



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนงาน การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะ
วางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ อุ่ดี และคณะ

พฤษภาคม 2559

สัญญาเลขที่ RDG5750113

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนงาน การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะ วางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อู่ดี	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. ดร.ศรรัตน์ มหาศรานนท์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3. นางสาวสุมาลี ยับสันเทียะ	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชุดโครงการ การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง
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.....	11
บทคัดย่อ.....	17
ABSTRACT.....	18
บทที่ 1	19
ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	19
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	20
บทที่ 2	21
ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย.....	21
บทที่ 3	42
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	42
ระเบียบวิธีวิจัย.....	43
บทที่ 4	69
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	69
บทที่ 5	120
สรุปผล.....	120
ข้อเสนอแนะ	122
เอกสารอ้างอิง.....	123

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom จาก http://www.cnmcco.com/ สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	22
ภาพที่ 2 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom.....	23
จาก http://www.supertechx-ray.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	23
ภาพที่ 3 หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom จาก http://www.supertechx-ray.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	23
ภาพที่ 4 หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)	24
จาก http://www.supertechx-ray.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	24
ภาพที่ 5 การจัดท่าของผู้ป่วยบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า Triangular wedge หรือ Breast board.....	29
ภาพที่ 6 เทคนิคการฉายรังสีของเต้านมบริเวณ Chest wall, Supraclavicular lymph nodes field และ Internal mammary field	30
ภาพที่ 7 เทคนิคการฉายรังสี lateral tangential field ของเต้านม ในขั้นตอนการวางแผนการรักษา แบบ conventional 2D tangential field.....	31
ภาพที่ 8 เทคนิคการจำลองการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009).....	31
ภาพที่ 9 การกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)	32
ภาพที่ 10 ภาพเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (Barrett, et al., 2009)	32
ภาพที่ 11 การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ (Barrett, et al., 2009)	33
ภาพที่ 12 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของเต้านม จาก http://ars.els-cdn.com/ สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	35
ภาพที่ 13 การฉาย brachytherapy โดยใช้ applicators วางในปากมดลูก	36
จาก http://www.aboutbrachytherapy.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	36
ภาพที่ 14 การกระจายของปริมาณรังสีจาก intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก โดยลักษณะของการกระจายของปริมาณรังสีเป็นรูปขมพู่.....	37
จาก http://www.varian.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	37
ภาพที่ 15 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์อวัยวะในอุ้งเชิงกรานเพศหญิง	38
จาก http://www.aboutbrachytherapy.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	38
ภาพที่ 16 นิยามของ point A ตามวิธีของ Manchester system	39
จาก Meredith WJ. Radium dosage: The Manchester system. Edinburgh: Livingstone, 1967.....	39
ภาพที่ 17 การกำหนดตำแหน่งของ bladder และ rectal points.....	40
จาก ICRU. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology. ICRU report No. 38. Bethesda, MD:ICRU, 1985	40
ภาพที่ 18 การวัดความยาวของช่องคลอดโดยวัดจากปากช่องคลอดถึง vaginal fornix.....	44
ภาพที่ 19 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A	44
ภาพที่ 20 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ bladder point.....	45

ภาพที่ 21 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ Rectal point	45
ภาพที่ 22 เครื่องมือทดสอบความแข็งชนิด Durometer Hardness Tester	49
ภาพที่ 23 เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึงชนิด Tensile Testing.....	50
ภาพที่ 24 Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing.....	50
ภาพที่ 25 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานยางพาราด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200-6,000 cGy	53
ภาพที่ 26 แสดง Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermalgravimetric Analysis (TGA).....	54
ภาพที่ 27 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินและไฟเบอร์	56
ภาพที่ 28 ขั้นตอนการแกะแม่พิมพ์ออกจากหุ่นต้นแบบ	56
ภาพที่ 29 ตำแหน่งและแนวการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง.....	58
ภาพที่ 30 การวาดขอบเขต (contour) หุ่นจำลอง (เส้นสีน้ำเงิน) เพื่อหาความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองอิงเชิงกรานยางพารา	60
ภาพที่ 31 อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้	62
ภาพที่ 32 การประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่เข้ากับฐานยึด และการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นจำลอง	62
ภาพที่ 33 การจัดตำแหน่งหุ่นจำลองเพื่อสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์.....	63
ภาพที่ 34 กำหนด rectal point ให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัด.....	63
ภาพที่ 35 การกำหนด bladder point ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัด โดยห่างจาก central line เป็นระยะ 2 เซนติเมตร.....	64
ภาพที่ 36 การวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา	64
ภาพที่ 37 ผลการวางแผนการรักษาแสดงลักษณะการกระจายของปริมาณรังสีเป็นไปตามมาตรฐานมีลักษณะเป็นรูปชมพู.....	65
ภาพที่ 38 การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าปริมาณรังสีจากการใส่แร่ในหุ่นจำลอง	65
ภาพที่ 39 การวางตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง Bladder point และ Rectal point.....	66
ภาพที่ 40 การจัดอุปกรณ์ในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A.....	66
ภาพที่ 41 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และความดัน.....	67
ภาพที่ 42 หน้าเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องใส่แร่ด้วยวิธีรังสีรักษาระยะใกล้	67
ภาพที่ 43 แม่แบบหุ่นจำลองสร้างจากดินเหนียวละเอียดตั้งแต่ส่วนคอถึงสะโพก	69
ภาพที่ 44 ชุดอะคลิติกใสสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสีสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ขนาดต่างๆ.....	70
ภาพที่ 45 หัววัดรังสี Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber รุ่น Model N30013	70
ภาพที่ 46 โครงสร้างและขนาดของหัววัดรังสี PTW Farmer® Ionization Chamber	70
ภาพที่ 47 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองในแนวตัดขวางโดยมีกล่องอะคลิติกสำหรับเติมน้ำ	72
ภาพที่ 48 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหน้า.....	73
ภาพที่ 49 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหลัง	73
ภาพที่ 50 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ.....	74
ภาพที่ 51 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ.....	75

ภาพที่ 52 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	76
ภาพที่ 53 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	76
ภาพที่ 54 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	77
ภาพที่ 55 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	77
ภาพที่ 56 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	78
ภาพที่ 57 การฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ปริมาณรังสีตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy อัตราปริมาณรังสี 300 cGy/minute	79
ภาพที่ 58 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	80
ภาพที่ 59 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	81
ภาพที่ 60 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	81
ภาพที่ 61 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	82
ภาพที่ 62 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	82
ภาพที่ 63 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน	83
ภาพที่ 64 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray	84
ภาพที่ 66 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 200 cGy	85
ภาพที่ 67 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 400 cGy	86
ภาพที่ 68 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 600 cGy	86
ภาพที่ 69 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 800 cGy	87
ภาพที่ 70 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 1000 cGy	87
ภาพที่ 71 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 2000 cGy	88
ภาพที่ 72 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 3000 cGy	88
ภาพที่ 73 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 4000 cGy	89
ภาพที่ 74 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 5000 cGy	89
ภาพที่ 75 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 6000 cGy	90
ภาพที่ 76 เปรียบเทียบโครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ (a) และกราฟที่ overlay (b)	92
ภาพที่ 77 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray	93
ภาพที่ 78 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging	93
ภาพที่ 79 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 200 cGy	94
ภาพที่ 80 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 400 cGy	94
ภาพที่ 81 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 600 cGy	95
ภาพที่ 82 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 800 cGy	95

ภาพที่ 83 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 1,000 cGy.....	96
ภาพที่ 84 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 2,000 cGy.....	96
ภาพที่ 85 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 3,000 cGy.....	97
ภาพที่ 86 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 4,000 cGy.....	97
ภาพที่ 87 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 5,000 cGy.....	98
ภาพที่ 88 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 6,000 cGy.....	98
ภาพที่ 89 การสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรวงอกจากดินเหนียว	99
ภาพที่ 90 การสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรวงอกที่ทำจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์.....	100
ภาพที่ 91 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ด้านหลัง.....	100
ภาพที่ 92 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ที่สามารถประกบกันอย่างพอดี.....	101
ภาพที่ 93 หุ่นจำลองทรวงอกยางพาราก่อนการตกแต่งและทำสีที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซิน	101
ภาพที่ 94 การสร้างแม่แบบหุ่นปอดจำลองจากปูนปลาสเตอร์	102
ภาพที่ 95 แม่พิมพ์ปอดที่สร้างจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์	102
ภาพที่ 96 การยัดแม่พิมพ์ปอดจำลองทั้งสองซีกให้แน่นสนิทด้วยน็อต.....	103
ภาพที่ 97 ปอดจำลองยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์	103
ภาพที่ 98 ผลการปั้นแบบหุ่นจำลองต้นแบบจากดินเหนียว.....	104
ภาพที่ 99 แม่พิมพ์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ผลิตจากเรซินและไฟเบอร์.....	104
ภาพที่ 100 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา ในทำด้านหน้า โดยจะมีรู 3 รู สำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่งจุด Point A และ Bladder point.....	105
ภาพที่ 101 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา ในด้านตัดขวาง ที่เห็นรูสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่.....	105
ภาพที่ 102 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราในทำด้านข้าง	106
ภาพที่ 103 การประเมินค่าความสม่ำเสมอหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา	107
ภาพที่ 104 การประเมินค่าความสม่ำเสมอภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านม	108
ภาพที่ 105 การประเมินค่าความสม่ำเสมอจากภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา.....	109
ภาพที่ 106 การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ทิศทางลำรังสี medial และ lateral tangential fields จุดหมุนระหว่างลำรังสีอยู่ในกึ่งกลางลำรังสีซึ่งเป็นตำแหน่งหัววัดรังสี (ลูกศรชี้)	110
ภาพที่ 107 การวางแผนการรักษาที่ใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge ขนาด 15 องศาเพื่อชดเชยส่วนของเนื้อเยื่อเต้านม (หัวลูกศรชี้เหลือแสดง wedge ทั้งสองทิศทาง).....	111
ภาพที่ 108 ภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal view) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal view).....	111
ภาพที่ 109 ภาพหุ่นจำลองทรวงอกในลักษณะภาพ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางการกำหนดลำรังสี.....	112
ภาพที่ 110 การใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็ง	112

ภาพที่ 111 การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ของเทคนิคการ แผนการรักษาแบบ 3 มิติ.....	113
ภาพที่ 112 ผลการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและ ระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร	113
ภาพที่ 113 การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ.....	114
ภาพที่ 114 ช่องเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีบริเวณใต้ราวนมขวาของหุ่นจำลอง ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสี อยู่ตำแหน่งจุดหมุนอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี.....	115
ภาพที่ 115 การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกในทิศทาง lateral และ medial tangential fields ด้วยเครื่อง อนุภาคพลังงาน 6 MV	115
ภาพที่ 116 ตำแหน่งของ Rectal point ที่ห่างจากบริเวณ high dose gradient	117

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง ปี 2550–2554 (ภัทรไพบูลย์ชัย, 2554)	25
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	26
ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (วิจิตชลชัย, 2550).....	46
ตารางที่ 4 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา	47
ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่อเต้านมชนิดต่างๆ.....	51
ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมของปอดและเนื้อเยื่อ.....	51
ตารางที่ 7 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ	53
ตารางที่ 8 แสดงผลการวัดตำแหน่งระยะเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A, bladder และ rectal points จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	71
ตารางที่ 9 เวลาการเริ่มจับตัวของน้ำยางของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนา.....	74
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ.....	79
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ.....	84
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ	91
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองทรวงอก	108
ตารางที่ 14 ผลของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	109
ตารางที่ 15 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา การวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสี และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ ในหุ่นจำลอง	116
ตารางที่ 16 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่ง Point A และ Bladder point เมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids	119

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อแผนงาน (ภาษาไทย)	การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง
ชื่อแผนงาน (ภาษาอังกฤษ)	Development of Radiotherapy Phantom for Radiation Treatment Patient Cancer
ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่	
ผู้เสนอ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทวัฒน์ อู่ดี
หน่วยงานต้นสังกัด	ภาควิหารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
หน่วยงานร่วมโครงการ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช ภาควิหารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร
ระยะเวลาดำเนินการ	12 เดือน

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

โรคมะเร็งเป็นโรคที่พบบ่อยมากที่สุดในโลกและเป็นสาเหตุการตายเป็นอันดับสองรองจากมะเร็งปอด ปัจจุบันการรักษามะเร็งมีหลายวิธีการ ได้แก่ การผ่าตัด การฉายรังสี การใช้ยาเคมีบำบัด และการรักษาด้วยฮอร์โมน การฉายรังสีด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นการรักษาที่สามารถกำจัดการก่อตัวและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายหลักของรังสีรักษาได้แก่การบรรเทาอาการหรือเพื่อรักษาให้หายขาดจากการเป็นโรคมะเร็ง การให้รังสีปริมาณสูงในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมยังต้องการความถูกต้องสูงเพื่อป้องกันภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยหากเกิดการผิดพลาดจากการให้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าปกติอาจส่งผลให้ไม่สามารถรักษามะเร็งหายขาดและมีโอกาสเกิดเป็นซ้ำได้อีก ในทางกลับกันหากให้ปริมาณรังสีที่มากเกินไปอาจทำให้อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ขึ้นได้

การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีความสำคัญในกระบวนการจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งก่อนการรักษาและในขณะที่ทำการรักษาได้ การฉายรังสีเพื่อการรักษามะเร็งเต้านมโดยปกติแล้วใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงระดับ 6 MV และปริมาณรังสีที่ให้ค่อนข้างสูงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการรักษาให้หายขาดหรือประคับประคองอาการ ตามมาตรฐานสากลที่กำหนดโดยคณะกรรมการการระหว่างประเทศด้านหน่วยและการวัดทางรังสี (International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU) ได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของปริมาณรังสีตลอดขั้นตอนการรักษาจะต้องไม่เกิน 5% เนื่องจากการฉายรังสีบริเวณเต้านมมีอวัยวะที่สำคัญ (Critical organ) ที่ต้องระวังไม่ให้ได้รับปริมาณรังสีมากเกินไปที่กำหนดไว้ การกำหนดปริมาณรังสีเพื่อการรักษาก่อนมะเร็งต้องการความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมากเพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการฉายรังสี การตรวจสอบปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากหุ่นจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีดังกล่าวที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์มีราคาแพงมากทำให้ประเทศไทยมีใช้เฉพาะในหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาหุ่นจำลองดังกล่าวขึ้นใช้เองในราคาถูกเพื่อประเมินค่าปริมาณรังสีจะช่วยให้การรักษามะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษาในหน่วยงานต่างๆ ทั่วประเทศมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้ป่วยจะมีโอกาสหายและลดภาวะแทรกซ้อนจากการรักษาได้เป็นอย่างมาก

โรคมะเร็งปากมดลูกพบมากเป็นอันดับต้นในเพศหญิงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น การรักษาส่วนใหญ่เป็นการรักษาร่วมหลายวิธีการ วิธีการรักษาด้วยรังสีรักษา เป็นวิธีการที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพ การรักษาส่ง สามารถแบ่งการรักษา มะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีรักษาออกเป็น การรักษาด้วยรังสีรักษาระยะไกล (Teletherapy) และรังสีรักษาระยะใกล้ (Brachytherapy) การฉายด้วยรังสีรักษาระยะไกลสำหรับรักษามะเร็งปากมดลูกเพียงอย่างเดียวอาจส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนต่ออวัยวะสำคัญ ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (Bladder) และทวารหนัก (Rectum) ดังนั้นการรักษามะเร็งปากมดลูกส่วนใหญ่จึงใช้วิธีการฉายรังสีระยะไกล ร่วมกับการฉายรังสีระยะใกล้ เนื่องจากการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ช่วยให้ก้อนมะเร็งได้รับปริมาณรังสีโดยตรง ในขณะที่อวัยวะและเนื้อเยื่อปกติที่อยู่รอบๆ ได้รับปริมาณรังสีน้อยซึ่งส่งผลให้ลดภาวะแทรกซ้อนได้อย่างมาก แต่ด้วยเหตุที่กำหนดปริมาณรังสี (prescribed dose) สำหรับการรักษาใช้พลังงานและปริมาณรังสีที่สูงมาก ความถูกต้องของการรักษาจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาอย่างมาก การประเมินความถูกต้องของปริมาณรังสีสามารถทำได้ด้วยการวัดปริมาณรังสีในผู้ป่วยซึ่งไม่สามารถทำได้โดยตรงแต่สามารถใช้วิธีการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองแทนได้ แต่ปัจจุบันยังไม่มีหุ่นจำลองที่เหมาะสมในการทดสอบเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาหรือเครื่องฉายรังสีระยะใกล้โดยเฉพาะ ดังนั้นหากมีหุ่นจำลองที่สามารถวัดค่าปริมาณรังสีด้วยการสอดใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีเข้าไปได้จะเป็นประโยชน์ต่อการตรวจสอบความถูกต้องก่อนการฉายได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนักได้รับ อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์สำหรับการทดสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ออกมาเทียบกับแผนการรักษาได้อีกด้วย

สำหรับหุ่นจำลองที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีทางรังสีรักษาในปัจจุบันมีจำนวนค่อนข้างน้อยเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองสำหรับการฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ที่เหมาะสมสำหรับการใส่อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูกนั้นยังไม่มีขายในท้องตลาด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูกจากน้ำยาพาราเพื่อตรวจสอบการประกันคุณภาพ และการตรวจสอบอัลกอริทึมในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาซึ่งส่งผลให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาเพื่อการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็ง
2. เพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งในทางรังสีรักษา
3. เพื่อทดสอบ/ประเมินคุณภาพและความพึงพอใจของหุ่นจำลองที่ผลิตขึ้นในด้านการใช้งานและความสมจริง

ผลการดำเนินงาน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสร้างหุ่นจำลองให้มีขนาดใกล้เคียงกับสัดส่วนของหญิงไทยมีความสูง 63 เซนติเมตร สัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว และรอบเอว 34 นิ้ว สำหรับหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานได้ออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิงและมีช่องสำหรับใส่เครื่องมือในการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ และออกแบบให้มีรูสำหรับใส่หัววัดรังสีในตำแหน่งอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ออกแบบส่วนสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ (applicators) และหัววัดรังสีให้เหมาะสมกับการใช้งาน การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองให้มีอวัยวะตั้งแต่คอถึงต้นขาเพื่อสร้างเป็นหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน โดยออกแบบให้สามารถนำหุ่นจำลองทั้งสองประกอบกันเป็นลำตัวได้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นเพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัว โดยได้ทำการหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ SSF ที่สามารถทำให้หุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการประกอบด้วยสมบัติความแข็ง (Hardness) ไม่ต่ำกว่า 23 (Hardness by shore A) สมบัติการทนแรงดึง (Tensile strength) ค่า Stress จะต้องไม่ต่ำกว่า 150 kN/m^2 ค่า Strain จะต้องไม่ต่ำกว่า 0.4 และค่า Modulus จะต้องไม่ต่ำกว่า 300 kN/m^2 และสมบัติการทนแรงฉีกขาด (Tear strength) ไม่ต่ำกว่า 1.0 kN/m โดยเริ่มต้นจากการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพาราด้านความหนาแน่น (Density) ความแข็ง (Hardness) การทนแรงดึง (Tensile strength) ทดสอบทนแรงฉีกขาด และทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging)

ทำการทดสอบชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราเพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Decomposition Temperature ด้วยเทคนิค Thermalgravimetric Analysis (TGA) จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้ทดสอบหาค่า glass transition (T_g) ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) หา Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimetric Analysis (TGA) ทำการทดสอบหาคุณสมบัติของนำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยนำหุ่นยางพาราไปฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) บริษัท Varian รุ่น 2100CD ปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน

ทำการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองจากหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวประกอบด้วยอวัยวะส่วนคอถึงต้นขา เพื่อสร้างเป็นหุ่นจำลองทรวงอกและอุ้งเชิงกรานที่สามารถนำมาประกอบกันได้ แม่พิมพ์สร้างจากไฟเบอร์ผสมเรซิน สำหรับการสร้างแม่พิมพ์ปอดจำลองใช้วิธีการเดียวกันกับหุ่นจำลองทรวงอก การขึ้นรูปหุ่นจำลองทรวงอกใช้วิธีบรรจุปอดภายในแม่พิมพ์ทรวงอกจากนั้นเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีลงในแม่พิมพ์ โดยระหว่างการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์ใช้วิธีการกรองด้วยตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ และวางแม่พิมพ์หุ่นจำลองทิ้งไว้เพื่อให้ น้ำยางพาราเกิดการจับตัว จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก แกะแม่พิมพ์ออก นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมีที่ยังตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง เติมน้ำและตกแต่งหุ่นจำลองให้มีความสมจริงมากที่สุด สำหรับการขึ้นรูปหุ่นอุ้งเชิงกรานใช้วิธีบรรจุกล่องอะคลิลิกในแม่พิมพ์อุ้งเชิงกราน จากนั้นเทน้ำยางลงในแม่พิมพ์ โดยระหว่างการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์ใช้วิธีการกรองด้วยตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับการขึ้นรูปหุ่นจำลองทรวงอก เมื่อหุ่นยางพาราแห้งดีแล้วทำการประกอบฝาปิดกล่องอะคลิลิก และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร เพื่อใส่หัววัดปริมาณรังสี ตามตำแหน่งที่ออกแบบสำหรับ point A และ Bladder point พร้อมทั้งตกแต่งหุ่นจำลองให้สวยงาม

การวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับแผนการรักษาประกอบด้วยการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ การวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานใช้วิธีการรักษาด้วยรังสีรักษากระยะใกล้จากเครื่องใส่แร่ (high dose rate; HDR) โดยกำหนดจุดอ้างอิงของกระเพาะปัสสาวะ ทวารหนัก และตำแหน่ง point A ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับในหุ่นจำลอง กำหนด prescription dose ที่ point A เท่ากับ 0.5 Gy

การทดสอบวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ในหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นเพื่อประเมินความสามารถในการนำหุ่นจำลองไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมทั้งการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อฉายรังสี จัดตำแหน่งการฉายรังสีของหุ่นจำลองตามแผนการรักษาและใส่หัววัดรังสีในช่องใส่หัววัดรังสีซึ่งอยู่ในเต้านมขวา ทำการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) นำค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference)

การวัดปริมาณรังสีหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานใช้วิธีวางหัววัดรังสีในตำแหน่งที่กำหนดไว้ประกอบด้วย Point A, Bladder point และ rectal point โดยทำการวัดค่าที่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่า Reading ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณค่าปริมาณรังสีในหน่วย cGy โดยแก้ค่าต่างๆ และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของการออกแบบหุ่นจำลองและสร้างแม่แบบด้วยดินเหนียวทำให้ได้แม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ที่มีความคงทนและแข็งแรงสามารถประกบกันอย่างพอดี ขอบและบริเวณรอยต่อมีความสมดุลซึ่งจะทำให้ไม่ปรากฏเห็นเป็นขอบรอยต่อที่ตัวหุ่นยางพาราภายหลังจากการขึ้นรูป บริเวณรอยต่อที่ประกบกันบนแม่พิมพ์จะถูกยึดด้วยน็อตโดยรอบเพื่อให้แม่พิมพ์คงรูปอยู่ได้ขณะทำการเทน้ำยางพารา ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกทั้งเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เมื่อนำค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาพบว่าค่าความแตกต่างปริมาณรังสีเท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการปลดปล่อยปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคและการคำนวณค่าปริมาณรังสีของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ซึ่งส่งผลให้การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากหากกำหนดปริมาณรังสีให้ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องส่งผลให้สามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้ดีและเนื้อเยื่อปกติได้รับปริมาณรังสีน้อยทำให้ลดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีได้ดี นอกจากนี้หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถจัดตำแหน่งสำหรับการฉายรังสีได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน สำหรับผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาแตกต่างกันที่ตำแหน่ง Point A เท่ากับ 28.97% ตำแหน่ง Rectal Point เท่ากับ 0.82% และตำแหน่ง Bladder point เท่ากับ 11.91%

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกจากยางพาราสำหรับใช้ในการตรวจสอบและวัดค่าปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการฉายรังสีเอกซ์พลังงานสูงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกทำให้ได้หุ่นจำลองตามขนาดที่ต้องการ โดยมีสัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว รอบเอว 34 นิ้ว ภายในหุ่นจำลองบรรจุปอดเพื่อให้สามารถทำการวางแผนการรักษาได้เหมือนกับมนุษย์จริง และเจาะรูให้มีขนาดเท่ากับหัววัดรังสีที่เต้านมขวาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอก สำหรับการสร้างแม่พิมพ์สำหรับหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมด้วยวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์พบว่าสามารถใช้ในการหล่อแบบได้ดี โดยผิวของหุ่นจำลองมีความเรียบเนียน การยึดแม่พิมพ์ที่ประกบกันด้วยน็อตสามารถช่วยลดการรั่วไหลของน้ำยางพาราขณะเทเพื่อหล่อแบบได้อย่างดีสำหรับหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราที่สร้างขึ้นมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อยางพาราเท่ากับ 1.03

กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการวัดและการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างของปริมาณรังสีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในบริเวณที่ห่างจาก high dose gradient (Rectal point) และ มากสุดถึง 29% ในช่วง high dose gradient (Point A)

สำหรับการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับสร้างหุ่นจำลองด้วยการทดสอบตัวอย่างยางจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณการเติม SSF ในตัวอย่างยางเพื่อให้น้ำยางจับตัวและอบแห้งได้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง โดยพบว่าการเติม 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

สำหรับการพัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะอื่นเมื่อประเมินความหนาแน่นของหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำ สำหรับด้านการออกแบบหุ่นจำลองควรพัฒนาให้สามารถจัดอุปกรณ์ในการวัดปริมาณรังสีสำหรับการใช้งานจริงได้ง่าย นอกจากนี้การศึกษาลดทอนของ Applicators จากการวัดจริง โดยวิจัยเปรียบเทียบกับกระบวนการทาง Monte carlo สามารถช่วยให้นำหุ่นจำลองไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และควรวัดปริมาณรังสีในจุดที่นอกช่วง high dose gradient อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระดุกให้มีความสมจริงในตัวหุ่นจำลองจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ ให้มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น แต่การกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสีอาจจะไม่ใช่ว่าจุดอ้างอิงในทางคลินิก ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่ติดต่อการใช้งานจริง

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

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

เผยแพร่ให้ผู้สนใจโดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษาและหน่วยงานการศึกษาที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการรักษาด้วยการฉายรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับโรคมะเร็งเต้านม ตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อการรักษาโรคมะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีรักษา ระยะใกล้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฝึกทักษะการปฏิบัติงานทางรังสีรักษาเพื่อการรักษาโรคมะเร็ง และเพื่อการเรียนการสอนจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมและมะเร็งปากมดลูกได้

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 ผลการศึกษวิจัยพบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งเต้านมได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีแผนการรักษา 2 และ 3 มิติมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ หุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกได้จริง นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมยาพาราของประเทศไทยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ได้

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

โรคมะเร็งเต้านมพบมากในประเทศไทยโดยเฉพาะในประชากรหญิงและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี จากรายงานของสถาบันมะเร็งแห่งชาติปี พ.ศ. 2552 ถึงปัจจุบัน พบว่ามะเร็งเต้านมเป็นมะเร็งที่พบบ่อยที่สุดในผู้หญิงทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย และเป็นสาเหตุการตายจากมะเร็งเป็นอันดับสองรองจากมะเร็งปอดเท่านั้น (ศรีมนิทรนิมิต, 2555) โดยอัตราการเกิดโรคมะเร็งของผู้หญิงทั่วไปพบว่ามีโอกาสป่วยเป็นมะเร็งได้มากถึง 1 ใน 10 (ชมรมฟื้นฟูสุขภาพมะเร็ง, 2553; ทวิชศรี, สุวดีพงศ์, ตันตะพลิน, กุลตวนิช, & สกฤตน์; โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์) โรคดังกล่าวส่งผลกระทบอย่างมากต่อภาวะเศรษฐกิจและสังคมไทยโดยรวม ด้วยเหตุนี้รัฐบาลจึงให้ความสำคัญต่อการตรวจวินิจฉัยและการรักษาโรคมะเร็งเต้านมมากยิ่งขึ้น จากสถานการณ์มะเร็งเต้านมที่นับวันพบว่ามีจำนวนที่มากขึ้นดังนั้นการรักษาด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก (Podgorsak, 2005) เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถกลับมาใช้ชีวิตประจำวันได้เหมือนปกติ ปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็งเต้านมมีด้วยกันหลายวิธีประกอบด้วยการผ่าตัด การฉายรังสี การใช้ยาเคมีบำบัด และการรักษาด้วยฮอร์โมน การฉายรังสีด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นวิธีการรักษาที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากสามารถควบคุม กำจัดการก่อตัวและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี โดยจุดมุ่งหมายหลักของรังสีรักษาประกอบด้วยการรักษาเพื่อบรรเทาอาการ และรักษาให้หายขาด (หล่อวิทยา, เทพมงคล, พรหมรัตน์พงศ์, & เทชะพิบูล, 2544)

กระบวนการทางรังสีรักษาประกอบไปด้วยขั้นตอนซับซ้อนและต้องการรายละเอียดสูงเนื่องจากการฉายรังสีต้องการให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมาก (Barrett, Dobbs, Morris, Roques, & Harrowen, 2009; Podgorsak, 2005) การวางแผนการรักษาเป็นขั้นตอนที่มีรายละเอียดและเข้าใจได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการรักษา นอกจากนี้การให้รังสีปริมาณสูงสำหรับการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมต้องการความถูกต้องสูงสุดหากเกิดการผิดพลาดจากการให้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าปกติอาจส่งผลให้ไม่สามารถรักษามะเร็งหายขาดและมีโอกาสเกิดเป็นซ้ำ ในทางกลับกันหากให้ปริมาณรังสีที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะปกติที่อยู่ข้างเคียงเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยจึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับการรักษาที่ถูกต้องปลอดภัยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ ปัจจุบันสามารถตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับด้วยการวัดรังสีในหุ่นจำลอง (Phantom) ทางรังสีรักษาที่มีคุณลักษณะเหมือนกับเนื้อเยื่อมนุษย์แต่เนื่องจากหุ่นจำลองดังกล่าวมีราคาที่สูงเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และยังไม่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้เนื่องจากหุ่นจำลองถูกสร้างขึ้นสำหรับใช้งานเฉพาะด้านไม่สามารถสร้างขึ้นสำหรับใช้วัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีในโรคมะเร็งแต่ละชนิดได้ด้วยเหตุผลที่ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้หากสามารถสร้างหุ่นจำลองขึ้นใช้เองเพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจะส่งผลให้การรักษามีประโยชน์สูงสุด จากการศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ภายในประเทศไทย พบว่ายางพาราสามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลองทางรังสีรักษาได้เนื่องจากมีคุณสมบัติหลายประการที่ใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงได้พัฒนาหุ่นจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับประกอบด้วยหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับใช้แทนผู้ป่วยมะเร็งเต้านม และหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานสำหรับใช้แทนผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูก โดยหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการรักษาได้

การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมจากยางพาราช่วยให้สามารถประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งก่อนการรักษาและระหว่างการรักษาในกระบวนการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมได้อย่างมาก เนื่องจากการฉายรังสีเพื่อการรักษาโรคมะเร็งเต้านมใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงระดับ 6 MV และปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นคณะกรรมการการระหว่างประเทศด้านหน่วยและการวัดทางรังสี (International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU) ได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของปริมาณรังสีตลอดขั้นตอนการรักษาให้ไม่เกิน 5% จากปริมาณรังสีที่แพทย์กำหนด เนื่องจากการฉายรังสีบริเวณเต้านมมีอวัยวะที่สำคัญ (Critical organ) การกำหนดปริมาณรังสีเพื่อการรักษาก้อนมะเร็งต้องการความถูกต้องและแม่นยำที่สูงมากเพื่อให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการฉายรังสีได้

มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่พบบ่อยเป็นอันดับต้นในเพศหญิง นิยมรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ (Brachytherapy) เนื่องจากการฉายด้วยรังสีระยะไกล (Teletherapy) เพียงอย่างเดียวอาจส่งผลกระทบต่ออวัยวะสำคัญเช่น กระเพาะปัสสาวะ (Bladder) และทวารหนัก (Rectum) เป็นต้น การรักษาด้วยรังสีระยะใกล้เป็นวิธีการรักษาที่สามารถให้ปริมาณรังสีสูงที่ก้อนมะเร็งได้โดยตรง ในขณะที่อวัยวะและเนื้อเยื่อปกติที่อยู่โดยรอบได้รับปริมาณรังสีน้อยซึ่งเป็นคุณลักษณะทางฟิสิกส์เฉพาะของสารกัมมันตรังสีที่ใช้ (C.A. Joslin, 2001) ด้วยเหตุที่สารกัมมันตรังสีที่ใช้ในการรักษาปลดปล่อยแกมมาจำนวนมากบริเวณที่ทำการรักษา หากเกิดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งอาจส่งผลกระทบต่ออวัยวะปกติได้รับรังสีปริมาณสูงมาก ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีเพื่อการรักษาโรคมะเร็งจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ปัจจุบันการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้สามารถวางแผนการรักษาแบบสามมิติด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (computer treatment planning system) เนื่องจากการรักษาค่อนข้างซับซ้อน ความผิดพลาดของการกระจายปริมาณรังสีในตัวผู้ป่วยอาจเกิดขึ้นได้ หากทำการตรวจสอบการกระจายปริมาณรังสีเพื่อป้องกันความผิดพลาดจะสามารถช่วยให้การรักษามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การตรวจสอบดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการใช้หุ่นจำลองเพื่อทดสอบการให้รังสีเนื่องจากไม่สามารถทำการวัดค่าปริมาณรังสีในตัวผู้ป่วยได้โดยตรง ดังนั้นหากทำการสร้างหุ่นจำลองที่สามารถใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายปริมาณรังสีได้จะเป็นประโยชน์ต่อการตรวจสอบความถูกต้อง โดยเฉพาะการตรวจสอบก่อนการรักษา นอกจากนี้การวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองยังสามารถใช้สำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนักได้รับ อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็ง
2. เพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งในงานรังสีรักษา

บทที่ 2

ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย

หุ่นจำลอง (Model) (เรื่องวิทยุ, 2556)

หุ่นจำลอง หมายถึง วัสดุสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบของจริงด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถใช้ของจริงเพื่อประกอบการเรียนการสอนได้ หุ่นจำลองร่างกายมนุษย์สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะและตำแหน่งของอวัยวะภายในร่างกายของคนได้ สำหรับหุ่นจำลองทางรังสีวิทยาหมายถึงหุ่นที่ลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ซึ่งอาจนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพในงานรังสีวินิจฉัย การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) การวัดปริมาณและการกระจายของรังสีในหุ่นจำลองเทียบเท่าผู้ป่วยจริงในอวัยวะต่างๆ (Dose Measurement and Dose distribution) ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาทางรังสีรักษา หุ่นจำลอง (เรื่องวิทยุ, 2556) สามารถแบ่งเป็นประเภทดังนี้

1. หุ่นรูปทรงภายนอก (Solid Model) เป็นหุ่นจำลองที่ต้องการแสดงรูปร่างหรือรูปทรงภายนอกเท่านั้น โดยน้ำหนัก ขนาด สีหรือพื้นผิว ลวดลายและมาตราส่วนจะผิดไปจากของจริง
2. หุ่นเท่าของจริง (Exact Model) มีขนาดและรูปร่างรายละเอียดทุกอย่างเท่าของจริงทุกประการสามารถใช้แทนของจริงได้เป็นอย่างดี
3. หุ่นจำลองแบบขยายหรือแบบย่อ (Enlarge, Reduce Model) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหุ่นจำลองแบบ มาตราส่วน โดยอาจมีการย่อหรือขยายให้เล็กหรือใหญ่ โดยยังคงเป็นสัดส่วนกับของจริงทุกส่วนและยังสามารถช่วยให้ทราบรายละเอียดและความสัมพันธ์กับของจริงได้
4. หุ่นจำลองแบบผ่าซีก (Cut Away Models) เป็นหุ่นจำลองที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะภายใน โดยตัดพื้นผิวบางภายนอกบางส่วนออก
5. หุ่นจำลองแบบเคลื่อนไหวทำงานได้ (Working Models) หุ่นจำลองแบบนี้สามารถแสดงให้เห็นส่วนที่ เคลื่อนไหวที่เป็นการทำงานของวัตถุหรือเครื่องจักร โดยนอกจากนี้ยังมีหุ่นจำลองอีกหลายประเภทอาทิเช่น หุ่นจำลองเลียนของจริง (mockup Models) และหุ่นจำลองแบบแยกส่วน (Build up Models) เป็นต้น

สำหรับคณะกรรมการระหว่างว่าด้วยหน่วยและการวัดรังสี (The International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อและหุ่นจำลองไว้ดังนี้ “วัสดุสมมูลสมมูลเนื้อเยื่อคือวัสดุใดๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อในแง่ของการทำปฏิกิริยากับรังสีชนิดก่อไอออน” และ “หุ่นจำลอง คือโครงสร้างใดๆ ที่ประกอบด้วยวัสดุแทนเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น และใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาของรังสีในร่างกายมนุษย์” โดยหุ่นจำลองมักถูกนำมาทดสอบมาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Image Equipment) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีและการลดทอนรังสีในเนื้อเยื่อมนุษย์

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา (Podgorsak, 2005)

