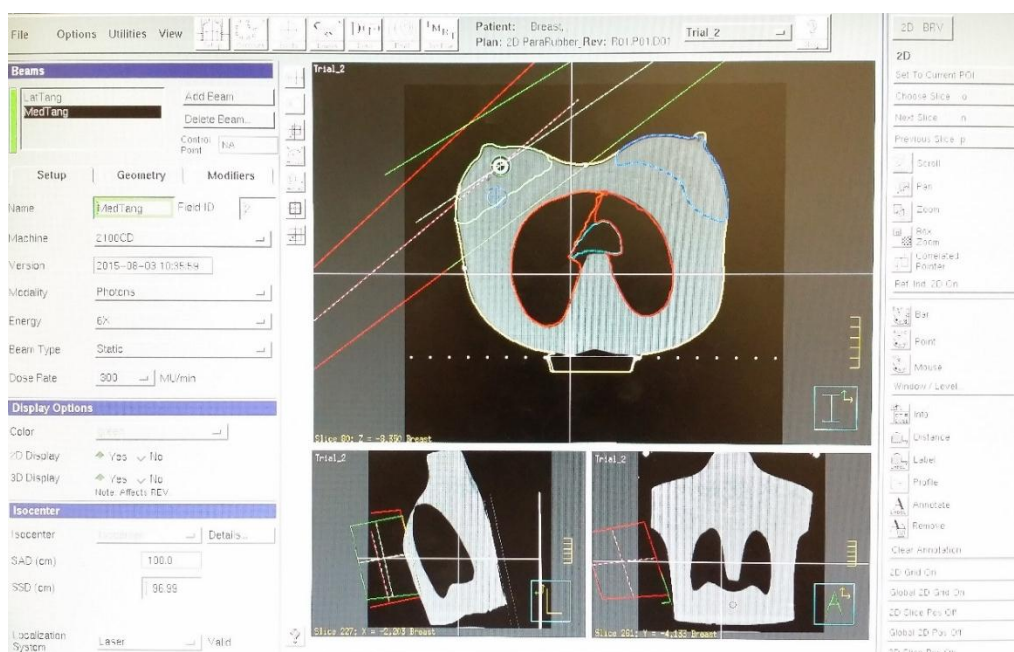
ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองทรวงอกยางพาราที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์สามารถนำไปใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงสำหรับตรวจสอบการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม ผลที่ได้จากการตรวจสอบปริมาณรังสีเป็นการประกันคุณภาพการรักษาเพื่อให้การกำหนดปริมาณรังสีสำหรับการรักษามีความถูกต้องแม่นยำและป้องกันการเกิดภาวะแทรกซ้อนจากความผิดพลาดที่เกิดจากอวัยวะปกติได้รับรังสีส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปใช้ในการฝึกหัดทักษะเพื่อเพิ่มทักษะให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา เช่น นิสิตแพทย์ นิสิตฟิสิกส์การแพทย์ นิสิตรังสีเทคนิค หรือนิสิตพยาบาล เป็นต้น นอกจากนี้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าปริมาณรังสีโรคมะเร็งปอดและมะเร็งตับได้ โดยการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีที่ปอดและตับเพื่อศึกษาปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้เนื่องจากหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นและคุณสมบัติเหมือนมนุษย์ตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง

สำหรับแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นจากเรซินผสมไฟเบอร์ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ทราบว่า การใช้วัสดุดังกล่าวสำหรับสร้างแม่พิมพ์สามารถสร้างหุ่นจำลองที่มีความสวยงาม ผิวเรียบ ไม่เกิดรอยต่อบริเวณที่ประกบกัน และระหว่างเทน้ำยางพาราก่อนการอบด้วยความร้อนไม่เกิดการรั่วไหลของน้ำยางพารา อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 ได้มีการแก้ปัญหาข้อจำกัดในเรื่องของการสร้างแม่พิมพ์จากปูนปลาสเตอร์จากการวิจัยในปีที่ 1 เนื่องจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ไม่สามารถทนการอบความร้อนได้ การศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 จึงแก้ไขด้วยการใช้แม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ที่นอกจากไม่เกิดการสึกกร่อนจากน้ำยางพาราผสมสารเคมีและมีน้ำหนักเบา แต่แม่พิมพ์ดังกล่าวมีข้อจำกัดการใช้งานเนื่องจากหากทำการอบด้วยความร้อนสูงเป็นเวลานานและบ่อยครั้งส่งผลให้แม่พิมพ์เกิดการแตกหักเสียหายได้แต่ยังสามารถ ดังนั้นหากสร้างแม่พิมพ์ด้วยวัสดุประเภทอื่นที่สามารถทนความร้อนได้ดี เช่น โลหะ อาจทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากยิ่งขึ้น

