



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองอัจฉิกรานของการ
ฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก”

โดย นางสาวสุมาลี ยับสันเทียะ และคณะ

พฤศจิกายน 2559

สัญญาเลขที่ RDG5750113

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองอู่เชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก”

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. นางสาวสุมาลี ยับสันเทียะ	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. นางสาวธัญรัตน์ ชูศิลป์	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3. ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
4. นายสมบัติ บุญขวาง	หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช

ชุดโครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วย
โรคมะเร็ง”

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย รหัสโครงการ RDG5750113 ที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำชิ้นงานและการทดสอบชิ้นงาน ตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลอง ขอขอบคุณหน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราชและภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบการประยุกต์ใช้หุ่นจำลองสำหรับจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาเพื่อทดสอบการวัดปริมาณรังสี

รายงานการวิจัยนี้มีความสมบูรณ์โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านจากหน่วยงานดังกล่าวข้างต้นมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร.....	11
บทคัดย่อ.....	14
Abstract.....	15
บทที่ 1	16
บทนำ.....	16
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	16
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
บทที่ 2	18
ทบทวนวรรณกรรม	18
1. มะเร็งปากมดลูก	18
2. การรักษา มะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีรักษาระยะใกล้	18
3. กระบวนการรักษา	20
4. กายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิง	20
5. ตำแหน่งอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสีดูดกลืนสำหรับการรักษาแบบ Intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก.....	22
6. หุ่นจำลอง (Model)	23
7. หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา.....	24
8. เครื่องมือวัดปริมาณรังสีชนิด Ionization Chamber	29
9. ยางพารา (Para rubber)	30
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3	37
การดำเนินการวิจัย.....	37
สมมติฐานการวิจัย.....	37
ขอบเขตงานวิจัย.....	37

วิธีวิจัย	37
บทที่ 4	61
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	61
1. ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน.....	61
2. ผลการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลอง	65
3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน.....	70
4. ผลการทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา.....	87
5. ผลการปั้นหุ่นจำลองต้นแบบ	91
6. ผลการสร้างแม่พิมพ์.....	92
7. ผลการสร้างหุ่นยางพาราสำหรับวัดปริมาณรังสี.....	93
8. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของชิ้นงาน.....	95
9. ผลการทดสอบและการประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานยางพารา	95
บทที่ 5	100
สรุปผลการทดลอง	100
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก ก.....	105
แบบฟอร์มสรุปผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่	105
ภาคผนวก ข.....	108
กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์.....	108
ภาคผนวก ค.....	110
คู่มือการจัดอุปกรณ์ สำหรับการประเมินความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ด้วยหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา.....	110
ภาคผนวก ง	112
การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสด	31
ตารางที่ 2 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (32)	41
ตารางที่ 3 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพาราฯ	42
ตารางที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่าง ๆ	47
ตารางที่ 5 ผลการวัดตำแหน่งระยะเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A, bladder และ rectal points จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	61
ตารางที่ 6 เวลาการเริ่มจับตัวของน้ำยางของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนา	65
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่าง ยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ	71
ตารางที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง ยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ	79
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสีด้วย ปริมาณต่าง ๆ	87
ตารางที่ 10 ผลของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	95
ตารางที่ 11 ปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่งต่างๆ	95
ตารางที่ 12 ปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่ง Point A และ Bladder point เมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids	98

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1 การรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้โดยใช้ applicators วางในปากมดลูก	19
ภาพที่ 2 การกระจายของปริมาณรังสีจาก intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก โดยลักษณะของการกระจายของปริมาณรังสีเป็นรูปขมพู	20
ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์อวัยวะในอุ้งเชิงกรานเพศหญิง	21
ภาพที่ 4 นิยามของ point A ตามวิธีของ Manchester system	22
ภาพที่ 5 แสดงการกำหนดตำแหน่งของ bladder และ rectal points	23
ภาพที่ 6 หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom จาก http://www.cnmcco.com/ สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	25
ภาพที่ 7 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom	26
ภาพที่ 8 หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom จาก http://www.supertechx-ray.com สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557	26
ภาพที่ 9 หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)	27
ภาพที่ 10 หุ่นจำลองชนิด Afterloading calibration phantom	28
ภาพที่ 11 หุ่นจำลองชนิด Brachytherapy QA Phantom ของ CIRS	29
ภาพที่ 12 โครงสร้างพื้นฐานของ cylindrical ionization chamber ชนิด Farmer	29
ภาพที่ 13 Water phantom และ applicator พร้อมด้วย PMMA rods ที่มี lead markers และการจัดตำแหน่งหัววัดรังสีชนิด ionization chamber (18)	33
ภาพที่ 14 cross-section ของ BrachyPhantom แสดงตัว cover, base, cartridge สำหรับใส่หัววัด stopper และช่องสำหรับใส่ 6-French plastic flexible catheter (28)	36
ภาพที่ 15 Chamber measurement setup ด้วย sandwich method (a) Geometrical arrangement ของ A1SL ion chambers ทั้ง 2 ตัว และ 192Ir source ภาพ (b) แสดงเครื่องมือจริงของ sandwich measurement device (29)	36
ภาพที่ 16 การวัดความยาวของช่องคลอดโดยวัดจากปากช่องคลอดถึง vaginal fornix	38
ภาพที่ 17 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A	39
ภาพที่ 18 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ bladder point	39
ภาพที่ 19 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ rectal point	39
ภาพที่ 20 เครื่องมือทดสอบความแข็ง	43
ภาพที่ 21 เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึง	44
ภาพที่ 22 Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing	45

ภาพที่ 23 Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermal gravimetric Analysis (TGA)	46
ภาพที่ 24 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy	48
ภาพที่ 25 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินและไฟเบอร์	49
ภาพที่ 26 ขั้นตอนการแกะแม่พิมพ์ออกจากหุ่นต้นแบบ	49
ภาพที่ 27 ตำแหน่งและแนวการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง	51
ภาพที่ 28 การวาดขอบเขต (contour) หุ่นจำลองเพื่อหาความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองอิงเชิงกรานยางพารา	53
ภาพที่ 29 อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้	53
ภาพที่ 30 การประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่เข้ากับฐานยึดที่ออกแบบมาสำหรับงานวิจัย และการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นจำลอง	53
ภาพที่ 31 การจัดตำแหน่งหุ่นจำลองเพื่อสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	54
ภาพที่ 32 การกำหนด rectal point ให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดที่ใส่ภายในหุ่นจำลอง	55
ภาพที่ 33 การกำหนด bladder point ให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัด โดยให้มีระยะห่างจาก central line เป็นระยะ 2 เซนติเมตร	55
ภาพที่ 34 การวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา	56
ภาพที่ 35 window ของการวางแผนการรักษาที่ได้ โดยลักษณะการกระจายของปริมาณรังสีเป็นไปตามมาตรฐานมีรูปร่างเหมือนลูกขมพู	56
ภาพที่ 36 การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าปริมาณรังสีจากการใส่แร่ในหุ่นจำลอง	57
ภาพที่ 37 การวางตำแหน่งของหัววัดรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง bladder point และ rectal point	57
ภาพที่ 38 การจัดหัววัดรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A	58
ภาพที่ 39 เครื่องวัดอุณหภูมิ และความดัน	58
ภาพที่ 40 หน้าเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องใส่แร่ด้วยวิธีรังสีรักษาระยะใกล้	59
ภาพที่ 41 ชุดอะคลิสิกส์สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสีสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ขนาดต่าง ๆ	62
ภาพที่ 42 หัววัดรังสี Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber รุ่น Model N30013	63
ภาพที่ 43 ขนาดของหัววัด PTW Farmer® Ionization Chamber	63
ภาพที่ 44 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองในแนวตัดขวางโดยมีกล่องอะคลิสิกส์สำหรับเติมน้ำ	64
ภาพที่ 45 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหน้า	64

ภาพที่ 46 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหลัง	65
ภาพที่ 47 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ	66
ภาพที่ 48 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ	67
ภาพที่ 49 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	68
ภาพที่ 50 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	68
ภาพที่ 51 เปอร์เซ็นต์ Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ	69
ภาพที่ 52 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ	69
ภาพที่ 53 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ	70
ภาพที่ 54 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (Non x-ray)	72
ภาพที่ 55 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการ Aging	72
ภาพที่ 56 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 200 cGy	73
ภาพที่ 57 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 400 cGy	73
ภาพที่ 58 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 600 cGy	74
ภาพที่ 59 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 800 cGy	74
ภาพที่ 60 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 1000 cGy	75
ภาพที่ 61 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 2000 cGy	75
ภาพที่ 62 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 3000 cGy	76
ภาพที่ 63 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 4000 cGy	76
ภาพที่ 64 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 5000 cGy	77
ภาพที่ 65 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 6000 cGy	77
ภาพที่ 66 เปรียบเทียบโครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่าน และผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ (a) และกราฟที่ overlay (b)	80
ภาพที่ 67 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (Non x-ray)	81
ภาพที่ 68 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging	81
ภาพที่ 69 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 200 cGy	82
ภาพที่ 70 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 400 cGy	82
ภาพที่ 71 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 600 cGy	83
ภาพที่ 72 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 800 cGy	83

ภาพที่ 73 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 1,000 cGy	84
ภาพที่ 74 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 2,000 cGy	84
ภาพที่ 75 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 3,000 cGy	85
ภาพที่ 76 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 4,000 cGy	85
ภาพที่ 77 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 5,000 cGy	86
ภาพที่ 78 โครมาโทแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 6,000 cGy	86
ภาพที่ 79 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่าน และผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	88
ภาพที่ 80 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ยังไม่ ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	89
ภาพที่ 81 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านและ ผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	89
ภาพที่ 82 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านและผ่าน การฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	90
ภาพที่ 83 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงาน ที่ยังไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	90
ภาพที่ 84 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างที่ Aging, ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านและ ผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน	91
ภาพที่ 85 ผลการปั้นแบบหุ่นจำลองต้นแบบจากดินเหนียว	92
ภาพที่ 86 แม่พิมพ์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ผลิตจากเรซินและไฟเบอร์	92
ภาพที่ 87 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราในท่าด้านหน้า โดยมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อวัด ปริมาณรังสีที่ตำแหน่งจุด Point A และ Bladder point	93
ภาพที่ 88 หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราในด้านตัดขวาง	93
ภาพที่ 89 ภาพแสดงหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราในท่าด้านข้าง	94
ภาพที่ 90 ภาพตัดขวางด้านข้างแสดงตำแหน่งของ Rectal point ที่ห่างจากบริเวณ high dose gradient	97

แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การพัฒนาหุ่นจำลองอึ่งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับ
มะเร็งปากมดลูก

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาอังกฤษ) Development of Brachytherapy Pelvic Phantom for
Cervical Cancer

หัวหน้าโครงการ : นางสาวสุมาลี ยับสันเทียะ
หน่วยงานต้นสังกัด : ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
หน่วยงานร่วมโครงการ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช
ภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน

คำสำคัญ (keyword) ของการวิจัย: มะเร็งปากมดลูก, การวัดปริมาณรังสี, หุ่นจำลอง, Cervical
Cancer, Radiation Dosimetry, Phantom
งบประมาณ : 456,100 บาท

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่พบบ่อยเป็นอันดับต้นในเพศหญิง และส่วนใหญ่รักษาด้วยรังสี
ระยะใกล้ (Brachytherapy) ประสิทธิภาพของการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้เกี่ยวข้องกับ
ความถูกต้องของกระบวนการรักษา ประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ และระบบวางแผนการรักษา
ดังนั้นการตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสีของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาโดยเทียบกับการ
วัดจริงในหุ่นจำลองจึงเป็นสิ่งสำคัญ หุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีทางรังสีรักษาในปัจจุบันถือ
ได้ว่ามีค่อนข้างน้อย และที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดก็ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อีกทั้ง
หุ่นจำลองสำหรับการฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ที่เหมาะสมสำหรับการใส่
อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูก นั้นยังไม่มีขายในท้องตลาดด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดพัฒนา
หุ่นจำลองอึ่งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูกจากยางพาราเพื่อตรวจสอบ
การประกันคุณภาพ และการตรวจสอบอัลกอริทึมในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ซึ่งจะทำให้
การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอึ่งเชิงกรานสำหรับการวัดปริมาณรังสี เพื่อตรวจสอบการคำนวณ
ปริมาณรังสีของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก

ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการวิจัย

การวิจัยเริ่มจากการพัฒนาสูตรยางพาราให้มีความหนาแน่นใกล้เคียง 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารโซเดียมซิริโคฟลูออไรด์ (SSF) ในสูตรยาง จากนั้นศึกษาความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา รวมถึงทดสอบการทนต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ด้วยความร้อน และการทนทานต่อรังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ปริมาณ 200 ถึง 6,000 เซนติเกรย์ จากนั้นจึงเลือกสูตรยางพาราที่เหมาะสมมาขึ้นรูปหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน ซึ่งออกแบบให้มีขนาดเท่ากับมาตรฐานหญิงไทย โดยใช้เทคนิคการหล่อแบบและทำยางคงรูปด้วยวิธีการอบด้วยความร้อน หลังจากนั้นนำหุ่นจำลองที่ได้มาทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความสม่ำเสมอโดยพิจารณาค่าเลขซีที และนำไปใช้ในการวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลการพัฒนาสูตรยางพารา พบว่าปริมาณการเติม SSF ลงไปในตัวอย่างเพื่อให้ให้น้ำยางจับตัวและอบแห้งได้นั้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาง นั่นคือตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ในปริมาณมากขึ้น มีผลทำให้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวเร็วขึ้น และทำให้ชิ้นงานยางพารามีความหนาแน่น (Density) และค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกล (Tensile Testing) ทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลง สำหรับการศึกษาพบว่าสูตรยางที่เติมปริมาณของ SSF 20 กรัมน้ำหนักเปียก ทำให้ได้ชิ้นงานยางพาราที่มีความหนาแน่น 0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีระดับค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) ตามมาตรฐานที่ตั้งไว้ และมีค่าสูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF นอกจากนี้ยังมีเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวประมาณ 27.60 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สามารถจะเหนี่ยวน้ำยางปริมาณมากอย่างช้า ๆ ลงในแม่พิมพ์ของหุ่นจำลองก่อนที่จะแข็งตัวจับกันเป็นก้อน ดังนั้นสูตรยางที่เติมปริมาณของ SSF 20 กรัมน้ำหนักเปียก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลองมากที่สุด ผลการทดสอบการทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน และการทนทานต่อรังสี ของชิ้นงานยางพาราที่สร้างขึ้นจากสูตรยางนี้ พบว่าสมบัติทางกายภาพ ลักษณะพื้นผิว และสีของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง และสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานยางพารามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นจากสูตรยางนี้สามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผลการขึ้นรูปหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้น ได้หุ่นจำลองที่มีน้ำหนักเท่ากับ 8 กิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อยางพาราเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความสม่ำเสมอ (uniformity) ของเนื้อยางพาราที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่น 0.03 และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการวัดและการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างของปริมาณรังสีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในบริเวณที่ห่างจาก low dose gradient (Rectal point) และ มากสุดถึง 29% ในช่วง high dose gradient (Point A)

3. สรุปผลการวิจัย

หุ่นจำลองอู้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นจากยางพารามีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ซึ่งให้ความถูกต้องเมื่อวัดในบริเวณที่เป็น low dose gradient

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

ด้านความหนาแน่นของหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าเป็นที่น่าสนใจมาก เนื่องจากมีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำ การออกแบบหุ่น สิ่งที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติม คือ ในเรื่องของการพัฒนาให้ง่ายต่อการจัดอุปกรณ์ในการวัดปริมาณรังสีสำหรับการใช้งานจริง

ศึกษาถึงการลดทอนของ Applicators จากการวัดจริง โดยวิจัยเปรียบเทียบกับกระบวนการทาง Monte Carlo ก็จะช่วยให้นำหุ่นจำลองไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และควรวัดปริมาณรังสีในจุดที่นอกช่วง high dose gradient

การเพิ่มกระดุกให้มีความสมจริงในตัวหุ่นจำลองจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการทดสอบเพิ่มขึ้น และมีความเสมือนมนุษย์จริงมากยิ่งขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

เผยแพร่ให้ผู้สนใจโดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษาและหน่วยงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการฝึกทักษะการปฏิบัติงานทางรังสีรักษา และการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา เพื่อการรักษาโรคมะเร็งปากมดลูก ด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ และเพื่อการเรียนการสอนการสร้างภาพและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูก

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพของการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้เกี่ยวข้องกับความต้องการของกระบวนการรักษา ประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ และระบบวางแผนการรักษา ดังนั้นการตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสีของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาโดยเทียบกับการวัดจริงในหุ่นจำลองจึงเป็นสิ่งสำคัญ วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอู่เชิงกรานสำหรับการวัดปริมาณรังสี เพื่อตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสีของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก การวิจัยเริ่มจากการพัฒนาสูตรยางพาราให้มีความหนาแน่นใกล้เคียง 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพาราที่ปรับเปลี่ยนปริมาณ SSF ในสูตรยาง จากนั้นศึกษาความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน และทดสอบหาคุณสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับรังสีเอกซ์พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ปริมาณ 200 ถึง 6,000 เซนติเกรย์ จากนั้นขึ้นรูปหุ่นจำลองอู่เชิงกราน ซึ่งออกแบบให้มีขนาดเท่ากับมาตรฐานหญิงไทย โดยใช้เทคนิคการหล่อแบบและทำยางคงรูปด้วยวิธีการอบด้วยความร้อน นำหุ่นจำลองที่ได้มาทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความสม่ำเสมอ โดยพิจารณาค่าเลขซีทีและวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ผลการพัฒนาสูตรยางพารา พบว่า ปริมาณของ SSF ที่เติมลงไปในสูตรยาง มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพารา โดยปริมาณของ SSF ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานยางพารามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลง ผลการทดสอบโดยการให้ความร้อน และการฉายรังสี พบว่าชิ้นงานยางพารามีความยืดหยุ่นลดลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษานี้พบว่าสูตรยางที่เติมปริมาณของ SSF 20 กรัม น้ำหนักเปียก ทำให้ได้ชิ้นงานยางพาราที่มีความหนาแน่น 0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลองมากที่สุด หุ่นจำลองอู่เชิงกรานจากยางพาราที่ขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์ มีน้ำหนักเท่ากับ 8 กิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นของเนื้อยางพาราเฉลี่ยเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื้อยางมีความสม่ำเสมอ ผลการประเมินจากการวัดปริมาณรังสีเทียบกับการวางแผนการรักษา พบว่ามีความแตกต่างของปริมาณรังสีน้อยกว่าร้อยละ 1 ในบริเวณที่ห่างจาก high dose gradient (Rectal point) และมากที่สุดถึงร้อยละ 29 ในช่วง high dose gradient (Point A) โดยสรุป หุ่นจำลองอู่เชิงกรานที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ซึ่งให้ความถูกต้องเมื่อวัดในบริเวณที่เป็น low dose gradient

คำสำคัญ หุ่นจำลองอู่เชิงกราน หุ่นจำลองยางพารา การวางแผนการรักษา มะเร็งปากมดลูก รังสีรักษา

Abstract

The brachytherapy effectiveness for cervical cancer treatment depends on the accuracy of treatment process, instrument performances and treatment planning system. Therefore, the verification of dose calculation from computerized treatment planning compared with the dose measurement in phantom is essential. Consequently, the purpose of this study was to develop the pelvic phantom for dose measurement in quality assurance of computerized treatment planning using in brachytherapy for cervical cancer. The para rubber formulation with varying SSF by weight was evaluated to achieve the mass density equivalent to 1 g/cm^3 . Then, these produced samples were determined densities, mechanical properties, aging and physical properties after irradiation with the doses range from 200 to 6,000 cGy by 6MV x-ray. The phantom which was comparable with Thai women standard size was constructed using casting technique and vulcanization with heat. And then, the determination of density and uniformity of the phantom using computed tomography numbers were considered. In the final process, the dose calculated from treatment planning and dose measured with the phantom was compared. The results showed that the varying of SSF weight in the para rubber formulation affected the physical and mechanical properties of the produced samples. The increasing of SSF weight affected the increasing of density of produced samples, on the other hand, the mechanical properties was decreased. The results of rubber aging and radiation effect testing found the produced samples had lower elasticity but higher strength. The para rubber formulation with 20 g SSF produced 0.87 g/cm^3 density of the samples and was the most satisfaction for phantom construction. The pelvic phantom has a weight of 8 kg, a density of 1.03 g/cm^3 and satisfied uniformity. The dose comparison showed the percentage of dose different less than 1% at the region which was far from high dose gradient region (rectal point) while the most of different of 29% found at the region which was close to high dose gradient region (Point A). In conclusion, the developed pelvic phantom is water equivalent and can be successfully used in radiation dosimetry for quality assurances in brachytherapy with the accuracy of measurement at the low dose gradient region.