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำมาเพื่อใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการทางรังสีรักษาทั้งในเรื่องของตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสี การตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือต่างๆ และการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำผู้ป่วยเพื่อทำการฉายรังสีสำหรับการรักษา เช่น การควบคุมคุณภาพการเคลื่อนที่ของ Multi-leaf Collimator (MLC Quality Assurance), การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) และการวัดปริมาณรังสี (Dose Measurement) ของเครื่องเร่งอนุภาค รวมทั้งยังใช้สำหรับวัดการกระจายรังสี (Dose distribution) หรือการคำนวณปริมาณรังสี (Dose Calculation) ให้กับผู้ป่วยเพื่อการรักษามะเร็งชนิดต่างๆ ในขั้นตอนของการวางแผนการรักษา (Treatment Planning) หุ่นจำลองที่ใช้ทางรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำจากวัสดุผสมเนื้อเยื่อเพื่อให้มีความสมจริงคล้ายมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และความเหมือนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยหุ่นจำลองทางรังสีรักษาอาจทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin), ซิลิโคน (Silicone), ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass), พอลิยูรีเทน (Polyurethane), พอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) หรืออะคริลิก (Acrylics) อย่างไรก็ตามวัสดุเหล่านี้มีราคาแพงและบางชนิดเป็นสารอันตรายเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถแบ่งประเภทของหุ่นจำลองทางรังสีรักษาตามลักษณะองค์ประกอบภายในได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองอย่างง่ายที่ได้รับความนิยมใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสี ภายในมีองค์ประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดและมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์มีได้หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom หรือหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom

สร้างจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซินมีความหนาแน่น 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

หุ่นจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพโดยทั่วไปในทางรังสีรักษา การตรวจสอบความคงตัวของลำรังสี และการควบคุมคุณภาพของ Multi-leaf collimator หุ่นจำลองชนิดนี้สามารถติดตั้งและใช้งานได้ง่าย วัสดุที่ใช้ทำมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำประมาณ 1% (Phantoms) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom

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

หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom

ออกแบบสำหรับการวัดปริมาณรังสี ตรวจสอบการวางแผนการรักษา และสามารถวัดการกระจายปริมาณรังสีแบบ 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 หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) ดังภาพที่ 4 เป็นหุ่นจำลองที่นิยมใช้ในทางรังสีวิทยาเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 30 ปี และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก หุ่นจำลองประเภทนี้ได้รับการตกแต่งและปรับปรุงจนมีคุณสมบัติที่ความเหมาะสมกับการใช้งาน ผลิตจากวัสดุที่สมมูลย์กับเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ กล้ามเนื้อ (Muscle), กระดูก (Bone), ปอด (Lung) และอากาศ (Air) หุ่นจำลองชนิดนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ทั้งภายนอกและภายใน โดยตัดเป็นสไลด์ตามขวางเพื่อประโยชน์ในการใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีสำหรับการประเมินค่าปริมาณรังสีภายในร่างกาย 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 ยางธรรมชาติชนิดนี้ประชาชนทั่วไปเรียกว่ายางพารา (Para rubber) ปัจจุบันยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากเป็นพืชยุทธศาสตร์ในการพัฒนาด้านการเกษตร ประเทศไทยมีแนวโน้มในการหันมาใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์มากขึ้น จากข้อมูลปี 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากถึง 3,776,957 ตัน จากการส่งออกทั้งในรูปของวัตถุดิบพร้อมทำผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา คิดเป็นมูลค่ากว่า 647,906 ล้านบาท ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่ถือว่ามีความสำคัญ อีกทั้งมีโอกาที่จะพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ยางพาราได้หลากหลาย โดยยางธรรมชาติเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแล้วสามารถนำมาจำหน่ายได้ในราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นการเรื่องที่ดีหากมีการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางให้มีระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถสร้างผลผลิต และผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างมีคุณภาพและมีมาตรฐาน (กรมวิชาการเกษตร, 2556) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ผ่านการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ เช่น กระดุกเทียม, ยางวงจัดฟัน, ยางนวดเหยือก, ดินประดิษฐ์สำหรับเด็ก ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์, แผ่นยางคลุมดิน และกระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำยางพารามาใช้เป็นฟ่อนจำลองทางการแพทย์ยังมีค่อนข้างน้อยทั้งที่เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานโดยการนำยางพารามาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง 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)

น้ำยางพาราหลังจากการกรีดยังมีความเป็นกรดต่างประมาณ 6 มีค่าแรงดึงผิวประมาณ 40.5 ดายน์ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ ohms-cm น้ำยางจะมีสีขาวข้น เมื่อปั่นด้วยความเร็วรอบสูงๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำยางเกิดการแยกชั้นแบ่งได้เป็นส่วนหลักๆ ดังนี้

1. ส่วนเนื้อยาง (Rubber Phase) เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวซึ่งอยู่ชั้นบนสุด คิดเป็นประมาณ 30-36% โดยอนุภาคของยางพาราจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน มีลักษณะเป็นทรงกลม บริเวณผิวล้อมรอบด้วยชั้น

ของโปรตีนและไขมันทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียรแต่หลังจากการกรีดไม่ถึงชั่วโมง แบคทีเรียและเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมันได้ถ้าปราศจากการเติมสารเคมีที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียซึ่งสามารถทำให้น้ำยางเสียความเสถียรได้

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

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

องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำยางพาราสดเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักประกอบด้วยน้ำ ยางไฮโดรคาร์บอน คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและกรดอะมิโน และองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
นิวทรอลลิปิด	1.0
ไกลโคลิปิดและฟอสโฟลิปิด	0.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
สารอินทรีย์	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. **ความทนทานต่อการขาด (Rebound resilience)** ยางพารามีคุณสมบัติทนการขาด 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 แต่สามารถทนได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน (Acetone) และ แอลกอฮอล์ (Alcohol)
9. **คุณสมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging Property)** ยางพารามีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป

การแปรรูปน้ำยางพารา (สุขประเสริฐ, 2548)

การแปรรูปน้ำยางพาราด้วยการเติมสารเคมีชนิดต่างๆ ในน้ำยางพาราจะทำให้ยางพาราที่ได้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรการผสมอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน หลักการและขั้นตอนของการออกสูตรการผสมน้ำยางกับสารเคมีนั้นปกติจะต้องคำนึงถึงประโยชน์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตและต้นทุน

สารเคมีที่นำมาใช้ในการผสมน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มหลักๆ 5 กลุ่ม ดังนี้

1. สารทำน้ำยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากอ่อน เหนียว ไปเป็นยางคงรูป
2. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูปให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้รวดเร็วยิ่งขึ้น การเกิดปฏิกิริยาคงรูประหว่างกำมะถันและยางส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินช้าและต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่สูงมาก
3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เป็นสารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากยางจะเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วในอุณหภูมิที่สูง หรืออยู่ในภาวะที่ปนเปื้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะ ทองแดง หรือ แมงกานีส เป็นต้น

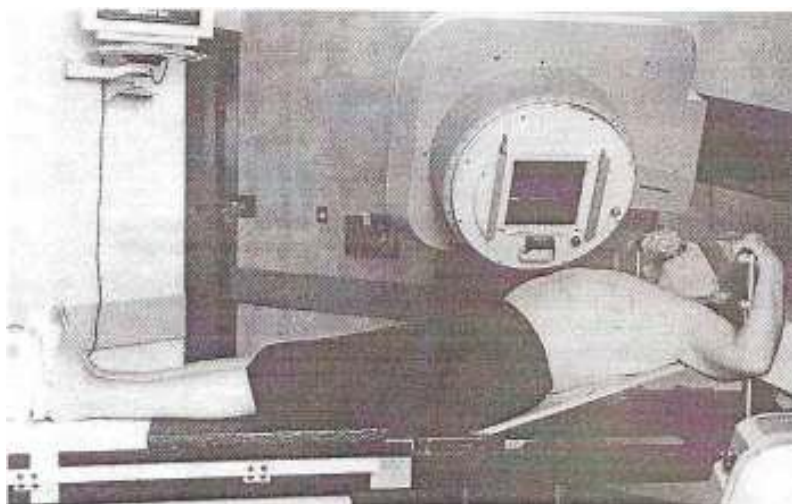
4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา
5. สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มระยะเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยา
6. สารอื่นๆ เช่น การเติมสารที่ทำให้เกิดสี, กลิ่น และฟอง เป็นต้น

รังสีรักษาสำหรับมะเร็งเต้านม(หล่อวิทยา, et al., 2544)

การรักษา มะเร็งเต้านมด้วยรังสีรักษามีเป้าหมายเพื่อควบคุมและลดการกระจายของโรคไปยังส่วนอื่นๆ ของร่างกาย การรักษาอาจใช้วิธีร่วมกันระหว่างการผ่าตัด การใช้ยาเคมีบำบัดหรือฮอร์โมนบำบัด และการใช้รังสีรักษา ถึงแม้ว่ามีวิธีการรักษาที่ดีเพียงใดก็อาจทำให้มีการกลับเป็นซ้ำได้อีกโดยเฉพาะบริเวณ Chest wall และ Regional lymph node ซึ่งอาจก่อให้เกิดภาวะแทรกซ้อนตามมา เช่น แผลเลือดออก เกิดการติดเชื้อ มีอาการปวด และแขนบวมที่เกิดจาก Brachial plexus compression อันเป็นการบั่นทอนคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย และเป็นแหล่งของการเกิดการแพร่กระจายของโรคต่อไป จุดประสงค์ของการฉายรังสีหลังผ่าตัดเป็นการทำลาย Microscopic disease ที่อาจหลงเหลืออยู่ที่บริเวณ Chest wall และ Peripheral Lymphatics โดยในปัจจุบันการพิจารณา Posterior chest wall irradiation หลังจากการทำ MRM แล้ว โดยเฉพาะในรายที่เป็น high risk ที่มี local-regional recurrence มากกว่าร้อยละ 15 หรือ 20 การทำการผ่าตัดแบบสงวนเต้านมเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยเฉพาะมะเร็งเต้านมในระยะเริ่มแรก (Stage I-II) แต่การทำการผ่าตัดด้วยวิธีนี้เพียงอย่างเดียวอาจทำให้เกิดภาวะ Locoregional recurrence สูงได้ถึงร้อยละ 35-40 มีการศึกษาต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการศึกษาของ NSABP B-06 พบว่า การผ่าตัดแบบสงวนเต้านมแล้วตามด้วยการฉายรังสีที่เต้านมจะได้ผลทั้งควบคุมโรคและอัตราการรอดชีวิตเท่ากับการทำ mastectomy

เทคนิคทางรังสีรักษา (Radiotherapy technique)

การฉายรังสีรักษามะเร็งเต้านมในแต่ละบริเวณ ผู้ป่วยจะต้องนอนอยู่ในท่าเดิมตลอด ดังนั้นหากผู้ป่วยนอนราบมักพบว่าหน้าอกส่วนบนลาดลง ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการให้ผู้ป่วยนอนศีรษะและไหล่อยู่บนกระดานสามเหลี่ยมรูปสามเหลี่ยม (Triangular wedge) เพื่อยกศีรษะและหน้าอกส่วนบนให้สูงขึ้นนานเป็นแนวราบ ยกแขนข้างเดียวกับหน้าอกที่จะทำการฉายรังสี กางออกเป็นมุมฉาก จับยึดกับเสาที่สามารถจัดระยะและระดับให้คงที่ได้ทุกวัน หรืออาจสอดมือไว้ใต้ศีรษะของผู้ป่วยเอง ตะแคงหน้าไปด้านตรงข้าม นอกจากนี้อาจสอดหมอนข้างไว้ใต้เข่าทั้งสองข้างของผู้ป่วยเพื่อให้นอนในท่าที่สบาย ไม่เกร็งเกินไป ส่งผลให้ไม่มีการยับยั้งยื้อยื้อตัว ขณะฉายรังสีดังแสดงภาพที่ 5 การจัดทำของผู้ป่วยในลักษณะดังกล่าวทำให้ขั้นตอนการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษามีความยุ่งยากและต้องการการฝึกทักษะที่ดีเพียงพอเนื่องจากอาจเกิดความผิดพลาดในการให้ปริมาณรังสีได้ค่อนข้างมากและเกิดภาวะแทรกซ้อนตามมาได้ สำหรับเทคนิคการให้ลำรังสีสำหรับการรักษามะเร็งเต้านมประกอบด้วยเทคนิคการฉายรังสีบริเวณ Chest wall เทคนิคการฉาย Supraclavicular lymph nodes field และ เทคนิคการฉาย Internal mammary field ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 5 การจัดท่าของผู้ป่วยบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า Triangular wedge หรือ Breast broad
จาก http://nci.cu.edu.eg/lectures/Book%20Breast%20Cancer%20PDF/Ch_8.pdf
สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

เทคนิคการฉายรังสีบริเวณ chest wall

การฉายรังสีบริเวณ Chest wall หลังการผ่าตัดหรือการฉาย intact breast กรณีที่ทำการผ่าตัดแบบสงวนเต้านม การฉายรังสีใช้เทคนิคการให้ลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential portals โดยครอบคลุม chest wall หรือเต้านมทั้งหมด และพยายามให้เนื้อปอดได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุด บริเวณฉายรังสีควรครอบคลุมพื้นที่ปอดเพียง 2-3 เซนติเมตร เป็นอย่างมากเพื่อลดภาวะแทรกซ้อนจากปริมาณรังสีที่บริเวณปอด ขอบเขตของลำรังสีที่ดีควรมีขนาดดังต่อไปนี้

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

เทคนิคการฉาย Supraclavicular lymph nodes field

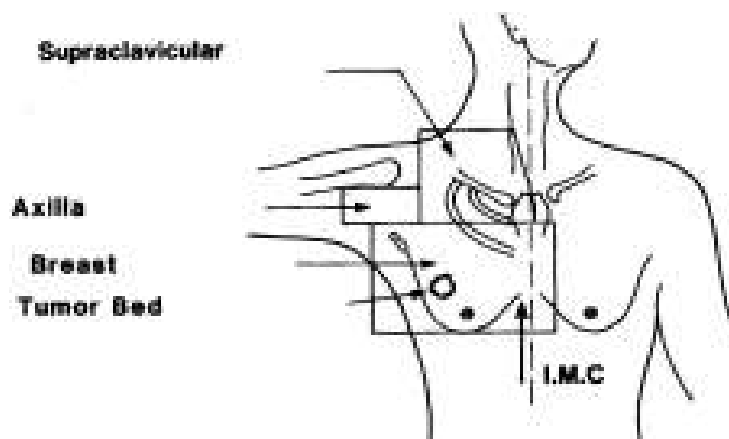
การใช้เทคนิคการให้ปริมาณรังสีลักษณะนี้ใช้ในกรณีที่ต้องการฉายเฉพาะ apex ของ axilla โดยมีขอบเขตของลำรังสีดังต่อไปนี้

- 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

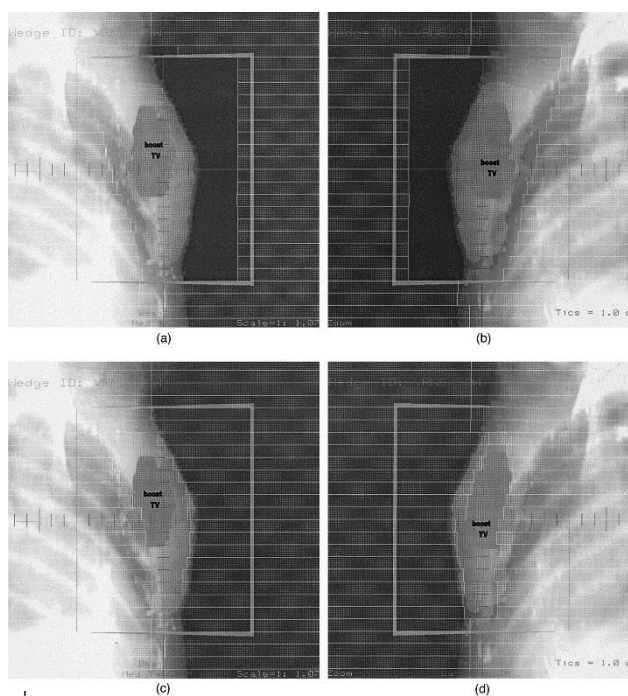
lateral ประมาณ 10-15 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ลำรังสีตกกระทบบริเวณหลอดลม หลอดอาหารและไขสันหลัง

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



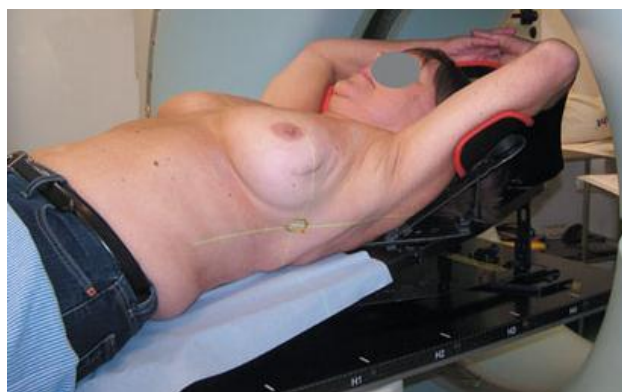
ภาพที่ 6 เทคนิคการฉายรังสีของเต้านมบริเวณ Chest wall, Supraclavicular lymph nodes field และ Internal mammary field



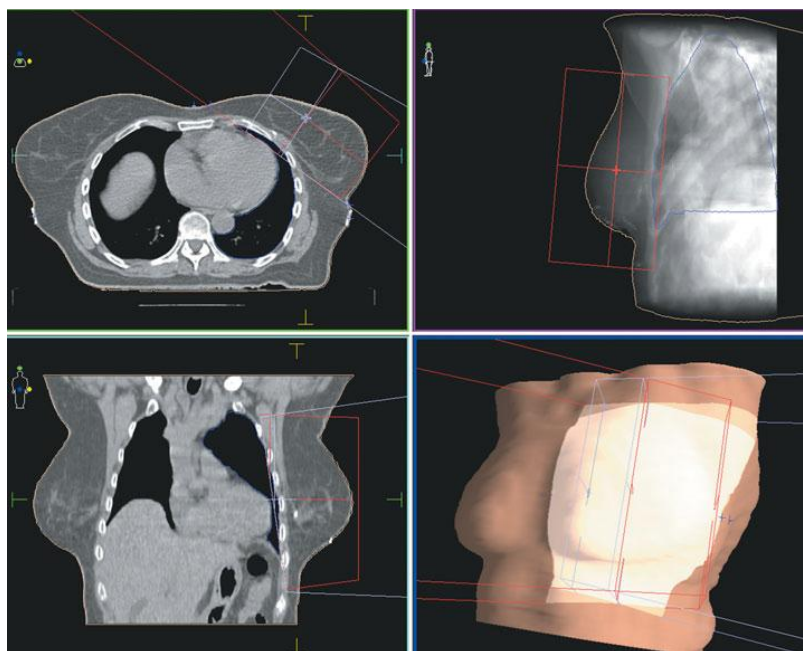
ภาพที่ 7 เทคนิคการฉายรังสี lateral tangential field ของเต้านม
ในขั้นตอนการวางแผนการรักษา แบบ conventional 2D tangential field

การจำลองการรักษา (Treatment Simulation) (Seymour, Khan, & Roger, 1992)

ประสิทธิภาพการรักษาด้วยรังสีรักษาขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอในการรักษา และความถูกต้องในการให้ปริมาณรังสีที่ก่อนมะเร็งในขณะที่เนื้อเยื่อรอบข้างได้รับปริมาณรังสีต่ำที่สุด ความถูกต้องของให้ทิศทางลำรังสีในขั้นตอนการจำลองการรักษามีความจำเป็นอย่างมากเพื่อช่วยให้การรักษามีประสิทธิภาพและบรรลุเป้าหมาย เนื่องจากการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาส่งผลต่อเทคนิคการฉายรังสีในขั้นตอนการรักษา ได้แก่ การจัดทำผู้ป่วยและการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดทำ สำหรับเทคนิคและขั้นตอนการจำลองการรักษาที่ห้องจำลองการรักษาประกอบด้วยการจัดท่าและทิศทางทำให้ลำรังสีบนตัวผู้ป่วยดังแสดงในภาพที่ 8 การกำหนดขอบเขตก่อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญและการกำหนดขอบเขตก่อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญรวมทั้งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังแสดงในภาพที่ 9



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



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

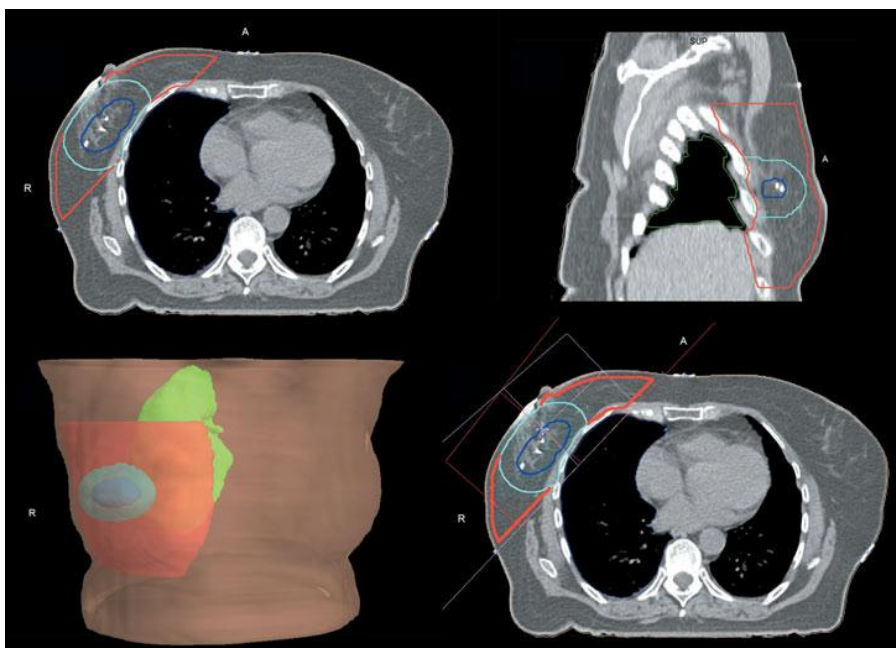
ระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (Treatment Planning System) (Seymour, et al., 1992)

ระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาใช้สำหรับการคำนวณปริมาณรังสีแบบ 2 มิติ 3 มิติ (3D-CRT) เทคนิคปรับความเข้มลำรังสี (IMRT) และเทคนิคปรับความเข้มรังสีเชิงปริมาตร (VMAT) เป็นต้น โดยใช้ข้อมูลผู้ป่วยจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา การวางแผนการรักษาเป็นการทำงานประสานกันระหว่างแพทย์ทางด้านรังสีรักษา และนักฟิสิกส์การแพทย์ สำหรับขั้นตอนการวางแผนการรักษา เริ่มต้นจากการตรวจสอบข้อมูลผู้ป่วยและศึกษาแผนการรักษา ตลอดจนเทคนิคที่ต้องใช้ในการรักษาหลังจากผ่านการจำลองการรักษาทั้งหมดอย่างละเอียด ประกอบด้วยเทคนิคในการฉายรังสี ตำแหน่งฉายรังสี (Anatomical site) ระยะลึกของก้อนมะเร็ง (Depth) ตรวจสอบปริมาณรังสีที่ฉายในแต่ละวัน (Daily dose) เส้นปริมาณรังสีที่แพทย์เลือก (Selected isodose) พลังงานรังสีที่ใช้และขนาดพื้นที่รังสีตามที่แพทย์กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 10 เพื่อให้การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ดังแสดงในภาพที่

11



ภาพที่ 10 ภาพเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม (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 วางอยู่บนกล้ามเนื้อหน้าอกที่มีชื่อว่า Pectoralis Muscle ต่ำกว่ากระดูกไหปลาร้า (Clavicle) โดยลักษณะการวางตัวของเนื้อเยื่อเต้านมจะยื่นจากแนว Mid line ไปยังด้านข้างถึงของของกล้ามเนื้อ Latissimus dorsi บริเวณที่อยู่ติดกับส่วนของฐานเต้านมเรียก Retromamary Space โดยส่วนที่หนาที่สุดของเต้านมจะอยู่บริเวณด้านบนและด้านนอก (Upper outer quadrant) ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยต่อมต่างๆ ที่มากกว่าบริเวณอื่น โดยมีส่วนที่เรียกว่า Axillary tail ที่เป็นบริเวณที่พบว่าการก่อตัวของก้อนเนื้อจำพวก Mass และ Primary tumor ได้บ่อยที่สุด เต้านมประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ ผิวหนัง ไขมันใต้ผิวหนัง และเนื้อเยื่อเต้านม โดยเนื้อเยื่อเต้านมยังประกอบไปด้วยเนื้อเยื่ออีก 3 ชนิด ได้แก่

1. Fibrous Tissue หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Connective Tissue เป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่อยู่บนเต้านม เช่น Cooper ligament

2. Adipose tissue เป็นไขมันที่กระจายตัวอยู่ภายในโดยรอบ

3. Adipose Tissue เป็นส่วนที่ผลิตน้ำนม ซึ่งฝังตัวอยู่ใน Adipose tissue ต่อมไขมัน (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) โดยในแต่ละส่วนขององค์ประกอบภายในเต้านมจะถูกกั้นแบ่งออกเป็น ส่วนๆ ด้วย Fibrous tissue หรือ Connective tissue ส่วนของระบบทางเดินน้ำเหลืองของเต้านมรวมทางเดินน้ำเหลืองในบริเวณใกล้เคียงที่อยู่บริเวณหน้าอกและรักแร้ โดยเป็นการรวมกันของต่อมน้ำเหลืองที่อยู่ติดกับ Internal jugular vein และ Subclavian vein ลงไปถึงฐานของลำคอใต้ต่อจุดเกาะปลายของกล้ามเนื้อ Sternocleidomastoid ถึงส่วนต้นของกระดูกไหปลาร้า โดยมีตำแหน่งของ Lymphatic trunk ที่สำคัญ 3 ตำแหน่งคือ Subclavian trunk บริเวณรักแร้, Jugular trunk บริเวณลำคอถึงด้านบนของกระดูกไหปลาร้า และ Bronchomediastinal trunk ซึ่งเชื่อมต่อกันในหลายทิศทาง ทางด้านซ้ายของร่างกายจะมีการเชื่อมต่อกันของต่อมน้ำเหลืองเพียงระยะสั้นๆ เท่านั้น ท่อน้ำเหลือง (Lymphatic duct) ทั้งด้านซ้ายและขวาจะทำหน้าที่ลำเลียงน้ำเหลืองเข้าสู่หลอดเลือดดำ Internal jugular vein หรือท่อน้ำเหลืองส่วนอก (Thoracic duct)

Axillary lymph node ต่อม้ำเหลืองบริเวณรักแร้ สามารถแบ่งออกได้ 3 ระดับ ดังนี้

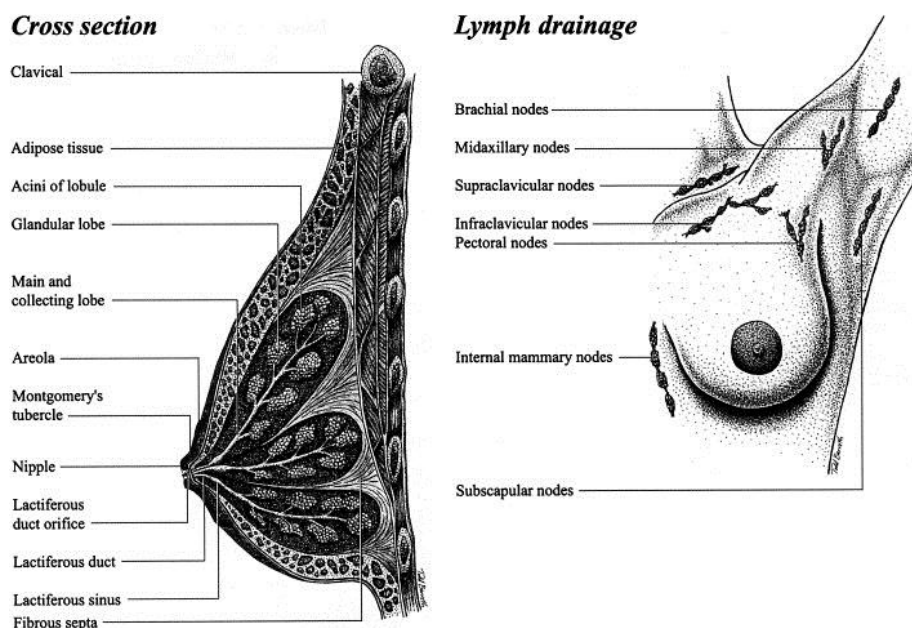
ระดับที่ 1 ต่อม้ำเหลืองที่อยู่ต่ำกว่าส่วนล่างของกล้ามเนื้อ Pectoralis minor

ระดับที่ 2 ต่อม้ำเหลืองที่อยู่ใต้กล้ามเนื้อ Pectoralis minor

ระดับที่ 3 ต่อม้ำเหลืองที่อยู่สูงกว่ากล้ามเนื้อ Pectoralis minor

ต่อมน้ำเหลืองเหล่านี้ถือว่าเป็นต่อมน้ำเหลืองหลักที่มีการระบายน้ำเหลืองภายในเนื้อเยื่อเต้านมซึ่งในขณะเดียวกันก็เป็นบริเวณที่พบว่าการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็งมากที่สุด

Internal mammary node เป็นกลุ่มของต่อมน้ำเหลืองขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-5 มิลลิเมตร โดยทั่วไปมักพบอยู่ในขอบเขต 3 เซนติเมตรถัดจากกระดูกหน้าอก และบางครั้งอาจพบที่อยู่ต่ำกว่าชายโครง (Costal margin) ต่อม้ำเหลืองเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ใน 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

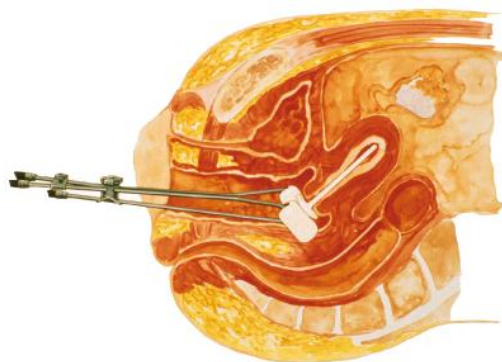
มะเร็งปากมดลูก (Seymour, et al., 1992)

ปากมดลูก (Cervix) เป็นส่วนหนึ่งของระบบสืบพันธุ์เพศหญิง มีลักษณะรูปร่างเป็นกรวยเล็กๆ เป็นช่องมีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร เป็นฐานของมดลูกและเชื่อมระหว่างมดลูกกับช่องคลอด โดยที่ทางผ่านปากมดลูกโดยปกติจะปิด แต่อย่างไรก็ตามขณะที่คลอดบุตรจะเปิดออกเพื่อให้ทารกคลอดออกมาจากมดลูกของแม่ มะเร็งปากมดลูก (Cervical cancer) เป็นมะเร็งที่พบมากที่สุดอันดับที่สองของผู้หญิงทั่วโลก ในแต่ละปีมีผู้หญิงจากทั่วโลกจำนวน 500,000 คนที่เป็นมะเร็งปากมดลูก ปากมดลูกประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น คือ ชั้นนอกและชั้นใน โดยหากผู้ป่วยเป็นมะเร็งปากมดลูกที่เซลล์ชั้นนอกซึ่งเรียกว่า squamous cell carcinoma เป็นชนิดที่พบบ่อยที่สุดของมะเร็งปากมดลูก สำหรับมะเร็งที่เกิดจากเซลล์ชั้นใน หรือ glandular cells ที่สร้าง mucus จะเรียกว่า cervical adenocarcinoma

การรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีรักษาระยะไกล (C.A. Joslin, 2001)

โรคมะเร็งปากมดลูกที่พบในอันดับต้นๆ ของหญิงไทย กระบวนการรักษามะเร็งปากมดลูกมีหลายวิธีด้วยกันทั้งการผ่าตัด เคมีบำบัด การรักษาด้วยรังสีระยะไกล รวมไปถึงการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ การรักษา มะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะไกลเริ่มขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 โดยเริ่มจากการรักษาด้วยรังสีเรเดียแบบ อัตราแรงรังสีต่ำ (low dose rate: LDR) จนปัจจุบันรักษาด้วยกัมมันตรังสีอัตราแรงรังสีสูง (high dose rate: HDR) โดยกัมมันตรังสีชนิดไอริเดียม 192 (Ir-192) ได้รับความนิยมใช้ในการรักษาตั้งแต่ปี ค.ศ.1967 และนิยมรักษาร่วมกับการฉายรังสีภายนอก (external-beam irradiation) หรือการฉายระยะไกลเพื่อการรักษาที่หวังผลให้ผู้ป่วยหายขาดจากมะเร็ง โดยสามารถใช้ในการรักษาตั้งแต่ผู้ป่วยระยะแรกจนถึงระยะท้าย วิธีที่ใช้ในการรักษาโดยทั่วไปเป็นการรักษาระบบแมนเชสเตอร์ (Manchester System) ซึ่งใช้อุปกรณ์ร่วมในการรักษา ประกอบด้วย central intrauterine tandem และ small vaginal ovoids จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงดังภาพที่ 13 การรักษาด้วยวิธีการฉายรังสีภายนอกมักใช้เทคนิค parallel opposed fields โดยมีการใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนรูปแบบลำรังสีชนิด Wedge ร่วมด้วย อย่างไรก็ตามจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหากทำการรักษา

ด้วย HDR ร่วมกับการฉายรังสีภายนอกทำให้ได้ผลการรักษาและภาวะแทรกซ้อนที่ใกล้เคียงกับ LDR ซึ่งเป็นผลการรักษาที่เหมาะสม



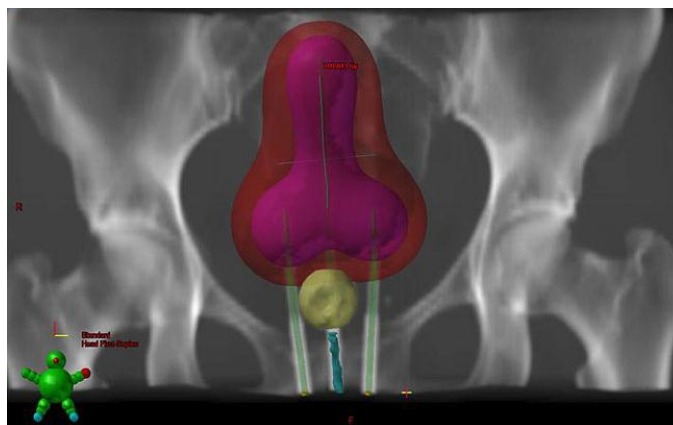
ภาพที่ 13 การฉาย brachytherapy โดยใช้ applicators วางในปากมดลูก

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

ผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกชนิด squamous cell cancer มีขนาดของ primary tumor ที่หลากหลาย ตั้งแต่ขนาด microscopic subclinical disease จนถึง enlarged tumor ซึ่งอาจขยายไปถึง parametrium เข้าไปที่ pelvic side wall รุกรานไปยัง lower vaginal tissues และ infiltrate ที่ body ของมดลูก (uterus) อาจจะมีการรุกรานไปยังอวัยวะหรือเนื้อเยื่อข้างเคียง เช่น rectum และ bladder ได้ โดยการรักษาเพื่อหวังผลให้หายสามารถใช้รักษาด้วยการฉายรังสีภายนอกและตามด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ ซึ่งขนาดของ primary tumor รวมถึงการขยายไปยังอวัยวะข้างเคียงเป็นสิ่งที่ใช้ในการตัดสินใจว่าแผนการรักษาจะเป็นแบบใด เนื่องจากการรักษาแต่ละแบบมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน โดยการรักษาด้วย intracavitary irradiation อย่างเดียวเหมาะสำหรับทำลายก้อนมะเร็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่า 3 - 4 เซนติเมตร ส่วนการรักษาแบบการฉายรังสีภายนอกเหมาะสำหรับการรักษาผู้ป่วยที่มีการกระจายของมะเร็งไปที่ต่อมน้ำเหลือง แต่โดยปกติแล้วนิยมใช้การร่วมรักษาระหว่าง intracavitary และ external-beam irradiation สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกระยะเริ่มแรกอาจทำการรักษาด้วย intracavitary irradiation เพียงอย่างเดียวหรือเริ่มรักษาด้วย intracavitary irradiation ก่อนแล้วตามด้วยการผ่าตัด หรือการรักษาด้วย intracavitary irradiation ร่วมกับ external-beam irradiation สำหรับการเป็นมะเร็งระยะท้ายมักรักษาทั้ง 2 วิธีร่วมกัน

โรคมะเร็งปากมดลูกเหมาะสำหรับการรักษาด้วย intracavitary irradiation ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของช่องคลอดและช่องมดลูกเหมาะกับการสอดใส่แร่ โดยปกติแล้วเนื้อเยื่อของปากมดลูกและช่องคลอดค่อนข้างติดอัมมูติและทนต่อการฉายด้วยรังสีอัตราแรงสูง และความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว (rapidly falls off) เมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี การรักษาด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นผลดีต่อเนื้อเยื่อปกติที่อยู่หลังจากปากมดลูก โดยเมื่อ intracavitary source applicators ถูกวางภายในช่องคลอดและมดลูก ตำแหน่งของอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นกับ ขนาดและรูปร่างของก้อนมะเร็ง ดังนั้นอาจจะส่งผลให้ก้อนได้รับปริมาณรังสีต่ำเกินไป และเนื้อเยื่อปกติอาจได้ปริมาณรังสีสูงเกินไป ดังนั้นจึงต้องเพิ่มการรักษาด้วยการฉายรังสีภายนอก สำหรับรูปร่างของการกระจายของปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ที่เหมาะสมมีลักษณะคล้ายลูกขมพู่ ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยรูปร่างของการกระจายปริมาณรังสีดังกล่าวอาจใช้วิธีการปรับเวลาของการปลดปล่อยรังสีของกัมมันตรังสีร่วมด้วยกับตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ สำหรับ