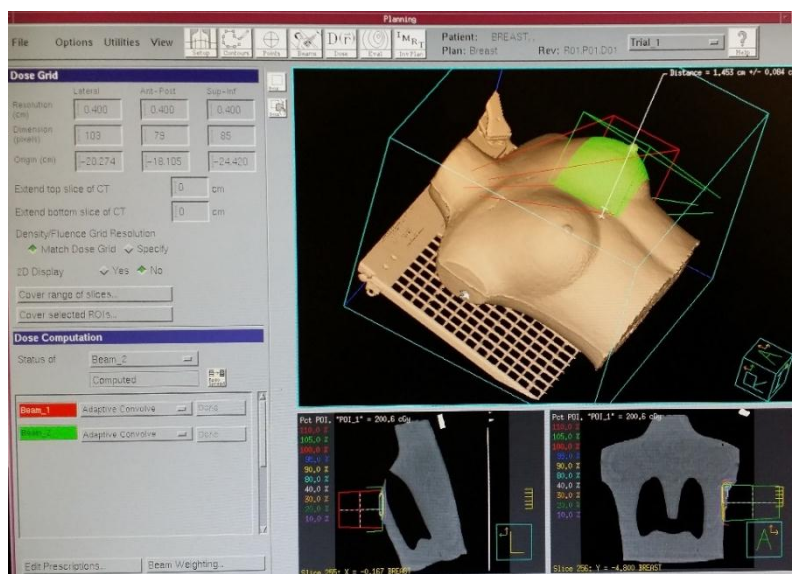
รูปภาพประกอบ



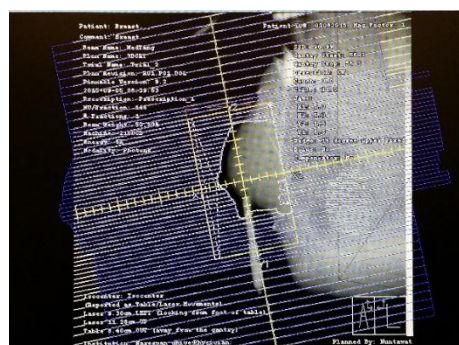
แสดงการประเมินค่าความสม่ำเสมอหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา
นม



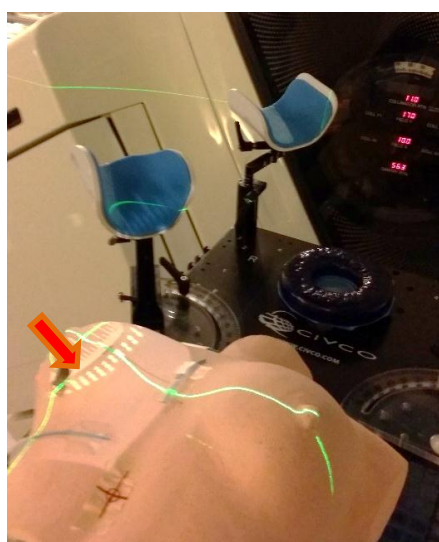
การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ทิศทางลำ
รังสี medial และ lateral tangential fields จุดหมุนระหว่างลำรังสีอยู่ในกึ่งกลางลำรังสีซึ่งเป็นตำแหน่ง
หัววัดรังสี



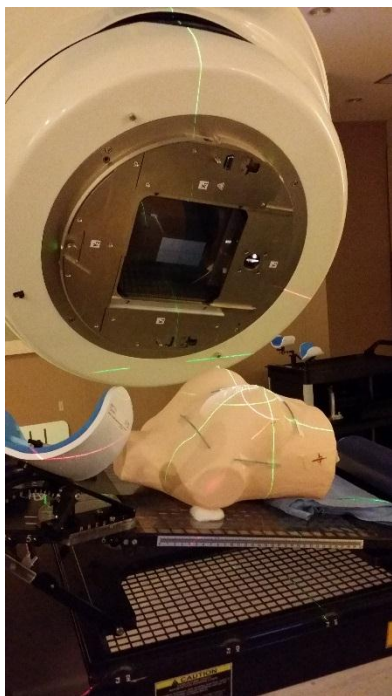
แสดงภาพหุ่นจำลองทรวงอกในลักษณะภาพ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางกำหนดลำรังสี



แสดงการใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็ง



แสดงช่องเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีบริเวณใต้ราวนมขวาของหุ่นจำลอง ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสีอยู่ตำแหน่งจุดหมุนอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี



การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกในทิศทาง lateral และ medial tangential ด้วยเครื่องอนุภาค

(ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2557)