Keyword Pelvic Phantom, Para rubber phantom, treatment planning, cervical cancer, radiotherapy

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่พบมากเป็นอันดับต้นในเพศหญิงและมีแนวโน้มพบผู้ป่วยมากขึ้นเรื่อยๆ การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการรักษาค่อนข้างสูงเนื่องจากสามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้อย่างมาก การรักษาด้วยวิธีดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ รังสีรักษาระยะไกล (Teletherapy) และรังสีระยะใกล้ (Brachytherapy) สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกโดยทั่วไปใช้การรักษาทั้ง 2 ประเภทควบคู่กันเนื่องจากรักษาด้วยการฉายรังสีระยะไกลเพียงอย่างเดียวอาจส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนต่ออวัยวะสำคัญอันได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (Bladder) และทวารหนัก (Rectum) สำหรับวิธีการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้เป็นการรักษาด้วยการใส่สารกัมมันตรังสีสอดใส่ไปที่ก้อนมะเร็งโดยตรงทำให้สามารถกำหนดปริมาณรังสีให้กับก้อนมะเร็งได้โดยตรงในขณะที่อวัยวะและเนื้อเยื่อปกติที่อยู่โดยรอบได้รับปริมาณรังสีเพียงเล็กน้อย (1)

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันประเทศไทยยังขาดหุ่นจำลองที่เหมาะสมในการประเมินความถูกต้องของแผนการรักษาที่ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (computer treatment planning system) และความถูกต้องของการทำงานของเครื่องใส่แร่สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ โดยเฉพาะ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของทั้งระบบเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาหรือเครื่องใส่แร่สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้จำเป็นต้องอาศัยหุ่นจำลองที่สามารถสอดใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีเข้าไปได้เพื่อประเมินความถูกต้องของการทำงานของเครื่องมือก่อนการให้ปริมาณรังสีจริง นอกจากนี้หากหุ่นจำลองดังกล่าวสามารถใช้ตรวจสอบปริมาณรังสีที่กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนักได้รับตามข้อกำหนดการประเมินรังสีในขั้นตอนการรักษาจะมีประโยชน์ต่อการรักษาอย่างมาก การประเมินดังกล่าวยังมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์สำหรับการทดสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับเปรียบเทียบกับแผนการรักษาได้

ถึงแม้ว่าหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีทางรังสีรักษามีความสำคัญต่อความถูกต้องของการกำหนดปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยอย่างมากแต่ปัจจุบันมีหุ่นจำลองดังกล่าวค่อนข้างน้อย สำหรับหุ่นจำลองที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดนั้นมีข้อจำกัดค่อนข้างมากเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองที่ขายในท้องตลาดยังเป็นหุ่นจำลองที่ใช้งานเฉพาะด้านไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการตรวจสอบการรักษาเพื่อประเมินปริมาณรังสีที่อวัยวะต่างๆ ได้รับขณะสอดใส่แร่เพื่อการรักษา การพัฒนาหุ่นจำลองสำหรับการฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ที่เหมาะสมสำหรับการใส่อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูกที่มีอวัยวะภายในต่างๆ จึงมีประโยชน์ในการรักษาอย่างมาก ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาหุ่นจำลองอู้งาช้างเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการสอดใส่สารกัมมันตรังสีด้วยวิธีการรังสีรักษาระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูกจากยางพาราเพื่อการประกันคุณภาพ และการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาซึ่งจะทำให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานสำหรับการวัดปริมาณรังสี สำหรับตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสีจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก

บทที่ 2

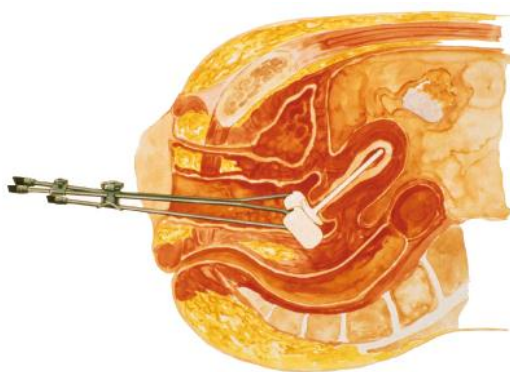
ทบทวนวรรณกรรม

1. มะเร็งปากมดลูก (2)

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

2. การรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ (1)

โรคมะเร็งปากมดลูกที่พบในอันดับต้นๆ ของหญิงไทย กระบวนการรักษามะเร็งปากมดลูกมีหลายวิธีด้วยกันทั้งการผ่าตัด ให้เคมีบำบัด การรักษาด้วยรังสีระยะไกล รวมไปถึงการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ การรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้เริ่มขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 โดยเริ่มจากการรักษาด้วยรังสีเรเดียแบบอัตราแรงรังสีต่ำ (low dose rate: LDR) จนปัจจุบันรักษาด้วยกัมมันตรังสีอัตราแรงรังสีสูง (high dose rate: HDR) โดยกัมมันตรังสีชนิดไอริเดียม 192 (Ir-192) ได้รับความนิยมในการรักษาตั้งแต่ปี ค.ศ.1967 และนิยมรักษาร่วมกับการฉายรังสีภายนอก (external-beam irradiation) หรือการฉายระยะไกลเพื่อการรักษาที่หวังผลให้ผู้ป่วยหายขาดจากมะเร็ง โดยสามารถใช้ในการรักษาตั้งแต่ผู้ป่วยระยะแรกจนถึงระยะท้าย วิธีที่ใช้ในการรักษาโดยทั่วไปเป็นการรักษาระบบแมนเชสเตอร์ (Manchester System) ซึ่งใช้อุปกรณ์ร่วมในการรักษาประกอบด้วย central intrauterine tandem และ small vaginal ovoids จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงดังภาพที่ 1 สำหรับการรักษาด้วยวิธี external-beam irradiation นั้นมักจะใช้เทคนิค parallel opposed fields โดยมีการใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนรูปแบบลำรังสีชนิด Wedge ร่วมด้วย อย่างไรก็ตามจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า หากทำการรักษาด้วย HDR ร่วมกับ external-beam irradiation นั้นทำให้ได้ผลการรักษาและภาวะแทรกซ้อนที่ใกล้เคียงกับ LDR ซึ่งเป็นผลการรักษาที่เหมาะสม



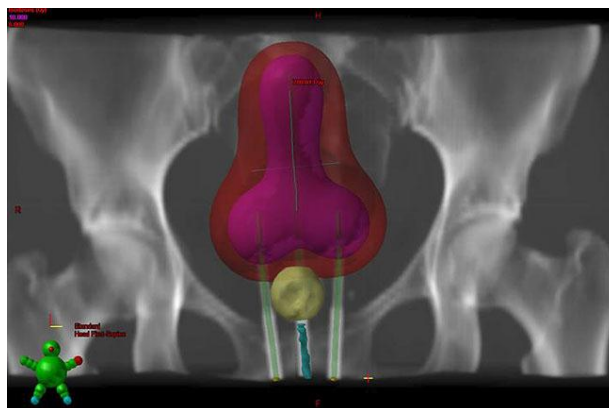
ภาพที่ 1 การรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้โดยใช้ applicators วางในปากมดลูก

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

ผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกชนิด squamous cell cancer นั้นมีขนาดของ primary tumor ที่หลากหลายตั้งแต่ขนาด microscopic subclinical disease จนถึง enlarged tumor ซึ่งอาจจะขยายไปถึง parametrium เข้าไปที่ pelvic side wall รุกรานไปยัง lower vaginal tissues และ infiltrate ที่ body ของมดลูก (uterus) อาจจะมีการรุกรานไปยังอวัยวะหรือเนื้อเยื่อข้างเคียง เช่น rectum และ bladder ได้ โดยการรักษาเพื่อหวังผลให้หายสามารถใช้รักษาด้วย external-beam irradiation และตามด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ ซึ่งขนาดของ primary tumor รวมถึงการขยายไปยังอวัยวะข้างเคียงเป็นสิ่งที่ใช้ในการตัดสินใจว่าแผนการรักษาจะเป็นแบบใดเนื่องจากการรักษาแต่ละแบบมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน โดยการรักษาด้วย intracavitary irradiation อย่างเดียวเหมาะสมสำหรับทำลายก้อนมะเร็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่า 3 - 4 เซนติเมตร ส่วนการรักษาแบบ external-beam irradiation เหมาะสำหรับการรักษาผู้ป่วยที่มีการกระจายของมะเร็งไปที่ต่อมน้ำเหลือง 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 โดยปกติแล้วเนื้อเยื่อของปากมดลูกและช่องคลอดนั้นค่อนข้างดูดซับรังสีและทนต่อการฉายด้วยรังสีอัตราแรงสูง และความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว (rapidly falls off) เมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี การรักษาด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นผลดีต่อเนื้อเยื่อปกติที่อยู่หลังจากปากมดลูก โดยเมื่อ intracavitary source applicators ถูกวางภายในช่องคลอดและมดลูก ตำแหน่งของอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นกับ ขนาดและรูปร่างของก้อนมะเร็ง ดังนั้นอาจจะส่งผลให้ก้อนได้รับปริมาณรังสีต่ำเกินไป และเนื้อเยื่อปกติอาจได้ปริมาณรังสีสูงเกินไป ดังนั้นจึงต้องเพิ่มการรักษาด้วย external-beam irradiation สำหรับรูปร่างของการกระจายของปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ที่เหมาะสมมี

ลักษณะคล้ายลูกชมพู่ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยรูปร่างของการกระจายปริมาณรังสีดังกล่าวอาจใช้วิธีการปรับเวลาของการปลดปล่อยรังสีของกัมมันตรังสีร่วมกับตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ สำหรับปริมาตรก้อนมะเร็งที่ใช้ในการรักษา (Target volume) แบ่งออกเป็น primary tumor และ pelvic lymph nodes โดยอวัยวะเสี่ยงสำคัญที่ต้องคำนึงถึงค่าปริมาณรังสีที่ได้รับ ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (bladder) และทวารหนัก (rectum)



ภาพที่ 2 การกระจายของปริมาณรังสีจาก intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก โดยลักษณะของการกระจายของปริมาณรังสีเป็นรูปชมพู่

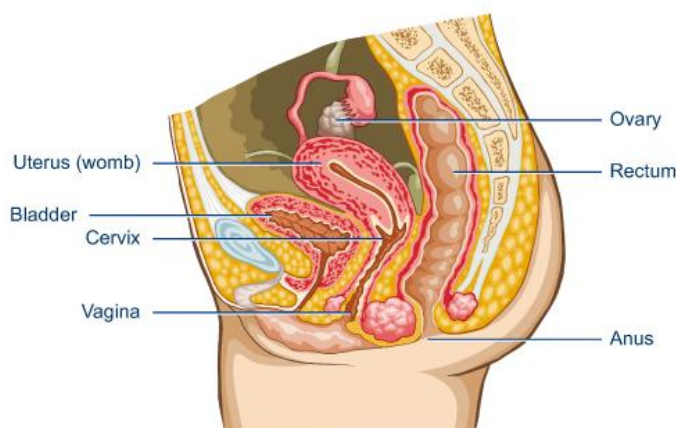
จาก <http://www.varian.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

3. กระบวนการการรักษา (1)

การรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกนั้นผู้ป่วยจะนอนอยู่บนขาหยั่งในท่า lithotomy บนเตียงรักษา โดยปกติคนไข้จะถูกทำให้หมดความรู้สึกต่อความเจ็บปวดด้วยวิธีการดมยาหรือทานยาแก้ปวด หลังจากการจัดอุปกรณ์ในช่องใส่อุปกรณ์แล้วนักรังสีการแพทย์ทำการสร้างภาพถ่ายรังสีด้วยวิธี orthogonal film ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือภาพเอ็มอาร์ไอ จากนั้นนักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทำวางแผนการรักษาเพื่อกำหนดเวลาและตำแหน่งในการรักษาด้วยรังสี สำหรับกระบวนการสอดใส่อุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า applicators ภายในตัวผู้ป่วย โดยปกติจะมีรูปแบบที่คล้ายกันในทุกกรณี โดยในกระเพาะปัสสาวะจะมีการใส่ bladder catheter โดยภายในบอลูนจะมีการใส่สารที่รังสีเพื่อให้ นักฟิสิกส์การแพทย์และแพทย์ทราบตำแหน่งของกระเพาะปัสสาวะและมีประโยชน์กรณีที่ต้องการเติมน้ำเพื่อให้น้ำเต็มกระเพาะปัสสาวะ (full bladder) โดยมีประโยชน์เพื่อช่วยให้ผนังของกระเพาะปัสสาวะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุดส่งผลให้ได้รับปริมาณรังสีน้อยลง สำหรับทวารหนักอาจมีการขยายโดยการใส่ผ้ากอซเพื่อเป็นการดันให้ทวารหนักอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี

4. กายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิง (3)

ภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิงประกอบด้วยอวัยวะต่างๆ ได้แก่ รังไข่ (Ovary) มดลูก (Uterus) กระเพาะปัสสาวะ (Urinary Bladder) ปากมดลูก (Cervix) ช่องคลอด (Vagina) ทวารหนัก (Rectum) และ ช่องทวารหนัก (Anus) โดยความสัมพันธ์ของแต่ละอวัยวะแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์อวัยวะในอุ้งเชิงกรานเพศหญิง

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

ช่องคลอด

ช่องคลอดนั้นเป็นอวัยวะที่เป็นท่อกลางต่อระหว่างปากมดลูกกับอวัยวะสืบพันธุ์ภายนอกผนังด้านหน้ามีความยาวประมาณ 6-8 เซนติเมตร และผนังด้านหลังมีความยาวประมาณ 7-10 เซนติเมตร

ปากมดลูก

ปากมดลูกนั้นเป็นส่วนล่างสุดของมดลูกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่ในช่องท้องและส่วนที่ยื่นโผล่เข้าไปในช่องคลอด 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

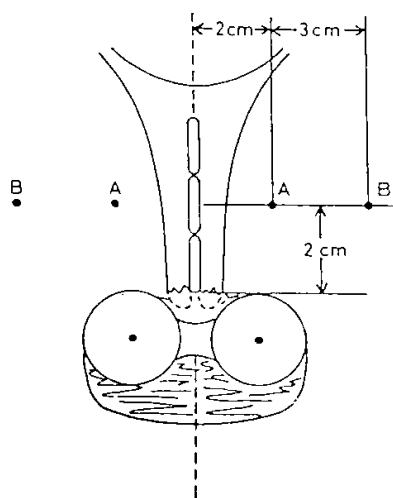
ทวารหนักเป็นส่วนปลายของลำไส้ใหญ่ มีลักษณะเป็นท่อตรงมีความยาวประมาณ 12.5 เซนติเมตร ตรงบริเวณส่วนล่างมีลักษณะพองโต เพื่อเก็บอุจจาระไว้โดยมีลิ้นช่วยพยุงอยู่ตำแหน่งที่ตั้งในเพศชายอยู่ข้างหลังกระเพาะปัสสาวะ ในเพศหญิงอยู่ข้างหลังมดลูก ตรงปลายของไส้ตรงหรือทวารหนัก (Anus) มีกล้ามเนื้อหูรูด 2 อัน ควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก กล้ามเนื้อหูรูดด้านในถูกควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนมัติ ไม่อยู่ใต้บังคับของจิตใจ ส่วนกล้ามเนื้อหูรูดด้านนอกอยู่ใต้บังคับของจิตใจ และสำคัญมากในการควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก

5. ตำแหน่งอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสีตูดกลืนสำหรับการรักษาแบบ Intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก

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

5.1 ตำแหน่งอ้างอิง Point A (4, 5)

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 4 สำหรับการวางแผนการรักษาใช้วิธีการนิยามตำแหน่ง point A ที่ระยะเหนือจาก cervical os (cervical end ของ tandem) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร และออกมาด้านข้างจาก cervical canal เป็นระยะ 2 เซนติเมตร



ภาพที่ 4 นิยามของ point A ตามวิธีของ Manchester system

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

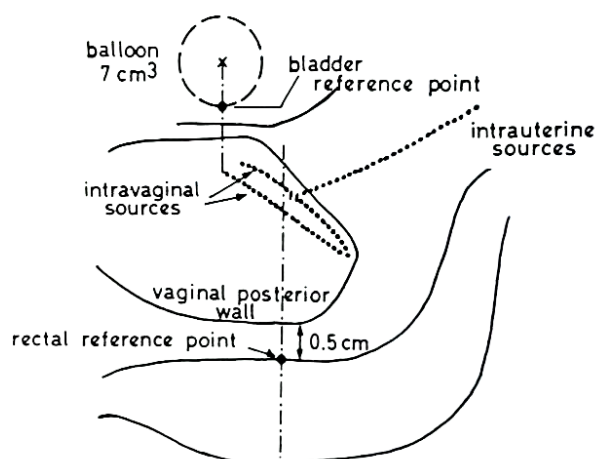
5.2 ตำแหน่งจุดกระเพาะปัสสาวะ (Bladder point) (4, 5)

ตำแหน่งอ้างอิง Bladder point กำหนดจาก Foley catheter โดยเติมด้วยสารทึบรังสี ปริมาตรประมาณ 7 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในบอลลูนเพื่อให้่ายต่อการกำหนดตำแหน่ง นอกจากนี้บอลลูนจะตรึงให้อยู่ในตำแหน่งที่ urethra ในภาพถ่ายรังสีทศทาง AP ซึ่งทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งของ reference point ได้จากเส้นที่ลากจากหน้ามาหลัง (anterio-posterior line) โดยวาดผ่าน

กึ่งกลางของบอลูน และ reference point นี้จะอยู่บนผิวด้านหลังของบอลูน ในภาพถ่ายทางรังสีด้านหน้า จุดอ้างอิงดังกล่าวจึงอยู่บริเวณกึ่งกลางของบอลูน ดังภาพที่ 5

5.3 ตำแหน่งจุดทวารหนัก (Rectal point) (4, 5)

การกำหนดตำแหน่ง Rectal point นั้นสามารถประเมินได้จากภาพถ่ายทางรังสีด้านหน้า ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของ ovoid sources (หรือปลายด้านล่างของ intrauterine source) สำหรับภาพถ่ายรังสีทำด้านข้างนั้นตำแหน่ง rectal point อยู่ที่ตำแหน่งบนเส้นที่ลากจากกึ่งกลางของ ovoid sources โดยอยู่หลัง posterior vaginal wall เป็นระยะ 5 มิลลิเมตรดังภาพที่ 5 ซึ่ง posterior vaginal wall นั้นอาจจะมองเห็นได้จากการใส่ผ้าก๊อซที่ขุบสารทึบรังสีใส่เข้าไปในช่องคลอด