ปริมาตรก้อนมะเร็งที่ใช้ในการรักษา (Target volume) แบ่งออกเป็น primary tumor และ pelvic lymph nodes โดยอวัยวะเสี่ยงสำคัญที่ต้องคำนึงถึงค่าปริมาณรังสีที่ได้รับ ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (bladder) และ ทวารหนัก (rectum)



ภาพที่ 14 การกระจายของปริมาณรังสีจาก intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก โดย
ลักษณะของการกระจายของปริมาณรังสีเป็นรูปชมพู่

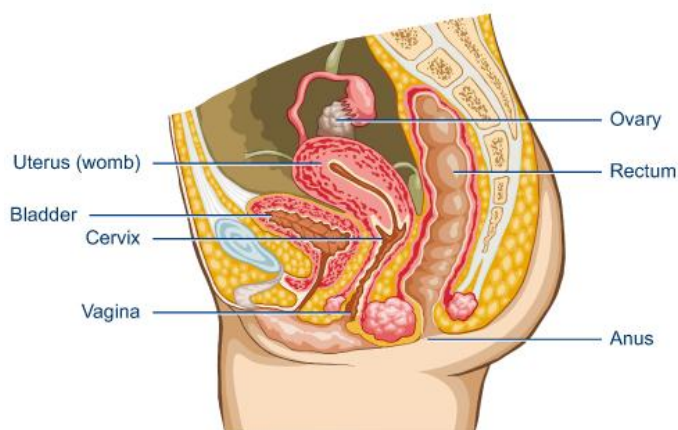
จาก <http://www.varian.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

กระบวนการรักษามะเร็งปากมดลูก (C.A. Joslin, 2001)

การรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกผู้ป่วยจะนอนอยู่บนขาหยั่งในท่า lithotomy บนเตียงรักษา โดยปกติคนไข้ถูกทำให้หมดความรู้สึกต่อความเจ็บปวดด้วยวิธีการดมยาหรือทานยาแก้ปวด หลังจากการจัดอุปกรณ์ในห้องใส่อุปกรณ์แล้วนักรังสีการแพทย์ทำการสร้างภาพถ่ายรังสีด้วยวิธี orthogonal film ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือภาพเอ็มอาร์ไอ จากนั้นนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทำวางแผนการรักษาเพื่อกำหนดเวลาและตำแหน่งในการรักษาด้วยรังสี สำหรับกระบวนการสอดใส่อุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า applicators ภายในตัวผู้ป่วย โดยปกติมีรูปแบบที่คล้ายกันในทุกกรณี ในกระเพาะปัสสาวะจะมีการใส่ bladder catheter โดยภายในบอลลูนมีการใส่สารที่บวมขึ้นเพื่อให้ นักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทราบตำแหน่งของกระเพาะปัสสาวะและมีประโยชน์กรณีที่ต้องการเติมน้ำเพื่อให้ น้ำเต็มกระเพาะปัสสาวะ (full bladder) โดยมีประโยชน์เพื่อช่วยให้ผนังของกระเพาะปัสสาวะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุดส่งผลให้ได้รับปริมาณรังสีน้อยลง สำหรับทวารหนักอาจมีการขยายโดยการใส่ผ้ากอซเพื่อเป็นการดันให้ทวารหนักอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี

กายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิง (ชวนชม สกนธวัฒน์ 2535)

ภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิงประกอบด้วยอวัยวะต่างๆ ได้แก่ รังไข่ (Ovary) มดลูก (Uterus) กระเพาะปัสสาวะ (Urinary Bladder) ปากมดลูก (Cervix) ช่องคลอด (Vagina) ทวารหนัก (Rectum) และ ช่องทวารหนัก (Anus) โดยความสัมพันธ์ของแต่ละอวัยวะแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์อวัยวะในอุ้งเชิงกรานเพศหญิง

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

ช่องคลอด

ช่องคลอดเป็นอวัยวะที่มีลักษณะเป็นท่อนเชื่อมต่อกันระหว่างปากมดลูกกับอวัยวะสืบพันธุ์ภายนอกผนังด้านหน้ามีความยาวประมาณ 6-8 เซนติเมตร และผนังด้านหลังมีความยาวประมาณ 7-10 เซนติเมตร

ปากมดลูก

ปากมดลูกเป็นส่วนล่างสุดของมดลูกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่ในช่องท้องและส่วนที่ยื่นโผล่เข้าในช่องคลอด ความยาวของปากมดลูกปกติ ประมาณ 3-4 เซนติเมตร

มดลูก

มดลูกเป็นอวัยวะที่เป็นโพรง ลักษณะคล้ายชมพู่ ประกอบด้วยผนังที่มีกล้ามเนื้อหนา ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร วางอยู่ระหว่างกระเพาะปัสสาวะกับลำไส้ใหญ่ส่วนล่าง

กระเพาะปัสสาวะ

กระเพาะปัสสาวะนั้นอยู่หน้าต่อปากมดลูกและช่องคลอดและหลังต่อ Pubis Symphysis โดยบริเวณ Trigone จะวางอยู่ด้านบน 1/3 ของช่องคลอด

ทวารหนัก

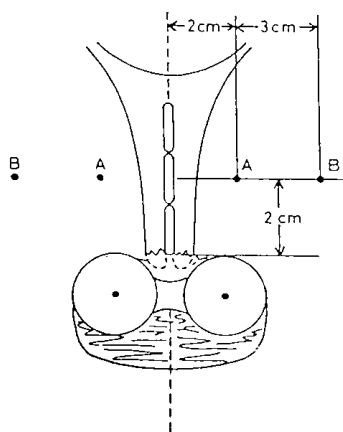
ทวารหนักเป็นส่วนปลายของลำไส้ใหญ่ มีลักษณะเป็นท่อนตรงมีความยาวประมาณ 12.5 เซนติเมตร ตรงบริเวณส่วนล่างมีลักษณะพองโต เพื่อเก็บอุจจาระไว้โดยมีกล้ามเนื้อช่วยพยุงอยู่ ตำแหน่งที่ตั้งในเพศชายอยู่ข้างหลังกระเพาะปัสสาวะ ในเพศหญิงอยู่ข้างหลังมดลูก ตรงปลายของไส้ตรงหรือทวารหนัก (Anus) มีกล้ามเนื้อหูรูด 2 อัน ควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก กล้ามเนื้อหูรูดด้านในถูกควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนมัติ ไม่อยู่ใต้บังคับของจิตใจ ส่วนกล้ามเนื้อหูรูดด้านนอกอยู่ใต้บังคับของจิตใจ และสำคัญมากในการควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก

ตำแหน่งอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสีตกเส้นสำหรับการรักษาแบบ Intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก

ปัจจุบันกำหนดตำแหน่งอ้างอิงหรือ reference point หลากหลาย โดยบางตำแหน่งมีความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดรังสีและบางตำแหน่งมีความสัมพันธ์กับอวัยวะเสี่ยง ซึ่งนิยามของตำแหน่งของจุดอ้างอิงต่างๆ สามารถหาประเมินได้จากภาพถ่ายรังสีทิศทาง AP และ Lateral โดยตำแหน่งอ้างอิง point A กระเพาะปัสสาวะ (Bladder point) และทวารหนัก (Rectal point) เป็นจุดอ้างอิงที่นิยมใช้ในการกำหนดปริมาณรังสีของมะเร็งปากมดลูกสามารถนิยามได้ ดังต่อไปนี้

ตำแหน่งอ้างอิง Point A (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, 1985; Khan FM., 2003)

การกำหนดตำแหน่งนิยามใช้ตามระบบ Manchester โดยตำแหน่งอ้างอิง point A เป็นจุดที่ใช้ในการกำหนดปริมาณรังสี (dose prescription point) เพื่อการรักษาผู้ป่วยในการวางแผนการรักษา โดยตำแหน่ง point A ใช้วิธีการกำหนดให้มีระยะห่างเหนือ lateral vagina fornix เท่ากับ 2 เซนติเมตรและห่างจาก cervical canal ในด้านข้างเป็นระยะ 2 เซนติเมตร ดังภาพที่ 16 สำหรับการวางแผนการรักษาใช้วิธีการนิยามตำแหน่ง point A ที่ระยะเหนือจาก cervical os (cervical end ของ tandem) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร และออกมาด้านข้างจาก cervical canal เป็นระยะ 2 เซนติเมตร



ภาพที่ 16 นิยามของ point A ตามวิธีของ Manchester system

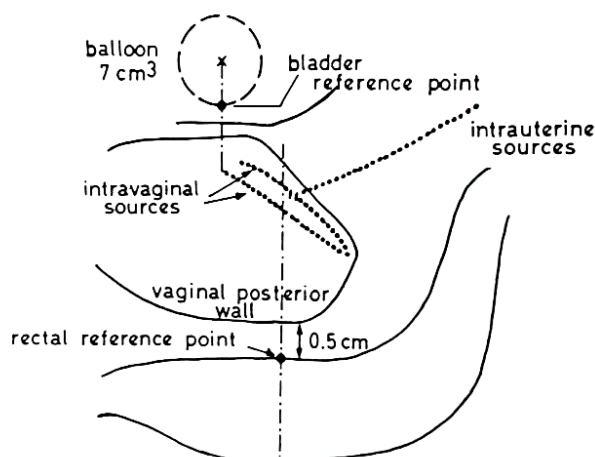
จาก Meredith WJ. Radium dosage: The Manchester system. Edinburgh: Livingstone, 1967.

ตำแหน่งจุดกระเพาะปัสสาวะ (Bladder point) (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, 1985; Khan FM., 2003)

ตำแหน่งอ้างอิง Bladder point กำหนดจาก Foley catheter โดยเติมด้วยสารทึบรังสีปริมาณประมาณ 7 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในบอลลูนเพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดตำแหน่ง นอกจากนี้ต้องรีบอลลูนให้อยู่ในตำแหน่งที่ urethra ในภาพถ่ายรังสีท่า AP ซึ่งทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งของ reference point ได้จากเส้นที่ลากจากหน้ามาหลัง (anterio-posterior line) โดยวัดผ่านกึ่งกลางของบอลลูน และ reference point นี้จะอยู่บนผิวด้านหลังของบอลลูน ในภาพถ่ายทางรังสีด้านหน้า จุดอ้างอิงดังกล่าวจึงอยู่บริเวณกึ่งกลางของบอลลูน ดังภาพที่ 17

ตำแหน่งจุดทวารหนัก (Rectal point) (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, 1985; Khan FM., 2003)

การกำหนดตำแหน่ง Rectal point สามารถประเมินได้จากภาพถ่ายทางรังสีด้านหน้าซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของ ovoid sources (หรือปลายด้านล่างของ intrauterine source) สำหรับภาพถ่ายรังสีทางด้านข้างนั้นตำแหน่ง rectal point อยู่ที่ตำแหน่งบนเส้นที่ลากจากกึ่งกลางของ ovoid sources โดยอยู่หลัง posterior vaginal wall เป็นระยะ 5 มิลลิเมตรดังภาพที่ 17 ซึ่งสามารถมองเห็น posterior vaginal wall ได้จากการใส่ผ้าก๊อชที่ขุบสารทึบรังสีใส่เข้าไปในช่องคลอด



ภาพที่ 17 การกำหนดตำแหน่งของ bladder และ rectal points

จาก ICRU. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology.

ICRU report No. 38. Bethesda, MD:ICRU, 1985

การสร้างนวัตกรรมสื่อการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้และเข้าใจได้ง่าย โดยเฉพาะการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่บุคลากรทางการแพทย์จะต้องทำความเข้าใจบทเรียนต่างๆ อย่างถ่องแท้และลึกซึ้ง ในขณะที่เนื้อหาการเรียนค่อนข้างยากและส่วนใหญ่การศึกษาในตำราเพียงอย่างเดียวทำให้ผู้เรียนไม่สามารถจินตนาการตามได้โดยง่าย การสร้างสื่อวัสดุสามมิติด้วยการพัฒนาหุ่นจำลองมนุษย์รูปแบบต่างๆ จึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก นอกจากจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นยังช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจและเป็นการเพิ่มทักษะให้กับผู้เรียนก่อนการปฏิบัติงานกับผู้ป่วยจริง ปัจจุบันหุ่นจำลองจากยางพาราธรรมชาติแทนวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากยางพารามีประโยชน์ที่หลากหลาย โดยมีการพัฒนาหุ่นจำลองเพื่อการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพจำนวนมาก เช่น พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์ (สุขประเสริฐ, 2548) การสร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย (ตันตพันธ์, 2554) การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา (ดวงรัตน์ et al., 2552) การสร้างหุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่โดยใช้วัสดุที่ทำด้วยยางพารา ไม้และซิลิโคนที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (ประดับวงษ์, โกวิท, สิมมะลี, & เขวอนชื่น, 2554) หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง ผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีและที่สำคัญสามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจเพิ่มมากขึ้น เกิดการเรียนรู้และเข้าใจได้ง่ายกว่าการเรียนการสอนรูปแบบเดิมสามารถนำไปใช้งานแทนหุ่นจำลองที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้

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

ประสิทธิภาพของการรักษาทางรังสีรักษา (Radiation Therapy) นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเป้าหมายหลักของรังสีรักษาเป็นการให้ปริมาณรังสีสูงสุดที่ก่อนมะเร็งในขณะที่ยังคงอยู่ข้างเคียงจะต้องได้รับปริมาณรังสีต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่ง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการพัฒนาทักษะและประสบการณ์ในการทำงาน โดยเฉพาะขั้นตอนการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด นอกจากนี้ระหว่างรักษาด้วยการฉายรังสีนั้นนักรังสีการแพทย์จำเป็นต้องมีการจัดทำที่ถูกต้องร่วมกับการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดทำรูปแบบต่างๆ อันนำไปสู่การรักษาที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากระหว่างการรักษาเป็นการปฏิบัติงานของนักรังสีการแพทย์เพียงคนเดียวเท่านั้น หากเกิดการประสานงานกันของนักรังสีการแพทย์เปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสามารถลดลงมากถึง 82% นอกจากจากตรวจสอบการจัดทำผู้ป่วยให้ถูกต้องและสม่ำเสมอแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการกำหนดและวางขอบเขตของลำรังสีที่จะฉายในบริเวณที่สนใจ และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรักษา อาทิเช่น Gantry, Collimator angle, Monitoring unit และการกำหนดเวลาในการฉายรังสี เป็นต้น (Seymour, et al., 1992)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

- 1) หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยการฉายรังสีระยะไกลได้
- 2) หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาในรังสีรักษาระยะไกลได้

ขอบเขตงานวิจัย

พัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากน้ำยางพาราให้มีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ และคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีจากแผนการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะไกลและรังสีรักษาระยะใกล้ โดยสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการกำหนดปริมาณรังสีเพื่อการรักษาผู้ป่วยได้ และมีความทนทานต่อปริมาณรังสีที่ใช้งานจริงในช่วง 200-6,000 cGy ด้วยการทดสอบความทนทานและสมบัติเชิงกลของหุ่นจำลองยางพารา

หุ่นจำลองทรวงอก

พัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาเพื่อการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านมโดยใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก การศึกษาประกอบด้วยการออกสูตรยางพาราเพื่อหาส่วนผสมและวิธีการที่เหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมเพศหญิงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับของจริง โดยออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom ศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับเต้านมและมะเร็งเต้านม การประยุกต์การใช้งานตรวจสอบปริมาณรังสีทางด้านรังสีรักษา การทดสอบความทนทาน และทดสอบสมบัติเชิงกลของหุ่นจำลอง

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

พัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีระหว่างการวัดจริง และการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยสามารถใส่อุปกรณ์สำหรับสอดใส่แร่เพื่อการรักษามะเร็งปากมดลูก และมีรูสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชัน (Ionization chamber) บริเวณตำแหน่งจุดอ้างอิง ได้แก่ point A ทวารหนัก และกระเพาะปัสสาวะ

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยการทำวิจัยทั้งหมด 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกและอวัยวะเชิงกรานเพศหญิง

จากการศึกษาและสืบค้นข้อมูลสัดส่วนของผู้หญิงไทยด้วยเทคโนโลยี "3D Body Scanning" และจากผลการสำรวจการวัดสัดส่วนของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) พบว่าสัดส่วนของผู้หญิงไทยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนัก 57.4 กิโลกรัม และมีสัดส่วนดังต่อไปนี้ รอบอก 36.0 นิ้ว รอบเอว 31.5 นิ้ว และรอบสะโพก 38.0 นิ้ว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาหุ่นจำลองมาตรฐานทางรังสีรักษาที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีชนิด Alderson Rando Phantom ซึ่งมีสัดส่วน รอบอก 34.0 นิ้ว รอบเอว 26 นิ้ว และรอบสะโพก 34.0 นิ้ว การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวในการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกและอวัยวะเชิงกรานให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานวัดค่าปริมาณรังสีในการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมและมะเร็งปากมดลูกตามลำดับ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกและอวัยวะเชิงกรานซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกเพศหญิงให้มีส่วนของร่างกายตั้งแต่ส่วนคอถึงต้นขา โดยออกแบบให้สามารถประกอบหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานให้มีรูปร่างเหมือนเพศหญิงที่มีอวัยวะตั้งแต่คอถึงต้นขาซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ได้

การออกแบบหุ่นจำลองทรวงอก

ออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกให้มีเต้านมทั้งสองข้าง เต้านมขวาเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีภายในหุ่นจำลองทรวงอกบรรจุปอดที่สร้างจากยางพาราฟองน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเนื้อเยื่อเพื่อความเหมือนจริงของการวัดค่าปริมาณรังสี โดยเฉพาะในขั้นตอนจำลองการรักษาซึ่งต้องกำหนดทิศทาง การวางลำรังสีที่เหมาะสมเพื่อป้องกันอวัยวะปกติข้างเคียงได้รับปริมาณรังสีเกินกำหนด การสร้างหุ่นจำลองทรวงอกได้ทำการออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงกับสัดส่วนของหญิงไทยมีความสูงตั้งแต่คอถึงสะดือ 63 เซนติเมตร สัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว และรอบเอว 34 นิ้ว การพัฒนาหุ่นจำลองได้คำนึงถึงการจัดทำผู้ป่วยในการฉายรังสีผู้ป่วยมะเร็งเต้านมที่ผู้ป่วยนอนบน Breast Broad ซึ่งใช้สำหรับยกศีรษะและหน้าอกให้ขนานเป็นแนวราบกับพื้นเหมือนกับที่ใช้ในผู้ป่วยจริง

การออกแบบหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกราน

ออกแบบหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานด้วยสัดส่วนของข้อมูลที่ได้จาก 3D Body Scanning และผลการสำรวจด้วยการวัดสัดส่วนของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) การออกแบบหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ออกแบบหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานเพศหญิง

หุ่นจำลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีขนาดครอบคลุมอวัยวะเชิงกรานทั้งหมด มีช่องขนาดใหญ่สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ (applicators) เพื่อการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ และออกแบบให้มีรูขนาดเล็กสำหรับสอดใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีในตำแหน่งอ้างอิงมาตรฐาน point A ตลอดจนตำแหน่งอ้างอิงสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีในกระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก การกำหนดตำแหน่งสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และตำแหน่งหัววัดรังสีใช้วิธีการศึกษาตำแหน่งดังกล่าวจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกที่แผนกรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ในช่วงระหว่างเดือนกันยายน 2557 ถึง มีนาคม 2558 และศึกษาขนาดของหัววัดปริมาณรังสีชนิด Ionization chamber ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ยี่ห้อ PTW เพื่อกำหนดขนาดหุ่นจำลอง

1.2 การกำหนดตำแหน่งสำหรับจุดอ้างอิง point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก

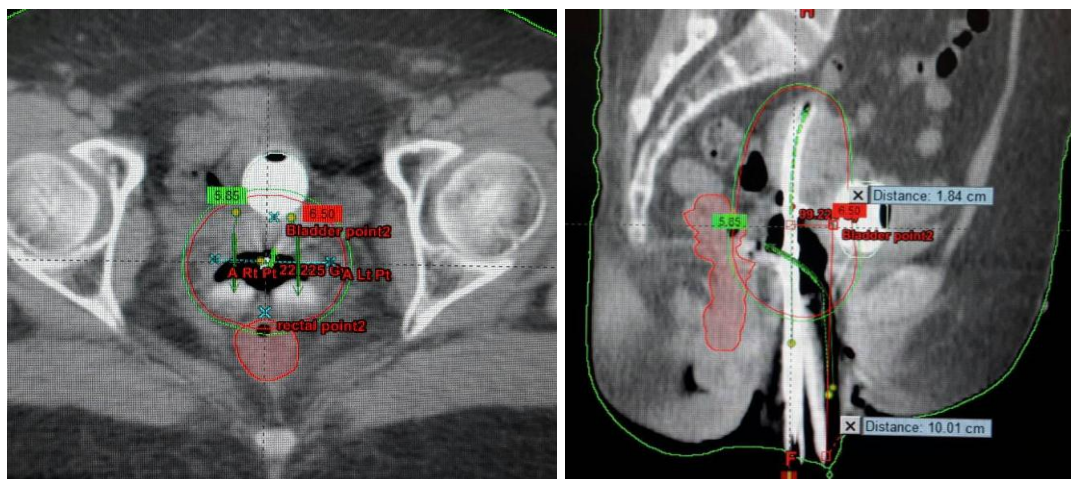
ทำการวัดขนาดเพื่อหาตำแหน่งสำหรับกำหนด point A จุดอ้างอิงของทวารหนัก (rectal point) และจุดอ้างอิงของกระเพาะปัสสาวะ (bladder point) โดยการวัดตำแหน่งดังกล่าวจากภาพเอกซเรย์ของผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกที่รักษาด้วยรังสีระยะใกล้ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ดังภาพที่ 18-21 แสดงการวัดตำแหน่งจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ศึกษาโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาสำหรับรังสีระยะใกล้บริษัท Varian ยี่ห้อ Eclipse



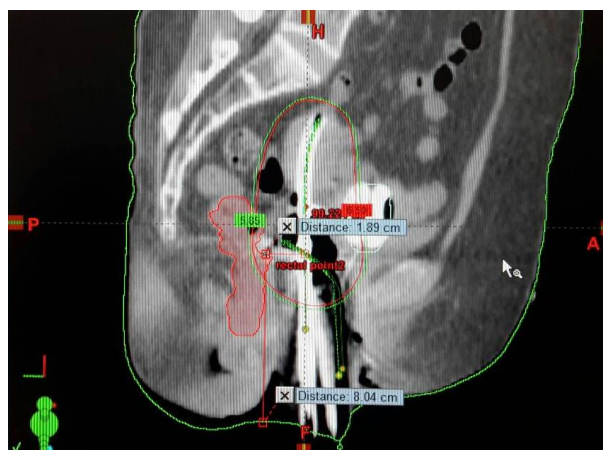
ภาพที่ 18 การวัดความยาวของช่องคลอดโดยวัดจากปากช่องคลอดถึง vaginal fornix



ภาพที่ 19 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A



ภาพที่ 20 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ bladder point



ภาพที่ 21 การวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งของ Rectal point

1.3 การออกแบบช่องในหุ่นจำลองสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสี

ศึกษาขนาดความกว้างของชุดอุปกรณ์สอดใส่แร่ขนาดมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย โดยอุปกรณ์สอดใส่แร่ประกอบไปด้วย Tandem และ Ovoid ทั้งด้านซ้ายและขวาของผู้ป่วย จากนั้นทำการวัดขนาดของพื้นที่สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสี โดยการวัดจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์และทดสอบใส่อุปกรณ์จริงในหุ่นจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

การพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการวางแผนการรักษาแม่แรงเต้านมและแม่แรงอู้งเชิงกรานในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกยางพาราเพื่อพัฒนาหุ่นจำลอง การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับทำหุ่นจำลองทรวงอกและอู้งเชิงกรานใช้เทคนิคและสูตรชนิดเดียวกันประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้อมูลด้านคุณสมบัติของยางพาราทั้งในด้านเคมีและด้านกายภาพ พบว่าสามารถประยุกต์เพื่อเป็นหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานทางด้านรังสีรักษาได้ โดยพิจารณาความหนาแน่นของหุ่นจำลองในหน่วยกรัมต่อมิลลิเมตร ความสมจริง ความใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ และศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเคมีที่ผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับใช้เติมน้ำยางพาราเพื่อการทดสอบคุณสมบัติของยางพาราก่อนการหล่อแบบจริง

จากการศึกษาของงานวิจัยของพรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ (พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ & และคณะ, 2552) ระบุว่า การเตรียมสารเคมีที่ใช้เติมน้ำยางพาราต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของเหลวก่อนการนำไปใช้ โดยการเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของเหลวขึ้นกับสถานะของสาร โดยหากสารเคมีสามารถละลายน้ำได้ให้เตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) สำหรับสารเคมีเป็นของแข็งที่ไม่สามารถละลายน้ำให้เตรียมในรูปที่เป็นสารที่กระจายตัวในน้ำ (dispersion) โดยอัตราส่วนสารเคมีและน้ำยางชั้นมีสูตรมาตรฐานดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (วิจิตชลชัย, 2550)

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนัก (กรัม)	
	แห้ง	เปียก
60% น้ำยางชั้น (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% ดิตาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)	2.5	5
50% แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbornate)	1.0	20

หมายเหตุ : ดิเตเนียมไดออกไซด์เป็นสารทำให้มีสีขาวซึ่งอาจไม่ใส่กรณีต้องการให้หุ่นจำลองเปลี่ยนเป็นสีอื่น

จากการเตรียมชิ้นงานยางพาราตามสูตรในตารางที่ 3 ด้วยเทคนิคการหล่อเข้าเบ้า (Casting process) พบว่าการเทน้ำยางแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบนานถึง 3 - 4 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำยางแต่ละชั้นแห้ง ดังนั้นการใช้เทคนิคการหล่อเพื่อสร้างหุ่นจำลองทั้งตัวด้วยการเทน้ำยางทีละชั้นทำให้ใช้เวลาในการอบนาน คณะผู้วิจัยได้ทดสอบนำสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัว โดยงานวิจัยของวรารักษ์และคณะ(วรารักษ์, 2537, 2549) ได้ใช้ SSF ในการทำให้น้ำยางผสมสารเคมีจับตัวในการผลิตดอกไม้ประดิษฐ์จากน้ำยางด้วยเทคนิคแบบหล่อเข้าพิมพ์ ช่วยให้ให้น้ำยางจับตัวได้เร็วขึ้น งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐาน (ตารางที่ 3) ให้เป็นสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นแสดงดังตารางที่ 4 เพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัว หุ่นจำลอง โดยหาปริมาณ SSF ที่เหมาะสมที่สามารถทำให้น้ำยางพาราสามารถทำการอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานสมบัติของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการ โดยกำหนดสมบัติของหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานดังต่อไปนี้

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

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 ในถังควบคุมอุณหภูมิ กวนน้ำยางพาราอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วรอบ 20-40 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนน้ำยางพาราเกิดการคงรูปบางส่วน โดยทำการทดสอบด้วย Chloroform เบอร์ 2.5 แสดงถึงโมเลกุลของยางคงรูปปานกลาง โดยยางมีลักษณะเป็นก้อนเล็กและไม่เหนียว

2.2.3 เติม 12.5% SSF ตามปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

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

2.2.5 ตั้งแม่พิมพ์ที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้ เพื่อให้น้ำยางพาราเกิดการจับตัวกัน โดยจับเวลาเพื่อหาเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัว

2.2.6 นำน้ำยางพาราที่เทลงในแม่พิมพ์แล้วไปอบให้น้ำยางพาราเกิดการคงรูปด้วยตู้อบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยางจับตัว 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 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3 การทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางพาราเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3.1 ความหนาแน่น

นำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2 มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง วัดความกว้างและความยาวของชิ้นตัวอย่างด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) จำนวน 5 ครั้ง นำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยความหนาแน่นของชิ้นยางในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรคำนวณจากสมการ

$$D = M/V$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (Density) หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D2240-03 (ASTM, 2003) โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2 จำนวน 5 ชิ้น มาทดสอบหาความแข็งด้วยเครื่อง Durometer Hardness Tester แสดงดังภาพที่ 22 จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 22 เครื่องมือทดสอบความแข็งชนิด Durometer Hardness Tester

2.3.3 การทนแรงดึง (Tensile strength)

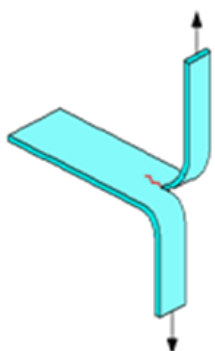
ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D 412-68 โดยทำการทดสอบการทนแรงดึงด้วยการใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 23 การทดสอบใช้วิธีการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปดัมเบลจำนวน 7 ชิ้น ดึงชิ้นงานด้วยความเร็ว 20 mm/min ด้วย load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at Yield), %การยืดออก ณ จุดขาด (Strain at Break) และค่ามอดูลัส ณ 100 % การยืดออก (Modulus at 100% Elongation)



ภาพที่ 23 เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึงชนิด Tensile Testing

2.3.4 ทดสอบทนแรงฉีกขาด

ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D624-00 โดยทำการทดสอบการทนแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 24 การทดสอบใช้วิธีการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูป Trouser Test Specimen จำนวน 7 ชิ้น โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tear Strength



ภาพที่ 24 Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing

2.3.5 ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging)

ทำการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging ด้วยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2 มาเร่งบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลชิ้นงานตัวอย่างตามวิธีในข้อที่ 2.3.2, 2.3.3 และ 2.3.4

2.4 การพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพารา

ประเมินการจับตัว คงรูปได้และอบแห้งของตัวอย่างชิ้นงานยางพาราในข้อที่ 2.2 ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณ SSF โดยทำการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ตัวอย่างชิ้นงานเกิดการเซตตัวเพื่อให้มีความเป็นไปได้ในการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลอง และทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการอบยางพาราที่เหมาะสม โดยที่สมบัติของยางคงรูปแล้วยังมีระดับความแข็งของยางเป็นไปตามที่ต้องการ มีลักษณะความยืดหยุ่นคล้ายเนื้อเยื่อและเต้านมในเพศหญิง

2.5 การประเมินค่าความหนาแน่นของชิ้นงานยางพารา

ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานกับเนื้อเยื่อเต้านม ปอดและเนื้อเยื่อมนุษย์ดังตารางที่ 5 และ 6 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่อด้วยค่าเลขซีที (CT number) จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (CT simulator) และเปรียบเทียบความหนาแน่นกับเนื้อเยื่อด้วยค่า electron density จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยค่า electron density ของเนื้อเยื่อปกติมีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่อเต้านมชนิดต่างๆ

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

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยฉายรังสีหุ่นจำลองยางพาราด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV อัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU และปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy ดังแสดงในภาพที่ 25 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน โดยสูตรยางที่พัฒนาขึ้นในการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกในครั้งนี้ได้ใช้สูตรตามตารางที่ 4 ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในวิธีดำเนินการวิจัย 2.2 ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในการทดสอบสมบัติแต่ละค่าได้อธิบายรายละเอียดในการเตรียมชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และวิธีการคำนวณไว้ใน 2.3 ขั้นตอนที่ 2 และเพื่อให้เป็นกร่ง่ายในการเรียกชื่อชิ้นงานตัวอย่างจึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 7 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ

ชื่อใช้แทน ตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
Non x-Ray	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางโดยใช้ 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 25 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานยางพาราด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200-6,000 cGy

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบเพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Decomposition Temperature ด้วยเทคนิค Thermalgravimeitric Analysis (TGA) จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.2 และขั้นตอนที่ 3 มาทดสอบหาค่า glass transition (T_g) ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) หา Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimeitric Analysis (TGA) แสดงดังภาพที่ 26 โดยมีสภาวะในการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ดังนี้ ขึ้นแรกลดอุณหภูมิจาก $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปที่อุณหภูมิ $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราเร็ว $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นขั้นตอนที่สองทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปที่อุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราเร็ว $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกัน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 6-10 มิลลิกรัม สำหรับการทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั้น กำหนดให้มีสภาวะดังต่อไปนี้ เพิ่มอุณหภูมิจาก $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปยังอุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราเร็ว $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม



ภาพที่ 26 แสดง Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermalgravimeitric Analysis (TGA)

ขั้นตอนที่ 5 การเตรียมแม่พิมพ์และหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู้งเชิงกราน

5.1 การเตรียมแม่พิมพ์และหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอก

หุ่นจำลองทางรังสีรักษาทั้งหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการขึ้นรูปหุ่นจำลองต้นแบบด้วยดินเหนียวที่ประกอบด้วยอวัยวะส่วนคอถึงสะดือ โดยทำการออกแบบโดยอาจารย์ภาควิชาออกแบบ คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นหุ่นมนุษย์ โดยมีขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองดังนี้

- 5.1.1 สร้างแม่พิมพ์ด้วยการหล่อหุ่นจำลองต้นแบบด้วยดินเหนียวเพื่อให้มีรายละเอียดสูงและเพื่อให้คงรูปอยู่ได้
- 5.1.2 ตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์และเก็บรายละเอียดผิวหนังของหุ่นจำลองต้นแบบที่ทำจากดินเหนียวก่อนการหล่อแบบ

- 5.1.3 แบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นด้านหน้าและด้านหลังเพื่อสร้างแม่พิมพ์เพื่อนำมาประกบกันในช่วงขั้นตอนการเทน้ำยาง โดยแต่ละด้านกันด้วยดินน้ำมันและแผ่นฟิล์มเพื่อให้่ายต่อการแยกแม่พิมพ์ออกจากกัน
- 5.1.4 วางแผ่นไฟเบอร์ผสมเรซินบนแบบหุ่นดินเหนียวที่ละด้านแล้วรอให้เรซินแข็งตัวเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์
- 5.1.5 นำหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวออกและตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย
- 5.1.6 เจาะรูสำหรับใส่น็อตเพื่อยึดตรึงแม่พิมพ์ด้านหน้าหลัง จากนั้นทำการประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน พร้อมทั้งตรวจสอบรอยรั่วบริเวณรอยต่อของแม่พิมพ์
- 5.1.7 สร้างแม่พิมพ์ปอดจำลองสำหรับหุ่นทรวงอกด้วยด้วยวิธีการเดียวกันกับหุ่นจำลองทรวงอกในข้อ 1-7 จากนั้นหล่อแบบด้วยวิธีการเดียวกันกับลำตัวหุ่นจำลองแต่ใช้สูตรการผสมแบบยางพองน้ำ (ประกายมณีวงศ์, et al., 2552)
- 5.1.8 การสร้างหุ่นจำลองใช้สูตรยางที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 4 โดยเติม SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียก สำหรับวิธีการผสมน้ำยางและสารเคมีนั้น ดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.1 - 2.2
- 5.1.9 ทำการบรรจุปอดที่เตรียมไว้จากข้อที่ 7 ลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่ประกบไว้รอการเทน้ำยาง จากนั้นเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลอง โดยกรองผ่านตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ
- 5.1.10 ตั้งแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้เพื่อให้ น้ำยางพาราเกิดการจับตัว จากนั้นนำเข้าสู่อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก
- 5.1.11 แกะแม่พิมพ์ออก จากนั้นนำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมีที่ยังตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง
- 5.1.12 เติมน้ำและตกแต่งหุ่นจำลองให้มีความสมจริงมากที่สุด

5.2 การเตรียมแม่พิมพ์และหล่อแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยางพารา และส่วนกล่องอะคลิลิกบรรจุน้ำซึ่งวางบริเวณตอนกลางหุ่นจำลองเพื่อใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสี โดยส่วนที่เป็นน้ำและเนื้อยางพารา กำหนดให้มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน โดยมีขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์จากหุ่นจำลองต้นแบบดังต่อไปนี้

- 5.2.1 ทำการปั้นหุ่นจำลองต้นแบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นจากภาควิชาออกแบบ คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยปั้นหุ่นจำลองต้นแบบด้วยดินเหนียวให้มีขนาดของหุ่นใกล้เคียงกับขนาดหุ่นมาตรฐานของหญิงไทย และมีส่วนสูงใกล้เคียงกับหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom
- 5.2.2 ตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ ทำการเก็บรายละเอียดผิวหนังของหุ่นจำลองต้นแบบที่ทำจากดินเหนียวก่อนการหล่อแบบ
- 5.2.3 แบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นด้านหน้าและด้านหลังเพื่อสร้างแม่พิมพ์เพื่อนำมาประกบกันในช่วงขั้นตอนการเทน้ำยาง โดยแต่ละด้านกันด้วยดินน้ำมันและแผ่นฟิล์มเพื่อให้่ายต่อการแยกแม่พิมพ์ออกจากกัน ดังภาพที่ 27

5.2.4 วางแผ่นไฟเบอร์ผสมเรซินบนแบบหุ่นดินเหนียวที่ละด้านแล้วรอให้เรซินแข็งตัวเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์

5.2.5 นำหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวออกและตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย ดังภาพที่ 28

5.2.6 เจาะรูสำหรับใส่น็อตเพื่อยึดตรึงแม่พิมพ์ด้านหน้าหลัง จากนั้นทำการประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน พร้อมทั้งตรวจสอบรอยรั่วบริเวณรอยต่อของแม่พิมพ์



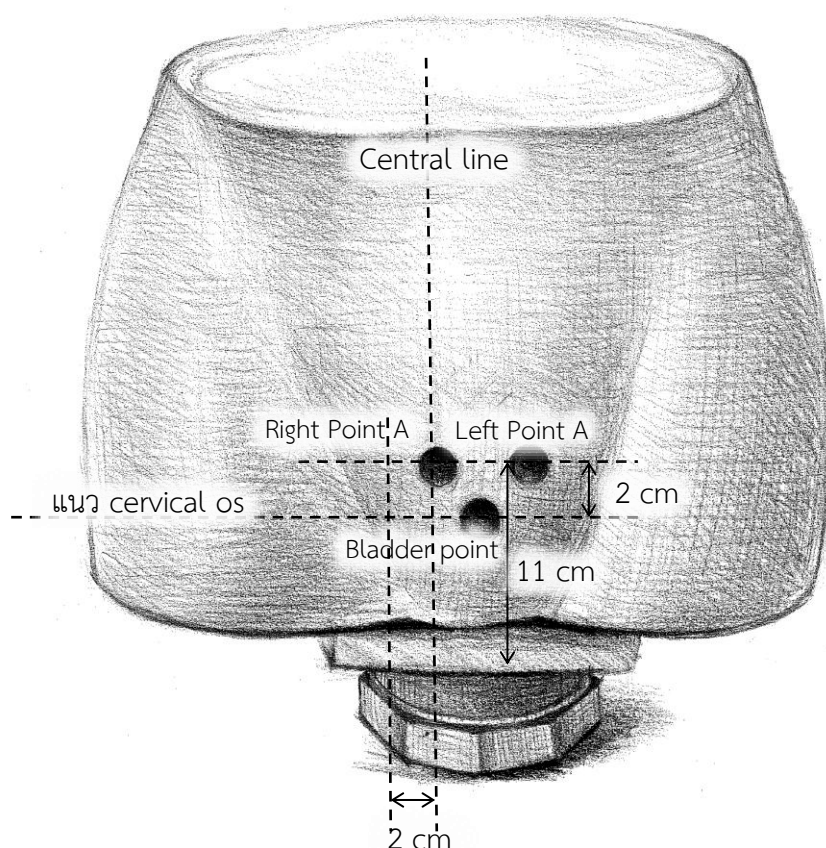
ภาพที่ 27 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินและไฟเบอร์



ภาพที่ 28 ขั้นตอนการแกะแม่พิมพ์ออกจากหุ่นต้นแบบ

5.3 การหล่อแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

- 5.3.1 การสร้างหุ่นจำลองใช้สูตรยางที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 4 โดยเติมสาร SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียก สำหรับวิธีการผสมน้ำยางและสารเคมีดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 ข้อ 2.2
- 5.3.2 วางกล่องอะคลิลิกขนาด 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่ประกอบไว้เพื่อรอการเทน้ำยาง จากนั้นเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลองซึ่งมีภายในมีกล่องอะคลิลิกอยู่ โดยการกรองผ่านตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ
- 5.3.3 ตั้งแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้เพื่อให้น้ำยางพาราเกิดการจับตัว จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางจับตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก
- 5.3.4 แกะแม่พิมพ์ออก นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้าง สารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง
- 5.3.5 เติมสีและตกแต่งผิวหุ่นจำลองให้มีความสมจริง
- 5.3.6 ประกอบฝาสำหรับปิดกล่องอะคลิลิกและเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ตามตำแหน่งที่ออกแบบสำหรับประเมินค่าปริมาณรังสีตำแหน่ง point A และ Bladder point สำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสี โดยเจาะรูในตำแหน่งที่ใช้ในการใส่หัววัดรังสี Point A ทั้งซ้ายและขวา และ bladder point โดยตำแหน่งที่ทำการเจาะดังภาพที่ 29 โดย กำหนดให้ Point A ห่างจาก central line ออกมาด้านข้าง 2 เซนติเมตร และอยู่เหนือ ตำแหน่ง flange (ตำแหน่ง cervical os) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร และ bladder point อยู่ในแนวเดียวกับ central line และต่ำกว่า Point A เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ตำแหน่ง ดังกล่าวได้จากผลการศึกษาผู้ป่วยจริงในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 29 ตำแหน่งและแนวการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองอย่างพารา

6.1 การประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอก

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการประเมินความสม่ำเสมอ (Uniformity) ในหุ่นจำลองจากค่าเลขซีที (CT number) ซึ่งประเมินจากภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) (AAPM, 2002) การประเมินคุณสมบัติค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองที่เป็นบริเวณเนื้อเยื่อ (Soft tissue) ใช้วิธีการประเมินด้วยเลขซีทีเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ภายใน ± 50 HU วิธีการทดสอบความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ประกอบด้วย

1. ทำการสร้างภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ 16 สไลด์ บริษัท Philips รุ่น Brilliance Big Bore กำหนดค่าความต่างศักย์หลอดเท่ากับ 120 kVp ค่ากระแสหลอดคูณเวลาเท่ากับ 300 mAs และความหนาสไลด์ (slice thickness) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้งานจริงสำหรับการสร้างภาพตัดขวางผู้ป่วย

2. ทำการวัดค่าเลขซีทีภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองทรวงอกด้วยการกำหนดบริเวณที่สนใจ (Region of interest) จำนวน 5 ตำแหน่งบนภาพให้ครอบคลุมทั่วทั้งตัวหุ่นจำลอง โดยกำหนดพื้นที่ในการวัดขนาดประมาณ 60-100 ตารางมิลลิเมตร จากนั้นวัดค่าเฉลี่ยเลขซีทีในภาพตัดขวางหุ่นจำลองที่ระดับเต้านมและช่องท้อง

3. บันทึกค่าที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง และคำนวณหาเลขซีทีเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในบริเวณที่สนใจ

4. ส่งภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกไปยังระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความสม่ำเสมอด้วยการสร้างโปรไฟล์ (Profile) ในแนวขวางของภาพและทำการทดสอบเพื่อประเมินค่าความหนาแน่นด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (Computerized Treatment Planning System) ยี่ห้อ Phillips รุ่น Pinnacle³

6.2 การประเมินความสม่ำเสมอหุ่นจำลองอู่เชิงกราน

หุ่นจำลองอู่เชิงกรานที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้นอกจากมีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแล้ว ยังทำการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีเพิ่มเติมด้วยการนำหุ่นจำลองที่ได้มาสร้างภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (CT simulator) ยี่ห้อ Philips รุ่น Brilliance Big Bore 16 สไลซ์ เพื่อประเมินค่าเลขซีที ค่าความสม่ำเสมอ และค่าความหนาแน่นของหุ่นจำลองที่สร้างขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบค่าเลขซีทีมาตรฐานของหุ่นจำลองอู่เชิงกรานกับน้ำเพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการนำหุ่นจำลองมาใช้งานเพื่อวัดปริมาณรังสีในทางรังสีรักษา สำหรับการตั้งองค์ประกอบเพื่อถ่ายภาพใช้ค่าเท่ากับการใช้งานจริงสำหรับการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่ส่วนอู่เชิงกราน โดยกำหนดค่าความต่างศักย์หลอด 120 กิโลโวลต์ และค่ากระแสหลอดคูณเวลา 300 มิลลิแอมแปร์วินาที ความหนาของสไลซ์ 3 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังทำการทดสอบเพื่อประเมินค่าความหนาแน่นด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (Computerized Treatment Planning System) ยี่ห้อ Phillips รุ่น Pinnacle³ จากนั้นนำหุ่นจำลองไปทำการวัดปริมาณรังสีตามแผนการรักษาที่ได้กำหนดไว้เพื่อประเมินความถูกต้องของปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

6.3 การประเมินค่าเลขซีที (CT number)

การประเมินค่าเลขซีทีของเนื้อเยื่อของหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู่เชิงกรานใช้วิธีการเปรียบเทียบกับค่าเลขซีทีของน้ำซึ่งเป็นค่าเลขซีทีมาตรฐาน พร้อมทั้งหาค่าความเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังสมการ

$$\%difference = \frac{CT\ number_{rubber} - CT\ number_{water}}{CT\ number_{water}} \times 100$$

เมื่อ $CT\ number_{rubber}$ คือค่า CT number ของเนื้อเยื่อของหุ่นจำลอง

$CT\ number_{water}$ คือ CT number ของน้ำภายในหุ่นจำลอง

6.4 การทดสอบความสม่ำเสมอ (Uniformity)

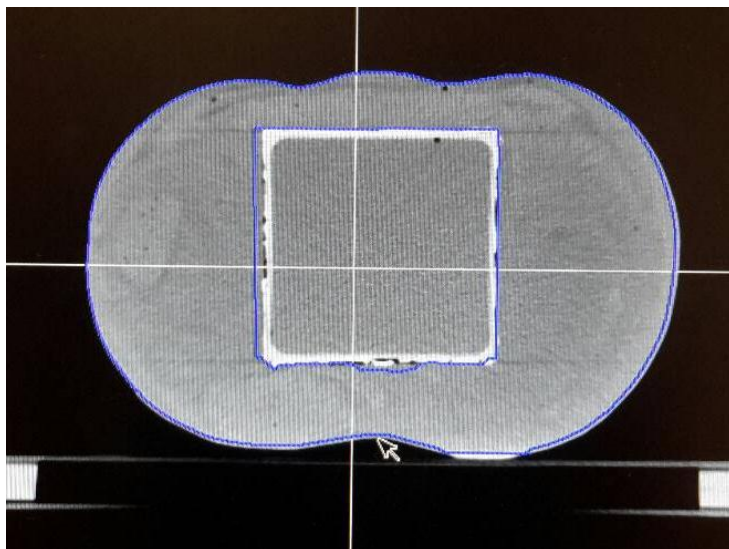
ประเมินค่าความสม่ำเสมอภายในของหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู่เชิงกรานอย่างพาราด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยวัดขอบเขตของเนื้อเยื่อภายในหุ่นจำลองที่เป็นส่วนของยางพาราจากทุกสไลซ์ (slice) ดังภาพที่ 30 และคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่ออย่างพารา

6.5 การหาค่าความหนาแน่น (density)

ทำการประเมินค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่อหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอู่เชิงกรานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยวัดขอบเขตของเนื้อเยื่อภายในหุ่นจำลองที่เป็นส่วนของยางพาราจากทุกสไลซ์ (slice) ดังภาพที่ 30 และคำนวณหาความหนาแน่นเฉลี่ยภายในปริมาตรที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเมื่อเทียบกับน้ำดังสมการ

$$\text{Percent difference} = \frac{d_{para} - d_{water}}{d_{water}} \times 100$$

เมื่อ d_{para} คือความหนาแน่นของหุ่นจำลองยางพารา d_{water} คือความหนาแน่นของน้ำ มีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพที่ 30 การวาดขอบเขต (contour) หุ่นจำลอง (เส้นสีน้ำเงิน) เพื่อหาความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองอู้งาช้างยางพารา

ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบการวัดปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบความถูกต้องการวางแผนการรักษา

7.1 การวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

7.1.1 การวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอก

วางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผน (Computerized Radiation Treatment Planning System) โดยฉายรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคบริษัท Variance รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV อัตราปลดปล่อยรังสี (Dose rate) เท่ากับ 300 cGy/MU และค่าปริมาณรังสีรวมที่ก่อนมะเร็ง 5,400 cGy เพื่อทำการฉายรังสีตามแผนการรักษา สำหรับแผนการรักษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยแผนการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ (3D-CRT) จากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา Pinnacle ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการวางแผนการรักษา ทั้ง 2 แบบ ประกอบด้วยค่ามุมเตียงผู้ป่วย (couch) มุมของแกนตรี (Gantry) มุมคอลลิเมเตอร์ (Collimator) ทิศทางลำรังสีแบบ medial และ lateral tangential fields เปิดลำรังสีให้มีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็ง (PTV) ซึ่งกำหนดให้ก้อนมะเร็งอยู่บริเวณเต้านมขวา โดยการวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติใช้คอลลิเมเตอร์สำหรับกำหนดขอบเขตพื้นที่การฉายรังสี (field size) และแผนการรักษาแบบ 3 มิติใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (multileaf collimator) ร่วมกับคอลลิเมเตอร์สำหรับกำหนดขอบเขตพื้นที่การฉายรังสี กำหนดตำแหน่งจุดหมุนระหว่างลำรังสีทั้งสองทิศทางให้เป็นตำแหน่งของหัววัดรังสี โดยตำแหน่งดังกล่าวเป็นบริเวณกึ่งกลางลำรังสีที่ทำการฉาย

7.1.1.1 ทดสอบการวัดปริมาณรังสีหุ่นจำลองทรวงอก

ทดสอบวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ในหุ่นจำลองทรวงอกเพื่อประเมินความสามารถในการนำหุ่นจำลองไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมทั้งการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการให้ลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields เพื่อหลบหลีกการฉายลำรังสีเข้าปอดและหัวใจผู้ป่วยโดยตรง ตรวจสอบและประเมินผลแผนการรักษาด้วยนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทางรังสีรักษา จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกตามแผนการรักษา จัดตำแหน่งการฉายรังสีของหุ่นจำลองตามแผนการรักษาและใส่หัววัดรังสีในช่องซึ่งอยู่ในเต้านมขวา ทำการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV และอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU

7.1.1.2 การเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี

ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference) ระหว่างการวัดและการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาหาได้จากสมการ

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

เมื่อ D_{mea} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการวัด

D_{TPS} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสีได้ และมีคุณสมบัติทางด้านความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ

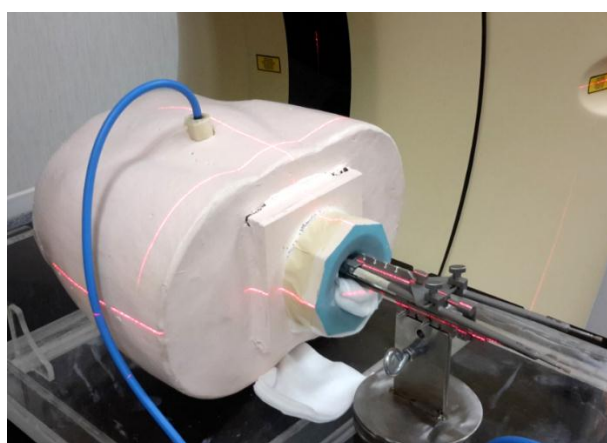
7.1.2 การวางแผนการรักษาโรคมะเร็งปากมดลูกในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

7.1.2.1 การสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

สร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ภายใน โดยประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับใส่ในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานแสดงดังภาพที่ 31 จากนั้นยัดเข้ากับอุปกรณ์ยึดจับที่ออกแบบมาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ดังภาพที่ 32 เพื่อป้องกันอุปกรณ์สอดใส่แร่เคลื่อนผิดตำแหน่งเมื่อมีการใส่น้ำหรือระหว่างการเคลื่อนย้าย โดยใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกเข้าไปในหุ่นจำลอง กำหนดให้ความยาวของ tandem อยู่ในตำแหน่งปากมดลูกซึ่งตรงกับระยะที่ได้ศึกษาและออกแบบไว้ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งที่ใส่หัววัดรังสีสำหรับประเมินค่าปริมาณรังสีที่ Point A โดยใส่หัววัดรังสีที่ตำแหน่ง Point A และ Rectum point เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดตำแหน่งในการคำนวณ

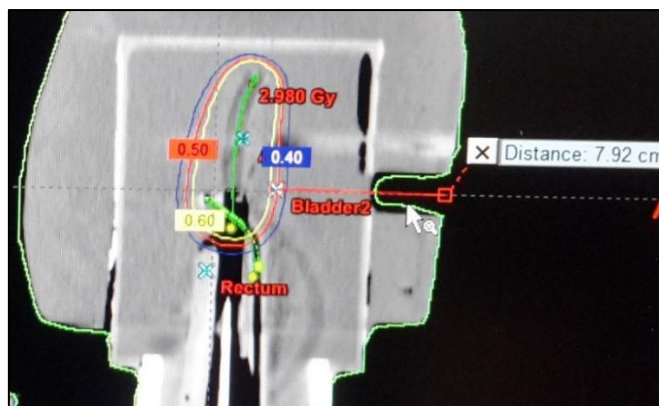


ภาพที่ 31 อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้



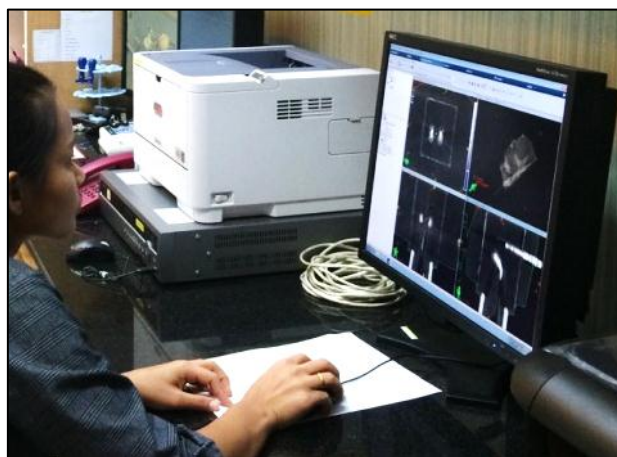
ภาพที่ 32 การประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่เข้ากับฐานยึด และการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นจำลอง

สร้างภาพหุ่นจำลองด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา 16 สไลซ์ ยี่ห้อ Philips รุ่น Brilliance Big Bore ด้วยค่าพารามิเตอร์ 120 kVp, 300 mAs และความหนาของสไลซ์ 3 มิลลิเมตร โดยจัดรูปแบบของอุปกรณ์ทั้งหมดดังภาพที่ 33 จากนั้นตรวจสอบตำแหน่งของหัววัดรังสีให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับ point A ซึ่งเป็นระยะ 2 เซนติเมตรจาก central line และเหนือ cervical os เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ซึ่งประเมินจากตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ที่ปรากฏบนภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ จากนั้นส่งภาพทั้งหมดเข้าสู่คอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาสำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ ยี่ห้อ Eclipse เพื่อสร้างแผนการรักษาสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกต่อไป

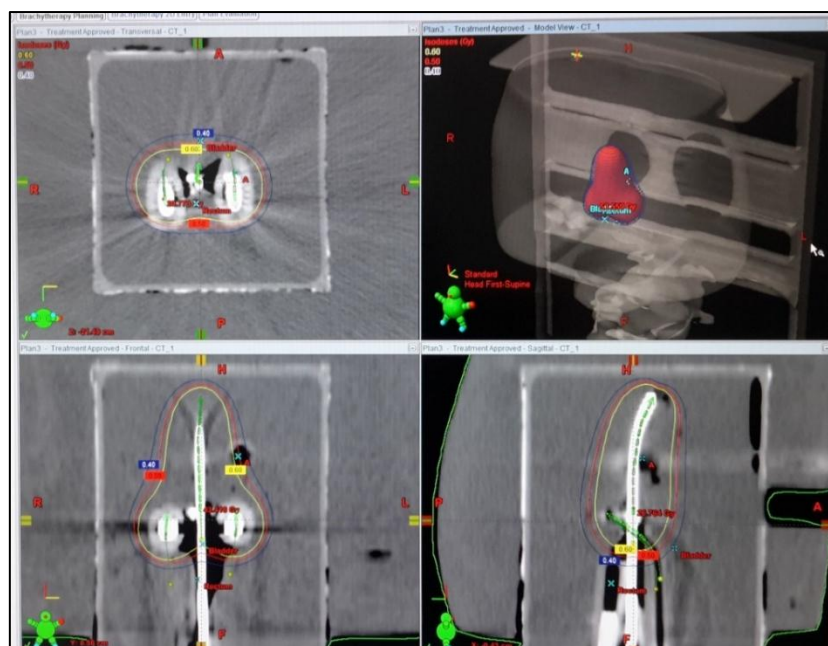


ภาพที่ 35 การกำหนด bladder point ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัด โดยห่างจาก central line เป็นระยะ 2 เซนติเมตร

วางแผนการรักษาแม่รังสีปากมดลูกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา และคำนวณปริมาณรังสีโดยกำหนด prescription dose ที่ตำแหน่ง point A ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 Gy (เนื่องจากข้อจำกัดของ electrometer ที่อ่านค่าได้เพียง 23 นาโนคูลอมป์) และทำการ normalize dose ที่ point A ด้วยการกำหนดให้มีค่าเป็นร้อยละ 100 ที่ตำแหน่งดังกล่าวเพื่อการประเมินค่าการกระจายของปริมาณรังสี ตัวอย่างของการวางแผนการรักษาดังภาพที่ 36 และการกระจายของปริมาณรังสี (dose distribution) ที่ได้จากการคำนวณปริมาณรังสีแสดงดังภาพที่ 37 ทำการบันทึกค่าปริมาณรังสีที่ point A กระเพาะปัสสาวะและทวารหนักได้รับ และส่งแผนการรักษาไปยังเครื่องฉายรังสีระยะใกล้ high dose rate ยี่ห้อ GammaMedPlus iX เพื่อทำการโหลดแร่ไปยังหุ่นจำลองต่อไป



ภาพที่ 36 การวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา



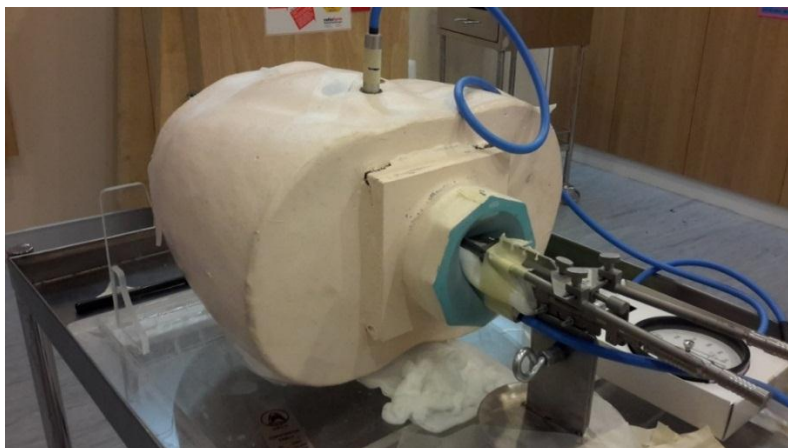
ภาพที่ 37 ผลการวางแผนการรักษาแสดงลักษณะการกระจายของปริมาณรังสีเป็นไปตามมาตรฐานมีลักษณะเป็นรูปขมพู

7.1.2.3 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง

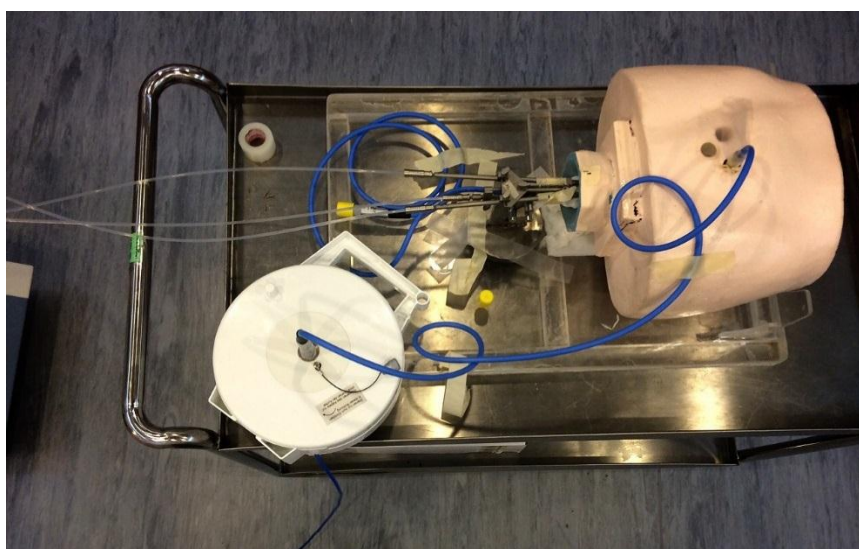
การวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานประกอบด้วย การต่อสาย transfer tube เข้ากับเครื่องใส่แร่ชนิด HDR Brachytherapy อุปกรณ์สอดใส่แร่ทั้ง Tandem และ Ovoids เพื่อนำแร่ไปยังตำแหน่งที่ทำการรักษาโดยการจัดอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 38 จากนั้นเชื่อมต่อหัววัดรังสีชนิดไอออนเซชัน ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ยี่ห้อ PTW รุ่น TW 30013 เข้ากับเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสี (electrometer) ยี่ห้อ PTW UNIDOS และวางหัววัดบริเวณตำแหน่งที่กำหนดไว้ประกอบด้วย Point A, bladder point และ rectal point โดยทำการวัดค่าที่ตำแหน่งจำนวน 3 ครั้งเพื่อนำค่า Reading ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างการวางหัววัดแสดงดังภาพที่ 39 และ 40



ภาพที่ 38 การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าปริมาณรังสีจากการใส่แร่ในหุ่นจำลอง



ภาพที่ 39 การวางตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง Bladder point และ Rectal point



ภาพที่ 40 การจัดอุปกรณ์ในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A

วางเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ และบาร์โอมิเตอร์ดังภาพที่ 41 เพื่อวัดความดันบรรยากาศ พร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของการวัดในแต่ละครั้งเพื่อแก้ค่าอุณหภูมิและความดันแสดงดังสมการ

$$k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$$

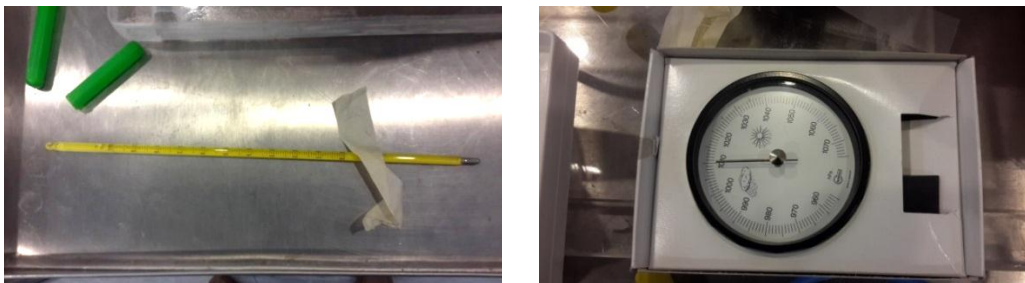
เมื่อ k_{TP} คือค่าแก้อุณหภูมิและความดัน

T คือ อุณหภูมิขณะทำการวัดหน่วยองศาเซลเซียส

T_0 คือ อุณหภูมิมาตรฐาน (20 องศาเซลเซียส)

P คือความดันขณะทำการวัด มีหน่วยเป็น kPa

ทำการควบคุมเครื่องใส่แร่เพื่อกำหนดให้เม็ดแร่วิ่งไปยังตำแหน่งการรักษาตามแผนการรักษาที่วางไว้ดังแสดงในภาพที่ 42 พร้อมทั้งนับวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสีหน่วยนาโนคูลอมป์ (nC)



ภาพที่ 41 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และความดัน



ภาพที่ 42 หน้าเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องใส่แร่ด้วยวิธีรังสีรักษาระยะใกล้

นำค่า Reading ที่ได้ มาทำการแก้ค่าต่างๆ เพื่อคำนวณปริมาณรังสีในน้ำ (D_w) มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gy) ดังสมการ

$$D_w = M \times N_{DW} \times k_{TP}$$

เมื่อ M คือ ค่า Reading ที่ได้จากการวัดมีหน่วยเป็น nC

N_{DW} คือ absorbed dose to water calibration factor ซึ่งเป็นค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบหัววัดรังสีเปรียบเทียบกับหัววัดรังสีมาตรฐานที่ secondary standard laboratory (SSDL) มีหน่วยเป็น mGy/nC

k_{TP} คือ ค่าแก้อุณหภูมิและความดัน

7.1.2.4 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองตามขนาดตัวผู้ป่วย

ทำการทดสอบเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอู่เชิงกรานกรณีผู้ป่วยมีขนาดลำตัว และขนาดมดลูกแตกต่างกันใช้วิธีการทดสอบตามขั้นตอน 7.1.2.2-1.7.2.3 แต่ปรับเปลี่ยนระยะของ ovoids จำนวน 3 ขนาด ตามสเกลที่แสดงตรงตำแหน่งที่ใช้ปรับความกว้างของ ovoids เพื่อประเมินความสามารถของ หุ่นจำลองในการวัดค่าปริมาณรังสีสำหรับผู้ป่วยที่มีขนาดมดลูกแตกต่างกัน บันทึกปริมาณรังสีที่ Point A และ Bladder point

7.1.2.5 การวิเคราะห์ผล

การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย คอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference) ดังสมการ

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

เมื่อ D_{mea} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการวัด

D_{TPS} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการ รักษา

ค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความ แตกต่างกันน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ (Van Dyk, Barnett, Cygler, & Shragge, 1993) แสดงว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสีได้ และมีคุณสมบัติทางด้านความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนที่ 1 ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอก

การออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกใช้วิธีการสร้างแม่แบบหุ่นจำลองจากดินเหนียวที่มีเนื้อละเอียดทำให้ได้สัดส่วนของหุ่นจำลองทั้งตัวตั้งแต่ส่วนคอถึงสะดือดังต่อไปนี้ รอบอก 37 นิ้ว และรอบเอว 34 นิ้ว ผลการปั้นหุ่นแม่แบบด้วยดินเหนียวแสดงดังภาพที่ 43 จากนั้นทำการสร้างแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์จากหุ่นจำลองต้นแบบสำหรับนำไปสร้างเป็นหุ่นจำลองทรวงอก



ภาพที่ 43 แม่แบบหุ่นจำลองสร้างจากดินเหนียวละเอียดตั้งแต่ส่วนคอถึงสะโพก

ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

1.1 การออกแบบบริเวณสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง

ผลการออกแบบบริเวณสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองแสดงดังภาพที่ 44 โดยบริเวณดังกล่าวใช้สำหรับวางกล่องอะคลิลิกความหนาแน่นใกล้เคียงกับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาด 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับบรรจุน้ำ อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสี โดยวัดขนาดกล่องดังกล่าวให้มีขนาดพอดีสำหรับอุปกรณ์สอดใส่แร่ และสามารถวัดวางหัววัดรังสีในตำแหน่งของ rectal point ได้

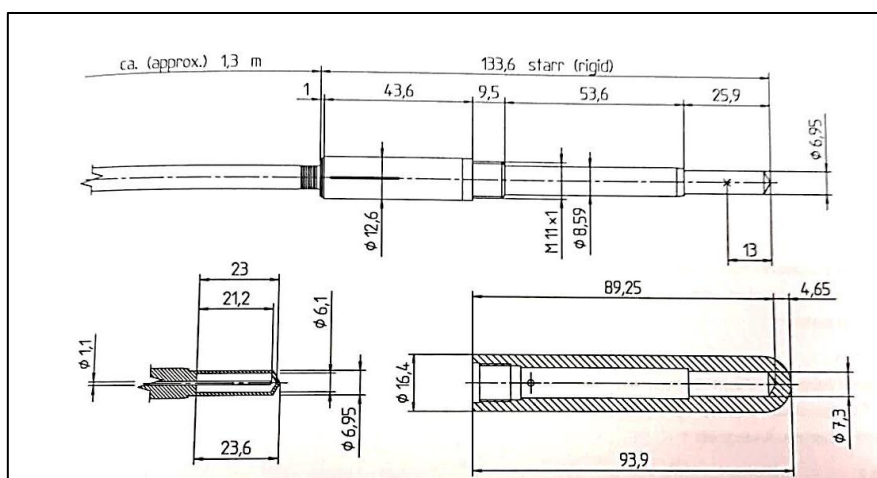


ภาพที่ 44 ชุดอะคลิลิกใสสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสีสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ขนาดต่างๆ

สำหรับหัววัดรังสีที่ใส่ในกล่องอะคลิลิกสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองมีปริมาตรของ sensitive volume เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร Model N30013 Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber แสดงดังภาพ 45 ขนาดของหัววัดรังสีแสดงดังภาพที่ 46 โครงสร้างหัววัดรังสีดังกล่าวนำไปใช้สำหรับกำหนดขนาดเพื่อการเจาะรูหุ่นจำลองสำหรับใส่หัววัดรังสี โดยใช้สว่านแท่นเจาะให้รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.4 มิลลิเมตร



ภาพที่ 45 หัววัดรังสี Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber รุ่น Model N30013



ภาพที่ 46 โครงสร้างและขนาดของหัววัดรังสี PTW Farmer® Ionization Chamber

1.2 การกำหนดระยะอ้างอิงสำหรับวัดปริมาณรังสีตำแหน่ง point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก

ผลการวัดระยะอ้างอิงจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ในผู้ป่วยจริงเพื่อกำหนดตำแหน่งในการวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ได้ผลดังตารางที่ 8 โดยระยะความยาวของช่องคลอดมีขนาดเท่ากับ 7.96 ± 0.72 เซนติเมตร ระยะดังกล่าวใช้ในการกำหนดตำแหน่งของการใส่ Tandem สำหรับตำแหน่งของ point A มีระยะห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 10.34 ± 0.72 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านข้าง (cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่ง Bladder point อยู่ห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 8.34 ± 0.76 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหน้า (cervical canal) เป็นระยะ 2 ± 0.34 เซนติเมตร และตำแหน่ง Rectal point อยู่ห่างจากตำแหน่งปากช่องคลอดเป็นระยะ 6.89 ± 0.87 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหลัง (cervical canal) เป็นระยะ 1.75 ± 0.32 เซนติเมตร

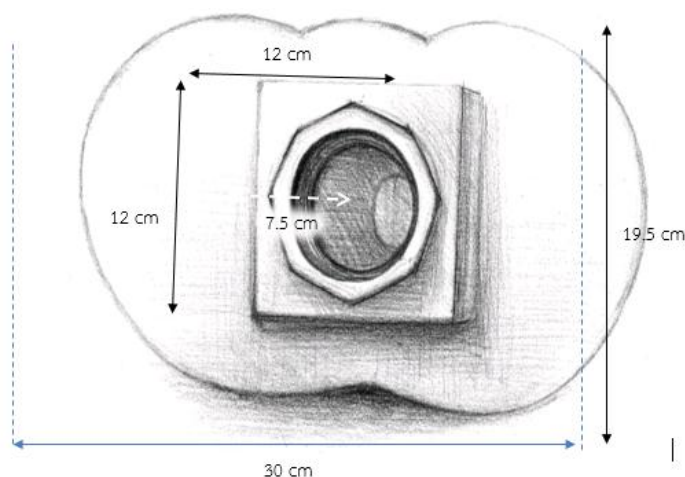
ตารางที่ 8 แสดงผลการวัดตำแหน่งระยะเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A, bladder และ rectal points จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ผู้ป่วย คนที่	ความยาว ช่องคลอด (เซนติเมตร)	ระยะ (เซนติเมตร)					
		Point A		Bladder		Rectum	
		ระยะห่างจาก cervical canal	ระยะสูงจาก แนวปากช่อง คลอด	ระยะห่างจาก cervical canal	ระยะสูงจาก แนวปากช่อง คลอด	ระยะห่างจาก cervical canal	ระยะจากแนวปาก ช่องคลอด
1	9.04	2	11.14	2.06	9.25	2.14	7.05
2	8.24	2	10.78	2.29	7.12	2.09	7.53
3	7.89	2	10.4	2.06	8.83	1.82	7.37
4	8.23	2	10.8	2.39	8.7	1.52	7.65
5	7.31	2	9.6	1.5	8.2	1.52	5.4
6	7.03	2	9.34	1.72	7.96	1.38	6.34
Mean	7.96	2	10.34	2	8.34	1.75	6.89
SD	0.72	0	0.72	0.34	0.76	0.32	0.87

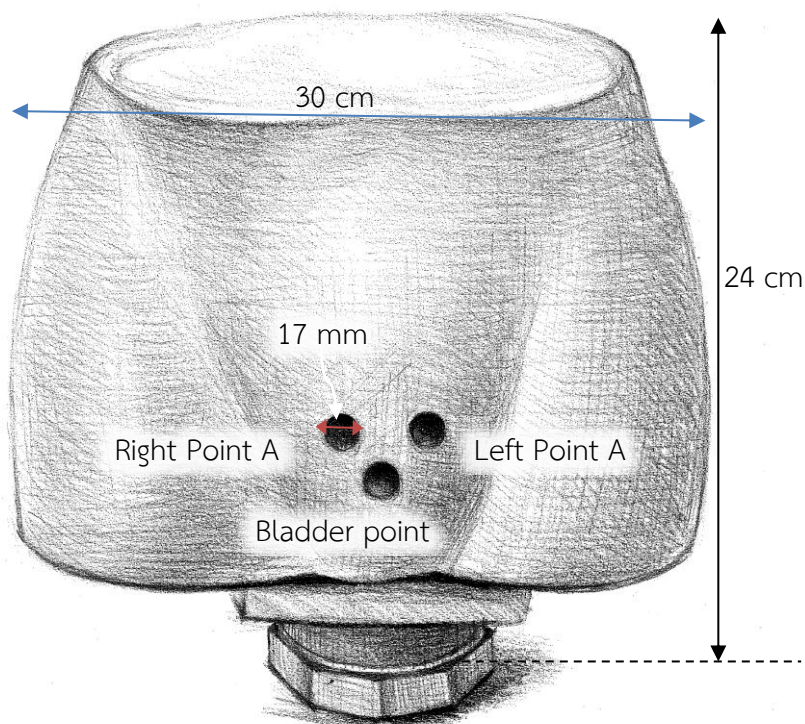
จากผลการศึกษาทำให้ทราบตำแหน่งในการกำหนดจุดในการวัดปริมาณรังสีของ point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ประกอบด้วยตำแหน่งการใส่ Tandem ระยะความยาวของช่องคลอดยาว 8 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่งของ point A ระยะห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 10 เซนติเมตร และระยะห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านข้าง (cervical canal) เท่ากับ 2 เซนติเมตร สำหรับ Bladder point ระยะห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 8 เซนติเมตร และระยะห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหน้า (cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่ง Rectal point ระยะห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 7 เซนติเมตร และระยะห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหลัง (cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร

1.3 ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานได้แบบหุ่นจำลองขนาดรอบเอว 32 นิ้ว รอบสะโพก 39 นิ้ว และสูง 9.44 นิ้ว โดยบริเวณกลางหุ่นจำลองประกอบด้วยกล่องอะคลิลิกทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์สำหรับบรรจุน้ำ อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสี การออกแบบกล่องอะคลิลิกทำให้ได้ตำแหน่งสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A, Bladder point และ Rectal point โดยกล่องดังกล่าวมีปริมาตร 12 x12x15 ลูกบาศก์ เซนติเมตร ดังภาพที่ 47 ด้านบนของหุ่นจำลองมีรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตำแหน่งเพื่อการวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A ทั้งด้านซ้ายและขวา และตำแหน่ง bladder point ดังแสดงในภาพที่ 48 นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้มีท่อกลางสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่แสดงดังภาพที่ 48 และ 49



ภาพที่ 47 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองในแนวตัดขวางโดยมีกล่องอะคลิลิกสำหรับเติมน้ำ



ภาพที่ 48 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหน้า



ภาพที่ 49 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหลัง

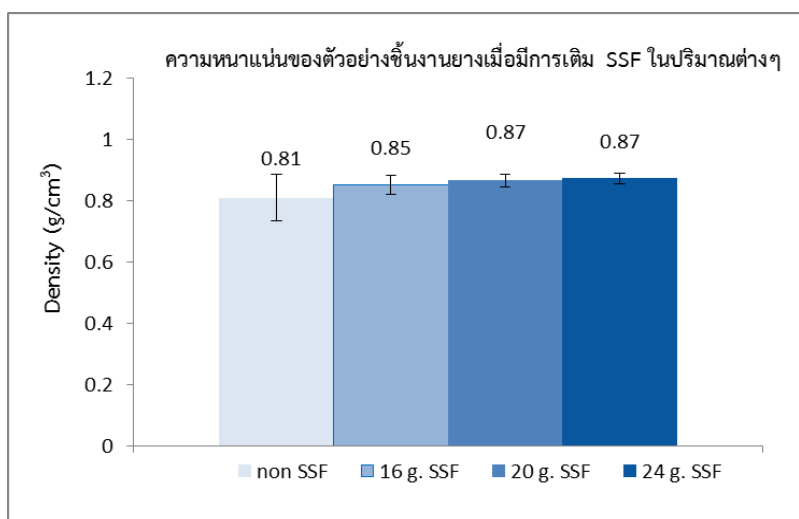
ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลอง

2.1 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างยางจากการพัฒนาสูตรยาง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสูตรยางพาราที่เหมาะสมสำหรับการสร้างหุ่นจำลองยางพาราที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงมนุษย์ด้วยการหาปริมาณการเติมสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ที่เหมาะสมเพื่อให้ความหนาแน่นใกล้เคียงกับ 1 g/cm^3 โดยสารเคมีดังกล่าวทำให้เกิดการจับตัวของชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้หุ่นจำลองยางสามารถคงรูปและอบแห้งได้ จากการทดสอบเวลาการจับตัวของน้ำยางเมื่อมีการใช้ปริมาณของ SSF ที่เพิ่มขึ้น พบว่าเวลาจับตัวของน้ำยางพารามีความเร็วมากขึ้นแสดงดังตารางที่ 9 สำหรับความหนาแน่นของตัวอย่างยางเมื่อมีการใช้ปริมาณ SSF ในการเตรียมชิ้นงานเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นชิ้นงานยางพารามีแนวโน้มที่สูงขึ้นแสดงดังภาพที่ 50 โดยค่าที่ได้จากการทดสอบมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.81\text{--}0.87 \text{ g/cm}^3$ สามารถนำไปใช้เทียบเคียงกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่อมนุษย์เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการฉายรังสีที่บริเวณเต้านมได้

ตารางที่ 9 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 50 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

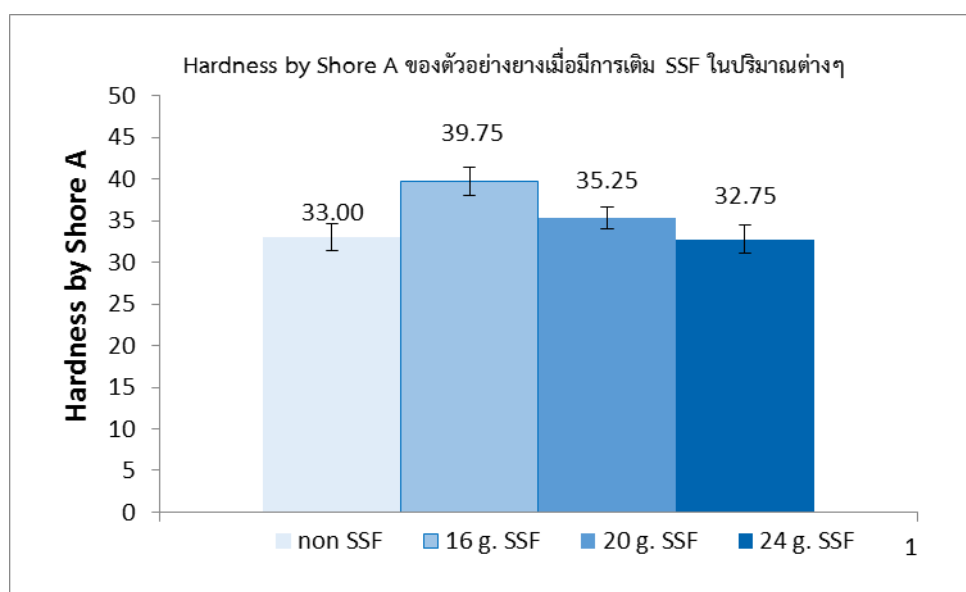
2.2 สมบัติเชิงกลของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยาง

ผลการศึกษาค้นสมบัติเชิงกลของตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางเมื่อทำการทดสอบหาสมบัติเชิงกลต่างๆ ประกอบด้วย ค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาด ตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.8 พบว่าผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) แสดงดังภาพที่ 51 โดยตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าความแข็งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานความแข็งที่กำหนดไว้ (ไม่ต่ำ

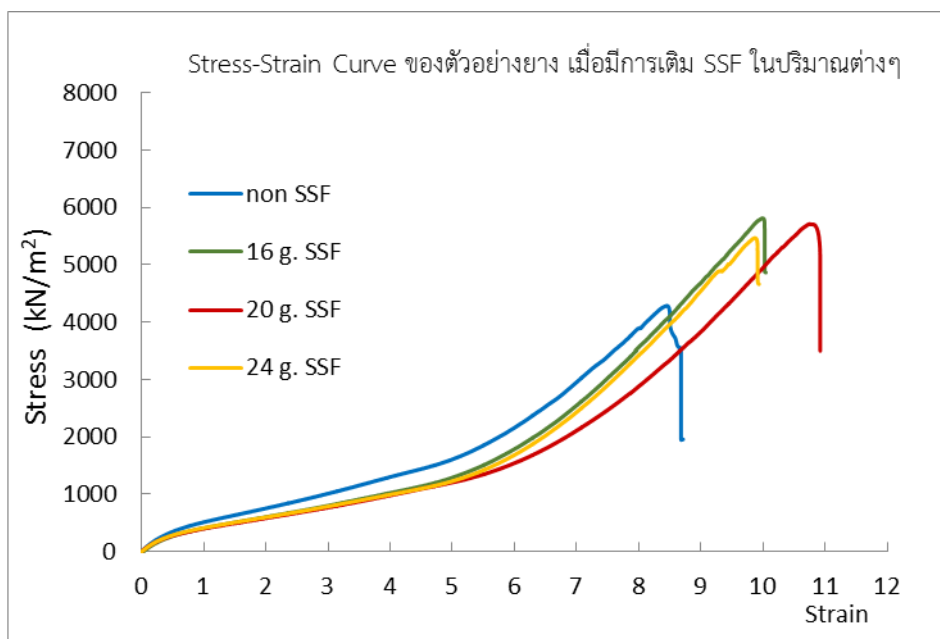
กว่า 23) และพบว่าปริมาณการเติม SSF มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยาง โดยตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียกมีค่าความแข็งสูงสุด แต่เมื่อตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (20 และ 24 กรัม น้ำหนักเปียก) พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างยางที่เติม SSF ขนาด 24 กรัม น้ำหนักเปียกมีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF

สำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing แสดงผลการทดสอบด้วย Stress – Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation แสดงดังภาพที่ 52, 53, 54 และ 55 พบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ และผลการทดสอบเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความแข็ง โดยตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียกแสดงผลการทดสอบที่มีค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (Stress at Yield) สูงสุด (5,811.30 kN/m²) ส่วนตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 20 กรัม น้ำหนักเปียกมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าเล็กน้อย (5,704.88 kN/m²) แต่มีระยะที่ยืดออก (Strain at Break) มากที่สุด มีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด โดยมีความสามารถในการยืดหยุ่น (Modulus at 100% Elongation) น้อย หรือกล่าวได้ว่ามีความเป็นอิลาสติก (elastic property) มากกว่าตัวอย่างยางอื่นๆ แต่สำหรับตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (24 กรัม น้ำหนักเปียก) พบว่าค่าความทนแรงดึง และระยะที่ยืดออกมีแนวโน้มที่ลดลง

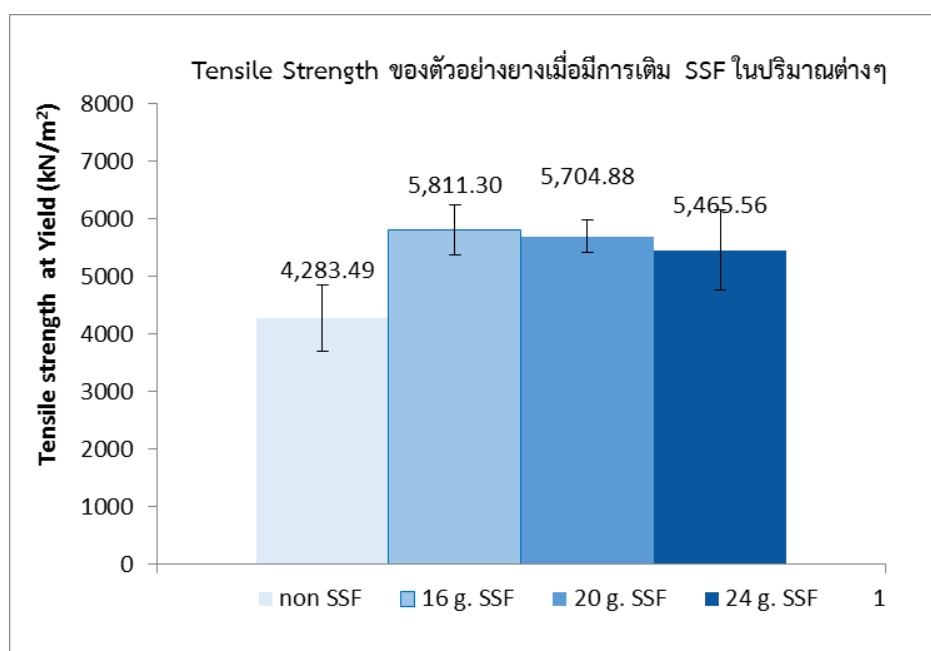
สำหรับผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดแสดงดังภาพที่ 56 พบว่าค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการสร้างหุ่นจำลองที่ตั้งไว้ เช่นเดียวกับสมบัติเชิงกลค่าอื่นๆ และพบว่าผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดเป็นไปในทำนองเดียวกับสมบัติเชิงกลอื่นข้างต้น โดยตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นโดยมีการเติม SSF ในปริมาณ 16 และ 20 กรัม น้ำหนักเปียกมีค่าสูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF แต่เมื่อมีการเติม SSF สูงถึง 24 กรัม น้ำหนักเปียก มีค่า Tear Strength ที่ต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF



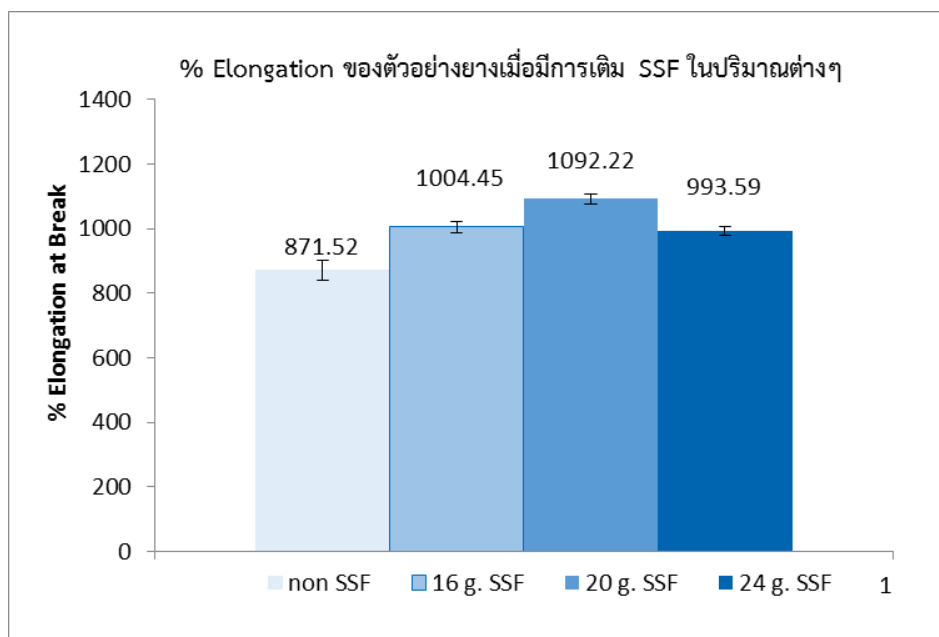
ภาพที่ 51 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



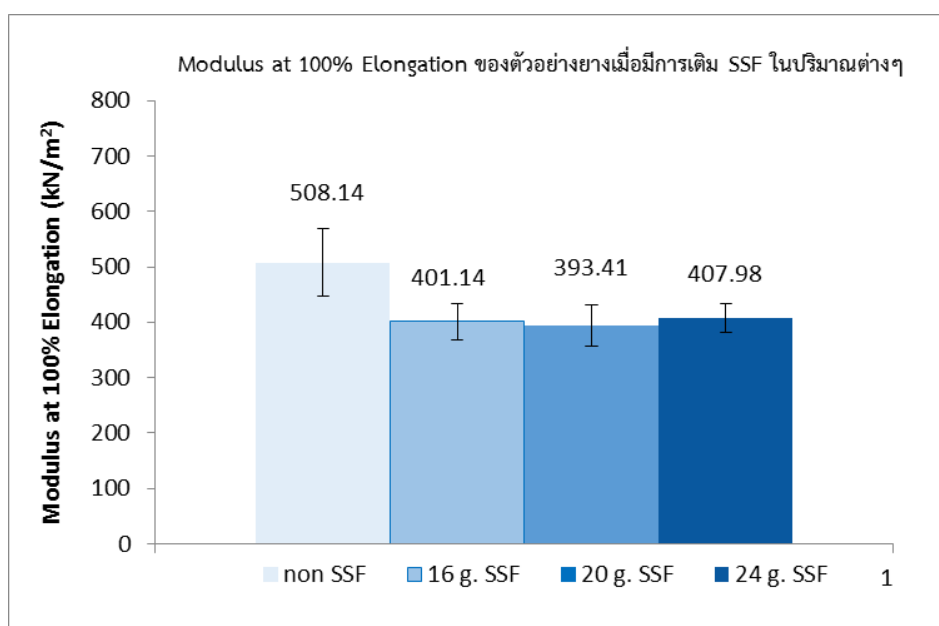
ภาพที่ 52 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



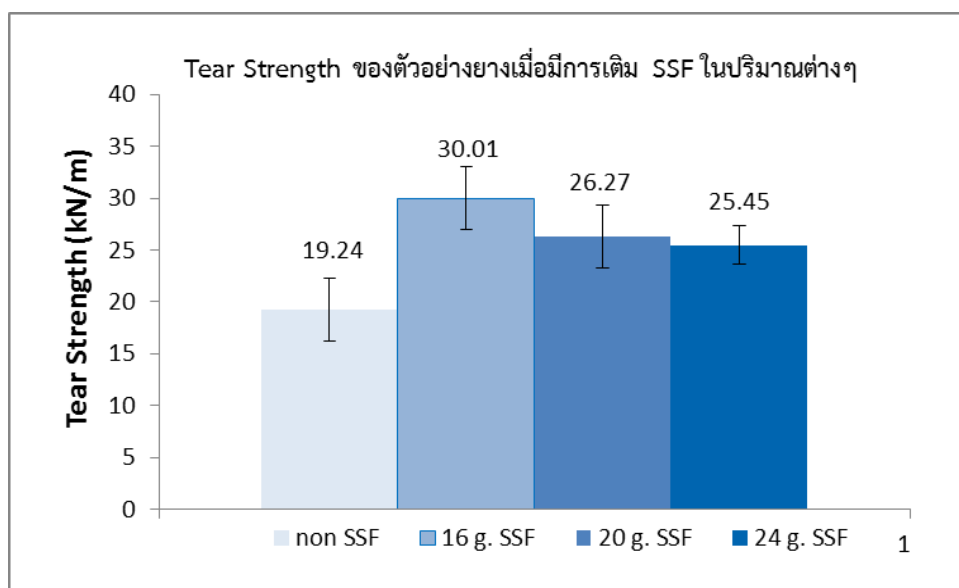
ภาพที่ 53 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 54 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 55 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 56 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นจำลองยางพารา

ผลการทดสอบการทนต่อรังสีของชิ้นงานยางพาราจากสูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นด้วยการทดสอบสมบัติต่างๆ โดยทำการฉายรังสีชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy อัตราการให้ปริมาณรังสี (dose rate) เท่ากับ 300 cGy/MU ด้วยเทคนิค SAD ที่ระดับความลึกจากผิวเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกที่ให้ปริมาณรังสีสูงสุด (Dmax) โดยวางชิ้นงานบน solid water phantom ที่มีความหนา 10 เซนติเมตร เพื่อให้เกิด full back-scattered ดังภาพที่ 57 จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาดตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.8

ผลการประเมินลักษณะทางกายภาพชิ้นงานยางพาราเมื่อทำการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งแสดงภาพถ่ายชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ aging, ชิ้นงานตัวอย่างยางที่ก่อนและหลังการฉายรังสีปริมาณต่างๆ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางยังมีสีเหลืองน้ำตาลไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า โดยเมื่อทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C (Aging) และการรับปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy พบว่าค่าปริมาณรังสีดังกล่าวทำให้เกิดปริมาณความร้อนมีเพียงเล็กน้อยจึงไม่มีผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ตามที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

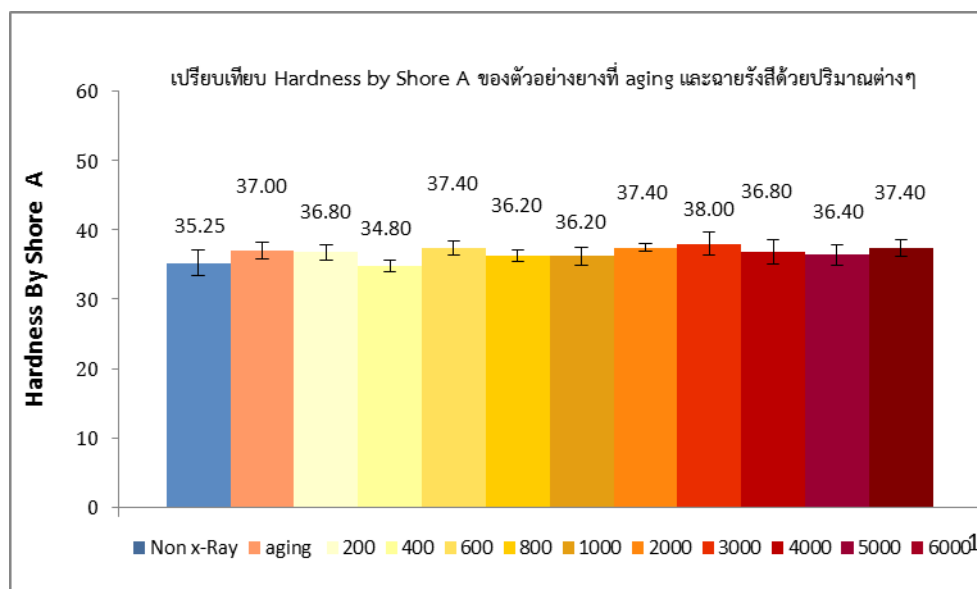


ภาพที่ 57 การฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ปริมาณรังสีตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy อัตราปริมาณรังสี 300 cGy/minute

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ

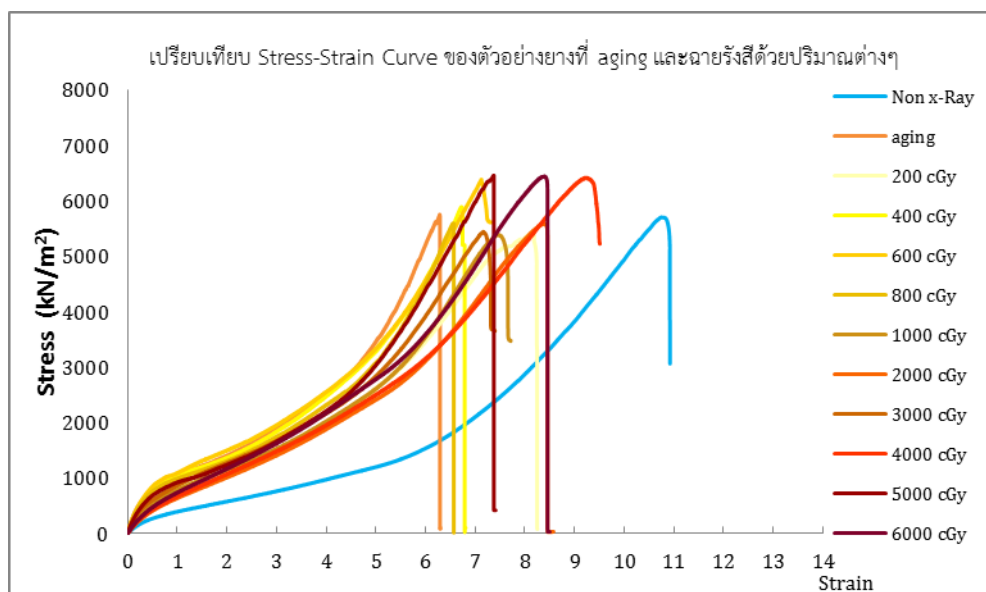
[illegible]

จากภาพที่ 58 ค่าความแข็ง Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองประกอบด้วย non x-ray, Aging และ 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 ซึ่งแสดงว่าถึงแม้ให้ปริมาณสูงถึง 6,000 cGy ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยางที่ทดสอบ

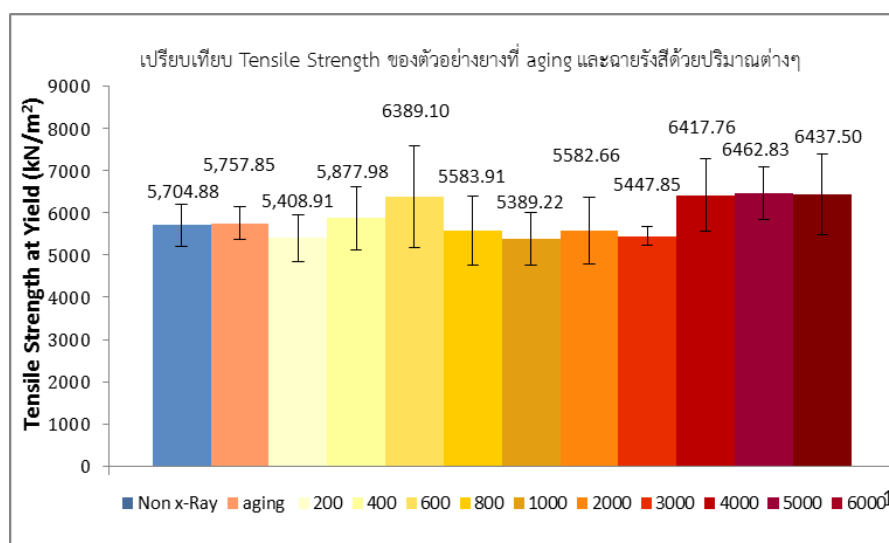


ภาพที่ 58 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน

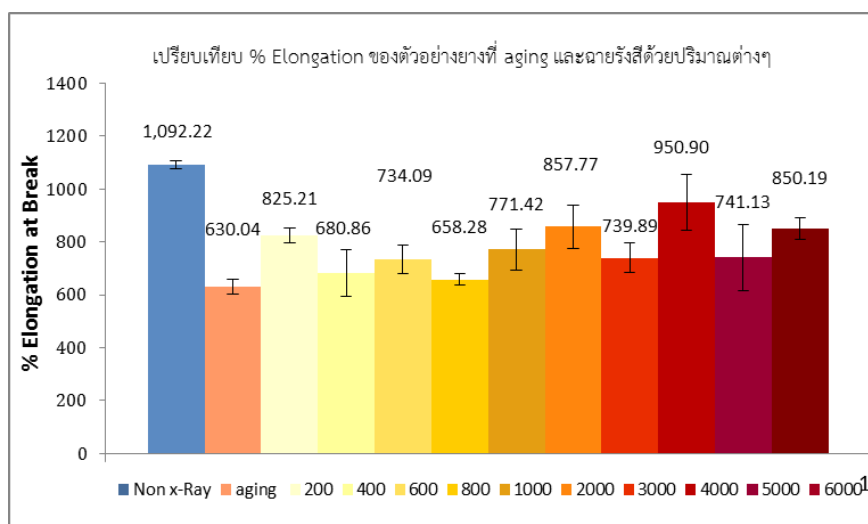
จากภาพที่ 59, 60, 61 และ 62 แสดง Stress - Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100%Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 200, 800, 1,000, 2,000 และ 3,000 cGy (มีค่า 5389.22 - 5583.91 kN/m²) มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างยาง non x-ray เล็กน้อย (มีค่า 5704.88 kN/m²) โดยค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ส่วนชิ้นงานยางที่ Aging และ x-ray ขนาด 400 cGy (มีค่า 5757.85 - 5877.98 kN/m²) มีค่าสูงกว่า non x-ray เล็กน้อย สำหรับชิ้นงานยางที่ผ่านการฉายเอกซเรย์ขนาด 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 61) และ ค่า Modulus at 100%Elongation (ภาพที่ 62) โดยค่า % 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 อย่างเด่นชัดแสดงดังภาพที่ 59 แสดงถึงชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ลดลง



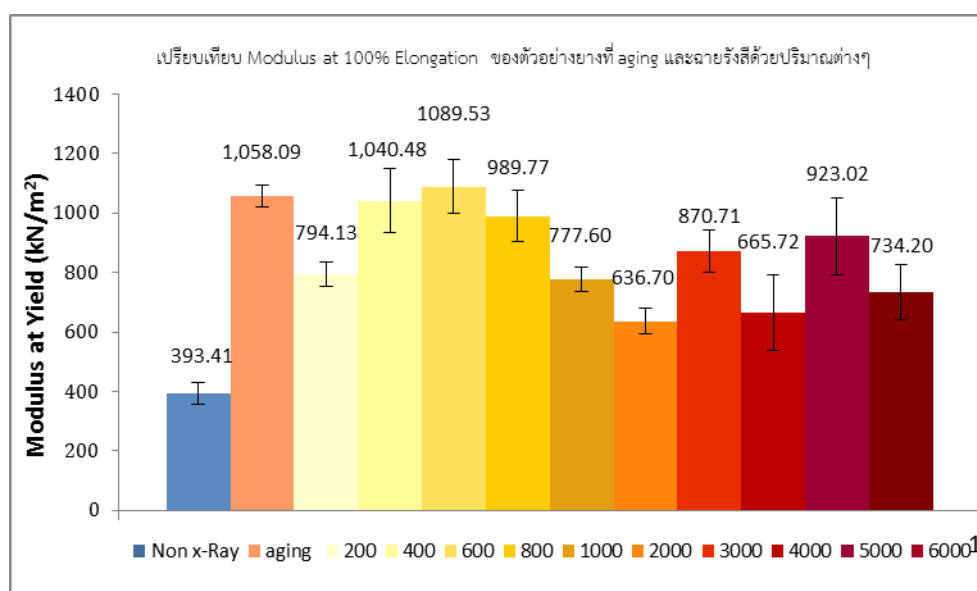
ภาพที่ 59 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน



ภาพที่ 60 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

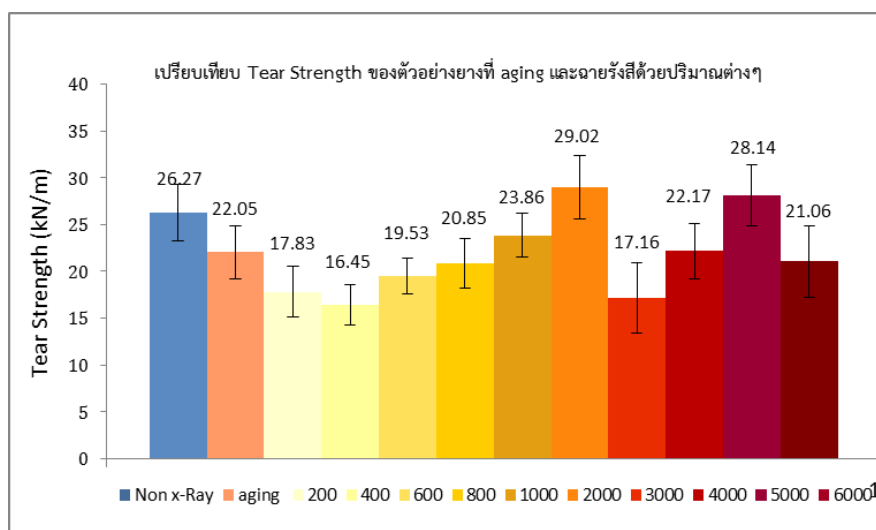


ภาพที่ 61 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 62 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

จากภาพที่ 63 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) โดยชิ้นงานยางที่นำมาทดสอบที่ผ่านการฉายรังสี x-ray มีค่าการทนต่อแรงฉีกขาดลดลง ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ฉายรังสี x-ray ขนาด 2,000 cGy มีค่า Tear Strength เท่ากับ 29.02 kN/m และชิ้นงานยาง x-ray ขนาด 5,000 cGy มีค่า Tear Strength เท่ากับ 28.14 kN/m จะเห็นว่ามีค่า Tear Strength สูงกว่าชิ้นงานยาง non x-ray เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



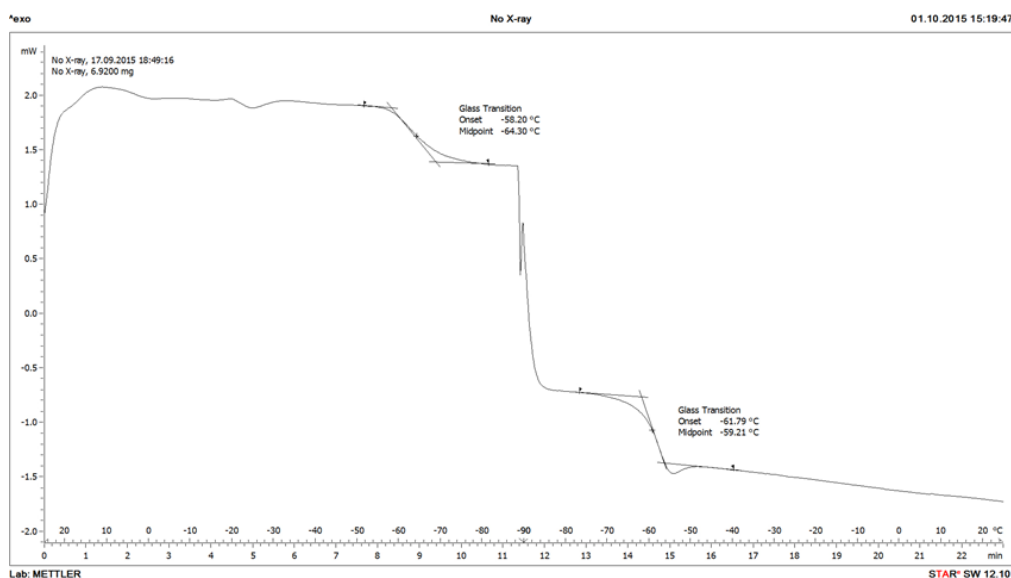
ภาพที่ 63 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

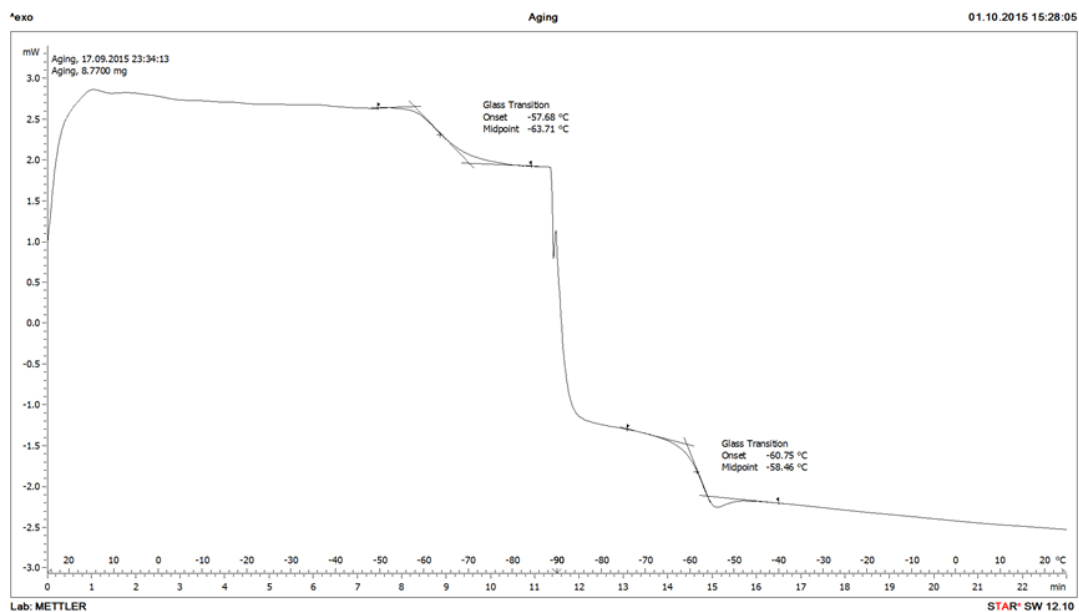
ผลการทดสอบชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อหาค่า Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimetric Analysis (TGA) เปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging และชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ปริมาณรังสีตั้งแต่ 200 - 6,000 cGy (ชิ้นงานยางจากขั้นตอนที่ 4) โดยการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย DSC ใช้การวิเคราะห์หาค่า T_g ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีได้ผลแสดงดังตารางที่ 11 และโครมาโตแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 64-75 ซึ่งพบว่าค่า $T_{g\text{ onset}}$ ทั้งชิ้นแรก ที่ลดอุณหภูมิจาก 25 °C ไปยังอุณหภูมิ -90 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และขั้นตอนที่สอง เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 °C ไปที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกัน มีค่า $T_{g\text{ onset}}$ ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าในช่วง -56.40 °C ถึง -61.79 °C ซึ่งต่างกันเล็กน้อยเพียง 1-5 °C แสดงถึงปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ยางได้จากการฉายรังสี x-ray ในช่วง 200 - 6,000 cGy ไม่มีผลทำให้สายโซ่โครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่มีการตัดสายโซ่โมเลกุลหรือเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อน และหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ

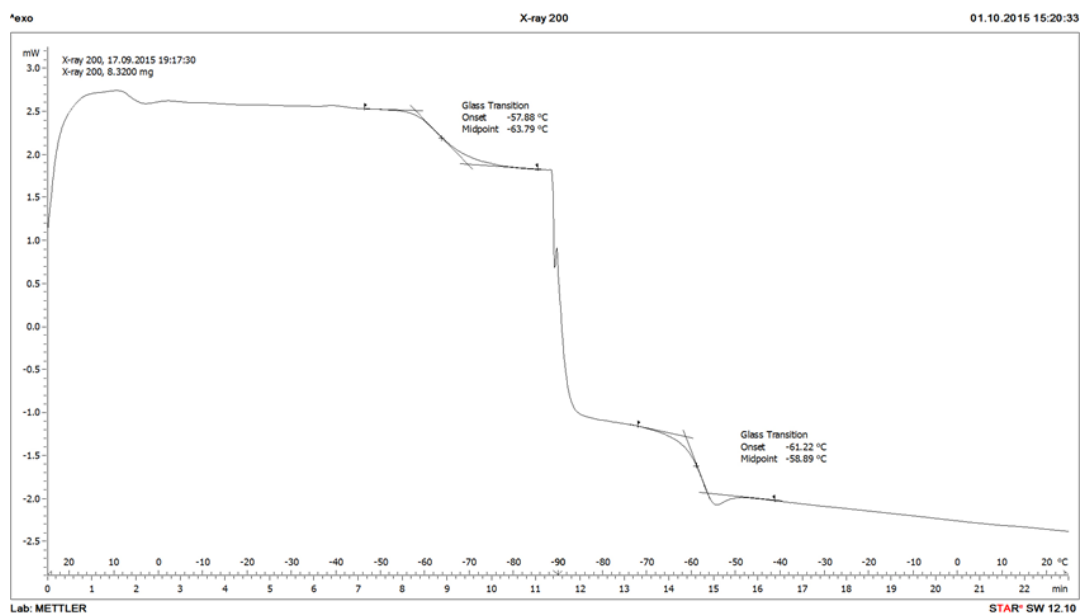
ตัวอย่าง	$T_{g \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	
	1 st ลดอุณหภูมิจาก 25 $^{\circ}\text{C}$ ถึง -90 $^{\circ}\text{C}$	2 nd เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 25 $^{\circ}\text{C}$
Non x-ray	-58.20	-61.79
Aging	-57.68	-60.75
x-ray 200 cGy	-57.88	-61.22
x-ray 400 cGy	-57.81	-60.73
x-ray 600 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