ภาพที่ 5 แสดงการกำหนดตำแหน่งของ bladder และ rectal points

จาก ICRU. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology. ICRU report No. 38. Bethesda, MD:ICRU, 1985

6. หุ่นจำลอง (Model) (6)

หุ่นจำลอง หมายถึง วัสดุสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบของจริงด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถใช้ของจริงเพื่อประกอบการเรียนการสอนได้ เช่น การอธิบายลักษณะและตำแหน่งของอวัยวะภายในร่างกายของคนหรือสัตว์ ในทางรังสีวิทยาหุ่นจำลองยังอาจหมายถึงหุ่นที่ลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ซึ่งอาจนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพในงานรังสีวินิจฉัยและการวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) รวมทั้งการวัดปริมาณและการกระจายของรังสีในหุ่นจำลองเทียบเท่าผู้ป่วยจริงในอวัยวะต่างๆ (Dose Measurement and Dose distribution) ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาทางรังสีรักษา ดังนั้นหุ่นจำลองจึงมีคุณค่าต่อการเรียนการสอนและการฝึกทักษะเพื่อการเรียนรู้เป็นอย่างมาก

หุ่นจำลอง (6) สามารถทำการแบ่งเป็นประเภทดังนี้

- หุ่นรูปทรงภายนอก (Solid Model) เป็นหุ่นจำลองที่ต้องการแสดงรูปร่างหรือรูปทรงภายนอกเท่านั้น โดยในเรื่องของน้ำหนัก ขนาด สีหรือพื้นผิว ลวดลายและมาตราส่วนจะผิดไปจากของจริง
- หุ่นเท่าของจริง (Exact Model) มีขนาดและรูปร่างรายละเอียดทุกอย่างเท่าของจริงทุกประการ สามารถใช้แทนของจริงได้เป็นอย่างดี
- หุ่นจำลองแบบขยายหรือแบบย่อ (Enlarge, Reduce Model) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหุ่นจำลองแบบ มาตราส่วน โดยอาจมีการย่อหรือขยายให้เล็กหรือใหญ่ โดยยังคงเป็นสัดส่วนกับของจริงทุกส่วนและยังสามารถช่วยให้ทราบรายละเอียดและความสัมพันธ์กับของจริงได้
- หุ่นจำลองแบบผ่าซีก (Cut Away Models) เป็นหุ่นจำลองที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะภายใน โดยตัดพื้นผิวบางภายนอกบางส่วนออก
- หุ่นจำลองแบบเคลื่อนไหวทำงานได้ (Working Models) หุ่นจำลองแบบนี้สามารถแสดงให้เห็นส่วนที่ เคลื่อนไหวที่เป็นการทำงานของวัตถุหรือเครื่องจักร โดยนอกจากนี้ยังมีหุ่นจำลองอีกหลายประเภทอาทิเช่น หุ่นจำลองเลียนของจริง (mockup Models) และหุ่นจำลองแบบแยกส่วน (Build up Models) เป็นต้น

สำหรับคณะกรรมการการระหว่างประเทศว่าด้วยเรื่องหน่วยและการวัดรังสี (The International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อและหุ่นจำลอง ไว้ดังนี้ “วัสดุสมมูลสมมูลเนื้อเยื่อคือวัสดุใดๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อในแง่ของการทำปฏิกิริยากับรังสีชนิดก่อก่อไอออน” และ “หุ่นจำลอง คือโครงสร้างใดๆ ที่บรรจุด้วยวัสดุที่แทนเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น และใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาของรังสีในร่างกายมนุษย์” โดยหุ่นจำลองมักถูกนำมาทดสอบมาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Image Equipment) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีและการลดทอนรังสีในเนื้อเยื่อมนุษย์ (7) นอกจากนี้หุ่นจำลองยังสามารถนำมาใช้เพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนเพื่อเพิ่มความเข้าใจและทักษะการปฏิบัติงานทางด้านรังสีรักษาที่ต้องการความถูกต้องและมีรายละเอียดในขั้นตอนการทำงานที่ค่อนข้างสูง

7. หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา (8)

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษาส่วนใหญ่นำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการทางรังสีรักษาทั้งในเรื่องของตรวจสอบผลการคำนวณปริมาณรังสี การตรวจสอบการทำงานเครื่องมือต่างๆ และการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำผู้ป่วยเพื่อทำการฉายรังสีสำหรับการรักษา ตัวอย่างการใช้งานหุ่นจำลองทางรังสีรักษา ได้แก่ การควบคุมคุณภาพการเคลื่อนที่ของ Multi-leaf Collimator (MLC Quality Assurance), การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) และการวัดปริมาณรังสี(Dose Measurement) ที่ปลดปล่อยจากเครื่องเร่งอนุภาค รวมทั้งยังใช้สำหรับวัดการกระจายรังสี (Dose distribution) หรือการคำนวณปริมาณรังสี (Dose Calculation) ให้กับผู้ป่วยเพื่อทำการรักษามะเร็งชนิดต่างๆ ในขั้นตอนของการวางแผนการรักษา (Treatment Planning) หุ่นจำลองที่ใช้ทางรังสีรักษาลดจากวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเพื่อให้มีความสมจริงคล้ายมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และความเหมือนของธาตุที่เป็น

องค์ประกอบ โดยหุ่นจำลองทางรังสีรักษาอาจทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin), ซิลิโคน (Silicone), ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass, พอลิยูรีเทน (Polyurethane, พอลิเมทธีนเมตาอะครีเลต (Polymethymethacrylate, PMMA) หรืออะคริลิก (Acrylics) ซึ่งวัสดุต่างๆ เหล่านี้มีราคาที่แตกต่างกันและบางชนิดเป็นสารอันตรายเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถแบ่งประเภทของหุ่นจำลองทางรังสีรักษาตามลักษณะองค์ประกอบภายในได้เป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

7.1 หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom

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

หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom ทำจากอีพอกซีเรซินที่มีความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิด Ionizing Chamber ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีชนิด Photon และ Electron มีลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีทั้งขนาด 20 x 20 เซนติเมตร และ 40 x 40 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยสร้างให้มีความหนาแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งานประเภทต่างๆ (9)



ภาพที่ 6 หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom

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

หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom เป็นหุ่นจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพโดยทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 7 นิยมใช้สำหรับการตรวจสอบความคงตัวของลำรังสี การควบคุมคุณภาพของ Multi-leaf collimator โดยหุ่นจำลองชนิดนี้สามารถติดตั้งและใช้งานได้ง่าย มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 1% (10)



ภาพที่ 7 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom

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

หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีการออกแบบสำหรับการวัดปริมาณรังสี ตรวจสอบการวางแผนการรักษา วัดการกระจายของรังสีแบบ 2 มิติ มีขนาด 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 8 ภายในมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 0.5% สามารถนำมาใช้สำหรับการฉายรังสีที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 50 KeV ถึง 25 MeV(10)



ภาพที่ 8 หุ่นจำลองชนิด [IMRT Homogeneous Phantom](http://www.supertechx-ray.com)

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

7.2 หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าแบบแรก ภายในมีองค์ประกอบที่ใช้แทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอาจมีรูปร่างที่คล้ายกับร่างกายมนุษย์เพื่อใช้สำหรับพิจารณาคุณลักษณะที่ล้ำรังสีผ่าน เช่น หุ่นจำลอง Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) ดังแสดงในภาพที่ 9 เป็นหุ่นจำลองที่เป็นที่นิยมใช้มากในทางรังสีวิทยาเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 30 ปี และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก โดยหุ่นจำลองประเภทนี้ได้รับการตกแต่งและปรับปรุงจนมีคุณสมบัติที่ความเหมาะสมกับการใช้งาน ผลผลิตจากวัสดุที่สมมูลกับเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ กล้ามเนื้อ (Muscle), กระดูก (Bone), ปอด (Lung) และอากาศ แต่มีราคาที่สูงกว่าหุ่นจำลองชนิดนี้สร้างให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยตัดให้เป็นสไลซ์ตามขวางเพื่อประโยชน์ในการใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีสำหรับการประเมินค่าปริมาณรังสีภายในร่างกาย นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานทางรังสีรักษาตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงการตรวจสอบการรักษา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเต้านมที่สามารถถอดออกได้และมีหลายขนาด เช่น ปริมาตร 200, 400, 600 และ 900 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นต้น (10)



ภาพที่ 9 หุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)

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

7.3 ฟุ่นจำลองสำหรับการวัดปริมาณรังสีด้วยวิธีการรังสีระยะใกล้

ในงานทางการฉายรังสีระยะใกล้จะมีฟุ่นจำลองที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานหลากหลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น Afterloading calibration phantom (11) ดังแสดงในภาพที่ 10 ฟุ่นจำลองผลิตจากวัสดุประเภทอะคริลิกรูปทรงกระบอก (Acrylic cylinder phantom) ใช้สำหรับการวัด source strength ของการรักษาเทคนิค afterloading และใช้สำหรับการสอบเทียบระหว่าง afterloading semiconductor probe กับ reference chamber ฟุ่นจำลอง Afterloading Calibration Phantom มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตรและสูง 12 เซนติเมตร สำหรับการใช้งาน radioactive afterloading source จะถูกใส่ใน afterloading applicator ในตำแหน่งรูตรงกลางของฟุ่นจำลองโดย remote control หลังจาก reference chamber ถูกใส่เข้าไปที่ตำแหน่งรูที่อยู่รอบๆ โดยรัศมีที่ 8 เซนติเมตรจะมีรูอีก 4 รูที่ห่างจากขอบของฟุ่นจำลอง 2 เซนติเมตร เพื่อเป็นรูสำหรับใส่หัววัด ในตำแหน่ง ที่ 0° , 90° , 180° และ 270° สำหรับรูที่ไม่ใช้งานจะมี dummy plugs ปิดรูไว้



ภาพที่ 10 ฟุ่นจำลองชนิด Afterloading calibration phantom

จาก <http://www.ptw.de/typo3temp/pics/f52576119a.jpg> สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

สำหรับ Brachytherapy QA Phantom (12) เป็นฟุ่นจำลองสำหรับการประกันคุณภาพ (quality assurance) ของ prostate brachytherapy QA program ซึ่งช่วยในการประเมินความถูกต้องของ image-guidance และ dosimetry calculations โดยใช้ฟุ่นจำลอง CIRS Model 045A ร่วมกับ CIRS Model 053G Ultrasound Prostate Phantom ช่วยให้ตอบโจทย์ QA program specific ของ transrectal ultrasound ที่ใช้สำหรับ guidance ของ prostate brachytherapy ตามคำแนะนำของ AAPM Task Group 128 โดยลักษณะของฟุ่นจำลองแสดงดังรูปที่ 11



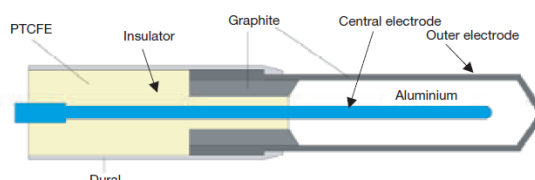
ภาพที่ 11 หุ่นจำลองชนิด Brachytherapy QA Phantom ของ CIRS

จาก <http://www.cirsinc.com/products/all/71/brachytherapy-qa-phantom/>

สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2557

8. เครื่องมือวัดปริมาณรังสีชนิด Ionization Chamber (13)

เครื่องมือวัดปริมาณรังสีในทางรังสีรักษามีหลายชนิด โดยออกแบบให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน หลักการโดยทั่วไปของหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ชนิด gas filled ประกอบด้วยผนังด้านนอกของ chamber สำหรับหุ้มก๊าซภายในมีส่วนของ collecting electrode อยู่ตรงกลางสำหรับนับวัดปริมาณรังสีดังภาพที่ 12 โดยผนังหัววัดรังสีและ collecting electrode จะแยกกันด้วย insulator เพื่อลด leakage current เมื่อมีการให้ความต่างศักย์กับ chamber โดยมี Guard electrode เพื่อช่วยให้ลด leakage ทำหน้าที่หยุด leakage current และยอมให้ผ่านไปที่ ground โดย bypass กับ collecting electrode ซึ่ง Guard electrode จะช่วยเพิ่ม field uniformity ใน sensitive volume ของ chamber ซึ่งเป็นผลดีต่อการเก็บประจุ ค่าที่ได้จากการวัดปริมาณรังสีต้องมีการแก้ค่าอุณหภูมิและความดันเพื่อแก้ค่าสำหรับประจุในมวลของอากาศ ในปริมาตรของหัววัดซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจาก ambient temperature และ pressure มาตรฐาน หัววัดรังสีชนิด Ionization Chamber เหมาะสำหรับการวัดปริมาณรังสีแบบจุด หรือ point dosimetry โดยหัววัดรังสีที่นิยมใช้มีปริมาตรของบริเวณที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสี หรือ sensitive volume เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพที่ 12 โครงสร้างพื้นฐานของ cylindrical ionization chamber ชนิด Farmer

ที่มา: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students (2005)

9. ยางพารา (Para rubber) (14)

ต้นยางพารามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติชนิดนี้ประชาชนทั่วไปเรียกว่า ยางพารา หรือต้นยางพารา (Para rubber) ยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากเป็นพืชยุทธศาสตร์ในการพัฒนาการเกษตรและประเทศไทยมีแนวโน้มในการหันมาใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์มากขึ้น จากข้อมูลปี 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากถึง 3,776,957 ตัน จากการส่งออกทั้งในรูปของวัตถุดิบพร้อมทำผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา คิดเป็นมูลค่ากว่า 647,906 ล้านบาท ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่ถือว่ามีศักยภาพ อีกทั้งมีโอกาที่จะพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ยางพาราได้หลากหลาย โดยยางธรรมชาติเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแล้วสามารถนำมาจำหน่ายได้ในราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นการเรื่องที่ดีหากมีการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางให้มีระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถสร้างผลผลิต และผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างมีคุณภาพและมีมาตรฐาน

(15) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ผ่านการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ เช่น กระดุกเทียม, ยางวงจัดฟัน, ยางนวดเหยือก, ดินประดิษฐ์สำหรับเด็ก ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์, แผ่นยางคลุมดินและกระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำยางพารามาใช้ในเป็นสื่อการเรียนการสอนยังมีค่อนข้างน้อยทั้งๆ ที่เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

9.1 องค์ประกอบของยางพารา (16, 17)

น้ำยางพาราที่ได้จากการกรีดจะมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 6 มีค่าแรงตึงผิวประมาณ 40.5 ดายน์ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ โอห์มเซนติเมตร น้ำยางจะมีสีขาวขุ่น เมื่อปั่นด้วยความเร็วรอบสูง ๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำยางเกิดการแยกชั้น โดยแบ่งได้เป็นสามส่วนหลักๆ ดังนี้

9.1.1 ส่วนเนื้อยาง (Rubber Phase) เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวซึ่งอยู่ชั้นบนสุด คิดเป็นประมาณ 30-36% โดยอนุภาคของยางพาราจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน เป็นทรงกลมบริเวณผิวล้อมรอบไปด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน ทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียรแต่หลังจากการกรีดไม่ถึงชั่วโมง แบคทีเรียและเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมันได้ถ้าปราศจากการเติมสารเคมีที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียซึ่งสามารถทำให้น้ำยางเสียความเสถียรได้

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

9.1.3 ส่วนตกตะกอน (Bottom Phase) เป็นส่วนที่อยู่ชั้นล่างสุดคิดเป็นประมาณ 15-20% ส่วนประกอบที่สำคัญในชั้นนี้คืออนุภาคลูทอยด์ (Lutoid particle) เป็นของที่มีความหนืดมาก รูปร่างกลมรีแบนมากกว่าอนุภาคของยาง ในน้ำยางที่ไม่ได้ถูกกำจัดเอาอนุภาคลูทอยด์ออก มักจะเกิดการจับตัวเองตามธรรมชาติหรือที่เรียกว่า Spontaneous Coagulation

สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสด

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

9.2 คุณสมบัติทางเคมี (16, 17)

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

9.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของยางพารา (16)

1. **ความยืดหยุ่น (Elasticity)** ยางพารามีความยืดหยุ่นได้ดี สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2. **ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)** ยางพารามีความทนทานต่อแรงดึงมาก เนื่องจากสามารถเกิดการตกลึกเมื่อได้รับแรงดึง

3. **ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)** ยางพารามีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง โดยผลึกจะเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึง และตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ส่งผลให้ต้านการฉีกขาดที่จะเกิดขึ้น

4. **การกระด้างกระดอน (Rebound resilience)** ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางจะมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยมาก และมีการสะสมความร้อนที่ต่ำด้วยเช่นกันทำให้อยางมีคุณสมบัติที่การกระด้างกระดอนที่สูงมาก

5. **ความทนทานต่อการขัดถู (Rebound resilience)** ยางพารามีคุณสมบัติทนการขัดถู ทนต่อแรงเสียดทานที่ดี

6. ความเหนียว (Tack) ยางพาราสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น

7. ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางพารามีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ โอห์ม-ซม

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

9. คุณสมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging Property) ยางพารามีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป

9.4 การแปรรูปน้ำยางพารา (14)

เมื่อทำการผสมระหว่างน้ำยางพาราและสารเคมีชนิดต่างๆ จะทำให้น้ำยางพาราที่ได้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรการผสมอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน หลักการและขั้นตอนของการออกสูตรการผสมน้ำยางกับสารเคมีนั้นปกติจะต้องคำนึงถึงหลักสำคัญ 3 ประการประกอบด้วยประโยชน์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิต และต้นทุน สารเคมีที่นำมาใช้ในการผสมน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มหลัก ๆ 5 กลุ่ม ดังนี้

1) สารทำน้ำยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization) ทำให้น้ำยางมีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากอ่อน เหนียว ไปเป็นยางคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

2) สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูปให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ระหว่างกำมะถันและยางนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปช้ามากและต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่สูงมาก

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

4) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

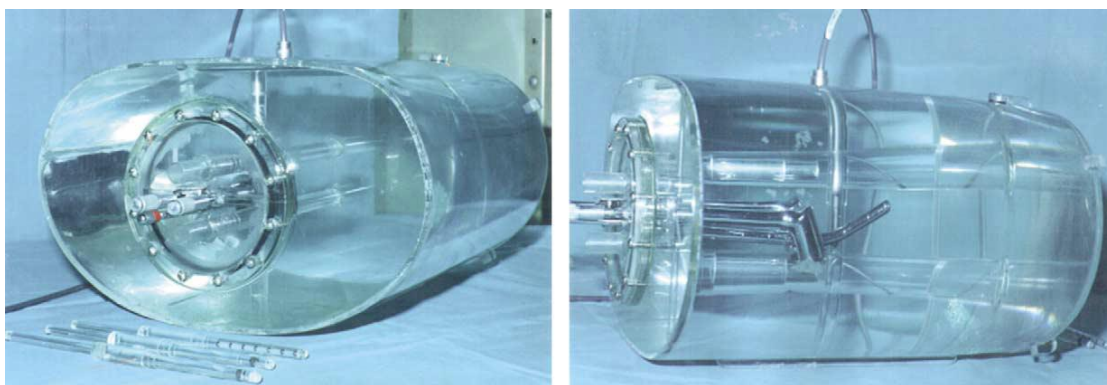
5) สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มระยะเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยาการคงรูปของยาง สารหน่วงปฏิกิริยา

6) สารอื่น ๆ เช่น การเติมสารที่ทำให้เกิดสี, กลิ่น และฟอง เป็นต้น

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2545 de Almeida CE และคณะ (18) ได้ออกแบบและสร้าง anthropomorphic water filled polymethylmethacrylate (PMMA) phantom เพื่อเป็นเครื่องมือใน Quality Assurance (QA) และการฝึกทักษะทาง brachytherapy ของ gynaecological tumours ในการรักษาโดยใช้

ซีเซียม 137 โดยหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดความหนา 21 เซนติเมตร ด้านตัดขวาง 25 เซนติเมตร และความยาวด้านข้าง 36 เซนติเมตร โดยมีผนังทำมาจาก PMMA หนา 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 13 หุ่นจำลองสามารถกำหนดจุดอ้างอิงสำหรับวัดปริมาณรังสี ได้แก่ point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ซึ่งกำหนดตำแหน่งจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ในคนไข้ที่มีขนาดใกล้เคียงกับหุ่นจำลอง สำหรับอุปกรณ์สอดใส่แร่ออกแบบและยึดติดกับฝาปิดที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ และมีช่องสำหรับการใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีชนิด Ionization chamber ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้ได้มีการทดสอบการนำหุ่นจำลองไปใช้วัดจริง เพื่อทดสอบการคำนวณจากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา 4 ชนิด และ Monte Carlo simulations ซึ่งได้ผลที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากที่สุดที่ตำแหน่ง point A เท่ากับ 5.1% หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นเหมาะสมในการใช้ในการทำ acceptance tests ของ treatment planning systems และอุปกรณ์สอดใส่แร่เหมาะสมเป็นสื่อการเรียนการสอน รวมทั้งการวิจัยทางด้านการวัดปริมาณรังสีสำหรับ QA ของ brachytherapy sources



ภาพที่ 13 Water phantom และ applicator พร้อมด้วย PMMA rods ที่มี lead markers และการจัดตำแหน่งหัววัดรังสีชนิด ionization chamber (18)

ปี 2546 วรรณดา สุจริต และคณะ (19) ได้พัฒนาและศึกษาผลของการหุ่นจำลองยางพารา ลูกสุกรในการเรียนการสอนวิชาวิทยาเอ็มบริโอ โดยสร้างหุ่นจำลองยางพาราของลูกสุกรขนาด 10 มิลลิเมตร ให้มีลักษณะภายนอกครบถ้วนตามอายุ และเปิดให้เห็นการเจริญของอวัยวะภายในของลูกสุกรในอายุเดียวกัน มีการทดสอบความรู้ของนิสิตก่อนและหลังการนำหุ่นจำลองไปใช้งาน ผลปรากฏว่าหุ่นจำลองช่วยให้เข้าใจเนื้อหาการเรียนได้ดีขึ้นกว่าการไม่ได้ใช้หุ่นจำลอง วัดตามคะแนนของการทดสอบหลังการใช้หุ่นจำลองมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นกว่าก่อนใช้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปี 2546 เสรี ฤกษ์งาม และคณะ (20) พัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคจากยางพาราและศึกษาประสิทธิภาพการเรียนการสอนโดยการใช้หุ่นจำลอง โดยนำยางพาราซึ่งเป็นสารธรรมชาติมาทดแทนสารสังเคราะห์ โดยพัฒนาและผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ในรูปหุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคเพศผู้พร้อมต่อมอวัยวะระบบสืบพันธุ์ และระบบสืบพันธุ์เพศเมียพร้อมเต้านม แสดงให้เห็นองค์ประกอบของอวัยวะระบบสืบพันธุ์และความสัมพันธ์กับอวัยวะใกล้เคียง รวมทั้งสามารถถอดประกอบให้เห็นถึงโครงสร้างภายใน หุ่นจำลองนี้ถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพการเรียนการสอน

โดยเป็นสื่อการสอนของนิสิตคณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการทดสอบพบว่า การใช้สื่อการสอนทำให้นิสิตเข้าใจและเรียนรู้ได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการเรียนการสอนแบบไม่มีสื่อการเรียนการสอน

ปี 2548 อภินันท์ สุขประเสริฐ (14) พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์ผลการประเมินความพึงพอใจในกลุ่มนักเรียนอยู่ในเกณฑ์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 71 โดยมีข้อเสนอแนะในเรื่องการปรับแก้วิธีการใช้งาน ขนาด และต้นทุนการผลิต เป็นต้น

ปี 2549 ผกาวดี พงษ์เกษ และคณะ (21) ได้พัฒนาหุ่นจำลองยางพาราของอวัยวะรับความรู้สึกพิเศษหูและตา และทดสอบประสิทธิภาพการเรียนรู้กายวิภาคศาสตร์โดยใช้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาและหาวิธีการที่เหมาะสมนำมาใช้ในการเพิ่มทักษะในการเรียนรู้และพัฒนาสื่อการเรียน ผลการวิจัยพบว่า หุ่นจำลองยางพาราของอวัยวะรับความรู้สึกช่วยเพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนิสิตมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปี 2549 อุทุมมา มัชฌะเนมิ และขวัญชัย รัตนเสถียร (22) ทำการการออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย โดยได้คัดเลือกวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ด้วยหลักเกณฑ์สากลผลิตเป็นอุปกรณ์ผลการศึกษาพบว่าพอลิสไตรีน มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลจากการใช้โปรแกรม XCOM และความหนาแน่นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อเมื่อนำไปผลิตเป็นหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อแบบแผ่นโดยใช้พิมพ์ซิลิโคน แล้วนำไปทดสอบพบว่าได้ค่าความดำเฉลี่ยของภาพรังสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปี 2549 วรนนท์ ศิริสัตยกุล และคณะ (23) ทำการการออกแบบ การผลิต และประเมิน หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนช่องเชิงกรานแบบแบ่งส่วนสำหรับวัดปริมาณรังสี เพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์เพศหญิงเนื่องจากการถ่ายภาพรังสีในส่วนท้องและช่องเชิงกราน โดยส่วนเนื้อเยื่อทำมาจากพอลิสไตรีนและส่วนกระดูกทำมาจาก พอลิสไตรีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 เปอร์เซ็นต์ จากการนำหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมาทดสอบเทียบกับหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อที่สั่งซื้อจากต่างประเทศพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในด้านของการลดทอนรังสี

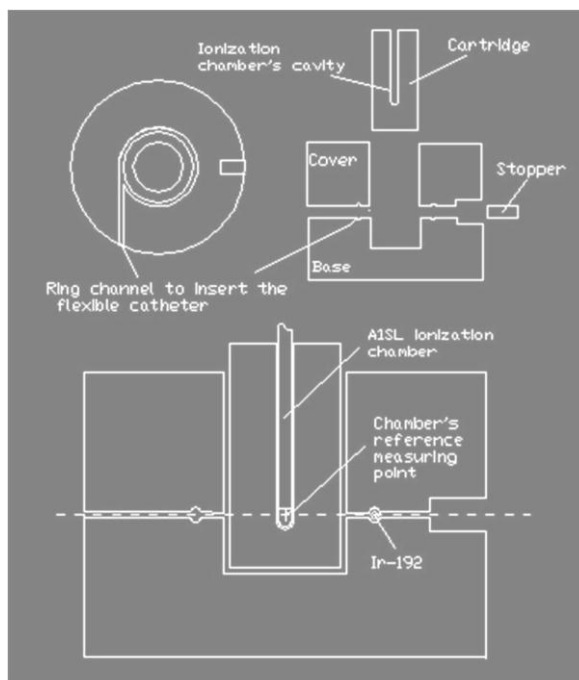
ปี 2552 บังอร ดวงรัตน์และคณะ (24) วิจัยและพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา ได้หุ่นจำลองที่มีขนาด สี และลักษณะใกล้เคียงกับของจริง และมีค่าเฉลี่ยในการประเมินความพึงพอใจ ความคงทนต่อการใช้งาน การนำกลับมาใช้ใหม่ และการคงสภาพเดิมภายหลังการฝึกเย็บมีค่าสูงสุด

ปี 2554 กานดา ตัณฑพันธ์ (25) สร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย พบว่าได้รับความพอใจในระดับสูงทั้งในด้านโครงสร้างรูปร่างลักษณะของหุ่นเสมือนผู้ป่วยจริงและการทดลองใช้งานที่ผู้เรียนสามารถเตรียมเครื่องใช้สำหรับใส่สายยางเพื่อให้อาหารได้ถูกต้อง ทั้งยังสามารถอธิบายวิธีการให้อาหารทางสายยางและเข้าใจภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากการให้อาหารทางสายยางได้อย่างชัดเจน

ปี 2552 พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์และคณะ (26) พัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางพองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ พบว่าการเติมสาร CaCO_3 ปริมาณ 5 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเตรียมยางพองน้ำ

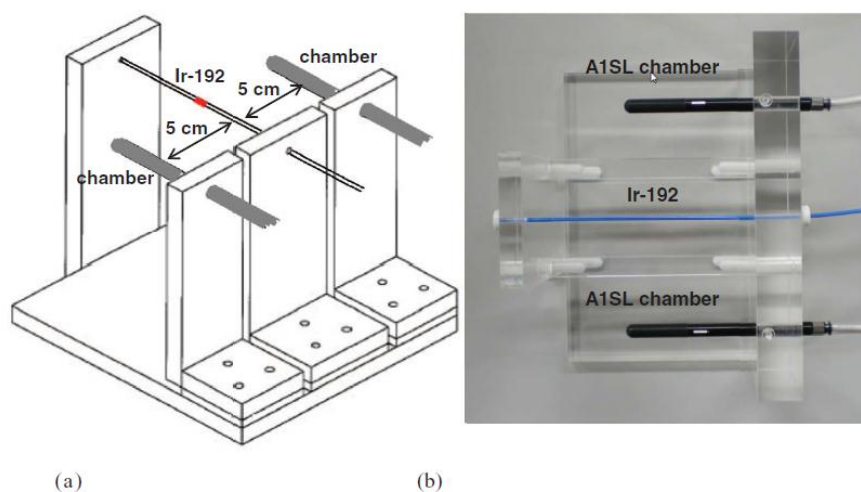
ปี 2554 วัฒนลก โกวิท และคณะ (27) ได้ศึกษาและพัฒนาวัตกรรมการแพทย์หุ่น ไบหน้าจำลองปากแห่งเพดานโหว่ โดยสร้างเป็น 2 ส่วนที่สามารถสวมใส่เข้าด้วยกันได้ คือตัวหุ่น ไบหน้าจำลอง โดยหล่อด้วยยางซิลิโคนและเรซินเสริมด้วยใยแก้ว และหุ่นต้นแบบแสดงภาวะรอยโรค ปากแห่งหล่อจากยางพารา โดยได้นวัตกรรมหุ่นไบหน้าจำลองเพื่อใช้ในการแพทย์และการ พยาบาล เพื่อเป็นสื่อประกอบในการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และน่าสนใจ เมื่อนำไปประเมิน พบว่า กลุ่ม ตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเสนอแนะให้ปรับปรุงในเรื่องสีและรอยแผลเป็นหลัง ผ่าตัดให้เหมือนจริงมากขึ้น

ปี 2556 Austerlitz C และคณะ (28) ได้สร้าง BrachyPhantom ดังภาพที่ 14 สำหรับการ ตรวจสอบ dose calculation ของ HDR brachytherapy planning system เพื่อให้สามารถวัด absorbed dose ในน้ำ ได้โดยตรง โดยใช้ A1SL chamber ซึ่งมีปริมาตร 0.057 ลูกบาศก์เซนติเมตร และคำนวณปริมาณรังสีได้จากสมการ $D_w^{Ir} = N_{D,w}^{Co} M k_s k_{elec} k_{tp} k_{pol} k_{Q,Qo} P_{sw}^{lw}$ เมื่อ D_w^{Ir} คือ absorbed dose in water, $N_{D,w}^{Co}$ คือ ionization chamber calibration factor, M คือค่านับวัด (nC), k_s คือ recombination factor หรือ ks, k_{elec} คือ electrometer calibration factor, k_{tp} คือ ค่าแก้อุณหภูมิและความดัน k_{pol} คือ polarity correction factor $k_{Q,Qo}$ คือ ค่าแก้จาก $N_{D,w}^{Co}$ เป็น $N_{D,w}$ ของ Ir-192 ซึ่งใช้ค่าเท่ากับ 1.0007 และ P_{sw}^{lw} มาจากการคำนวณ Monte Carlo ซึ่งแก้ ค่าจาก liquid water เป็น solid water ตัวหุ่นจำลองทำมาจาก solid WaterTM เมื่อใส่หัววัดที่ ตำแหน่งกึ่งกลาง ระยะจาก source ถึง หัววัดเท่ากับ 3 เซนติเมตร เปรียบเทียบความแตกต่างของ ปริมาณรังสีที่วัดได้จาก BrachyPhantom เทียบกับการคำนวณจาก Treatment planning ไม่เกิน $\pm 3\%$



ภาพที่ 14 cross-section ของ BrachyPhantom แสดงตัว cover, base, cartridge สำหรับใส่หัววัด stopper และช่องสำหรับใส่ 6-French plastic flexible catheter (28)

ปี 2556 Araki F และคณะ (29) ได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับการวัด absorbed dose ในน้ำด้วย ionization chamber สำหรับเครื่อง Nucletron microSelectron-v2 HDR ดังภาพที่ 15 โดยใช้ ionization chamber Exradin A1SL chambers (0.057 ลูกบาศก์เซนติเมตร) 2 ตัว วางระหว่าง source เป็นระยะ 5 เซนติเมตร ดังนั้นจึงเรียกว่า sandwich setup คำนับวัดที่ได้จะเฉลี่ยจาก 2 detectors ดังนั้นปัญหาด้านการวางตำแหน่งของ source และ detector จึงสามารถตัดออกไปได้ โดยความถูกต้องของวิธีการวัดนี้ใช้การเปรียบเทียบการวัดปริมาณรังสี เทียบกับ absorbed dose to water ที่คำนวณได้จาก AAPM TG-43 protocol โดยใช้สมการ $D_w^I = MN_{D,w}^{Co} k_{Q,Q_0}$ เมื่อ M เป็นค่า นับวัดที่แก้ค่าต่าง ๆ แล้ว คำนับวัดที่ได้จะถูกแปลงไปเป็น absorbed dose-to-water โดยใช้ ^{60}Co calibration factor ($N_{D,w}$) และใช้ Monte Carlo-คำนวณ beam quality conversion factor, k_Q , สำหรับ แปลง $N_{D,w}$ ของ ^{60}Co ไปเป็น ^{192}Ir ผลการทดลองพบว่าค่า absorbed dose to water ที่วัด ที่มุม 90 องศา ห่างจาก source 5 เซนติเมตร ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ 1.3% สำหรับปริมาณ รังสีในตำแหน่ง anisotropic points อยู่ภายใน 1.5% เมื่อเทียบกับการคำนวณ



ภาพที่ 15 Chamber measurement setup ด้วย sandwich method (a) Geometrical arrangement ของ A1SL ion chambers ทั้ง 2 ตัว และ ^{192}Ir source ภาพ (b) แสดงเครื่องมือจริงของ sandwich measurement device (29)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีหลายงานวิจัยที่พัฒนาหุ่นจำลองฝึกทักษะ หรือสำหรับวัดปริมาณรังสีจากโดยใช้ยางพารา โดยยางพาราสามารถรูปอยู่ได้เช่นเดียวกับเรซินหรือโฟเบอร์กลาส ซึ่งปฏิกิริยาการรูป (Vulcanization) ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวเป็นคงรูป ด้วยการใช้กำมะถัน (30)

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

หุ่นจำลองอู้งเชิงกรานสำหรับวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์เพื่อวัดปริมาณรังสีสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาในรังสีรักษาระยะใกล้ โดยหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ คือ 1 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร

ขอบเขตงานวิจัย

หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นในระยะที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีระหว่างการวัดจริงและการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ โดยสามารถใส่อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูก และมีรูสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชัน (ionization chamber) ตรงตำแหน่งจุดอ้างอิง ได้แก่ point A ทวารหนัก และกระเพาะปัสสาวะ

วิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานเพศหญิง

จากการศึกษาและสืบค้นข้อมูลสัดส่วนของผู้หญิงไทยด้วยเทคโนโลยี "3D Body Scanning" เปรียบเทียบกับผลการสำรวจด้วยการวัดสัดส่วนโดยตรงของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) พบว่าสัดส่วนของผู้หญิงไทยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนัก 57.4 กิโลกรัม ส่วนสูง 156.9 เซนติเมตร และมีสัดส่วนดังต่อไปนี้

รอบอก	36.0 นิ้ว
รอบเอว	31.5 นิ้ว
รอบสะโพก	38.0 นิ้ว

จากการศึกษาขนาดของหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom ของภาควิชารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นหุ่นจำลองที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ พบว่ามีสัดส่วนดังต่อไปนี้

รอบอก	34 นิ้ว
รอบเอว	26 นิ้ว
รอบสะโพก	34 นิ้ว

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานโดยใช้ข้อมูลสัดส่วนจากข้อมูล "3D Body Scanning" และผลการสำรวจด้วยการวัดสัดส่วนโดยตรงของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ออกแบบหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานเพศหญิง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบให้หุ่นจำลองมีขนาดที่ครอบคลุมอู้งเชิงกรานทั้งหมด โดยกำหนดให้หุ่นจำลองมีช่องขนาดใหญ่สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่เพื่อการรักษามะเร็งปาก

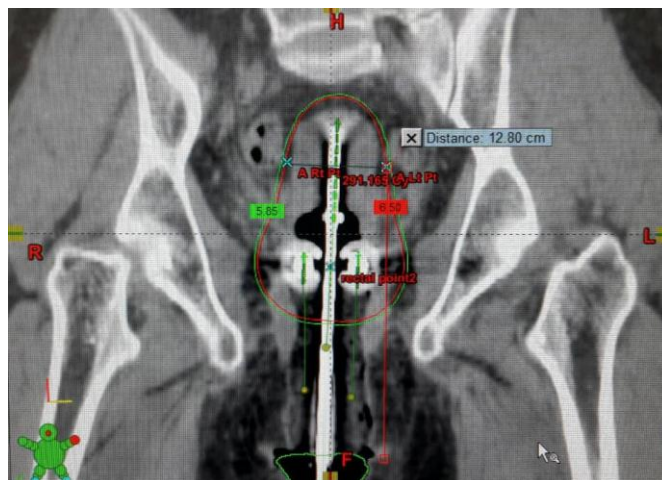
มดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ (applicators) และออกแบบให้มีรูขนาดเล็กสำหรับสอดใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีในตำแหน่งอ้างอิงมาตรฐาน point A ตลอดจนตำแหน่งอ้างอิงสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีในกระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก การกำหนดตำแหน่งสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสีในหุ่นจำลองใช้วิธีการประเมินจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกที่แผนกรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เข้ารับการตรวจรักษาในช่วงเดือนกันยายน 2557 ถึง มีนาคม 2558 และศึกษาขนาดของหัววัดปริมาณรังสีชนิด Ionization chamber ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ยี่ห้อ PTW เพื่อกำหนดตำแหน่งในการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น

1.2 การกำหนดตำแหน่งสำหรับจุดอ้างอิง point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก

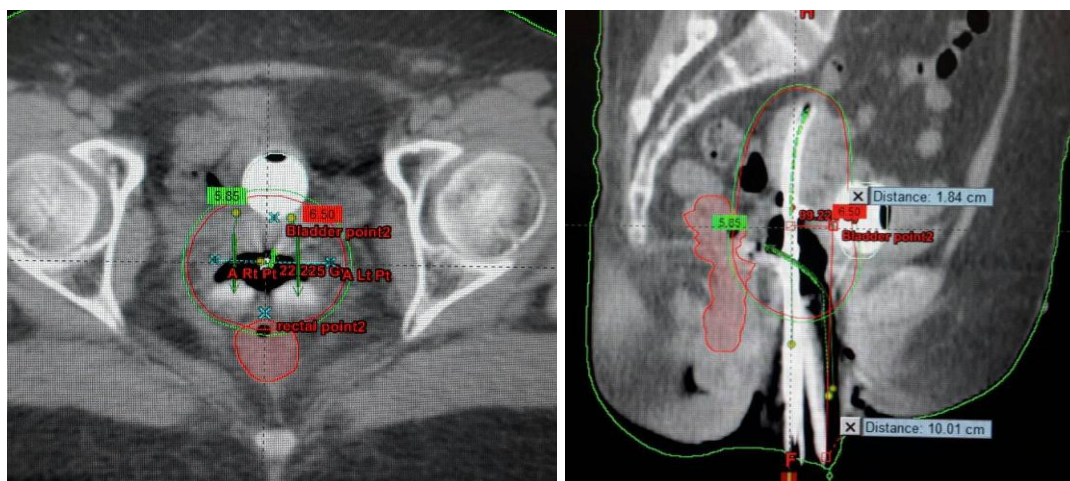
ทำการวัดขนาดเพื่อหาตำแหน่งสำหรับกำหนดตำแหน่งอ้างอิง point A ทวารหนัก (rectal point) และกระเพาะปัสสาวะ (bladder point) โดยการวาดอวัยวะดังกล่าวบนภาพเอกซเรย์ของผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกที่รักษาด้วยรังสีระยะใกล้ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร ดังภาพที่ 16-19 แสดงการวัดตำแหน่งจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ศึกษาโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาสำหรับรังสีระยะใกล้ ยี่ห้อ Eclipse