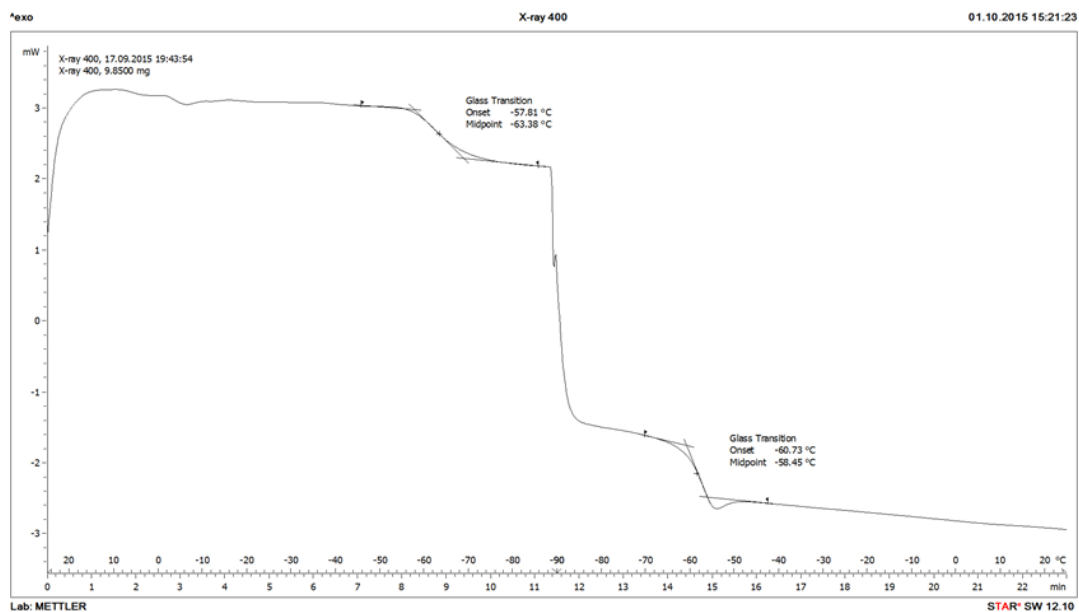
ภาพที่ 64 โคโรนาโทรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray



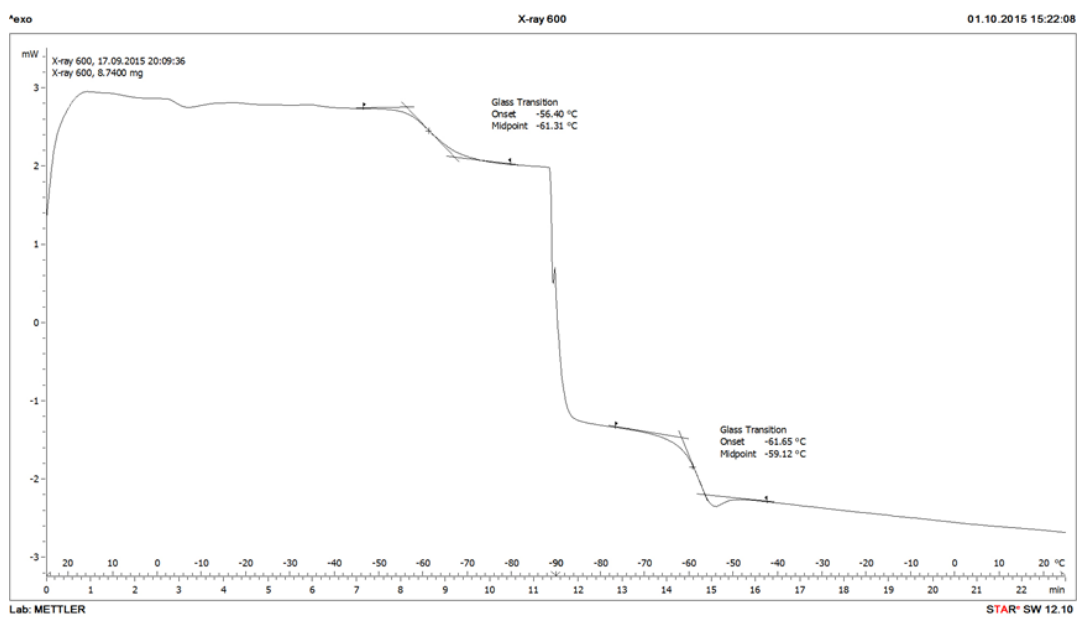
ภาพที่ 65 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging



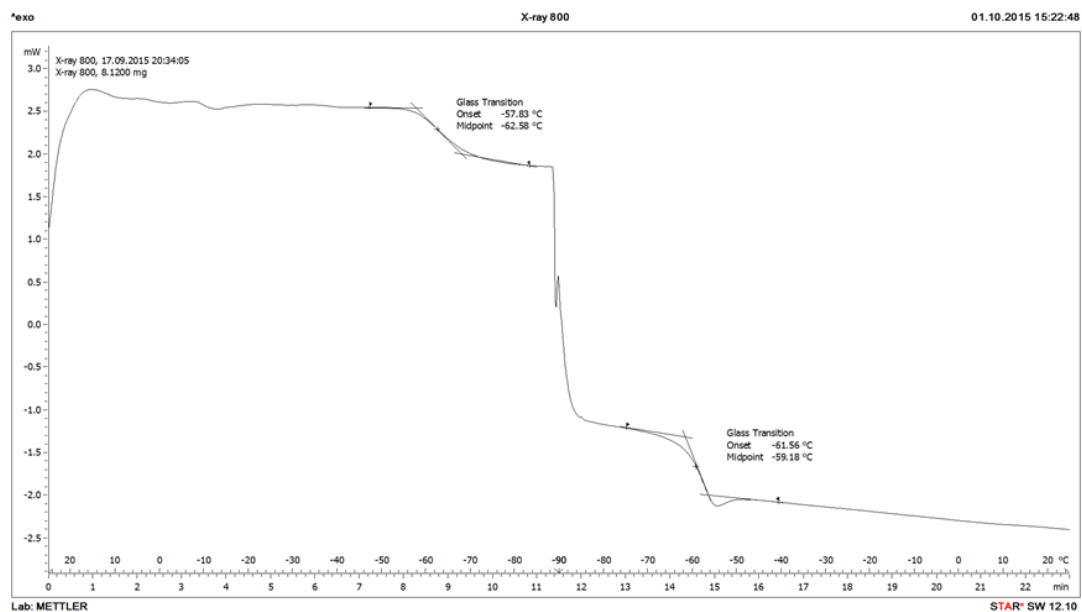
ภาพที่ 66 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 200 cGy



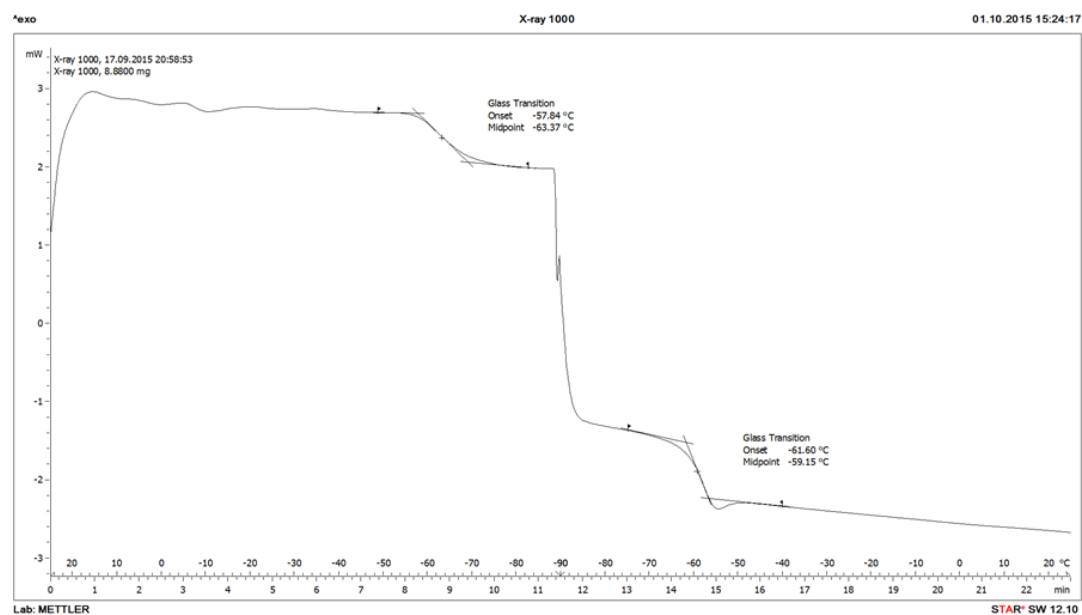
ภาพที่ 67 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 400 cGy



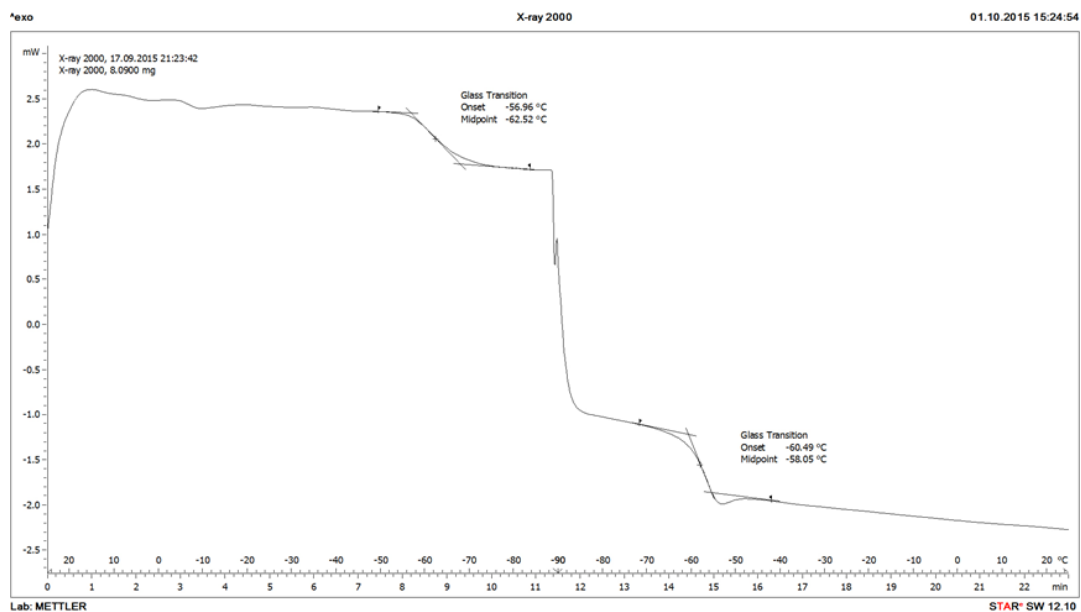
ภาพที่ 68 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 600 cGy



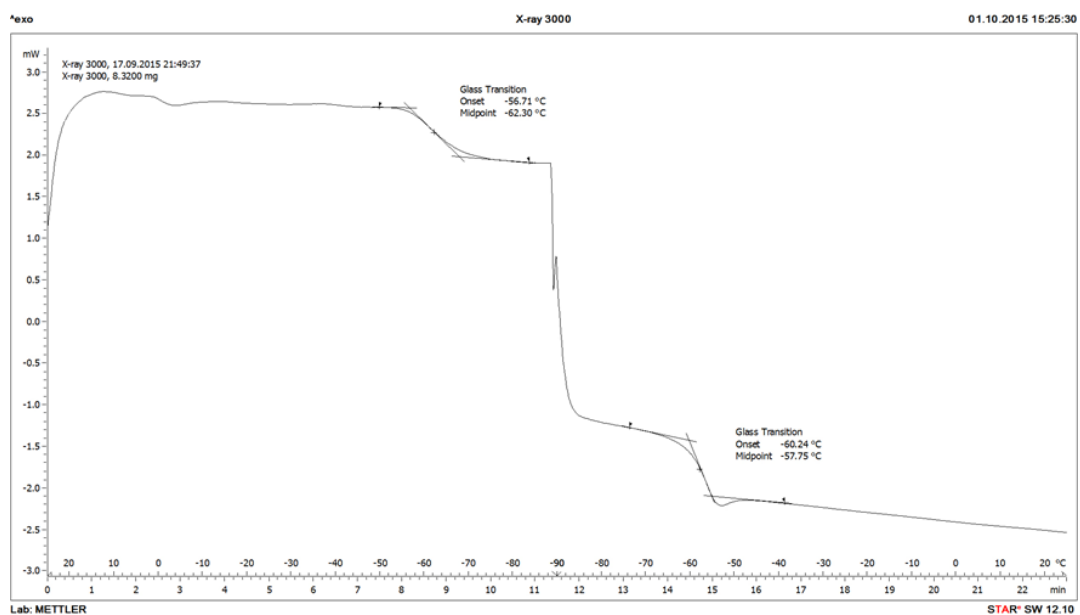
ภาพที่ 69 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 800 cGy



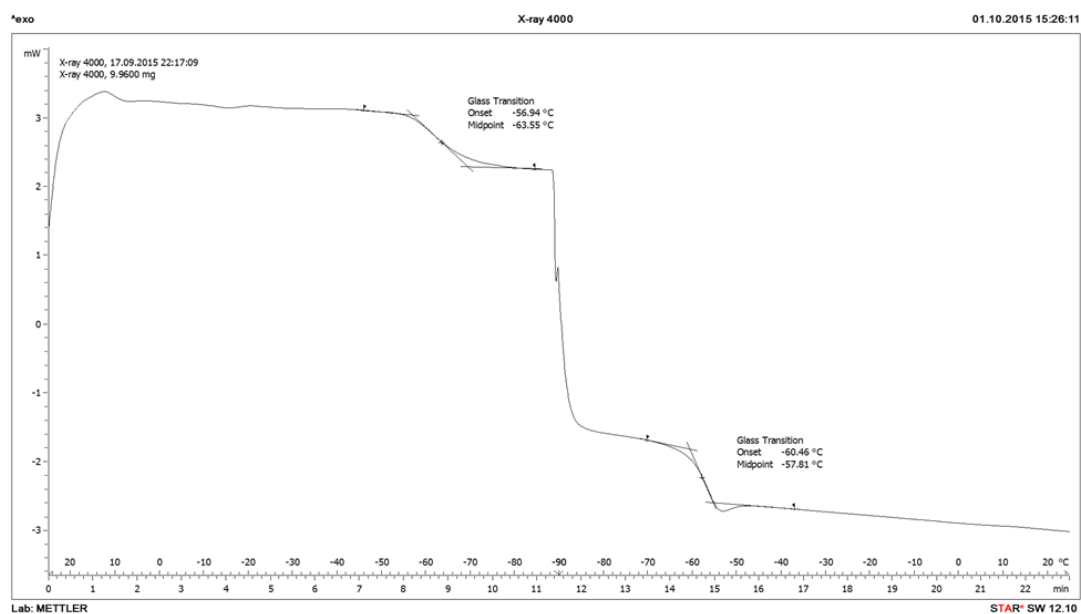
ภาพที่ 70 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 1000 cGy



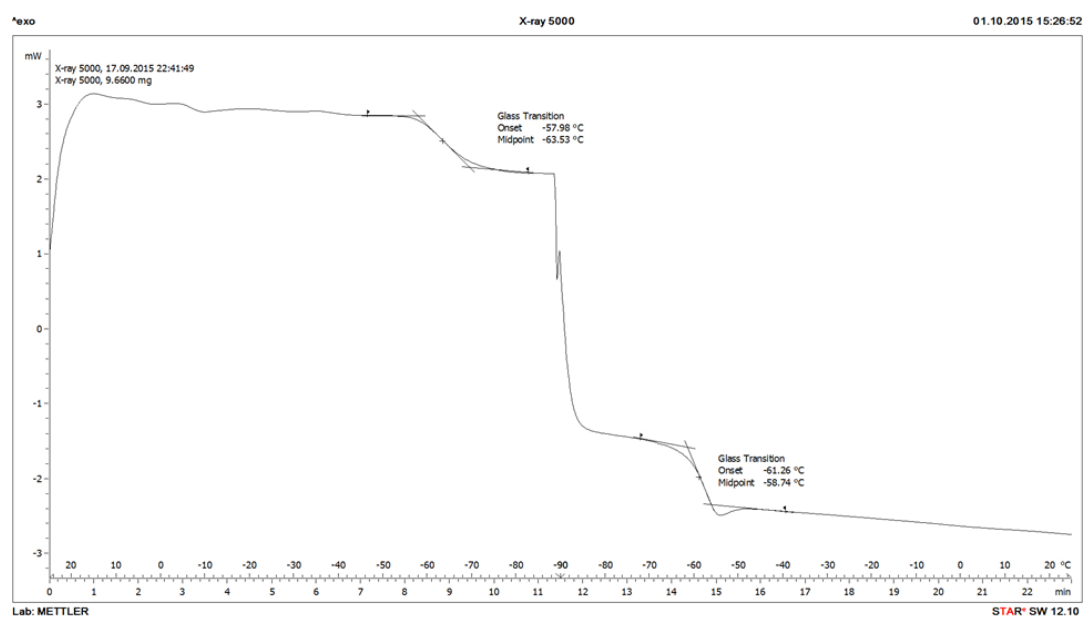
ภาพที่ 71 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 2000 cGy



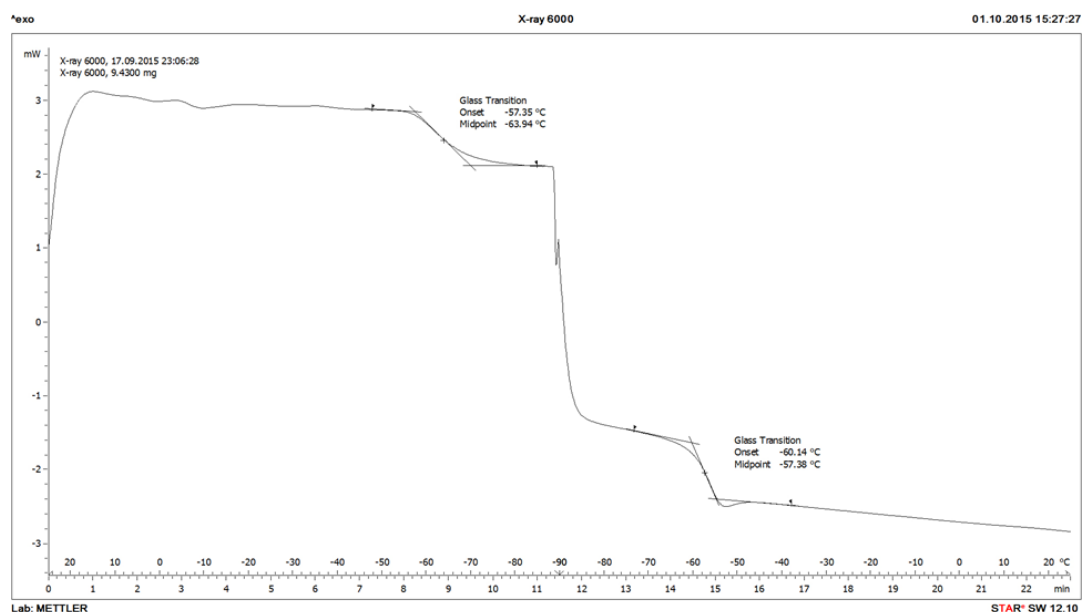
ภาพที่ 72 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 3000 cGy



ภาพที่ 73 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 4000 cGy



ภาพที่ 74 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 5000 cGy

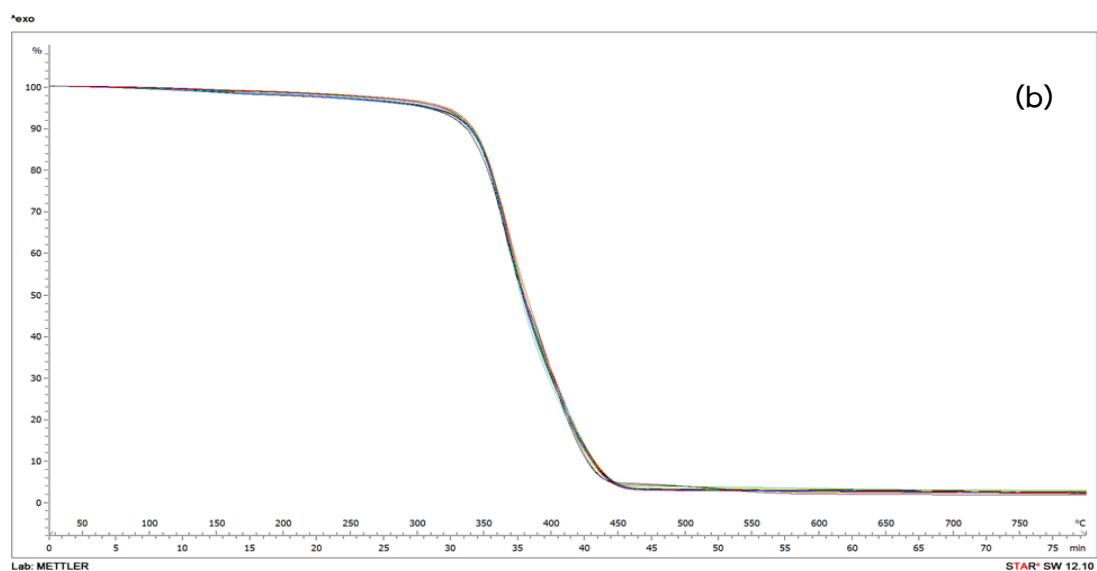
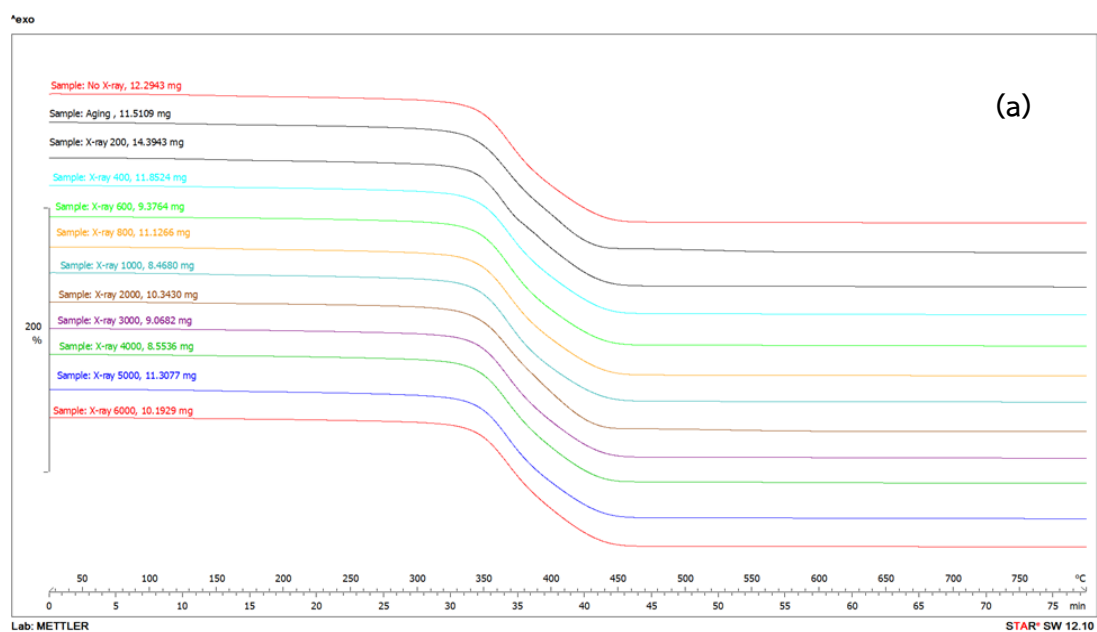


ภาพที่ 75 โครมาโตแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 6000 cGy

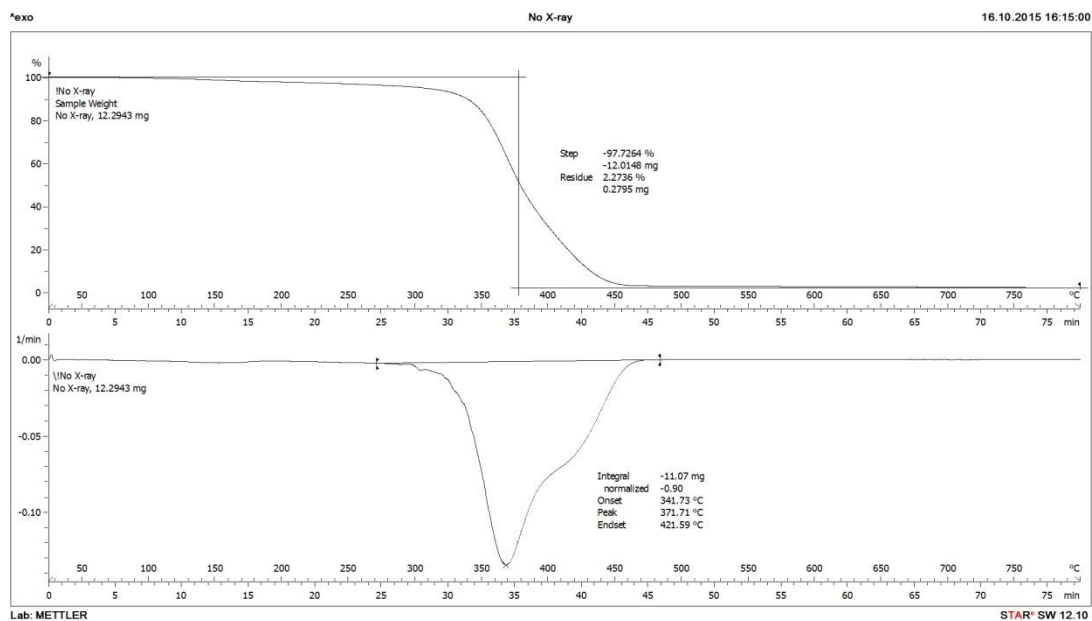
ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จากการวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงานที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 12 และโครมาโตแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 76 พบว่า $T_{d \text{ onset}}$ มีค่าเท่ากับ $335.91 - 341.73 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{d \text{ peak}}$ มีค่าเท่ากับ $365.21 - 371.71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนการวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยาง พบว่ามี 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรก อุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ $97.15 - 98.28 \%$ และที่เหลือเป็น residue เท่ากับ $1.72 - 2.85 \%$ ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการ Aging และหลังการฉายรังสีมีค่า $T_{d \text{ onset}}$ และ $T_{d \text{ peak}}$ ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ฉายรังสีประมาณ $2-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานยางตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีให้แก่ชิ้นงานยาง ในช่วง $200 - 6,000 \text{ cGy}$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางด้วยการตัดสายโซ่โมเลกุลในโครงสร้างยางให้สั้นลงในบางสายโซ่โมเลกุลซึ่งเป็นผลจากค่า T_d ที่ลดลงและพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงานยางที่ Aging ชิ้นงานยางที่ฉายรังสีเท่ากับ 200 และ 2,000 cGy มีลักษณะพิกซ้อนกันอยู่สองพิกแสดงดังภาพที่ 77, 78 และ 79 และมีการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างยาง เนื่องจากปรากฏอุณหภูมิสลายตัวนั้นมีช่วงการสลายตัวที่กว้างของชิ้นงานยางที่ฉายรังสี 600, 4,000 และ 6,000 cGy โดยพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG แสดงดังภาพที่ 80, 81 และ 82

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง ยาง ก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ

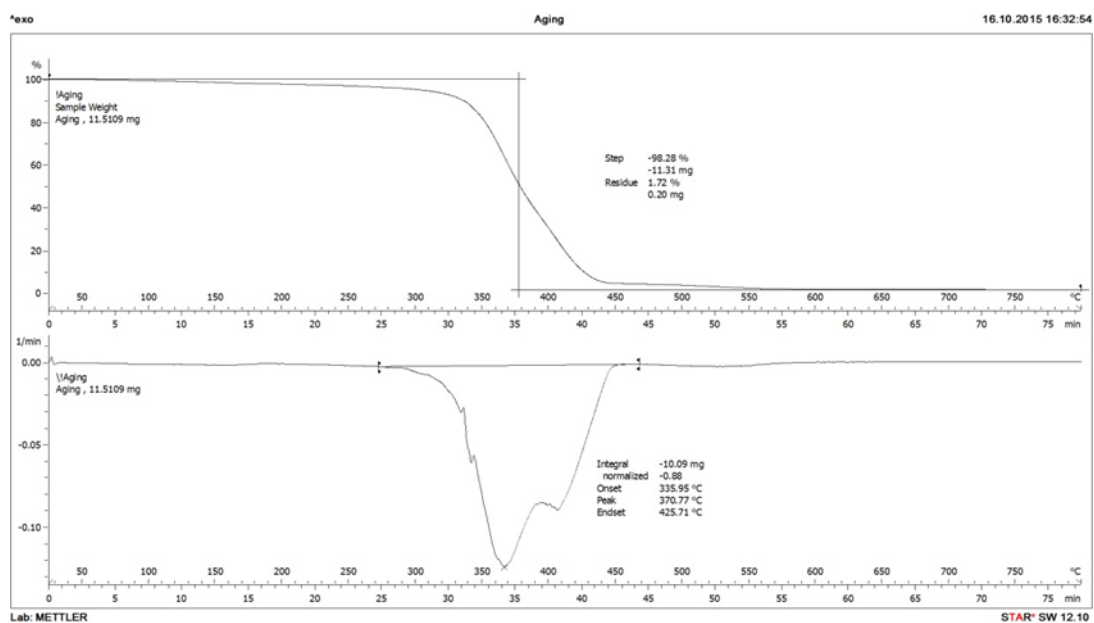
ตัวอย่าง	Decomposition Temperature, T_d ($^{\circ}\text{C}$) for 1 st composition		Composition	
			1 st composition	2 nd composition
	$T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d \text{ peak}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	(%w/w)	(Residue) (%w/w)
Non x-ray	341.73	371.71	97.73%	2.27%
Aging	335.95	370.77	98.28%	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%



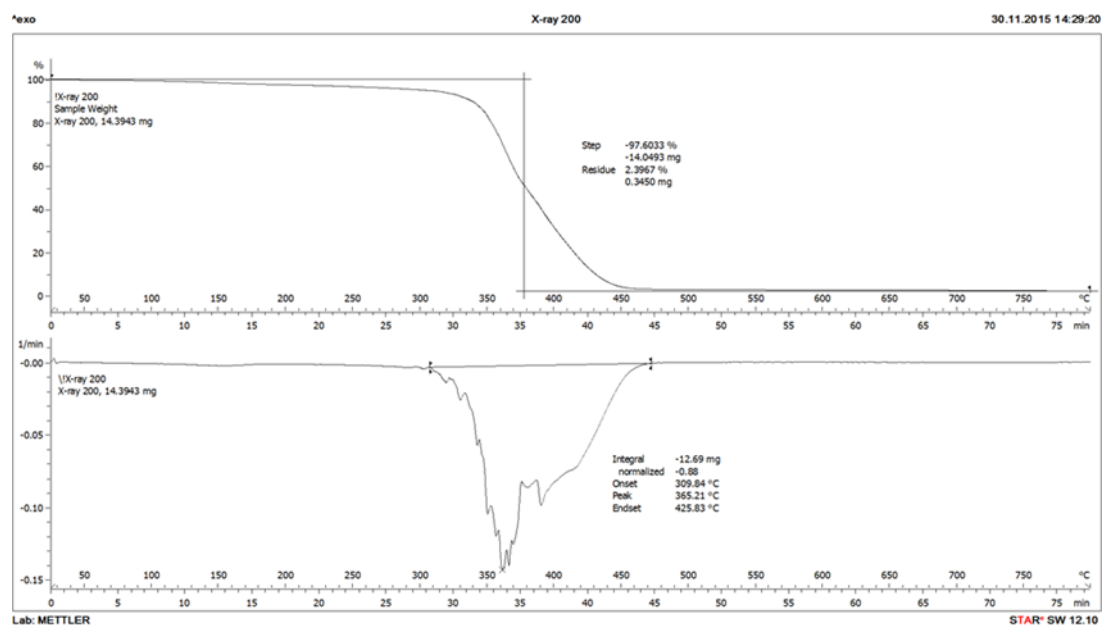
ภาพที่ 76 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ (a) และกราฟที่ overlay (b)



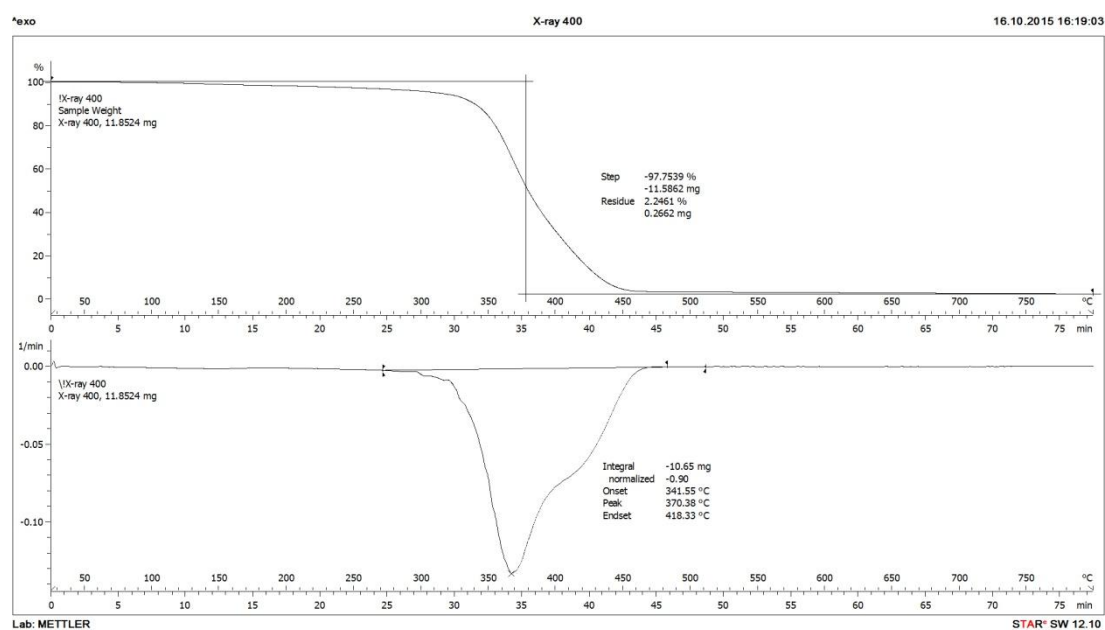
ภาพที่ 77 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางไม่ผ่านการฉายรังสี Non x-ray



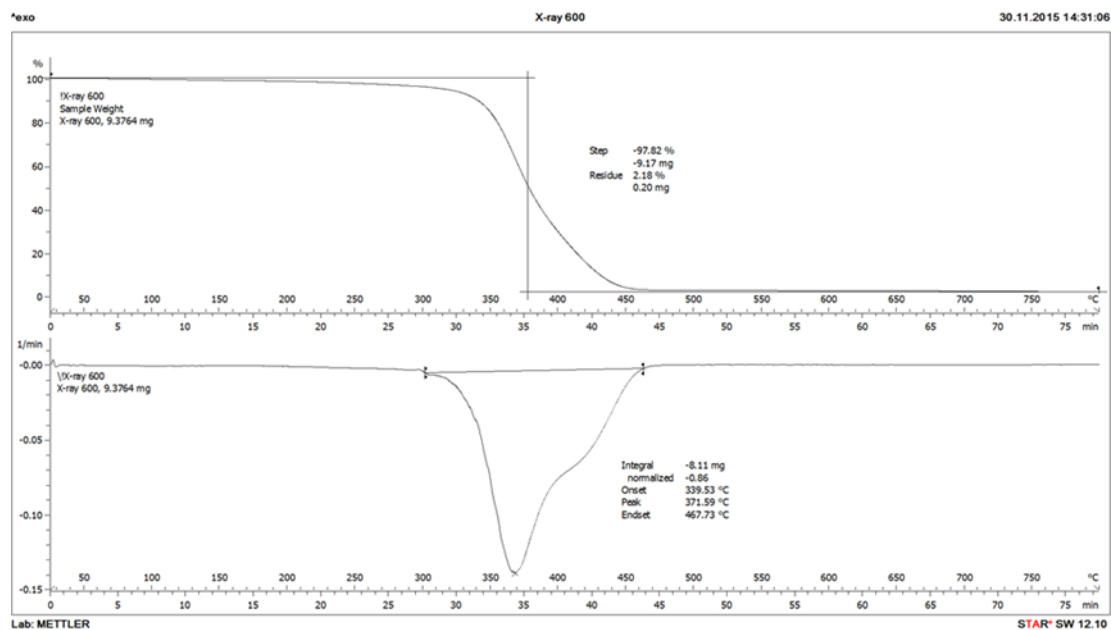
ภาพที่ 78 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging



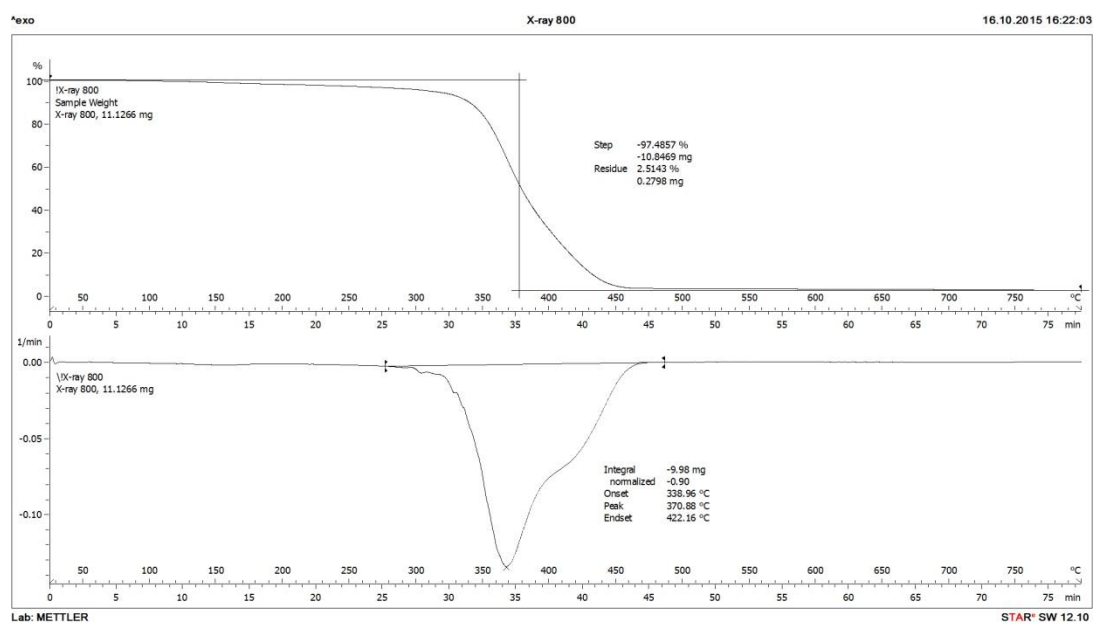
ภาพที่ 79 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 200 cGy



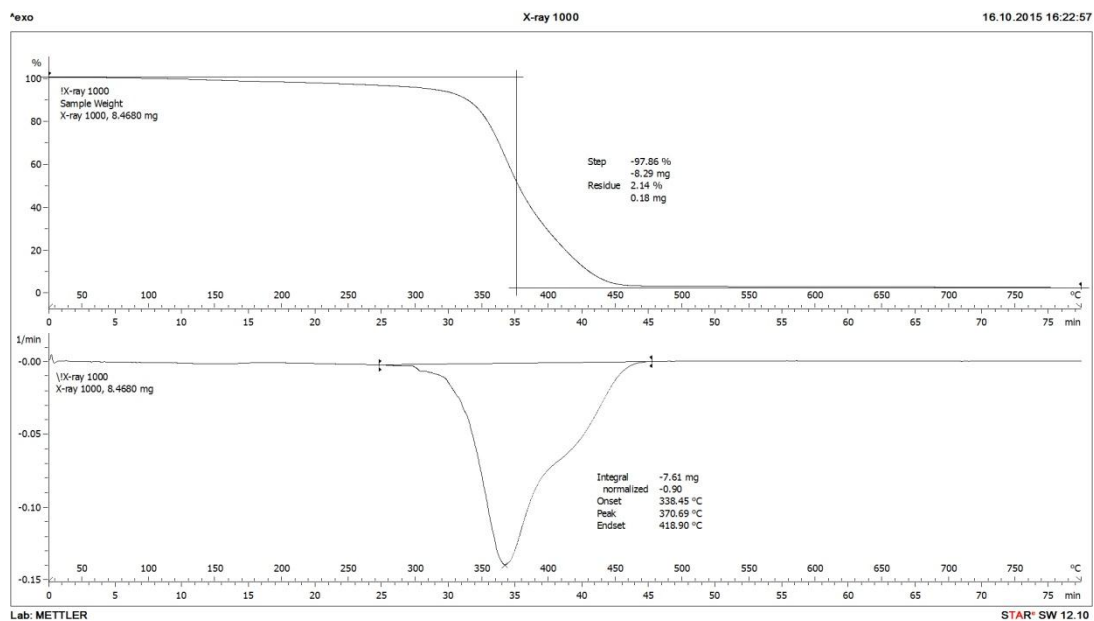
ภาพที่ 80 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 400 cGy



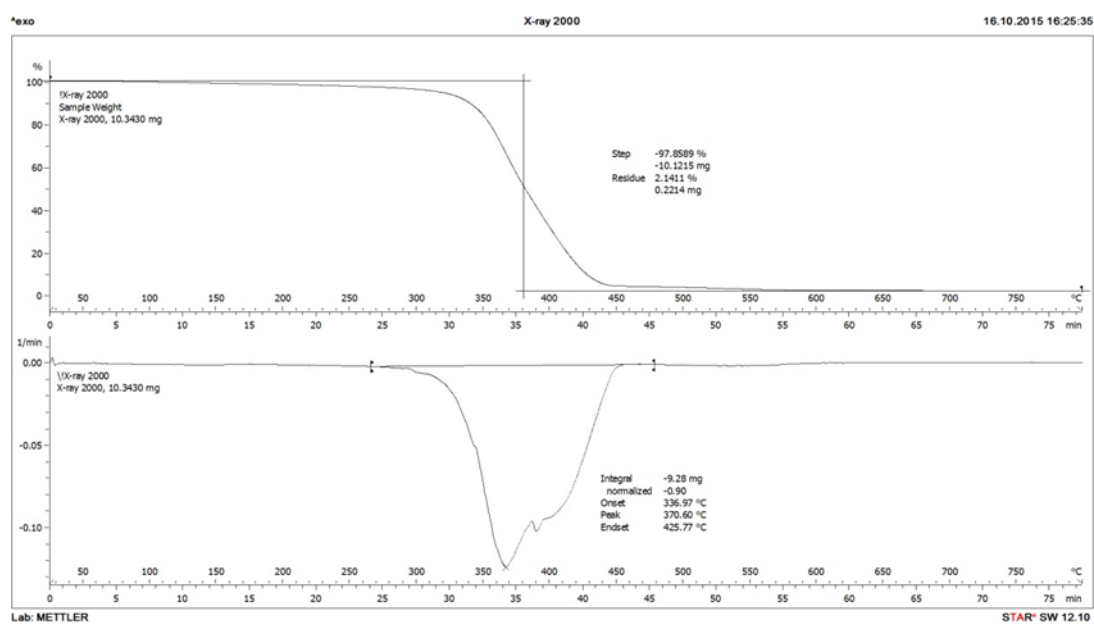
ภาพที่ 81 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 600 cGy



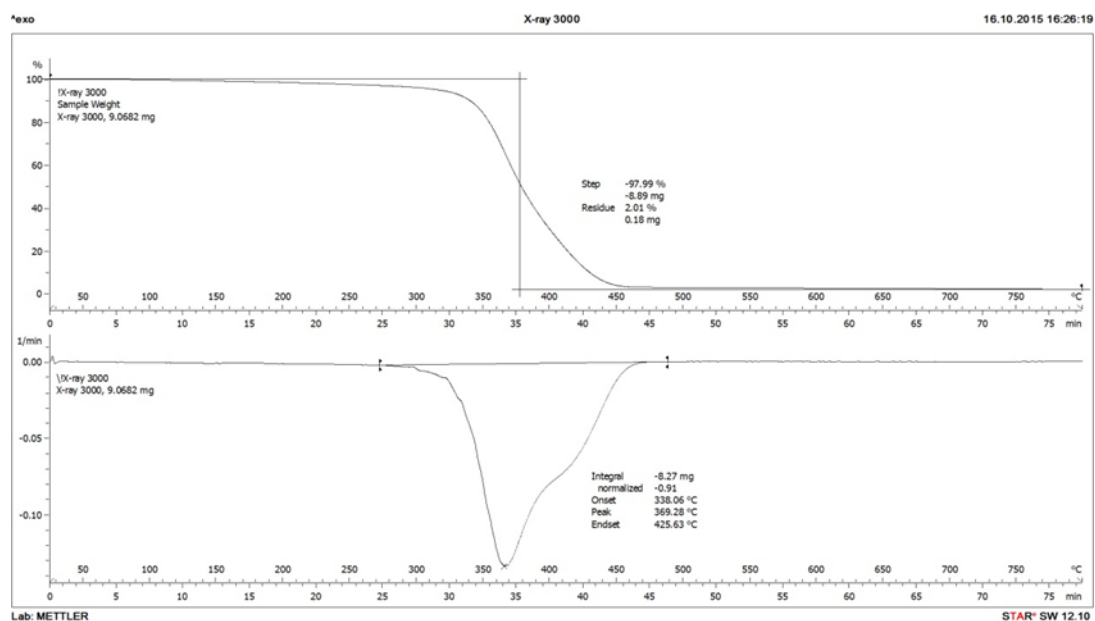
ภาพที่ 82 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 800 cGy



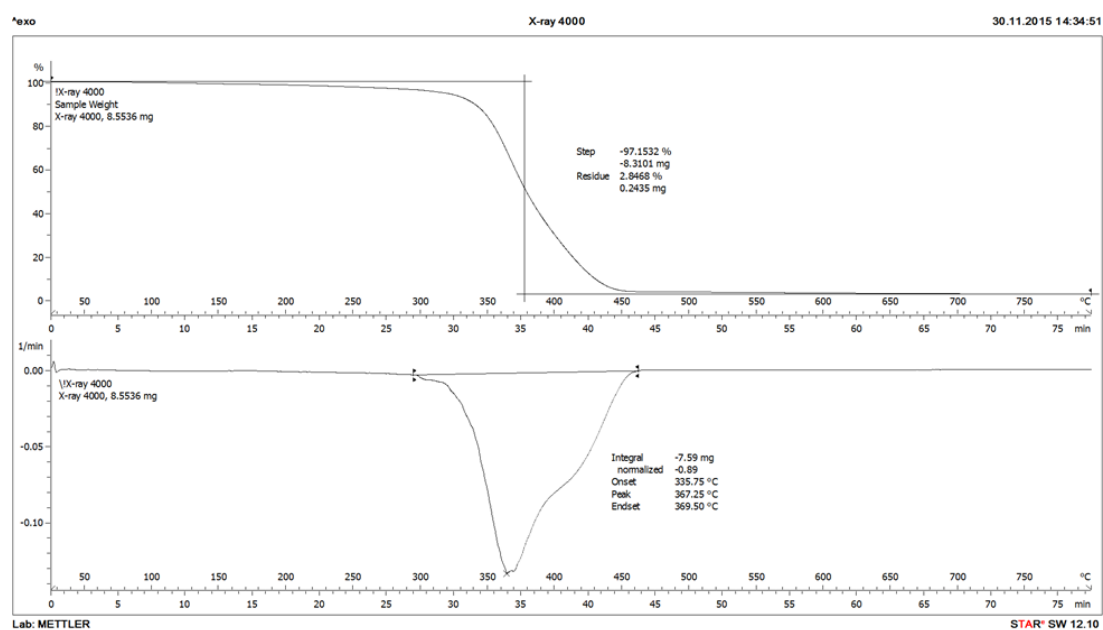
ภาพที่ 83 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 1,000 cGy



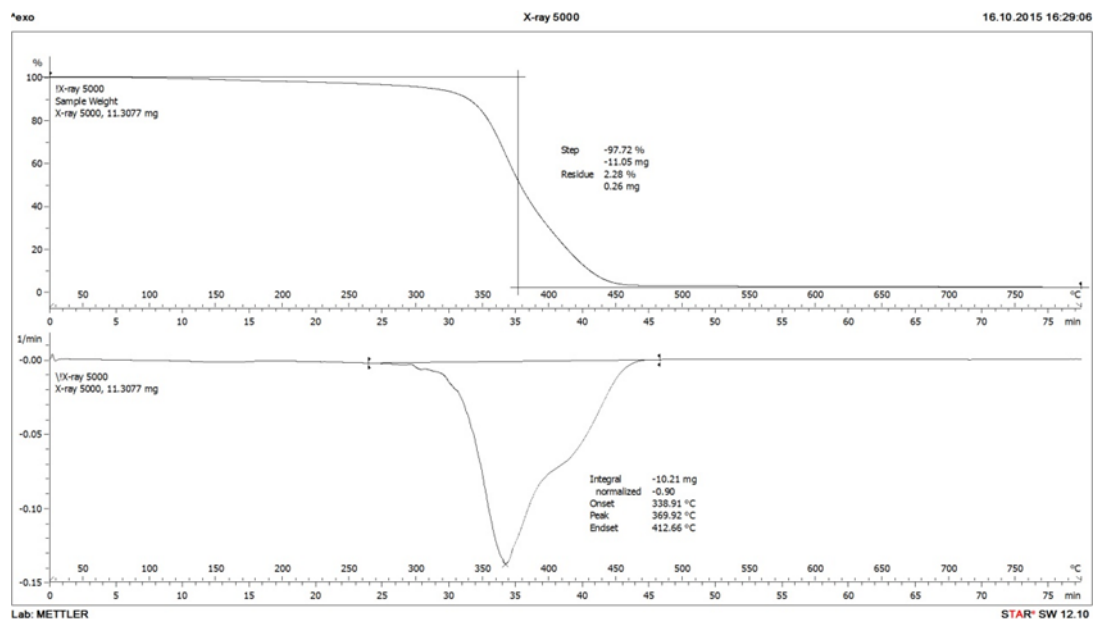
ภาพที่ 84 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 2,000 cGy



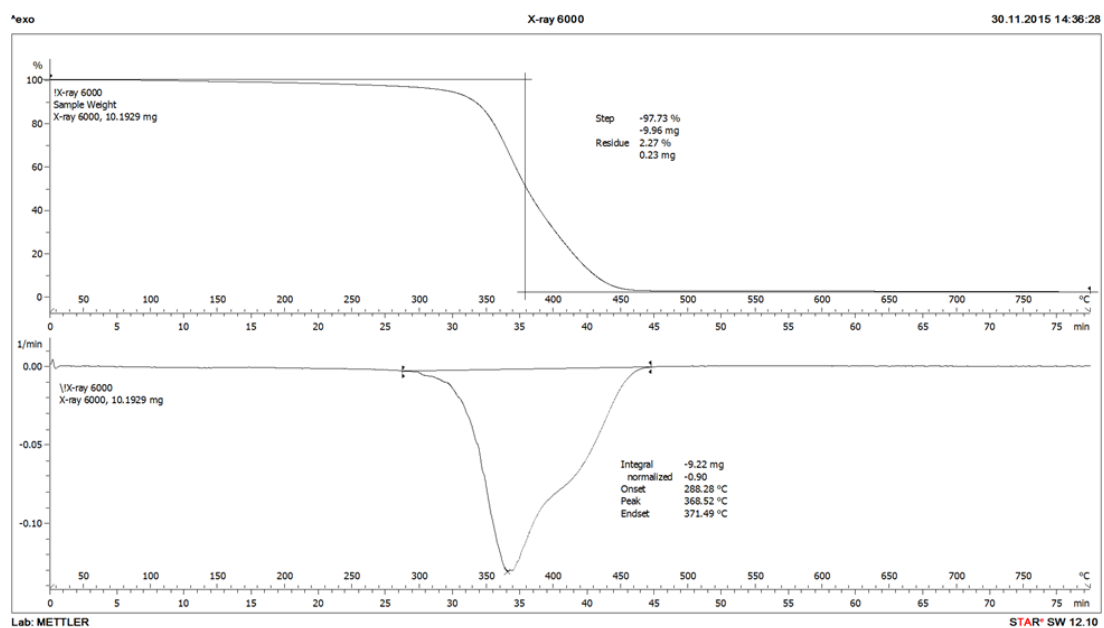
ภาพที่ 85 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 3,000 cGy



ภาพที่ 86 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 4,000 cGy



ภาพที่ 87 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 5,000 cGy

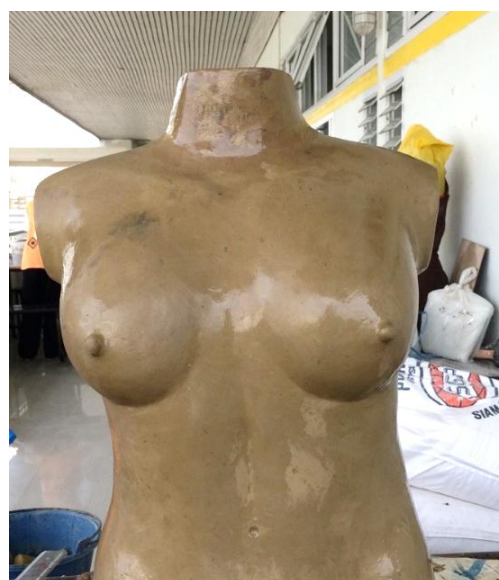


ภาพที่ 88 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างผ่านการฉายรังสี x-ray ขนาด 6,000 cGy

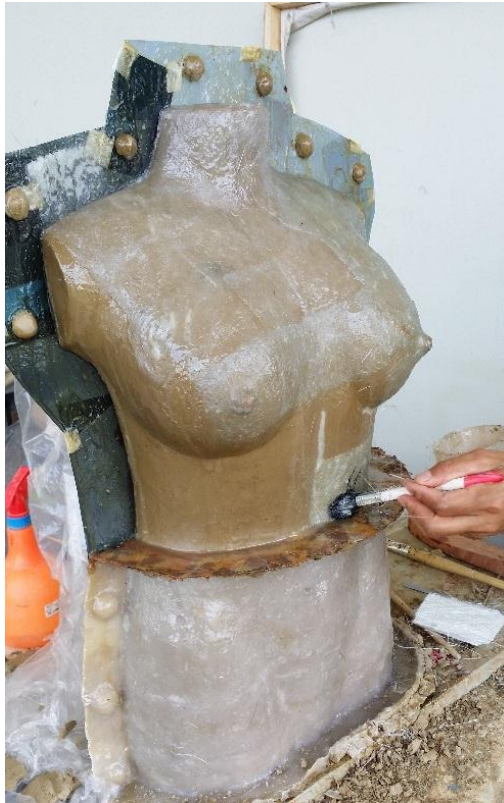
ขั้นตอนที่ 5 ผลการเตรียมแม่พิมพ์และการหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

ผลการเตรียมแม่พิมพ์และการหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอก

ผลของการออกแบบหุ่นจำลองและสร้างแม่แบบหุ่นทรวงอกและเต้านมด้วยดินเหนียวได้ผลแสดงดังภาพที่ 89 เมื่อนำแม่แบบหุ่นทรวงอกดินเหนียวมาทำการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ได้ผลแสดงดังภาพที่ 90 โดยแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นแบ่งออกเป็นซีกด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังภาพที่ 91 แม่พิมพ์ดังกล่าวใช้สำหรับเป็นแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกซึ่งมีความคงทนและแข็งแรง สามารถคงรูปอยู่ได้หลังจากเทน้ำยางพารา การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำยางพาราที่มีปริมาตรมากถึง 20-30 กิโลกรัมต่อหุ่นจำลองแต่ละชิ้นเมื่อทำการทดสอบการเทน้ำยางพาราพบว่าแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์สามารถรองรับน้ำยางขนาดดังกล่าวได้นอกจากนี้ยังพบว่าแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกทั้งซีกด้านหน้าและด้านหลังสามารถประกบกันอย่างพอดีแสดงดังภาพที่ 92 ทำให้ขอบและบริเวณรอยต่อมีความสมดุลซึ่งทำให้ไม่ปรากฏเห็นเป็นขอบรอยต่อที่ตัวหุ่นยางพาราภายหลังการขึ้นรูป บริเวณรอยต่อที่ประกบกันบนแม่พิมพ์จะถูกยึดด้วยนอตเพื่อให้แม่พิมพ์คงรูปอยู่ได้ขณะทำการเทน้ำยางพารา ผลการขึ้นรูปหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมจากยางพาราด้วยแม่พิมพ์เรซินแสดงดังภาพที่ 93



ภาพที่ 89 การสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรวงอกจากดินเหนียว



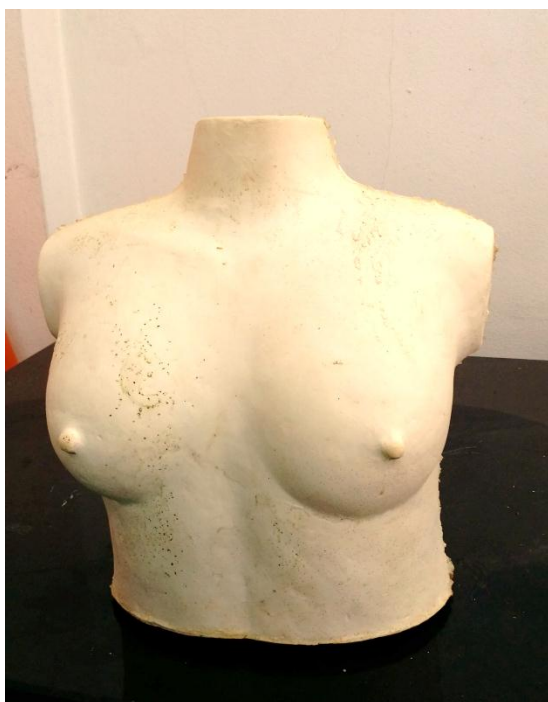
ภาพที่ 90 การสร้างแม่แบบหุ่นจำลองทรงอกที่ทำจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์



ภาพที่ 91 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ด้านหลัง



ภาพที่ 92 แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงอกจากเรซินผสมไฟเบอร์ที่สามารถประกบกันอย่างพอดี

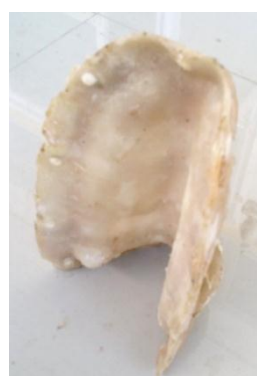


ภาพที่ 93 หุ่นจำลองทรงออกยาวพาราก่อนการตกแต่งและทำสีที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซิน

สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างปอดจำลองใช้วิธีการขึ้นรูปแม่แบบด้วยปูนปลาสเตอร์ดังภาพที่ 94 จากนั้นสร้างแม่พิมพ์ด้วยเรซินผสมไฟเบอร์และเจาะรูเพื่อยึดแม่พิมพ์ให้แนบสนิทด้วยน็อตเพื่อให้ประกบกันได้พอดีและป้องกันน้ำยางพารารั่วออกขณะเทยางพาราเช่นเดียวกับการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกและเต้านมดังแสดงในภาพที่ 95 และ 96 ตามลำดับ ผลการสร้างปอดจำลองจากยางพาราแสดงดังภาพที่ 97 โดยปอดจำลองที่ได้มีผิวเรียบสม่ำเสมอและมีรูปทรงคงที่สามารถนำไปจัดวางในหุ่นจำลองทรวงอกยางพาราได้



ภาพที่ 94 การสร้างแม่แบบหุ่นปอดจำลองจากปูนปลาสเตอร์



ภาพที่ 95 แม่พิมพ์ปอดที่สร้างจากวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์



ภาพที่ 96 การยึดแม่พิมพ์ปอดจำลองทั้งสองซีกให้แนบสนิทด้วยน๊อต



ภาพที่ 97 ปอดจำลองยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์

ผลการเตรียมแม่พิมพ์และการหล่อแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

ผลจากการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานทำให้ได้แม่แบบหุ่นจำลองจากการปั้นที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของมาตรฐานหญิงไทย และหุ่นจำลองมาตรฐาน Rando rando phantom หุ่นต้นแบบดินเหนียวมีขนาดรอบเอว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) รอบสะโพก 99 เซนติเมตร (39 นิ้ว) สูง 24 เซนติเมตร (9.44 นิ้ว) ดังภาพที่ 98



ภาพที่ 98 ผลการปั้นแบบหุ่นจำลองต้นแบบจากดินเหนียว

ผลการสร้างแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์สำหรับขึ้นหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราแสดงดังภาพที่ 99 แม่พิมพ์หุ่นจำลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ด้านหน้าและหลัง สามารถประกบกันได้แนบสนิทและยึดติดกันด้วยน็อตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เมื่อทำการทดสอบด้วยการเทน้ำลงในแม่พิมพ์พบว่าการรั่วซึมเพียงเล็กน้อยสำหรับความคงทนในการขึ้นรูปหุ่นจำลองยางพาราใช้การทดสอบความทนความร้อนด้วยการนำแม่พิมพ์ไปทำการอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นสามารถทนต่อความร้อนได้และไม่เสียรูปทรงไปจากเดิม

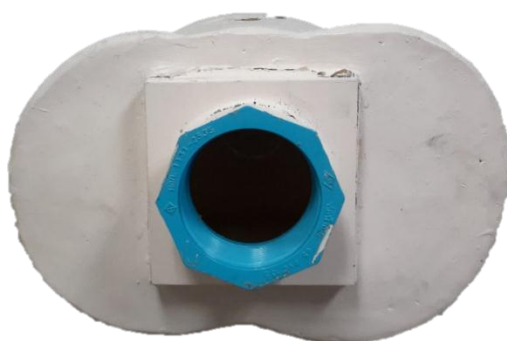


ภาพที่ 99 แม่พิมพ์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ผลิตจากเรซินและไฟเบอร์

ผลการสร้างหุ่นจำลองยางพาราอุ้งเชิงกรานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 100-102 หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดรอบเอว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) รอบสะโพก 99 เซนติเมตร (39 นิ้ว) สูง 24 เซนติเมตร (9.44 นิ้ว) ความสูงจากปากช่องถึงเอว 24 เซนติเมตร ความกว้างด้านหน้าหลัง 19.5 เซนติเมตร ความกว้างด้านซ้ายขวา 30 เซนติเมตร น้ำหนักรวม 8 กิโลกรัม หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ ภายในบรรจุกล่องอะคลิลิกสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่ได้และสามารถเจาะรูที่มีขนาดพอดีสำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีในตำแหน่งต่างๆ ได้ดังภาพที่ 103 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่ในการรักษามะเร็งปากมดลูก และช่องสำหรับใส่หัววัดรังสี โดยมีกล่องอะคลิลิกปริมาตร 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตรเพื่อบรรจุน้ำและอุปกรณ์สอดใส่



ภาพที่ 100 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา ในทำด้านหน้า โดยจะมีรู 3 รู สำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่งจุด Point A และ Bladder point



ภาพที่ 101 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา ในด้านตัดขวาง ที่เห็นรูสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่



ภาพที่ 102 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราในท่าด้านข้าง

สำหรับการออกแบบให้หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานประกอบด้วยส่วนของเนื้อยางพาราและกล่องอะคริลิกใส่น้ำทำให้สามารถใส่อุปกรณ์สอดใส่ได้ในหุ่นจำลองได้โดยไม่มีช่องอากาศภายใน อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในการประกันคุณภาพการรักษาในงานรังสีรักษาร่วมกับอุปกรณ์สอดใส่แร่ชนิดอื่นๆ ได้ เช่น อุปกรณ์ชนิด cylinder หรือ สาย catheter ซึ่งมีท่อนำแร่เพียงเส้นเดียวแทน Tandem และ Ovoids สำหรับหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้การเลือกใช้กล่องอะคริลิกเพื่อให้สามารถรองรับน้ำที่เติมเข้าไปได้แต่ข้อจำกัดของกล่องอะคริลิก ได้แก่ ความหนาแน่นของผนังของกล่องทำให้เกิดสิ่งแปลกปลอมโลหะ (artifact) ขึ้นบนภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และอาจส่งผลกระทบต่อการลดทอนปริมาณรังสีโดยเฉพาะการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะไกล อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่มีผลต่อการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในกล่องอะคริลิกซึ่งบรรจุในหุ่นจำลอง

อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ นอกจากการวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบการวางแผนการรักษาสำหรับมะเร็งปากมดลูก เช่น สามารถประยุกต์ใช้ในการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ที่ใช้อุปกรณ์สอดใส่รูปแบบอื่นๆ เนื่องจากผู้วิจัยได้ออกแบบให้หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานมีช่องขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่รูปแบบต่างๆ ได้ ทำให้สามารถนำหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานไปใช้ประโยชน์สำหรับประกอบการฝึกทักษะในการสร้างภาพสำหรับนักรังสีการแพทย์และฝึกทักษะการวางแผนการรักษาสำหรับนักฟิสิกส์การแพทย์ และสามารถนำไปใช้เป็นหุ่นสำหรับวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณค่าปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาตามกระบวนการของการประกันคุณภาพ และการควบคุมคุณภาพในงานรังสีรักษาได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบแผนการรักษาสำหรับการรักษาด้วยการฉายรังสีระยะใกล้ได้

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองยางพารา

ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอก

การทดสอบความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาแสดงดังภาพที่ 103 ผลการประเมินค่าความสม่ำเสมอบริเวณเนื้อเยื่อระดับเต้านมและช่องท้องแสดงดังภาพที่ 104 และตารางที่ 13 ผลการประเมินค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองยางพาราบริเวณเนื้อเยื่อระดับเต้านมจำนวน 5 ตำแหน่งได้ค่าเฉลี่ยซีทีที่เฉลี่ยอยู่ในช่วง -11.1 ถึง -18.3 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 4.6 ถึง 7.5 โดยมีค่าเฉลี่ยเลขซีทีที่เท่ากับ -14.38 สำหรับความสม่ำเสมอบริเวณเนื้อเยื่อระดับช่องท้องจำนวน 6 ตำแหน่ง ค่าเฉลี่ยซีทีที่เฉลี่ยอยู่ในช่วง -11.4 ถึง 8.3 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 5.0 ถึง 11.8 โดยมีค่าเฉลี่ยเลขซีทีที่เท่ากับ -3.6



ภาพที่ 103 การประเมินค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา

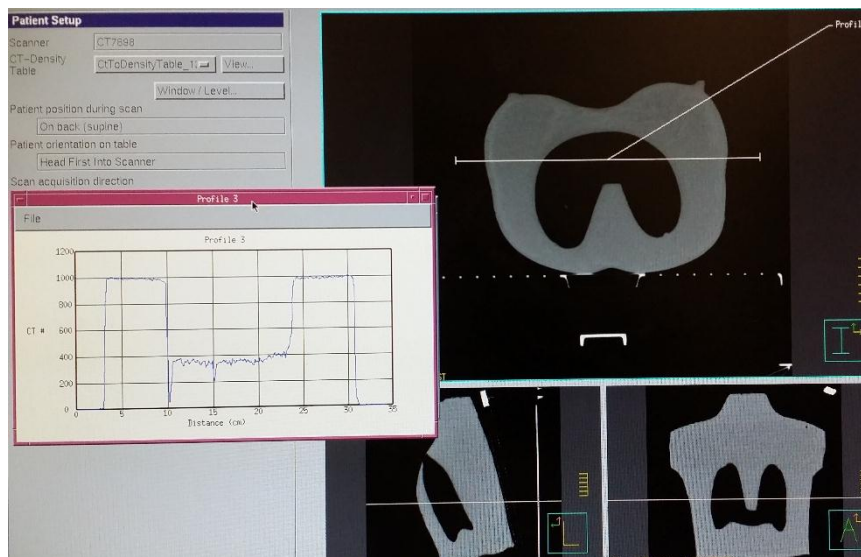


ภาพที่ 104 การประเมินค่าความสม่ำเสมอภาพตัดขวางเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านม

ตารางที่ 13 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	

สำหรับการประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยการสร้างโปรไฟล์แนวขวางหุ่นจำลองทรวงอกได้ผลการประเมินแสดงดังภาพที่ 105 พบว่าหุ่นจำลองมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่เหมือนมนุษย์ โดยปอดอยู่ภายในหุ่นจำลองและรูปร่างภายนอกคล้ายกับมนุษย์จริงสามารถแสดงภาพตัดขวางแนว axial, sagittal และ coronal views ได้ดังภาพที่ 69



ภาพที่ 105 การประเมินค่าความสม่ำเสมอจากภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรวงอกที่เนื้อเยื่อระดับเต้านมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองอึ้งเชิงกราน

ผลการวัดค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อภายในของหุ่นจำลองอึ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 14 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยภายในหุ่นจำลองเท่ากับ 1.03 ลูกบาศก์เซนติเมตร และความสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 0.03 โดยหุ่นจำลองมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยแสดงถึงเนื้อเยื่อของหุ่นจำลองมีความสม่ำเสมอที่ดี หากประมาณช่วงจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้พบว่าหุ่นจำลองมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1 – 1.06 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 14 ผลของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของหุ่นจำลองอึ้งเชิงกราน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

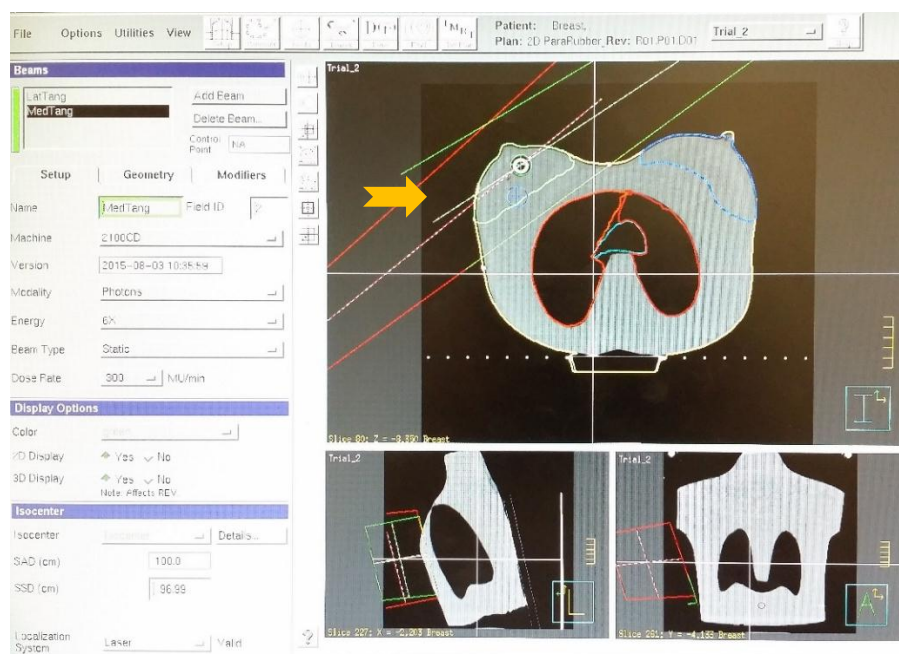
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.03	0.03

ขั้นตอนที่ 7 ผลการทดสอบการวัดปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบความถูกต้องการวางแผนการรักษา

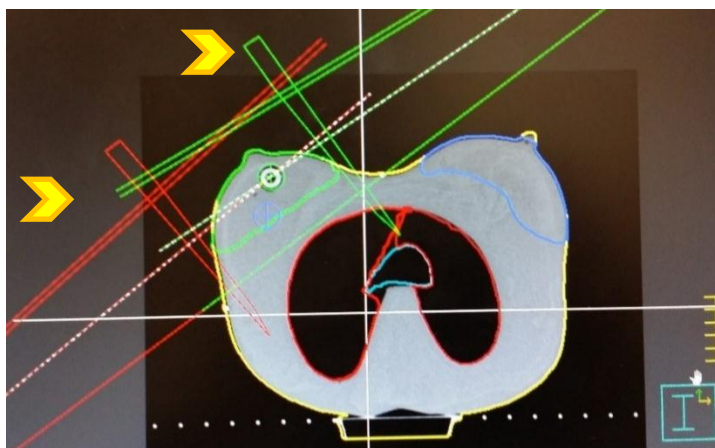
การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีใช้วิธีการเปรียบเทียบปริมาณรังสีระหว่างการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานกับค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมและผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูก

7.1 ผลการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ผลการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยวางแผนการรักษาด้วยการฉายรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคบริษัท Variance รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV และอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU แผนการรักษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยแผนการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ จากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ดังแสดงดังภาพที่ 106 สำหรับพารามิเตอร์ที่ได้จากการวางแผนการรักษาประกอบด้วย ค่าตำแหน่งการหมุนของเตียงผู้ป่วย (couch) เท่ากับ 0 องศา มุมของแกนตรี (Gantry) เท่ากับ 50.5 และ 230.5 องศา สำหรับลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields ตามลำดับ มุมคอลลิเมเตอร์ (Collimator) เท่ากับ 348.7 องศา การฉายทั้งสองทิศทางใช้การเปิดลำรังสีให้มีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งด้วยขนาดพื้นที่ 10x17 ตารางเซนติเมตร กำหนดตำแหน่งจุดหมุน (Isocenter) ระหว่างลำรังสีทั้งสองทิศทางที่ตำแหน่งของหัววัดรังสีซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางลำรังสีแสดงดังภาพที่ 106 ใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge เพื่อลดขนาดของเนื้อเยื่อเต้านมเพื่อการฉายรังสีบนพื้นที่ไม่ตั้งฉากกับลำรังสีเนื่องจากความโค้งของเต้านมส่งผลให้ปริมาณรังสีภายในเต้านมไม่ครอบคลุมก้อนมะเร็งแสดงดังภาพที่ 107 การวิจัยครั้งนี้ใช้ wedge ขนาด 15 องศาทั้งสองทิศทางลำรังสีแสดงดังภาพที่ 107 (หัวลูกศรแสดง wedge ทั้งสองทิศทาง)



ภาพที่ 106 การวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ทิศทางลำรังสี medial และ lateral tangential fields จุดหมุนระหว่างลำรังสีอยู่ในกึ่งกลางลำรังสีซึ่งเป็นตำแหน่งหัววัดรังสี (ลูกศรชี้)



ภาพที่ 107 การวางแผนการรักษาที่ใช้อุปกรณ์ปรับแต่งลำรังสีชนิด wedge ขนาด 15 องศาเพื่อชดเชยส่วนของเนื้อเยื่อเต้านม (หัวลูกศรสีเหลืองแสดง wedge ทั้งสองทิศทาง)