ภาพที่ 16 การวัดความยาวของช่องคลอดโดยวัดจากปากช่องคลอดถึง vaginal fornix



ภาพที่ 17 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A



ภาพที่ 18 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ bladder point



ภาพที่ 19 การวัดความยาวเพื่อกำหนดตำแหน่งของ rectal point

1.3 การออกแบบหุ่นจำลองสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสี

ศึกษาขนาดความกว้างของชุดอุปกรณ์สอดใส่แร่ขนาดมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อกำหนดช่องสำหรับจัดวางอุปกรณ์ในหุ่นจำลอง โดยอุปกรณ์สอดใส่แร่ประกอบไปด้วย Tandem และ Ovoid ทั้งซ้ายและขวา จากนั้นทำการวัดขนาดของพื้นที่สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสีจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และทดสอบใส่อุปกรณ์จริงในหุ่นจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

การพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับการวัดปริมาณรังสีในการรักษามะเร็งปากมดลูกของการวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกใช้ยางพาราสำหรับพัฒนาหุ่นจำลองเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย ราคาถูก เมื่อแข็งตัวแล้วสามารถคงสภาพอยู่ได้และมีความยืดหยุ่นที่ดี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความเหมือนของธาตุองค์ประกอบใกล้เคียงกับมนุษย์โดยมีขั้นตอนการยางคงรูปสำหรับหุ่นจำลองยางพาราดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

จากศึกษาข้อมูลด้านคุณสมบัติของยางพาราทั้งด้านเคมีและกายภาพ พบว่าสามารถนำมาประยุกต์เพื่อเป็นหุ่นจำลองอวัยวะทางด้านการรังสีรักษาได้ โดยพัฒนาให้ความหนาแน่นของหุ่นจำลองใกล้เคียงน้ำในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีรูปร่างสมจริงและใกล้เคียงอวัยวะของมนุษย์ โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเคมีที่ผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับใช้เติมน้ำยางพาราเพื่อการทดสอบคุณสมบัติของยางพาราก่อนการหล่อแบบจริง

จากการศึกษางานวิจัยของพรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ (31) ซึ่งได้ให้ข้อเสนอแนะการเตรียมสารเคมีที่ใช้เติมในน้ำยางพาราให้อยู่ในรูปของเหลวก่อนการนำไปใช้ โดยการเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของของเหลวนั้นจะขึ้นกับสถานะของสารนั้นๆ หมายถึงหากสารเคมีสามารถละลายน้ำได้ให้เตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) สำหรับสารเคมีเป็นของแข็งที่ไม่สามารถละลายน้ำให้เตรียมในรูปที่เป็นสารที่กระจายตัวในน้ำ (dispersion) โดยอัตราส่วนสารเคมีและน้ำยางชั้นมีสูตรมาตรฐานดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (32)

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

หมายเหตุ ดิตาเนียมไดออกไซด์เป็นสารทำให้มีสีขาวซึ่งอาจไม่ใส่กรณีต้องการให้หุ่นจำลองเปลี่ยนเป็นสีอื่น

จากการเตรียมชิ้นงานยางพาราตามตารางที่ 2 ด้วยเทคนิคการหล่อเข้าเบ้า (Casting process) พบว่าการเทน้ำยางให้แต่ละชั้นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบนานถึง 3 - 4 ชั่วโมง น้ำยางแต่ละชั้นจึงจะแห้ง ดังนั้นการสร้างหุ่นจำลองทั้งตัวหากใช้เทคนิคการหล่อโดยการเทน้ำยางทีละชั้นจึงใช้เวลานาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทดสอบนำสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัว โดยงานวิจัยของวรารณและคณะ ได้ใช้สาร SSF ในการทำให้น้ำยางผสมสารเคมีเกิดการจับตัวกันเพื่อการผลิตดอกไม้ประดิษฐ์จากน้ำยางด้วยเทคนิคแบบหล่อเข้าพิมพ์ การใช้สารเคมีดังกล่าวช่วยให้น้ำยางจับตัวได้เร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐาน (ตามตารางที่ 2) ซึ่งเป็นสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3 เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัว หุ่นจำลอง การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการหาปริมาณที่สาร SSF ที่เหมาะสมสำหรับทำให้น้ำยางพาราที่สร้างขึ้นนั้นสามารถอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานสมบัติของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการ โดยคุณสมบัติที่ต้องการมีดังต่อไปนี้

- 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 3 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา

รายการ	น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนัก (กรัม)		กำหนดสัญลักษณ์ ชิ้นงานยางที่เตรียม
		แห้ง	เปียก	
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 3

2.2.2 บ่มน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีจากข้อที่ 2.2.1 ในถังที่ควบคุมอุณหภูมิได้ตลอดเวลา มีการกวนน้ำยางพาราอย่างช้าๆ ความเร็วรอบประมาณ 20-40 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำยางพาราเกิดการคงรูปบางส่วนซึ่งทำการทดสอบด้วย Chloroform เบอร์ 2.5 ซึ่งทำให้โมเลกุลของยางคงรูปปานกลาง ยางจะมีลักษณะเป็นก้อนเล็กและไม่เหนียว

2.2.3 จากนั้นเติม 12.5 % SSF ตามปริมาณต่าง ๆ ในแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 3

2.2.4 กรองน้ำยางพาราในข้อที่ 2.2.3 ลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปสี่เหลี่ยม ขนาด 200 * 200 * 60 มิลลิเมตร โดยการค่อย ๆ เทลงในแม่พิมพ์

2.2.5 ตั้งแม่พิมพ์ที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้ เพื่อให้ น้ำยางพาราเกิดการยางจับตัวกัน โดยในขั้นตอนนี้จะทำการจับเวลาเพื่อหาเวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัว

2.2.6 นำน้ำยางพาราที่เทลงในแม่พิมพ์แล้วไปอบให้น้ำยางพาราเกิดการคงรูปด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก

2.2.7 แกะชิ้นงานยางพาราออกจากแม่พิมพ์ นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมีที่ยังตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง

2.2.8 ทำการทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางที่เตรียมได้จากข้อ 2.2.7 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3 การทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางพาราเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

2.3.1 ความหนาแน่น

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

ความหนาแน่นของชิ้นยางในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรคำนวณจากสมการ

$$D = M/V$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (Density) หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ทำการทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D2240-03 (33, 34) นำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.2.7 จำนวน 5 ชิ้น มาทดสอบหาค่าความแข็งด้วยเครื่อง Durometer Hardness Tester แสดงดังภาพที่ 20 จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 20 เครื่องมือทดสอบความแข็ง

2.3.3 การทนแรงดึง (Tensile strength) ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D 412-68

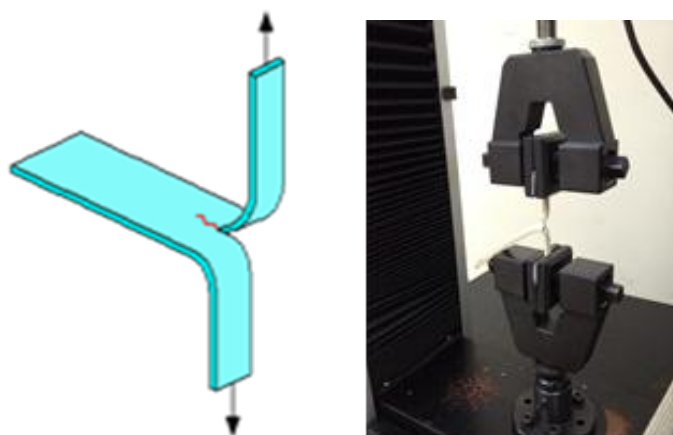
การทดสอบการทนแรงดึงใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 21 โดยการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปดัมเบลจำนวน 7 ชิ้น ชิ้นงานดังกล่าวจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim load cell 1 kN ด้วยแรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at Yield), %การยืดออก ณ จุดขาด (Strain at Break) และค่ามอดูลัส ณ 100 % การยืดออก (Modulus at 100% Elongation)



ภาพที่ 21 เครื่องมือทดสอบการทนแรงดึง

2.3.4 ทดสอบทนแรงฉีกขาด โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D624-00

การทดสอบการทนแรงฉีกขาดใช้การทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 22 โดยต้องเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูป Trouser Test Specimen จำนวน 7 ชิ้น ชิ้นงานจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tear Strength



ภาพที่ 22 Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing

2.3.5 ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging

การทดสอบความต้านทานความเสื่อมสภาพนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้เตรียมได้จากข้อที่ 2.2.7 มาเร่งบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่าง มาทดสอบสมบัติเชิงกล ตามวิธีในข้อที่ 2.3.2, 2.3.3 และ 2.3.4

2.4 การพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพารา

พิจารณาตัวอย่างชิ้นงานยางพาราในข้อที่ 2.2.7 จากการปรับเปลี่ยนปริมาณ SSF เพื่อช่วยให้ยางจับตัว คงรูปได้และอบแห้ง โดยศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ตัวอย่างชิ้นงานเกิดการเซตตัวเพื่อให้มีความเป็นไปได้ในการเทน้ำยางพาราลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลองและศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการอบยางพารา โดยที่สมบัติของยางคงรูปแล้วยังมีระดับความแข็งของยางเป็นไปตามที่ต้องการ รวมทั้งความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่ออู้งิงกราน

2.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพารา

ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพารา จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาสูตรน้ำยางพาราที่มีปริมาณสารเคมียาง และเวลาในการเร่งบ่มที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติของยางพาราตามเป้าหมายที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบเพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Decomposition Temperature ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric Analysis (TGA) นำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จาก ขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.2.7, ข้อที่ 2.3.5 และขั้นตอนที่ 4 มาทดสอบหาค่า glass transition (T_g) ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) หา Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermal gravimetric Analysis (TGA) แสดงดังภาพที่ 23 โดยมีสภาวะในการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ดังนี้ ขั้นแรกลดอุณหภูมิจาก 25°C องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -90°C องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10°C องศาเซลเซียสต่อ

นาที่ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นขั้นตอนที่ 2 ทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก -90 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกัน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 6-10 มิลลิกรัม

สำหรับการทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั้น จะมีสถานะดังนี้ ให้อุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ต่อนาที ไปที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม



ภาพที่ 23 Sample crucibles, crucible sealing press, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermal gravimetric Analysis (TGA)

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่าง ๆ โดยชิ้นงานยางพาราไปฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 เมกะโวลต์ ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU และปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 เซนติเกรย์ ดังแสดงในภาพที่ 24 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน จากสูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นในการสร้างหุ่นจำลองนั้น ได้มีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยสูตรยางเดียวกันตามตารางที่ 4 ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในวิธีดำเนินการวิจัย 2.2 ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในการทดสอบสมบัติแต่ละค่านั้นได้อธิบายรายละเอียดในการเตรียมชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และวิธีการคำนวณไว้ใน 2.3 ขั้นตอนที่ 2 แล้วและเพื่อให้เป็นการง่ายไม่ยุ่งยากในการเรียกชื่อชิ้นงานตัวอย่าง จึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงและตารางบอกค่าสมบัติต่าง ๆ

ชื่อใช้แทน ตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
Non x-Ray	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางโดยใช้ SSF 20 กรัม น้ำหนักเปียก(20g. SSF) ดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีเวลาการเซตตัว ค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) ที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างหุ่นจำลอง ซึ่งชิ้นนี้ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี
Aging	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองซึ่งชิ้นงานนี้จะทำการทดสอบการต้านต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน ดังข้อที่ 2.3.5
x-ray 200 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 200 cGy
x-ray 400 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 400 cGy
x-ray 600 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 600 cGy
x-ray 800 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 800 cGy
x-ray 1,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 1,000 cGy
x-ray 2,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 2,000 cGy
x-ray 3,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 3,000 cGy

ตารางที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงและตารางบอกค่าสมบัติต่าง ๆ (ต่อ)

ชื่อใช้แทน ตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
x-ray 4,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 4,000 cGy
x-ray 5,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 5,000 cGy
x-ray 6,000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลอง มีการฉายรังสีปริมาณ 6,000 cGy



ภาพที่ 24 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200 - 6,000 cGy

ขั้นตอนที่ 5 การเตรียมแม่พิมพ์และหล่อแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยางพารา และส่วนที่สามารถบรรจุน้ำได้ อยู่บริเวณตอนกลางหุ่นจำลองเพื่อความสะดวกในการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสี โดยส่วนที่เป็นน้ำและเนื้อยางพารากำหนดให้มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

5.1 การสร้างแม่พิมพ์จากหุ่นจำลองต้นแบบ

5.2.1 ทำการปั้นหุ่นจำลองต้นแบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นจากภาควิชาออกแบบ คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยปั้นหุ่นจำลองต้นแบบด้วยดินเหนียว ให้มีขนาดของหุ่นใกล้เคียงกับขนาดหุ่นมาตรฐานของหญิงไทยและมีส่วนสูงใกล้เคียงกับหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom

5.2.2 ตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์และเก็บรายละเอียดผิวหนังของหุ่นจำลองต้นแบบที่ทำจากดินเหนียวก่อนการหล่อแบบ

5.2.3 แบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นด้านหน้าและด้านหลังเพื่อสร้างแม่พิมพ์เพื่อนำมาประกบกันในขั้นตอนการเทน้ำยาง โดยแต่ละด้านกันด้วยดินน้ำมันและแผ่นฟิล์มเพื่อให้่ายต่อการแยกแม่พิมพ์ออกจากกัน ดังภาพที่ 25

5.2.4 วางแผ่นไฟเบอร์ผสมเรซินบนแบบหุ่นดินเหนียวที่ละด้านแล้วรอให้เรซินแข็งตัวเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์

5.2.5 นำหุ่นจำลองต้นแบบดินเหนียวออกและตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย ดังภาพที่

5.2.6 เจาะรูสำหรับใส่น็อตเพื่อยึดโครงแม่พิมพ์ด้านหลัง จากนั้นทำการประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน พร้อมทั้งตรวจสอบรอยรั่วบริเวณรอยต่อของแม่พิมพ์



ภาพที่ 25 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์จากเรซินและไฟเบอร์



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการแกะแม่พิมพ์ออกจากหุ่นต้นแบบ

5.2 การหล่อแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

5.2.1 ประกอบแม่พิมพ์เรซินทั้งสองฝั่งจากนั้นยึดด้วยน็อตเพื่อความแข็งแรงพร้อมทั้งอุดรอยรั่วที่ขอบแม่พิมพ์

5.2.2 การสร้างหุ่นจำลองใช้สูตรยางที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 3 โดยเติมสาร SSF ปริมาณ 20 กรัม น้ำหนักเปียก สำหรับวิธีการผสมน้ำยางและสารเคมีดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 ข้อ 2.2

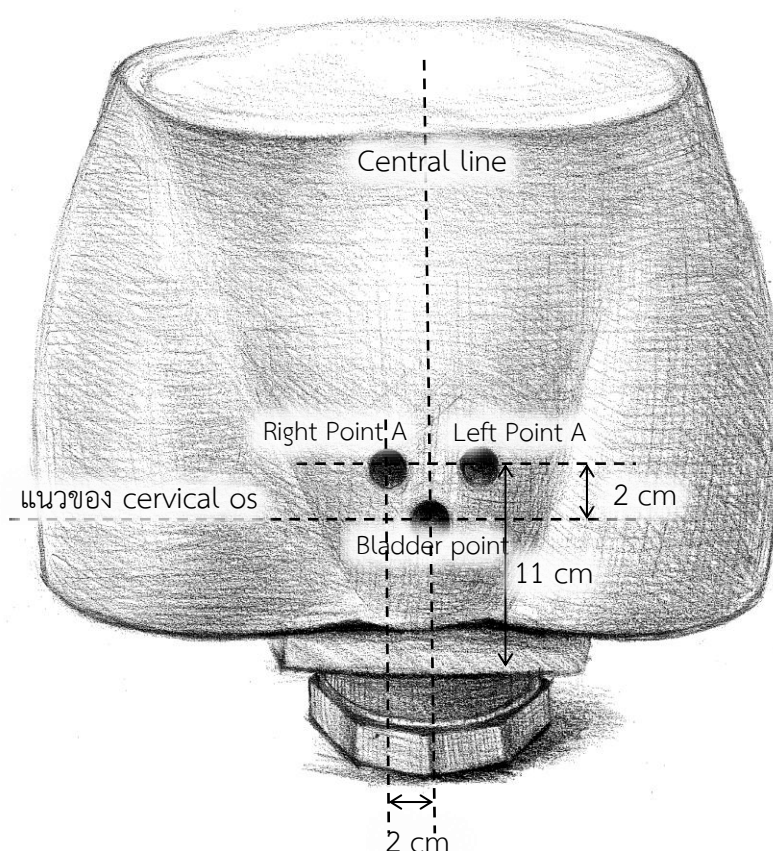
5.2.3 บรรจุกล่องอะคลิลิกขนาด 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่ประกอบไว้เพื่อรอการเทน้ำยาง จากนั้นเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วลงในแม่พิมพ์หุ่นจำลอง โดยการกรองผ่านตะแกรงละเอียดอย่างช้าๆ

5.2.4 ตั้งแม่พิมพ์หุ่นจำลองที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้เพื่อให้น้ำยางพาราเกิดการจับตัว จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางจับตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก

5.2.5 แกะแม่พิมพ์ออก จากนั้นนำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด และนำไปอบให้แห้ง

5.2.6 เติมสีและตกแต่งผิวหุ่นจำลองให้มีความสมจริง

5.2.7 ประกอบฝาสำหรับปิดกล่องอะคลิลิกและเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตรตามตำแหน่งที่ออกแบบสำหรับประเมินค่าปริมาณรังสีตำแหน่ง point A และ Bladder point สำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสี โดยเจาะรูในตำแหน่งที่ใช้ในการใส่หัววัดรังสี Point A ทั้งซ้ายและขวา และ bladder point โดยตำแหน่งที่ทำการเจาะดังภาพที่ 27 โดยกำหนดให้ Point A ห่างจาก central line ออกมาด้านข้าง 2 เซนติเมตร และอยู่เหนือตำแหน่ง flange (ตำแหน่ง cervical os) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร และ bladder point อยู่ในแนวเดียวกับ central line และต่ำกว่า Point A เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ตำแหน่งดังกล่าวได้จากผลการศึกษาผู้ป่วยจริงในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 27 ตำแหน่งและแนวการเจาะรูสำหรับใส่หัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของชิ้นงาน

หุ่นจำลองอู่เชิงกรานที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้นอกจากมีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแล้ว ยังทำการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีเพิ่มเติมด้วยการนำหุ่นจำลองที่ได้มาสร้างภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา (CT simulator) ยี่ห้อ Philips รุ่น Brilliance Big Bore 16 สไลซ์ เพื่อประเมินค่าเลขซีที (CT number) ค่า Uniformity และค่าความหนาแน่นของหุ่นจำลองที่สร้างขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับค่า CT number มาตรฐานของน้ำเพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการนำหุ่นจำลองมาใช้งานเพื่อวัดปริมาณรังสีในทางรังสีรักษา สำหรับการตั้งองค์ประกอบเพื่อถ่ายภาพใช้ค่าเท่ากับการใช้งานจริงสำหรับการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่ส่วนอู่เชิงกราน โดยกำหนดค่าความต่างศักย์หลอด 120 กิโลโวลต์ และค่ากระแสหลอดคูณเวลา 300 มิลลิแอมแปร์วินาที ความหนาของสไลซ์ 3 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังทำการทดสอบเพื่อประเมินค่าความหนาแน่น (Density) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (Computerized Treatment Planning System) ยี่ห้อ Phillips รุ่น Pinnacle³ จากนั้นนำหุ่นจำลองไปทำการวัดปริมาณรังสีตามแผนการรักษาที่ได้กำหนดไว้เพื่อประเมินความถูกต้องของปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา สำหรับขั้นตอนในการประเมินค่า CT number ความสม่ำเสมอและความหนาแน่นของหุ่นจำลองที่ต้องการทดสอบต่าง ๆ เป็นต้น

6.1 การประเมินค่า CT number

การประเมินค่า CT number ของเนื้อเยื่อของหุ่นจำลองอู่เชิงกรานใช้วิธีการเปรียบเทียบกับ CT number ของน้ำ พร้อมทั้งหาค่าความเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ดังสมการ

$$\text{Percent difference} = \frac{CT \text{ number}_{rubber} - CT \text{ number}_{water}}{CT \text{ number}_{water}} \times 100$$

เมื่อ $CT \text{ number}_{rubber}$ คือค่า CT number ของเนื้อเยื่อของหุ่นจำลอง และ $CT \text{ number}_{water}$ คือ CT number ของน้ำภายในหุ่นจำลอง

6.2 การทดสอบความสม่ำเสมอ (Uniformity)

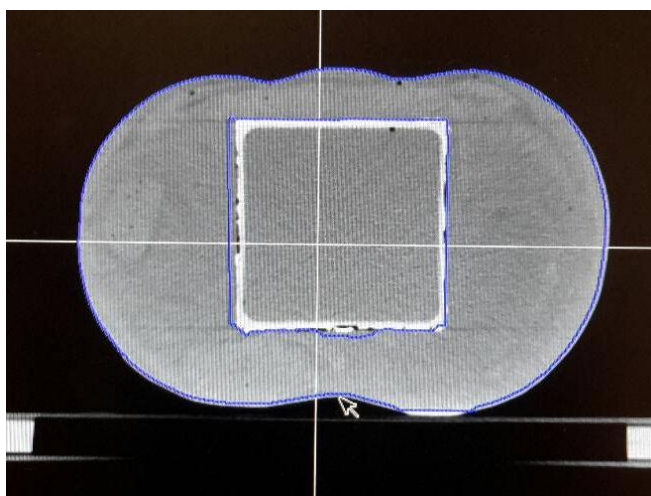
ประเมินค่าความสม่ำเสมอภายในของหุ่นอู่เชิงกรานยางพาราโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยวาดขอบเขตของเนื้อเยื่อภายในหุ่นจำลองที่เป็นส่วนของยางพาราจากทุกสไลซ์ (slice) ดังภาพที่ 28 และคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อยางพารา

6.3 การหาค่าความหนาแน่น (density)

ทำการประเมินค่าความหนาแน่นของเนื้อเยื่ออู่เชิงกรานจากยางพาราด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยวาดขอบเขตของเนื้อเยื่อภายในหุ่นจำลองที่เป็นส่วนของยางพาราจากทุกสไลซ์ (slice) ดังภาพที่ 28 และคำนวณค่าความหนาแน่นเฉลี่ยภายในปริมาตรที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่ออ่อนหรือน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 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 28 การวาดขอบเขต (contour) หุ่นจำลองเพื่อหาความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของ
หุ่นจำลองอู่เชิงกรานยางพารา

ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบผลการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลอง

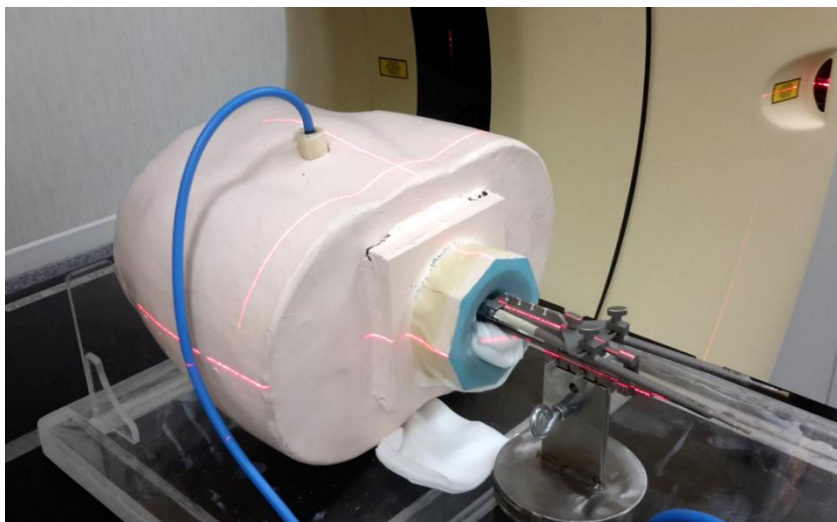
ทำการทดสอบความสามารถในการวัดปริมาณรังสีของหุ่นจำลองอู่เชิงกรานยางพาราด้วยการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ วางแผนการรักษา และวัดปริมาณรังสีดังต่อไปนี้

7.1 การสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

7.1.1 ประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับจัดวางในหุ่นจำลองอู่เชิงกรานดังภาพที่ 29 และยึดเข้ากับอุปกรณ์ยึดจับดังภาพที่ 30 เพื่อป้องกันการเคลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ เมื่อมีการใส่น้ำหรือระหว่างการเคลื่อนย้าย



ภาพที่ 29 อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้



ภาพที่ 30 การประกอบอุปกรณ์สอดใส่แร่เข้ากับฐานยึดที่ออกแบบมาสำหรับงานวิจัย และการใส่
อุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นจำลอง



ภาพที่ 31 การจัดตำแหน่งหุ่นจำลองเพื่อสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

7.1.2 ใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกเข้าไปในหุ่นจำลองโดยให้ความยาวของ tandem อยู่ในตำแหน่งปากมดลูกซึ่งตรงกับระยะที่ได้ศึกษาและออกแบบไว้ โดยสัมพันธ์กับตำแหน่งที่ใส่หัววัดรังสีสำหรับประเมินค่าปริมาณรังสีที่ Point A โดยใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตำแหน่ง Point A และ Rectum point เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดจุดในการคำนวณ

7.1.3 สร้างภาพหุ่นจำลองด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา 16 สไลซ์ ยี่ห้อ Philips รุ่น Brilliance Big Bore ด้วยค่าพารามิเตอร์ 120 kVp, 300 mAs และความหนาของสไลซ์ 3 มิลลิเมตร โดยจัดอุปกรณ์ดังภาพที่ 31 จากนั้นตรวจสอบตำแหน่งของหัววัดรังสีให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับ point A ซึ่งเป็นระยะ 2 เซนติเมตรจาก central line และเหนือ cervical os เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ซึ่งประเมินจากตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่

7.1.4 ส่งภาพเข้าสู่คอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาสำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ ยี่ห้อ Eclipse เพื่อสร้างแผนการรักษาสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกต่อไป

7.2 การวางแผนการรักษา

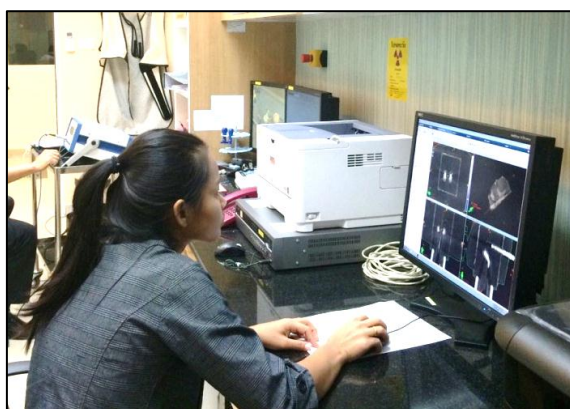
7.2.1 กำหนดจุดอ้างอิงของกระเพาะปัสสาวะ ทวารหนัก และตำแหน่ง point A จากตำแหน่งที่กำหนดไว้ในแผนการรักษา โดยกำหนดให้เป็นตำแหน่งเดียวกันกับในหุ่นจำลอง ดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่งของ Point A กำหนดให้มีระยะ 2 เซนติเมตรจาก central line และเหนือ cervical os เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับหัววัดรังสีที่ใส่ในขั้นตอนการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

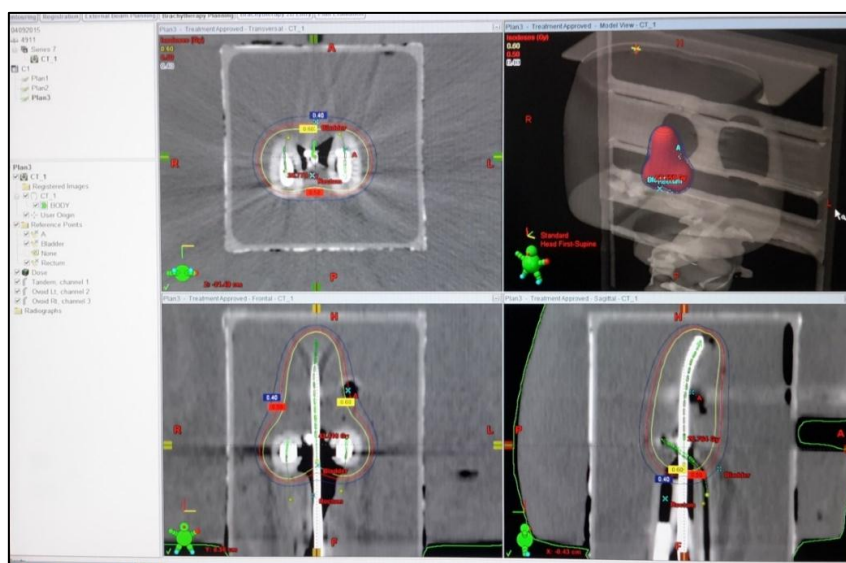
2) ตำแหน่งของทวารหนักจะใส่หัววัดรังสีในขณะสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เพื่อต้องการให้การกำหนดจุดของ rectum point นั้นมีความเที่ยงตรงเป็นจุดเดียวกัน โดยกำหนดจุด rectum point ดังภาพที่ 32

7.2.2 วางแผนการรักษา มะเร็งปากมดลูก ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา 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 34 และการกระจายของปริมาณรังสีที่ได้หลังการคำนวณปริมาณรังสีแสดง ดังภาพที่ 35

7.2.3 ทำการบันทึกค่าปริมาณรังสีที่ point A กระเพาะปัสสาวะและทวารหนักได้รับ และส่งแผนการรักษาไปยังเครื่องฉายรังสีระยะใกล้ high dose rate ยี่ห้อ GammaMedPlus iX เพื่อทำการโหลดแร่ไปยังหุ่นจำลองต่อไป



ภาพที่ 34 การวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา



ภาพที่ 35 หน้าต่างการวางแผนการรักษาหุ่นจำลอง โดยลักษณะการกระจายของปริมาณรังสีเป็นไปตามมาตรฐานมีรูปร่างเหมือนลูกชมพู

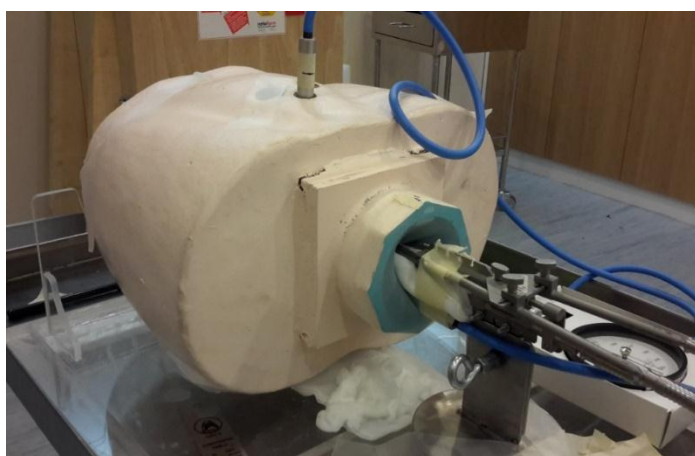
7.3 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง

7.3.1 ต่อสาย transfer tube เข้ากับเครื่อง HDR Brachytherapy และอุปกรณ์สอดใส่แร่ทั้ง Tandem และ Ovoids เพื่อนำแร่ไปยังตำแหน่งที่ทำการรักษาโดยการจัดอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 36

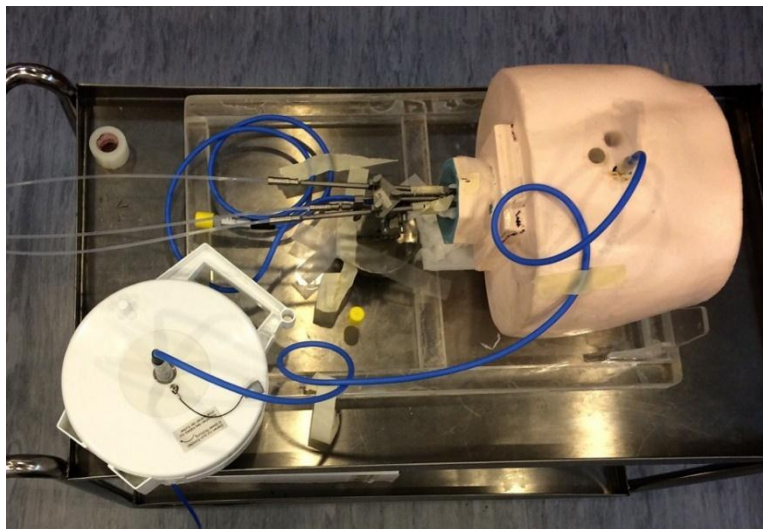
7.3.2 ต่อหัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชันปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ยี่ห้อ PTW รุ่น TW 30013 เข้ากับเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสี (electrometer) ยี่ห้อ PTW UNIDOS และวางหัววัดบริเวณตำแหน่งที่กำหนดไว้ประกอบด้วย Point A, bladder point และ rectal point โดยทำการวัดค่าครึ่งละตำแหน่ง วัดค่าปริมาณรังสีตำแหน่งละ 3 ครั้งเพื่อนำค่า Reading ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างการวางหัววัดแสดงดังภาพที่ 37 และ 38



ภาพที่ 36 การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าปริมาณรังสีจากการใส่แร่ในหุ่นจำลอง



ภาพที่ 37 การวางตำแหน่งของหัววัดรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดค่าปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง bladder point และ rectal point



ภาพที่ 38 การจัดหัววัดรังสีในหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A

7.3.4 วางเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ และวางบารอมิเตอร์เพื่อวัดความดันบรรยากาศดังภาพที่ 39 พร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของการวัดในแต่ละครั้งเพื่อนำไปแก้ค่าอุณหภูมิและความดัน โดยสมการที่ใช้ในการแก้อุณหภูมิความดัน คือ

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

เมื่อ k_{TP} คือค่าแก้อุณหภูมิและความดัน T คือ อุณหภูมิขณะทำการวัด หน่วยองศาเซลเซียส T_0 คือ อุณหภูมิมาตรฐาน (20 องศาเซลเซียส) และ P คือความดันขณะวัด มีหน่วยเป็น kPa



ภาพที่ 39 เครื่องวัดอุณหภูมิ และความดัน

7.3.5 การควบคุมเครื่องใส่แร่เพื่อส่งให้แร่ไปยังตำแหน่งการรักษาตามแผนการรักษาที่วางไว้ดังแสดงในภาพที่ 40 พร้อมทั้งนับวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องอ่านค่าปริมาณรังสี โดยค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็นนาโนโคลอมป์ (nC)



ภาพที่ 40 หน้าจอเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องใส่แร่ด้วยวิธีรังสีรักษาระยะใกล้

7.3.6 นำค่า Reading ที่ได้ มาคำนวณโดยแก้ค่าต่างๆ ดังสมการด้านล่าง เพื่อคำนวณปริมาณรังสีในน้ำ (D_w) มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gy)

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

เมื่อ M คือ ค่า Reading มีหน่วยเป็น nC ที่ได้จากการวัดและ N_{DW} คือ absorbed dose to water calibration factor ซึ่งเป็นค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบหัววัดรังสีเทียบกับหัววัดรังสีมาตรฐานที่ secondary standard lab มีหน่วยเป็น mGy/nC และ k_{TP} คือค่าแก้อุณหภูมิและความดัน

7.4 การวัดปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลองเมื่อปรับระยะความกว้างของ Ovoids

ทำการทดลองตามขั้นตอนเดียวกับข้อ 7.3 แต่มีการปรับระยะของ ovoids 3 ขนาดตามสเกลที่แสดงตรงตำแหน่งที่ใช้ปรับความกว้างของ ovoids และบันทึกปริมาณรังสีที่ Point A และ Bladder point แต่ไม่ได้บันทึกที่ Rectal point เนื่องจาก ตำแหน่งของ rectal point จะใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีได้ยากกว่าตำแหน่งอื่น

7.5 การเปรียบเทียบผล

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent difference) ดังสมการ

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

เมื่อ D_{mea} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการวัด D_{TPS} คือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา โดยค่าที่วัดได้เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ (35) แสดงว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณรังสีได้ และมีคุณสมบัติทางด้านความหนาแน่นเทียบเท่าเนื้อ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

1.1 ระยะเพื่อกำหนดตำแหน่งจุดอ้างอิงเพื่อวัดปริมาณรังสีตำแหน่ง point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก

ผลการวัดระยะภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ในผู้ป่วยจริงเพื่อกำหนดตำแหน่งในการวัดปริมาณรังสีของ point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ได้ผลดังตารางที่ 5 โดยระยะความยาวของช่องคลอดมีขนาดเท่ากับ 7.96 ± 0.72 เซนติเมตร ระยะดังกล่าวใช้ในการกำหนดตำแหน่งของการใส่ Tandem สำหรับตำแหน่งของ point A อยู่ห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 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 5 ผลการวัดตำแหน่งระยะเพื่อกำหนดตำแหน่งของ point A, bladder และ rectal points จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

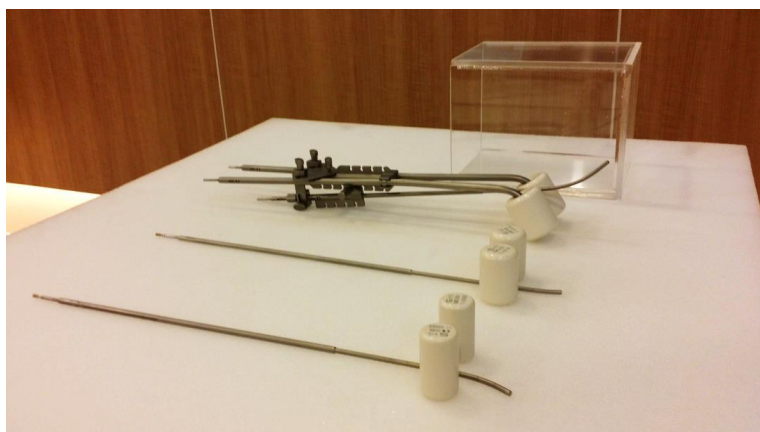
ผู้ป่วย คนที่	ความยาว ช่องคลอด (เซนติเมตร)	ระยะ (เซนติเมตร)					
		Point A		Bladder		Rectum	
		ห่างจาก cervical canal	สูงจาก แนวปาก ช่อง คลอด	ห่างจาก cervical canal	สูงจาก แนวปาก ช่อง คลอด	ห่างจาก cervical canal	จากแนว ปากช่อง คลอด
1	9.04	2	11.14	2.06	9.25	2.14	7.05
2	8.24	2	10.78	2.29	7.12	2.09	7.53
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