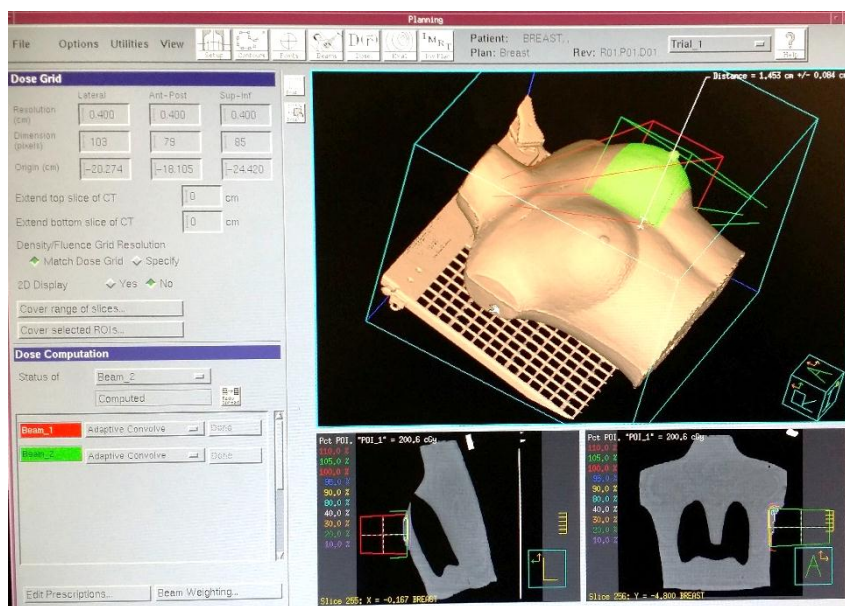
การวางทิศทางลำรังสีทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ใช้วิธีการประเมินภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal views) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal views) ดังภาพที่ 108 (a) และ 108 (b) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสร้างภาพตัดขวางหุ่นจำลองทรงอกให้เป็นภาพ 3 มิติ เพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางลำรังสีได้ดียิ่งขึ้นแสดงดังภาพที่ 109 โดยการวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติใช้การเปิดพื้นที่ลำรังสีด้วยคอลลิเมเตอร์ในลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้ลำรังสีเปิดเป็นบริเวณกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งและเนื้อเยื่อเต้านมปกติรอบก้อนมะเร็ง สำหรับการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติเป็นเทคนิคการรักษาที่จำกัดขอบเขตลำรังสีให้ครอบคลุมเฉพาะเต้านมเพื่อลดปริมาณรังสีที่เนื้อเยื่อปกติที่อยู่รอบเต้านมด้วยการใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็งดังภาพที่ 110 นอกจากนี้การวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักการให้ปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ได้ดังแสดงในภาพที่ 111 ผลการปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักการให้ปริมาณรังสีทำให้แผนการรักษาที่เหมาะสมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เปอร์เซ็นต์ค่าน้ำหนักปริมาณรังสีทิศทาง lateral และ medial tangential เท่ากับ 46.5% และ 53.5% ตามลำดับ



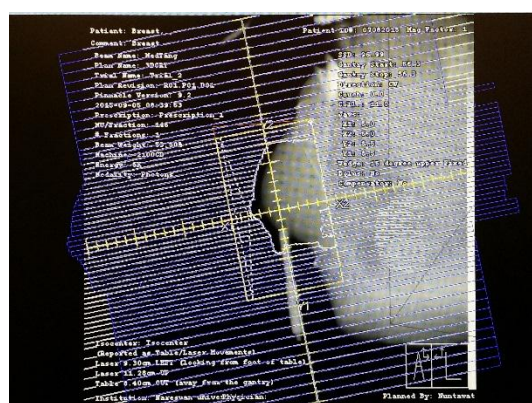
a) ภาพตัดขวาง sagittal views

b) ภาพตัดขวาง coronal view

ภาพที่ 108 ภาพตัดขวางแนวด้านข้าง (sagittal view) และแนวด้านหน้า-หลัง (coronal view)



ภาพที่ 109 ภาพหุ่นจำลองทรวงอกในลักษณะภาพ 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของทิศทางที่กำหนดลำรังสี

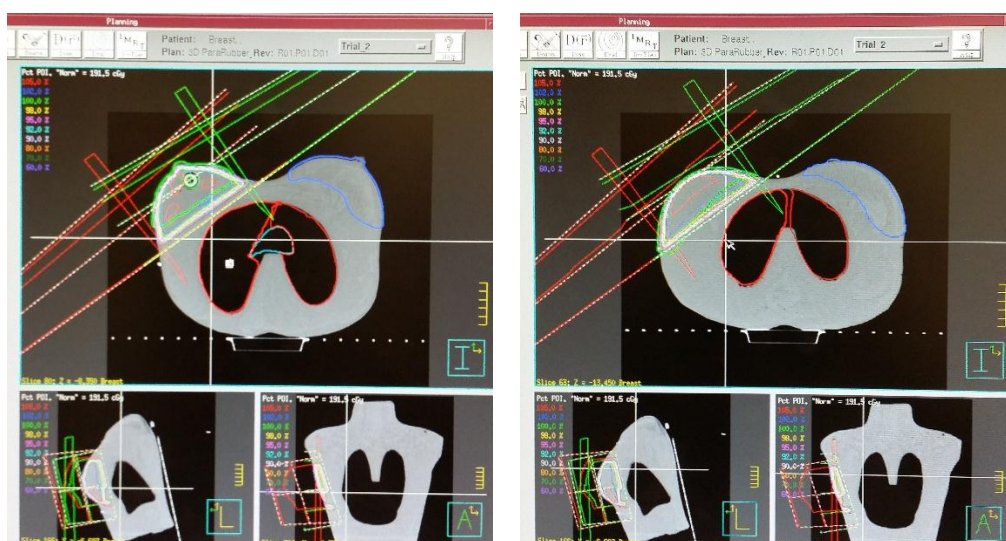


ภาพที่ 110 การใช้มัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (Multileaf collimator) ทำให้พื้นที่ลำรังสีมีลักษณะเดียวกับขนาดก้อนมะเร็ง



ภาพที่ 111 การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักปริมาณรังสีในแต่ละลำรังสี (beam weighting) ของเทคนิคการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติ

การกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) ที่ได้จากการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกแสดงดังภาพที่ 112 ซึ่งเป็นการกระจายปริมาณรังสีในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร ผลการวางแผนการรักษาพบว่าปริมาณรังสีมีการกระจายปริมาณครอบคลุมก้อนมะเร็งค่อนข้างดี โดยการใช้ wedge ขนาด 15 องศาสามารถลดผลที่เกิดจากการโค้งงอของเต้านมทำให้ค่าปริมาณรังสีสูง (hot spot) ไม่เกิน 105% ตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดค่าปริมาณรังสี (Normalization point) มีค่าปริมาณรังสีเท่ากับ 191.5 cGy การส่งแผนการรักษาไปยังห้องฉายรังสีเพื่อทำการวัดค่าปริมาณรังสีจะทำภายหลังการตรวจสอบแผนการรักษาที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาโดยนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทางรังสีรักษา



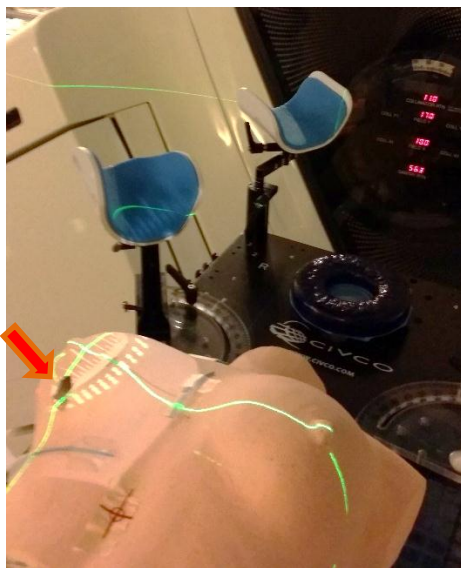
ภาพที่ 112 ผลการวางแผนการรักษาโรคมะเร็งเต้านมในหุ่นจำลองทรวงอกในระนาบกึ่งกลางลำรังสีและระนาบเหนือกึ่งกลางลำรังสีเป็นระยะ 5 เซนติเมตร

7.2 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองทรวงอก

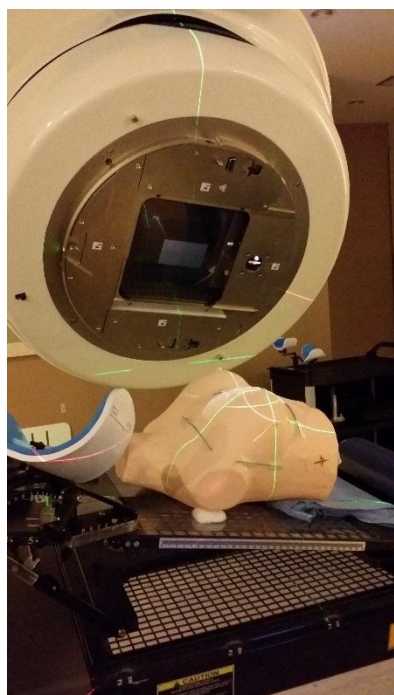
แผนการรักษาหุ่นจำลองทรวงอกจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาถูกส่งเข้าระบบเครื่องเร่งอนุภาคทำให้สามารถระบุตำแหน่งการฉายรังสีบนหุ่นจำลองตามแผนการรักษาได้ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับจัดตำแหน่งการฉายรังสีประกอบด้วย ค่าตำแหน่งเตียง การหมุนของหัวเครื่อง การหมุนคอลิเมเตอร์ และพื้นที่ฉายรังสี สำหรับการฉายรังสีใช้วิธีการแบ่งฉาย (fractionation) ตามการรักษาจริงด้วยการกำหนดค่าปริมาณรังสีสำหรับการฉายครั้งละ 200 cGy ที่ตำแหน่งจุดหมุนเครื่องซึ่งเป็นตำแหน่งที่วางหัววัดรังสี การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV แสดงดังภาพที่ 113 สำหรับการวัดค่าปริมาณในหุ่นจำลองทรวงอกใช้วิธีการใส่หัววัดรังสีชนิด ionization chamber ขนาด 0.6 cc ลงในช่องที่เจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีซึ่งอยู่ใต้ราวนมขวาดังแสดงในภาพที่ 114 โดยตำแหน่ง sensitive volume ของหัววัดรังสีอยู่ตำแหน่งหัวนมหุ่นจำลองที่ระดับลึกใต้ผิวหนัง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าปริมาณรังสีเพื่อการรักษา (prescription dose) หัววัดรังสีสามารถวางในช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกได้อย่างแนบสนิทเพื่อลดอิทธิพลจาก scattered radiation เข้ามายังหัววัดรังสีซึ่งเกิดจากช่องอากาศระหว่างหัววัดรังสีและหุ่นจำลองที่ทำให้ค่าปริมาณรังสีเกิดความผิดพลาดได้ การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกทิศทาง lateral และ medial tangential แสดงดังภาพที่ 115



ภาพที่ 113 การจัดตำแหน่งฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ



ภาพที่ 114 ช่องเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีบริเวณใต้ราวนมขวาของหุ่นจำลอง ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสี อยู่ตำแหน่งจุดหมุนอ้างอิงสำหรับคำนวณค่าปริมาณรังสี



ภาพที่ 115 การฉายรังสีหุ่นจำลองทรวงอกในทิศทาง lateral และ medial tangential fields ด้วยเครื่อง อนุภาคพลังงาน 6 MV

7.3 การเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี

ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกจำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่วัดได้ทั้งเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาพบว่าค่าความแตกต่างปริมาณรังสีของแผนการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างปริมาณรังสีระหว่างการคำนวณและวัดจริงมีค่าน้อยกว่า 3% ทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการปลดปล่อยปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคและการคำนวณค่าปริมาณรังสีของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ซึ่งส่งผลให้การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากหากกำหนดปริมาณรังสีให้ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องทำให้สามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้ดีและเนื้อเยื่อปกติได้รับปริมาณรังสีน้อยทำให้ลดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีได้ดี นอกจากนี้หุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถจัดตำแหน่งสำหรับการฉายรังสีได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

7.4 ผลการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ผลที่ได้จากการวัดค่าปริมาณรังสีในตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ในการกำหนดค่าปริมาณรังสีเพื่อการรักษาจากการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งตำแหน่ง Point A, rectal point และ bladder point พบว่าเมื่อกำหนดปริมาณรังสีที่ normalization point (Point A) เท่ากับ 0.5 Gy ใช้เวลาในการฉายรังสี 37.6 วินาที โดยปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเปรียบเทียบกับค่าการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในตำแหน่งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 15 โดยค่านับวัดและผลการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข

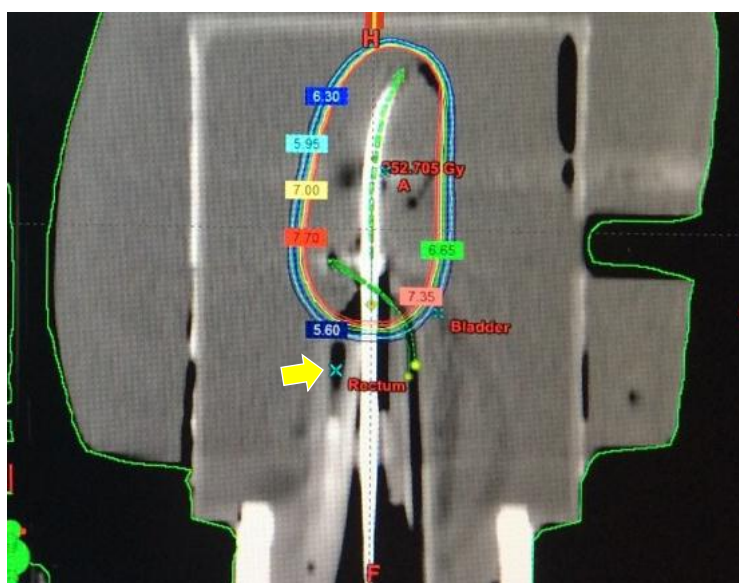
ตารางที่ 15 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา การวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสี และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ ในหุ่นจำลอง

Point dose verification	Treatment Planning (Gy)	Measurement (Gy)	% difference
Point A	0.504	0.650	28.97
Rectal Point	0.243	0.241	-0.82
Bladder point	0.511	0.572	11.91

จากตารางที่ 15 พบว่าค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ตำแหน่ง Point A, Rectal Point และ Bladder point เท่ากับ 28.97, 0.82 และ 11.91 ตามลำดับ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างของการนับวัดปริมาณรังสีประเด็นแรกเกิดจากระยะจากต้นกำเนิดรังสี (source) ถึงหัววัดรังสีค่อนข้างสั้นจึงส่งผลต่อค่าปริมาณรังสีที่นับวัดได้เนื่องจากที่บริเวณใกล้ต้นกำเนิดรังสีมีความแตกต่างของปริมาณรังสีสูง (high dose gradient) ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีค่อนข้างมาก โดยพบว่าปริมาณรังสีเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วจากระดับ 100 Gy ถึง 0.5 Gy ที่ตำแหน่ง Point A ในระยะ 2 เซนติเมตร นอกจากนี้เนื่องจากหัววัดรังสีมีขนาดใหญ่ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เพิ่มระยะทางการวัดค่าปริมาณรังสีซึ่งอาจส่งผลให้ค่านับวัดปริมาณรังสีมีความแตกต่างกันสูง ดังนั้นการใช้หัววัดรังสีที่มีขนาดเล็กลงอาจทำให้การวัดค่าปริมาณรังสีมีความแตกต่างลดลงได้ อย่างไรก็ตามการกำหนดเกณฑ์การประเมินบริเวณที่ dose gradient สูงควรใช้เกณฑ์ที่มีค่าสูง (Venselaar, Welleweerd, & Mijnheer, 2001) นอกจากนี้การประเมินค่าความแตกต่างของปริมาณรังสี

เพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอต่อการประเมิน การพิจารณาค่า distance to agreement (DTA) จากค่า gamma index มาร่วมในการประเมินค่าความแตกต่างในทาง Brachytherapy สามารถทำให้เพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ผลได้มากยิ่งขึ้น (Bannon, Yang, & Rivard, 2011; Yang, Melhus, Sioshansi, & Rivard, 2011)

ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานด้วยรังสีรักษาระยะใกล้มีคุณลักษณะเฉพาะของการกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) ที่ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณรังสีอย่างรวดเร็วในระยะทางที่สั้น ส่งผลให้ค่าปริมาณรังสีที่วัดค่าได้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยเฉพาะหากจัดวางตำแหน่งหัววัดรังสีผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การวางหัววัดรังสีในน้ำมีโอกาสเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งได้ง่ายกว่าการวางในหุ่นจำลองชนิด solid water phantom ที่กำหนดตำแหน่งคงที่ไว้ด้วยการเจาะรูในหุ่นจำลองให้มีขนาดพอดีกับหัววัดรังสี อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองชนิด solid water phantom ไม่สามารถจัดวางอุปกรณ์สอดใส่แร่ได้เนื่องจากเป็นหุ่นจำลองตัน จากผลการประเมินค่าปริมาณรังสีในตาราง 15 พบว่าที่ตำแหน่ง Rectal point มีความแตกต่างของปริมาณรังสีที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาน้อยกว่า 1% เนื่องจากตำแหน่ง rectal point (ลูกศรชี้) อยู่ห่างจากบริเวณที่เป็น high dose gradient ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่ง point A และ Bladder point ที่อยู่ในบริเวณ high dose gradient ดังแสดงในภาพที่ 116



ภาพที่ 116 ตำแหน่งของ Rectal point ที่ห่างจากบริเวณ high dose gradient

ประเด็นที่ 2 จากการออกแบบการยัดอุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสีจากงานวิจัยของ de Almeida และคณะ (de Almeida, Rodriguez, Vianello, Ferreira, & Sibata, 2002) ได้มีการออกแบบหุ่นจำลองในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยครั้งนี้ แต่การใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่มีความแตกต่างกัน โดยเป็นการจัดวางอุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นอย่างถาวรส่งผลให้สามารถจัดอุปกรณ์ในการทำประกันคุณภาพได้ง่ายและไม่ต้องการตำแหน่งความสัมพันธ์ของ point A, bladder point และ rectal point กับตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่ฝังในหุ่นจำลองของ de Almeida และคณะส่งผลให้ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์สอดใส่แร่มีความถูกต้องมากกว่าแต่เนื่องจากอุปกรณ์สอดใส่แร่มี

ราคาที่แพงส่งผลให้หุ่นจำลองดังกล่าวมีราคาที่สูงมากตามราคาของอุปกรณ์สอดใส่แร่ สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสร้างฐานยึดอุปกรณ์สอดใส่แร่เพื่อช่วยจัดตำแหน่งให้ขั้นตอนการสร้างภาพและการวัดปริมาณรังสีเป็นตำแหน่งเดียวกันเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าปริมาณรังสี โดยฐานที่ออกแบบสร้างจากสแตนเลสมีน้ำหนักมากทำให้สามารถยึดและป้องกันการเลื่อนของอุปกรณ์สอดใส่แร่จากแรงดันของน้ำได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังประดิษฐ์ฐานรองหุ่นจำลองเพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายไปยังห้องใส่แร่ภายหลังการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ประเด็นที่ 3 การใช้หัววัดรังสีที่ใช้วัดปริมาณรังสีและระยะที่เหมาะสมในการวัดได้มีการวิจัยจำนวนที่สร้างหุ่นจำลองและหาวิธีการเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในน้ำ (absorbed dose to water) สำหรับเครื่องใส่แร่ HDR Ir-192 source ด้วยหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber เช่น งานของ Austerlitz C และคณะ (Austerlitz & Campos, 2013) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีที่วัดได้จาก BrachyPhantom เปรียบเทียบกับการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาไม่เกิน $\pm 3\%$ ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวได้มีการกำหนดระยะ source-detector distance เท่ากับ 3 เซนติเมตร และใช้การเคลื่อนที่ของ source เป็นระนาบเดียว และงานของ Araki F และคณะ (Araki et al., 2013) ที่ได้ออกแบบเครื่องมือเพื่อช่วยยึดจับหัววัดรังสีชนิด ionization chamber แบบ sandwich ซึ่งช่วยให้การวัดปริมาณรังสีง่ายขึ้น แต่งานวิจัยทั้งสองเป็นการวัดปริมาณรังสีซึ่งมีความแตกต่างจากเงื่อนไขของการรักษาผู้ป่วยจริง โดยเฉพาะกรณีของการรักษามะเร็งปากมดลูกที่มีอุปกรณ์สอดใส่แร่จำนวน 3 แท่ง โดยระยะของการส่งปริมาณรังสีมาจาก source แบบหลายทิศทาง ดังนั้นอาจจะไม่สามารถทดสอบความถูกต้องได้จริงในทางคลินิกอันเนื่องมาจากมีความซับซ้อนของการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ได้อย่างแท้จริง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งมีความซับซ้อนของปริมาณรังสีมากกว่าเนื่องจากการส่งปริมาณรังสีจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ที่ใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูกจริง แต่การออกแบบการทดสอบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ส่งผลให้การวัดปริมาณรังสีทำได้ยากเนื่องจากการกระจายของปริมาณรังสี (dose distribution) มีความซับซ้อนกว่าการใส่แร่เพียงแท่งเดียว อีกทั้งผู้วิจัยต้องการวัดปริมาณรังสีที่จุดที่กำหนดต่าง ๆ ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณที่เป็น high dose gradient ดังนั้นจึงส่งผลให้มีความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณที่มาก ดังนั้น จึงมีหลายงานวิจัยที่เลือกใช้ฟิล์มในการวัดปริมาณรังสีสำหรับ Brachytherapy (Palmer, Lee, Ratcliffe, Bradley, & Nisbet, 2013; Uniyal, Naithani, Sharma, & Srivastava, 2012) (Uniyal, Sharma, & Naithani, 2012) เนื่องจากสามารถประเมินได้แบบระนาบที่มีความละเอียดสูง ช่วยให้สามารถประเมินการกระจายของปริมาณรังสีและประเมินค่า gamma index ได้ ซึ่งจะให้ผลการประเมินที่ดีกว่าการประเมินแบบ point dose จากการวัดด้วยหัววัดรังสี ionization chamber เพียงอย่างเดียว

7.5 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานตามขนาดตัวผู้ป่วย

ผลการทดสอบเพื่อวัดปริมาณรังสีกรณีผู้ป่วยมีขนาดตัวและขนาดมดลูกที่ต่างกันในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบให้สามารถทำการปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์สอดใส่แร่ให้มีขนาดต่างๆ ได้ตามขนาดมดลูกผู้ป่วยที่มีความแตกต่างกัน โดยได้ทำการปรับระยะความกว้าง ovoids ของอุปกรณ์สอดใส่แร่ จำนวน 3 ขนาด ประกอบด้วยขนาดกว้าง ปานกลาง และแคบ เพื่อทดสอบการวางแผนการรักษากรณีมดลูกมีขนาดแตกต่างกันตามขนาดตัวผู้ป่วยได้ผลการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสี การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่ง Point A และ Bladder point เมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids ดังตารางที่ 16 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids ส่งผลให้ปริมาณรังสีมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากในบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง และ

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่ขึ้นกับระยะความกว้างของ ovoids ดังนั้น ความกว้างของ ovoids ที่ใช้ในการทำการควบคุมคุณภาพโดยใช้หุ่นจำลองไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของปริมาณรังสีที่วัดได้ จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าความถูกต้องของปริมาณรังสีเกิดจากการจัดวางหัววัดรังสีระหว่างการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการวัดจริง

ตารางที่ 16 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่ง Point A และ Bladder point เมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids

Dose verification point		Treatment Planning (Gy)	Measurement (Gy)	%different
ตำแหน่งที่ 3	Point A	0.479	0.503	-4.738
	Bladder	0.304	0.272	11.874
ตำแหน่งที่ 2	Point A	0.400	0.496	-19.268
	Bladder	0.130	0.138	-5.757
ตำแหน่งที่ 1	Point A	0.540	0.495	9.167
	Bladder	0.395	0.367	7.734

บทที่ 5

สรุปผล

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกจากยางพาราสำหรับใช้ในการตรวจสอบและวัดค่าปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม โดยทำการฉายรังสีเอกซ์พลังงานสูงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV การศึกษาวิจัยประกอบด้วยการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองทรวงอกให้มีสัดส่วนใกล้เคียงกับหญิงไทยและหุ่นจำลองมาตรฐาน การพัฒนาสูตรยางพาราสำหรับสร้างหุ่นจำลองยางพาราให้มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์ การประเมินความหนาแน่นของหุ่นจำลองทรวงอกด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสีเพื่อประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีและการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค ผลการออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกทำให้ได้หุ่นจำลองสัดส่วนรอบอก 37 นิ้ว รอบเอว 34 นิ้ว ประกอบด้วยส่วนคอ ส่วนลำตัว และส่วนท้อง ภายในหุ่นจำลองได้ออกแบบให้มีปอดเพื่อให้สามารถทำการวางแผนการรักษาได้เหมือนกับมนุษย์จริง การวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองใช้วิธีการเจาะรูที่เต้านมขวาให้มีขนาดเท่ากับหัววัดรังสีชนิด ionization chamber เพื่อวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอก สำหรับการสร้างแม่พิมพ์เพื่อหล่อแบบหุ่นจำลองทรวงอกด้วยวัสดุเรซินผสมไฟเบอร์พบว่าสามารถใช้ในการหล่อแบบได้ดี โดยผิวของหุ่นจำลองมีความเรียบเนียน การยึดแม่พิมพ์ที่ประกบกันด้วยน็อตสามารถช่วยลดการรั่วไหลของน้ำยางพาราขณะเทเพื่อหล่อแบบได้อย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการใช้แม่พิมพ์เพื่อการอบยางพาราในขั้นตอนการขึ้นรูปเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงติดต่อกันเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงต่อครั้งและใช้ในการสร้างหุ่นจำลองมากกว่า 10 ครั้งส่งผลให้แม่พิมพ์เกิดการแตกร้าวในบางส่วนแต่สามารถซ่อมแซมได้

สำหรับการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปเพื่อใช้สร้างหุ่นจำลอง พบว่าปริมาณการเติม SSF มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง โดยการเติม SSF ในตัวอย่างยางปริมาณมากขึ้นทำให้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวเร็วขึ้น และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลง ดังนั้นควรคำนึงถึงปริมาณการใช้ SSF ที่เหมาะสมเพื่อให้ยางสามารถจับตัวและอบแห้งได้โดยที่ยังคงสมบัติเชิงกลอยู่ในระดับค่าที่ยอมรับได้ ตัวอย่างยางที่เติม SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียกใช้ระยะเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวประมาณ 27.60 นาที ซึ่งเป็นเวลาเหมาะสมที่สามารถเทน้ำยางปริมาณมากอย่างช้าๆ ลงในแม่พิมพ์ของหุ่นจำลองก่อนน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อน และระดับค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) มีค่าสูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม 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 และช่วงของอุณหภูมิการสลายตัวกว้างขึ้นเล็กน้อย ($T_{d \text{ onset}}$ ถึง $T_{d \text{ end}}$) ทำให้ทราบว่าความร้อนจากการ aging และฉายรังสีมีผลให้โครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดทั้งการตัดสายโซ่โมเลกุลยางให้สั้นลงและเกิดแบบ

เชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งเป็นเกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณไม่มากนัก 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 โดยพบว่ายางที่ผ่านการให้ความร้อน (aging) และการฉายรังสีมีความยืดหยุ่นลดลงหรือความเป็นอีลาสติกลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นของหุ่นจำลองยางพาราสรุปได้ว่าการฉายรังสี 200 – 6,000 cGy ทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของหุ่นจำลองยางพารามีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ผลการประเมินความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่ระดับเนื้อเยื่อระดับเต้านมและช่องท้อง พบว่าค่าเฉลี่ยของเลขซีทีมีค่า -14.38 และ -11.4 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการประเมินพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์จริงซึ่งมีค่าเลขซีทีตั้งแต่ -100 ถึง 100 (Fat and Soft tissue) สำหรับผลการทดสอบการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นด้วยการฉายรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ด้วยแผนการรักษาที่ได้จากการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาเทคนิคการรักษาสองมิติและสามมิติที่มีลำรังสีทิศทาง medial และ lateral tangential fields พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีมีค่าเท่ากับ 2.3% และ 1.8% สำหรับเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติตามลำดับ ผลความแตกต่างมีค่าไม่เกินข้อกำหนด 3% ทำให้สรุปได้ว่าหุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นจากยางพาราในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการตรวจสอบความถูกต้องของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่องเร่งอนุภาคตามแผนการรักษา การตรวจสอบค่าปริมาณรังสีดังกล่าวเป็นการประกันคุณภาพเครื่องมือและแผนการรักษาเพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระบวนการรักษาด้วยรังสีรักษาที่มีพลังงานสูงมีความถูกต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดภาวะแทรกซ้อนจากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาดได้

สำหรับการสร้างหุ่นจำลองอวัยวะกรรณยางพาราทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีน้ำหนักเมื่อไม่ใส่น้ำเท่ากับ 8 กิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อยางพาราเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีค่าแตกต่างจากความหนาแน่นของน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์ ความสม่ำเสมอ (uniformity) ของเนื้อยางพาราที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นเท่ากับ 0.03 และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีระหว่างการวัดและการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาพบว่ามีความแตกต่างของปริมาณรังสีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ในบริเวณที่ห่างจาก high dose gradient (Rectal point) และความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 29% ในช่วง high dose gradient (Point A) จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองยางพาราที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกได้ โดยทำการวัดค่าปริมาณรังสีในช่วงที่ห่างจากบริเวณที่เป็น high dose gradient โดยสามารถกำหนดจุดในการวัดที่จุดใดๆ ได้ นอกเหนือจากตำแหน่ง point A นอกจากนี้ยังสามารถนำหุ่นจำลองอวัยวะกรรณยางพาราไปประยุกต์ใช้กับแผนการรักษาอื่นๆ ที่ใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่ที่แตกต่างกันได้ อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ในการวัดรังสีระยะไกลได้ ซึ่งนอกจากเป็นประโยชน์ต่อการวัดปริมาณรังสีแล้วยังสามารถนำหุ่นจำลองที่ได้ไปประยุกต์ในการฝึกทักษะ การสร้างภาพและการวางแผนการรักษาของนักฟิสิกส์การแพทย์ได้

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองทรวงอกและหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานจากน้ำยางพาราที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์สามารถนำไปใช้ในการวัดค่าปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมและมะเร็งปากมดลูก ผลที่ได้จากการตรวจสอบปริมาณรังสีเป็นการประกันคุณภาพการรักษาเพื่อให้การกำหนดปริมาณรังสีสำหรับการรักษามีความถูกต้องแม่นยำและป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากความผิดพลาดที่เกิดจากอวัยวะปกติได้รับรังสีส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองทรวงอกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปใช้ในการฝึกทักษะให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา เช่น นิสิตแพทย์ นิสิตฟิสิกส์การแพทย์ นิสิตรังสีเทคนิค หรือนิสิตพยาบาล เป็นต้น นอกจากนี้หุ่นจำลองทรวงอกที่สร้างขึ้นจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าปริมาณรังสีโรคมะเร็งปอดและมะเร็งตับได้ด้วยการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดรังสีที่ปอดและตับเพื่อศึกษาปริมาณรังสีจากแผนการรักษาได้เนื่องจากหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นและคุณสมบัติเหมือนมนุษย์ตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง สำหรับหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งรังไข่และมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้

การสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองจากเรซินผสมไฟเบอร์ทำให้ทราบว่าการใช้วัสดุดังกล่าวสามารถสร้างหุ่นจำลองที่มีความสวยงาม ผิวเรียบ ไม่เกิดรอยต่อบริเวณที่ประกบกัน และระหว่างเหน้ายางพาราก่อนการอบด้วยความร้อนไม่เกิดการรั่วไหลของน้ำยางพารา อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 ได้มีการแก้ปัญหาข้อจำกัดในเรื่องของการสร้างแม่พิมพ์จากปูนปลาสเตอร์จากการวิจัยในปีที่ 1 เนื่องจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ไม่สามารถทนการอบความร้อนได้ การศึกษาวิจัยในระยะที่ 2 จึงแก้ไขด้วยการใช้แม่พิมพ์จากเรซินผสมไฟเบอร์ที่นอกจากไม่เกิดการสึกกร่อนจากน้ำยางพาราผสมสารเคมีและมีน้ำหนักเบา แต่แม่พิมพ์ดังกล่าวมีข้อจำกัดการใช้งานเนื่องจากหากทำการอบด้วยความร้อนสูงเป็นเวลานานและบ่อยครั้งส่งผลให้แม่พิมพ์เกิดการแตกหักเสียหายได้แต่ยังสามารถขึ้นรูปหุ่นจำลองได้ ดังนั้นหากสร้างแม่พิมพ์ด้วยวัสดุประเภทอื่นที่สามารถทนความร้อนได้ดี เช่น โลหะ หรือพลาสติกอาจทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- AAPM. (2002). Quality control in diagnostic radiology. *Report No. 74*,
- Araki, F., Kouno, T., Ohno, T., Kakei, K., Yoshiyama, F., & Kawamura, S. (2013). Measurement of absorbed dose-to-water for an HDR (192)Ir source with ionization chambers in a sandwich setup. *Med Phys*, 40(9), 092101.
- 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.
- Austerlitz, C., & Campos, C. A. (2013). A BrachyPhantom for verification of dose calculation of HDR brachytherapy planning system. *Med Phys*, 40(11), 112103.
- Bannon, E. A., Yang, Y., & Rivard, M. J. (2011). Accuracy assessment of the superposition principle for evaluating dose distributions of elongated and curved 103Pd and 192Ir brachytherapy sources. *Med Phys*, 38(6), 2957-2963.
- Barrett, A., Dobbs, J., Morris, S., Roques, T., & Harrowven, J. (2009). *Practical Radiotherapy Planning* (Fourth ed.). London Hodder Arnold.
- C.A. Joslin, A. F., E.J. Hall. (2001). *Principles and Practice of Brachytherapy using afterloading systems*. London: 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).
- de Almeida, C. E., Rodriguez, M., Vianello, E., Ferreira, I. H., & Sibata, C. (2002). An anthropomorphic phantom for quality assurance and training in gynaecological brachytherapy. *Radiother Oncol*, 63(1), 75-81.
- 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.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. (1985). *ICRU report 62 . Dose and Volume. Specifications for Reporting. Intracavitary Therapy in Gynecology*. Maryland: ICRU.

- Khan FM. (2003). *The Physics of Radiation Therapy*. 3rd edn. MD: Lippincott, Williams and Wilkins.
- Palmer, A. L., Lee, C., Ratcliffe, A. J., Bradley, D., & Nisbet, A. (2013). Design and implementation of a film dosimetry audit tool for comparison of planned and delivered dose distributions in high dose rate (HDR) brachytherapy. *Phys Med Biol*, 58(19), 6623-6640.
- Phantoms, R. T. Q. C. Retrieved 11 เมษายน 2556, from <http://www.supertechx-ray.com/QualityControlPhantoms/RadiationTherapyOC.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.
- Uniyal, S. C., Naithani, U. C., Sharma, S. D., & Srivastava, A. K. (2012). Radiochromic film dosimetry of rectal inhomogeneity and applicator attenuation in high dose rate brachytherapy of uterine cervix. *J Appl Clin Med Phys*, 13(1), 3654.
- Uniyal, S. C., Sharma, S. D., & Naithani, U. C. (2012). A dosimetry method in the transverse plane of HDR Ir-192 brachytherapy source using gafchromic EBT2 film. *Phys Med*, 28(2), 129-133.
- Van Dyk, J., Barnett, R. B., Cygler, J. E., & Shragge, P. C. (1993). Commissioning and quality assurance of treatment planning computers. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 26(2), 261-273.
- Venselaar, J., Welleweerd, H., & Mijnheer, B. (2001). Tolerances for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems. *Radiother Oncol*, 60(2), 191-201.
- Yang, Y., Melhus, C. S., Sioshansi, S., & Rivard, M. J. (2011). Treatment planning of a skin-sparing conical breast brachytherapy applicator using conventional brachytherapy software. *Med Phys*, 38(3), 1519-1525.
- กรมวิชาการเกษตร, ค. ส. (2556). ยางพารา. [รายงาน]. *Para rubber electrnic bulletin* 1.
- จิตต์ลัดดา, ศ. (2553). เทคโนโลยียางพารา *Natural Rubber Technology* (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคโนโลยีคอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด
- ชมรมฟื้นฟูสุขภาพมะเร็ง. (2553). มะเร็งเต้านม. Retrieved 9 เมษายน, 2556, from <http://www.siamca.com/knowledge-id52.html>
- ชวนชม สกนธวัฒน์ (2535). นรีเวชวิทยา. สำนักพิมพ์ คอมเพรส แอนด์ ดีไซน์ ขอนแก่น(2), 9-14.
- 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., ตัณฑะผลิน, ป., กุลตวนิช, ก., & สกฤรัตน์, เ. 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., & เชาวันชื่น, บ. (2554). การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นไบนารีจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. 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, ข. (2537). ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
- วรารณ, ข. (2549). ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน *Natural Rubber : Production and Application* (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนวิจัย (สกว.).
- วิจิตชลชัย, ณ. (2550). “เอกสารประกอบบทปฏิบัติการ หลักสูตร การผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง”. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร
- ศรีมนินท์นิมิต, ว. (2555). มะเร็งเต้านม พบเร็ว รอดสูง. Retrieved 3 เมษายน, 2556, from www.tscor.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.