จากผลการศึกษาทำให้ได้ตำแหน่งในการกำหนดจุดในการวัดปริมาณรังสีของ point A กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ดังนี้ ตำแหน่งของการใส่ Tandem ความยาวของช่องคลอดยาว 8 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่งของ point A ห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 10 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านข้าง (cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร สำหรับ Bladder point ห่างจากแนวปากช่องคลอดเท่ากับ 8 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหน้า

(cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่ง Rectal point ห่างจากแนวปากช่องคลอด เท่ากับ 7 เซนติเมตร และห่างจากแนวแกนกลางมาทางด้านหลัง (cervical canal) เป็นระยะ 2 เซนติเมตร

1.2 ผลการออกแบบส่วนสำหรับใส่อุปกรณ์และใส่หัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง

ผลการออกแบบอุปกรณ์สำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลอง แสดงดังภาพที่ 41 โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นกล่องอะคริลิกทรงความหนาแน่นใกล้เคียงกับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาด 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับบรรจุน้ำ อุปกรณ์สอดใส่ แร่ และหัววัดปริมาณรังสี โดยวัดขนาดให้พอเหมาะสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสีใน ตำแหน่งของ rectal point ด้วย อย่างไรก็ตามพบว่ากล่องอะคริลิกมีความหนาแน่นที่มากกว่าน้ำ เล็กน้อยซึ่งส่งผลต่อการวัดปริมาณรังสีไม่มากนัก หากต้องการสร้างหุ่นจำลองในลักษณะเดียวกันนี้ อาจจะต้องมีการเลือกใช้วัสดุอื่นแทน เช่น PMMA และควรออกแบบส่วนกล่องให้เป็นทรงกระบอก มากกว่า แต่ที่ผู้วิจัยไม่ได้ใช้วัสดุและรูปทรงดังกล่าว เนื่องจากข้อจำกัดในการหาซื้อวัสดุ และการสร้าง ทรงกระบอกยากกว่าการสร้างเป็นลักษณะกล่องสี่เหลี่ยม

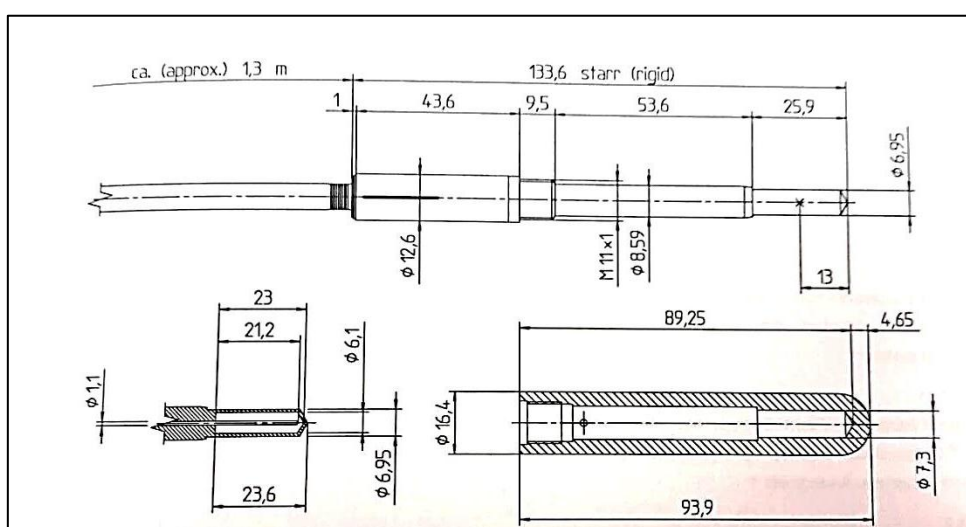


ภาพที่ 41 ชุดอะคริลิกใสสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่และหัววัดรังสีสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก ด้วยรังสีระยะใกล้ขนาดต่าง ๆ

การออกแบบหุ่นจำลองให้สามารถใส่หัววัดรังสีได้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้หัววัด ปริมาณรังสี Model N30013 Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber โดยมีปริมาตร ของ sensitive volume เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังภาพ 42 และมีขนาดของหัววัด แสดงดังภาพที่ 43 ขนาดหัววัดรังสีดังกล่าวนำไปใช้สำหรับเจาะรูหุ่นจำลองใส่หัววัดปริมาณรังสี โดย ขนาดของรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.4 มิลลิเมตร



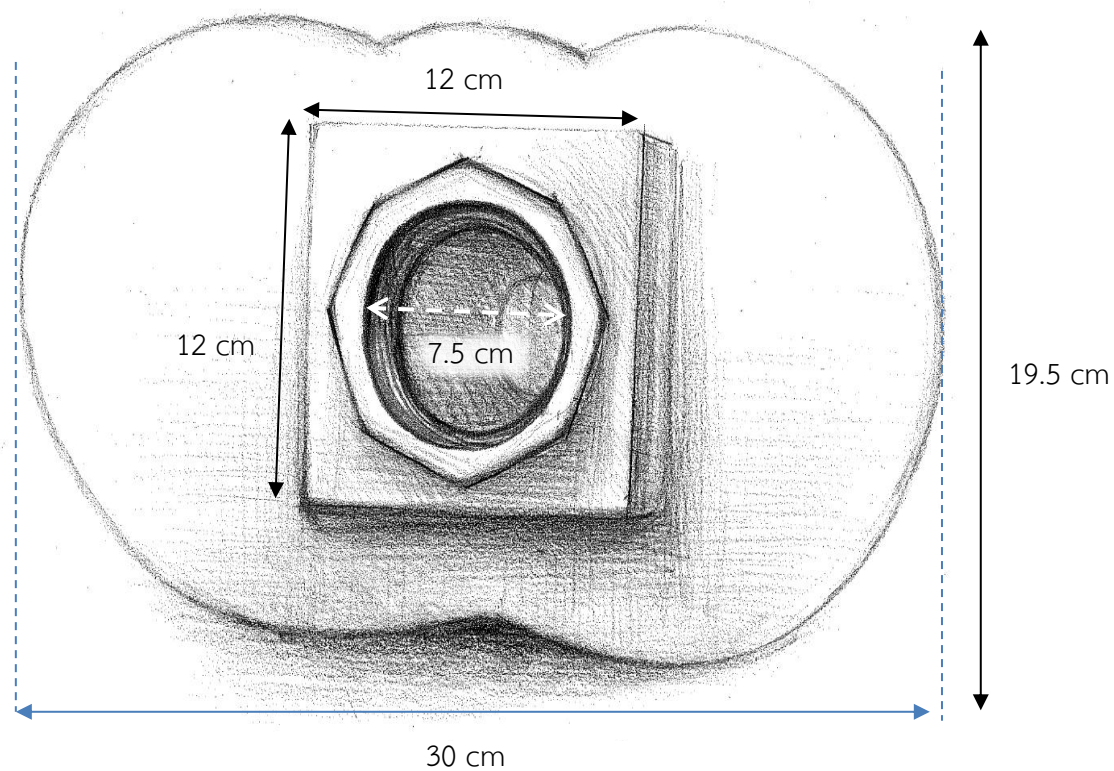
ภาพที่ 42 หัววัดรังสี Waterproof PTW Farmer® Ionization Chamber รุ่น Model N30013



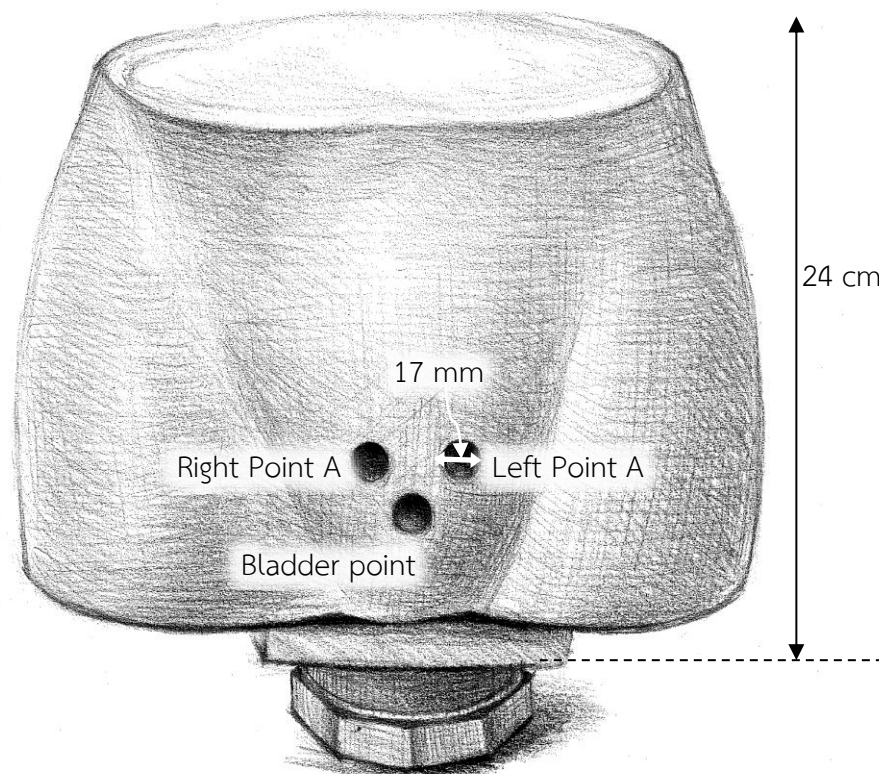
ภาพที่ 43 ขนาดของหัววัด PTW Farmer® Ionization Chamber

1.3 ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

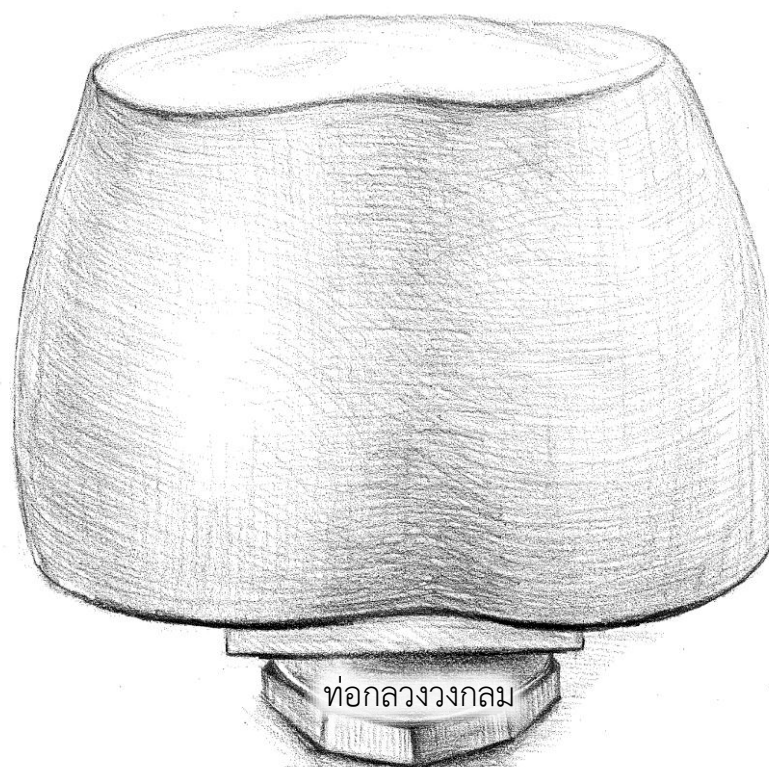
ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานได้แบบหุ่นจำลองขนาดรอบเอว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) รอบสะโพก 99 เซนติเมตร (39 นิ้ว) และสูง 24 เซนติเมตร (9.44 นิ้ว) โดยบริเวณกลางหุ่นจำลองลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมสำหรับบรรจุน้ำ อุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสีสำหรับวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A และ Bladder point rectal point โดยกล่องดังกล่าวมีปริมาตร 12 x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 44 ด้านบนของหุ่นจำลองมีรูขนาดใกล้เคียงกับหัววัดปริมาณรังสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตำแหน่งเพื่อการวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่ง point A ด้านซ้ายและขวา และตำแหน่ง bladder point ดังแสดงในภาพที่ 45 โดยท่อกลวงเพื่อเป็นช่องใส่อุปกรณ์ในการรักษา แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 44 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองในแนวตัดขวางโดยมีกล่องอะคลิลิกสำหรับเติมน้ำ



ภาพที่ 45 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหน้า



ภาพที่ 46 ผลการออกแบบหุ่นจำลองเมื่อมองด้านหลัง

2. ผลการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลอง

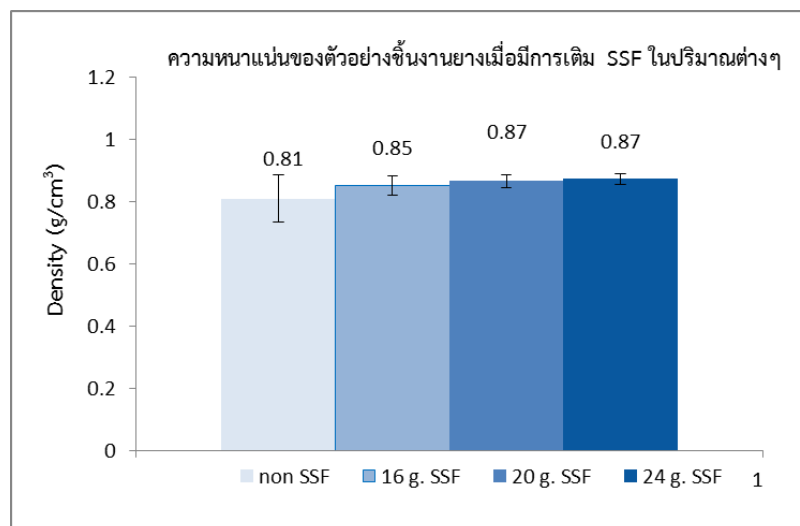
2.1 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างยางพาราที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

ชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมได้ตามข้อ 2.2.7 จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษาโดยการเติมสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยาง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาปริมาณของ SSF ที่เหมาะสม เพื่อให้หุ่นจำลองยางพาราที่จะสร้างขึ้นสามารถคงรูปและอบแห้งได้ จากการหาเวลาการเซตตัวหรือจับตัวของน้ำยาง เมื่อมีการใช้ปริมาณของ SSF ที่เพิ่มขึ้น พบว่าเวลาการจับตัวของน้ำยางจะเร็วขึ้นแสดงดังตารางที่ 6 ส่วนความหนาแน่นของตัวอย่างยางเมื่อมีการใช้ปริมาณ SSF ในการเตรียมชิ้นงานเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นแสดงดังภาพที่ 47 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.81-0.87 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสามารถนำไปใช้เทียบเคียงกับความหนาแน่นของเนื้อเยื่อมนุษย์ได้

ตารางที่ 6 เวลาการเริ่มจับตัวของน้ำยางของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนา

สูตรยางที่พัฒนา	เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัว (นาท)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
16 g. SSF	63.80	3.42
20 g. SSF	27.60	2.51

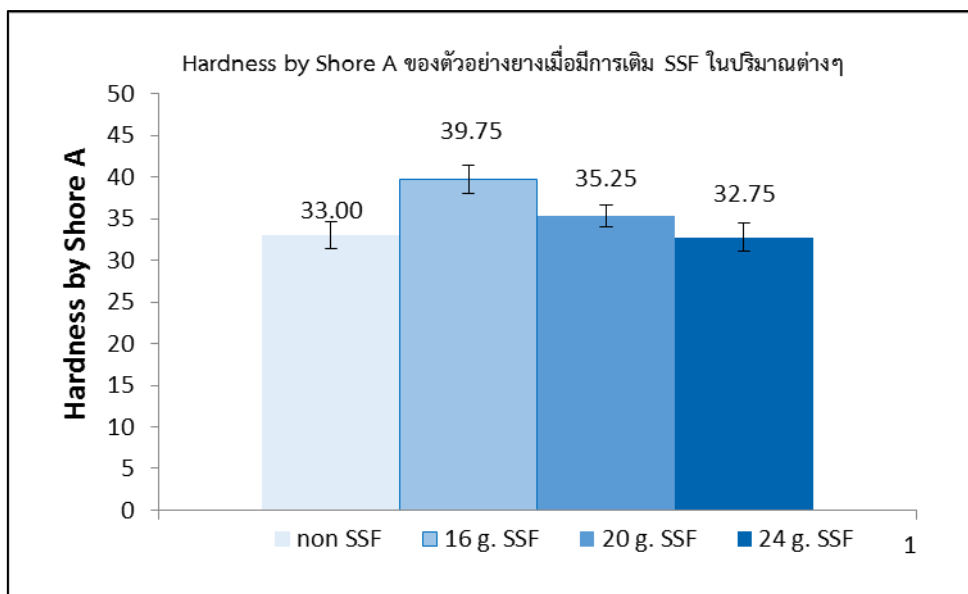
24 g. SSF	5.40	1.52
-----------	------	------



ภาพที่ 47 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ

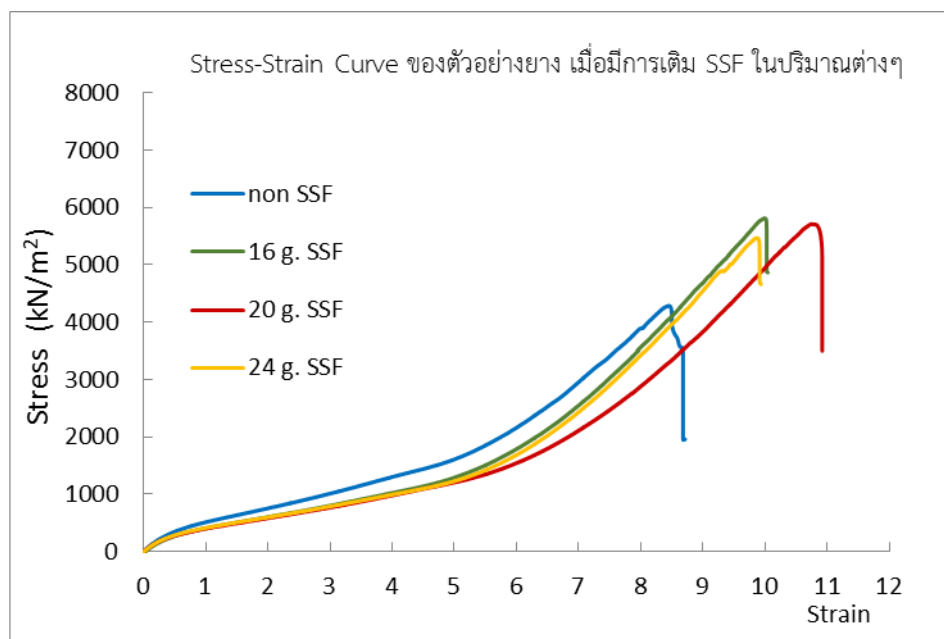
2.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

จากชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา ในข้อ 2.2.7 นั้น ได้นำมาทดสอบหาสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาดตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.8 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) แสดงดังภาพที่ 48 พบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าความแข็งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานความแข็งที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้คือไม่ต่ำกว่า 23 และพบว่าปริมาณการเติม SSF มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยาง โดยตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียก มีค่าความแข็งสูงสุดแต่เมื่อตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (20 และ 24 กรัม น้ำหนักเปียก) พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างยางที่เติม SSF ขนาด 24 กรัม น้ำหนักเปียก จะมีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF

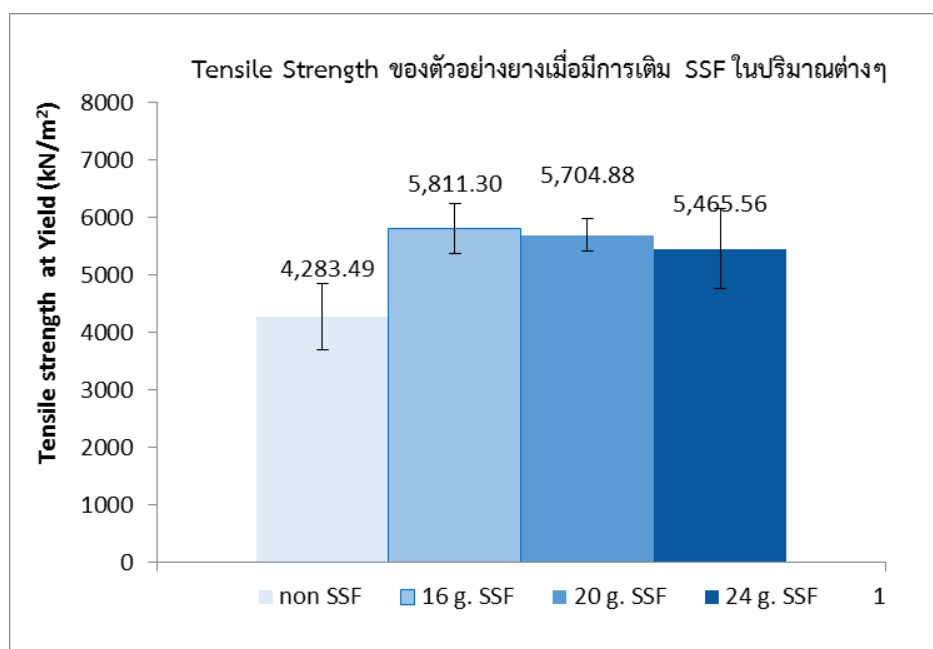


ภาพที่ 48 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่าง ๆ

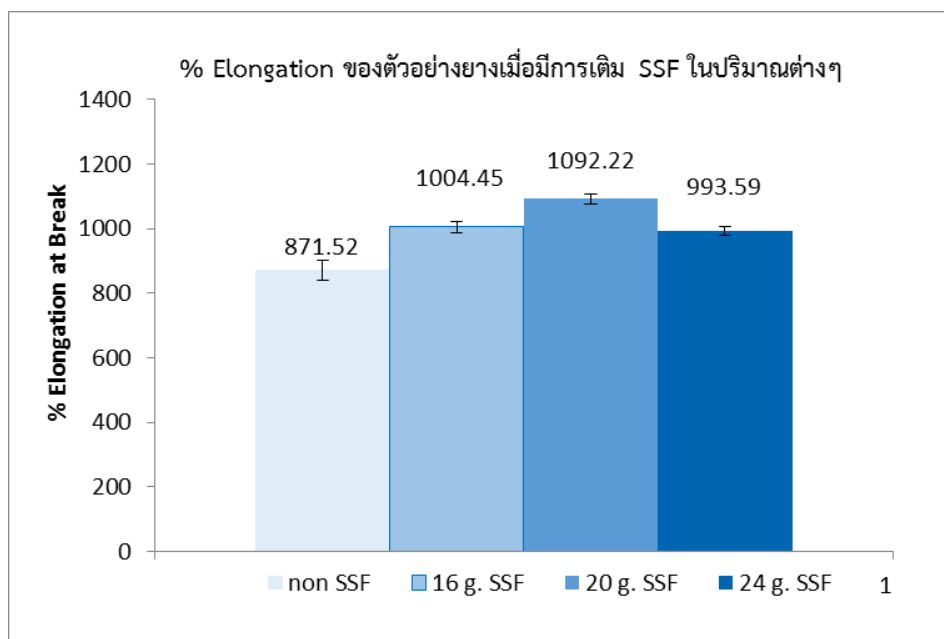
สำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing แสดงผลการทดสอบเป็นลักษณะของ Stress – Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation แสดงดังภาพที่ 49, 50, 51 และ 52 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ และผลการทดสอบเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความแข็ง โดยตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 16 กรัม น้ำหนักเปียก แสดงผลการทดสอบที่มีค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (Stress at Yield) สูงสุด (5811.30 kN/m^2) ส่วนตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF ขนาด 20 กรัม น้ำหนักเปียกนั้นจะมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าเล็กน้อย (5704.88 kN/m^2) แต่มีระยะที่ยืดออก (Strain at Break) มากที่สุด มีค่าความแข็งแรงหรือแข็งแรงต่ำที่สุด แสดงถึงความสามารถในการยืดหยุ่น (Modulus at 100% Elongation) น้อย หรือกล่าวได้ว่ามีความเป็นอิลาสติก (elastic property) มากกว่าตัวอย่างยางอื่นๆ แต่สำหรับตัวอย่างยางที่มีการเติม SSF มากขึ้น (24 กรัม น้ำหนักเปียก) พบว่าค่าความทนแรงดึงและระยะที่ยืดออกมีแนวโน้มที่ลดลง



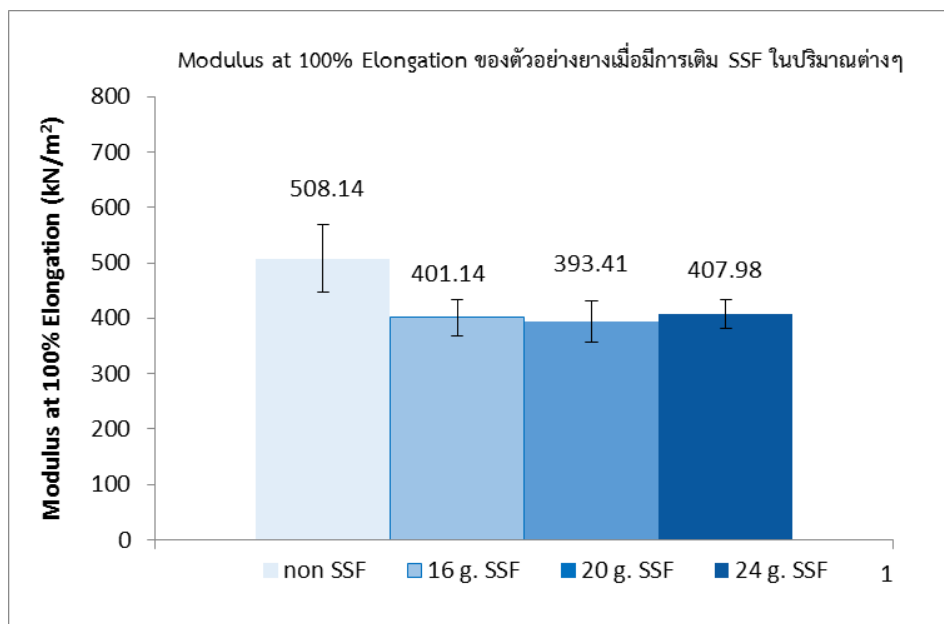
ภาพที่ 49 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 50 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

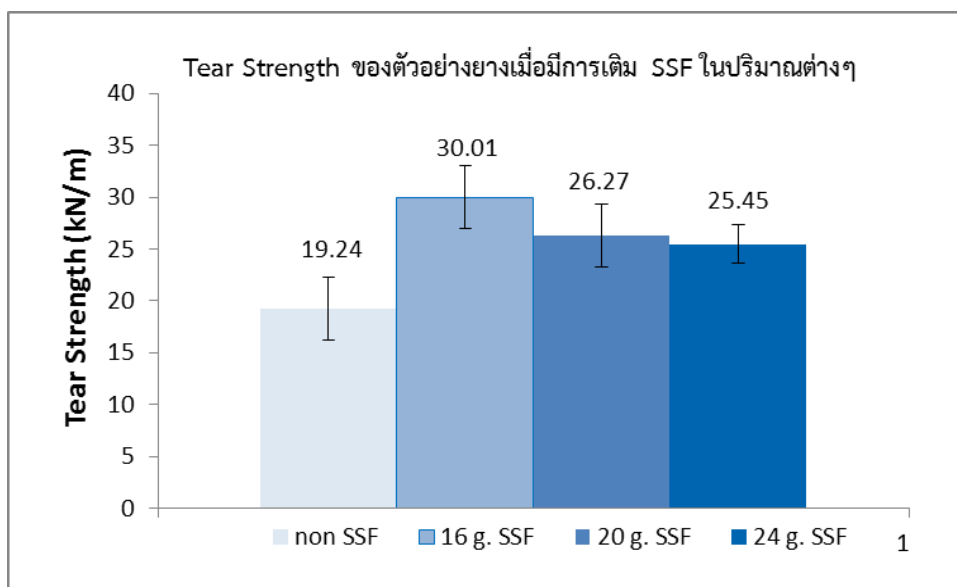


ภาพที่ 51 เปอร์เซ็นต์ Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 52 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

ผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดแสดงดังภาพที่ 53 พบว่าค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานหุ่นจำลองที่ตั้งไว้ เช่นเดียวกับสมบัติเชิงกลค่าอื่นๆ และพบว่าผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดเป็นไปในทำนองเดียวกับสมบัติเชิงกลอื่นข้างต้นที่กล่าวมา นั่นคือตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นโดยมีการเติม SSF ในปริมาณ 16 และ 20 กรัมน้ำหนักเปียก จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติม SSF แต่เมื่อมีการเติม SSF สูงถึง 24 กรัมน้ำหนักเปียก จะมีค่า Tear Strength ที่ต่ำกว่าตัวอย่างยางที่ไม่เติม SSF



ภาพที่ 53 Tear Strength ของตัวอย่างขึ้นงานยางเมื่อมีการเติม SSF ในปริมาณต่างๆ

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

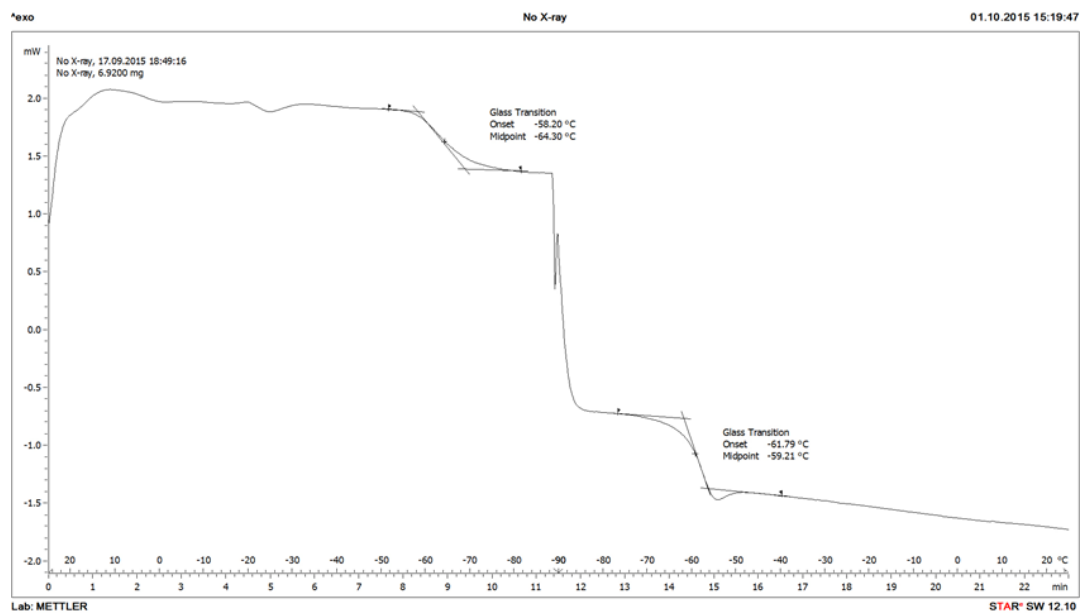
นำชิ้นงานยางพาราที่ได้จากการพัฒนาสูตรยางพาราในขั้นตอนที่ 2 (ตารางที่ 4) มาทำการทดสอบเพื่อหาค่า glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) หาค่า Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermal gravimetric Analysis (TGA) ซึ่งจะแสดงผลค่าต่าง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

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย DSC จะวิเคราะห์หาค่า T_g ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 7 และโครมาโตแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 54-65 พบว่าค่า $T_{g \text{ onset}}$ ทั้งชิ้นแรก ที่ลดอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และในขั้นตอนที่สองเพิ่มอุณหภูมิจาก -90 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเช่นกัน มีค่า $T_{g \text{ onset}}$ ใกล้เคียง มีค่าในช่วง -56.40 องศาเซลเซียส ถึง -61.79 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่างกันเล็กน้อยเพียง

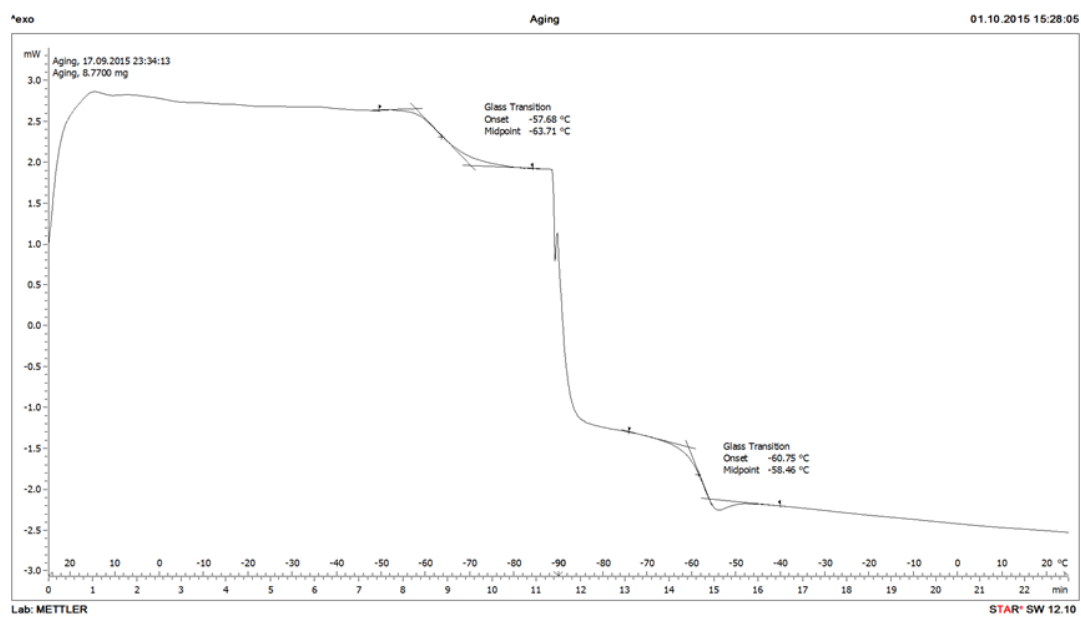
1-5 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ยางได้ จากการฉายรังสี x-ray ในช่วง 200 - 6,000 cGy พบว่าไม่มีผลทำให้สายโซ่โครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลง โดยพบว่าไม่มีเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลหรือเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่าง ยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ

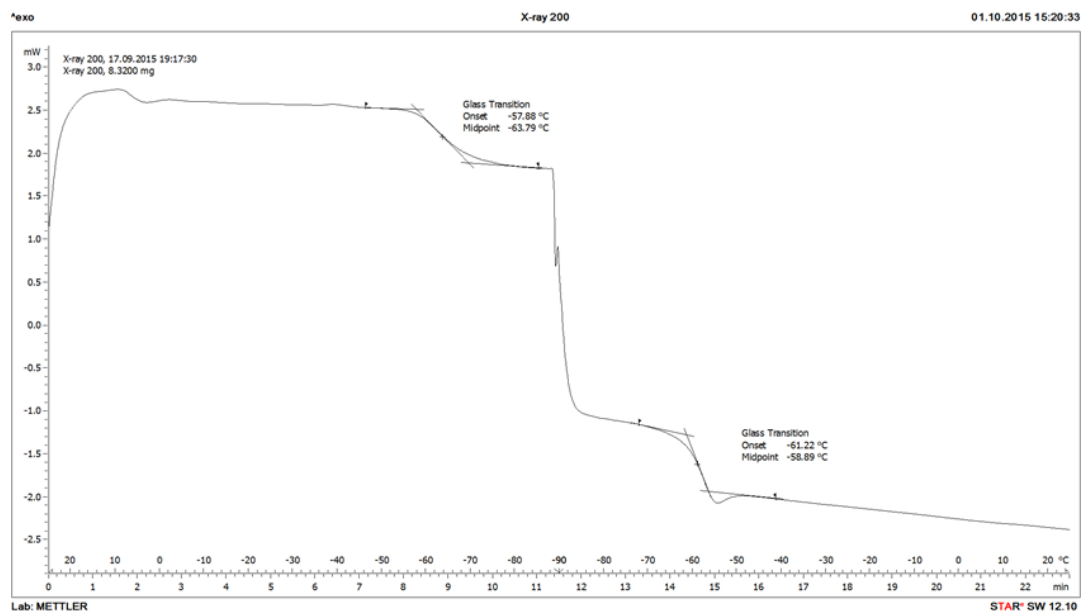
ตัวอย่าง	$T_{g \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	
	1 st ลดอุณหภูมิจาก 25 $^{\circ}\text{C}$ ไปที่ -90 $^{\circ}\text{C}$	2 nd เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 $^{\circ}\text{C}$ ไปที่ 25 $^{\circ}\text{C}$
Non x-ray	-58.20	-61.79
Aging	-57.68	-60.75
x-ray 200 cGy	-57.88	-61.22
x-ray 400 cGy	-57.81	-60.73
x-ray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



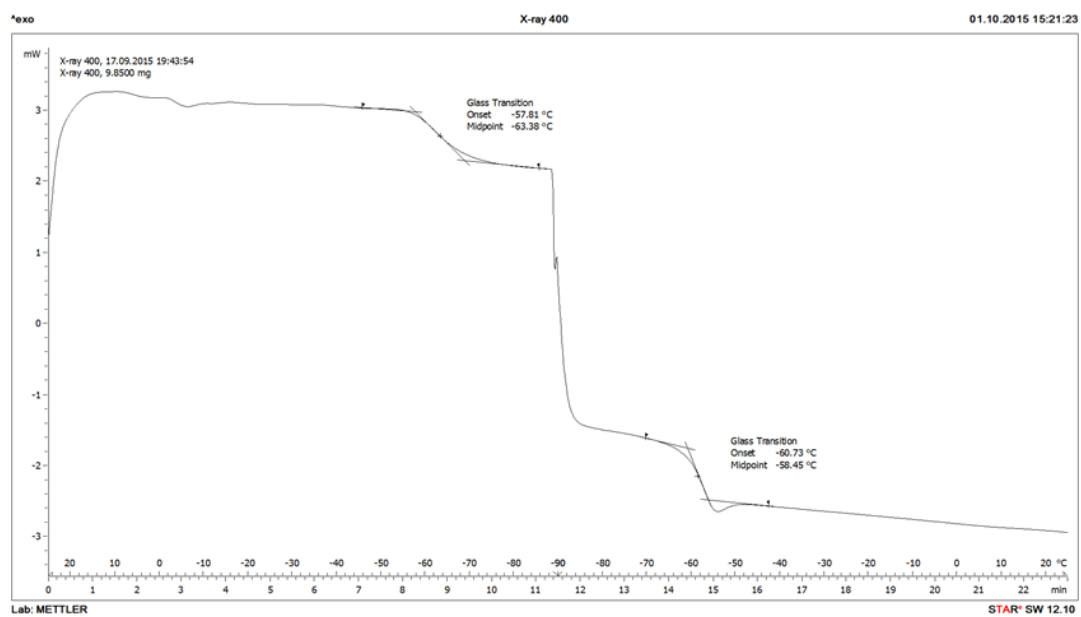
ภาพที่ 54 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (Non x-ray)



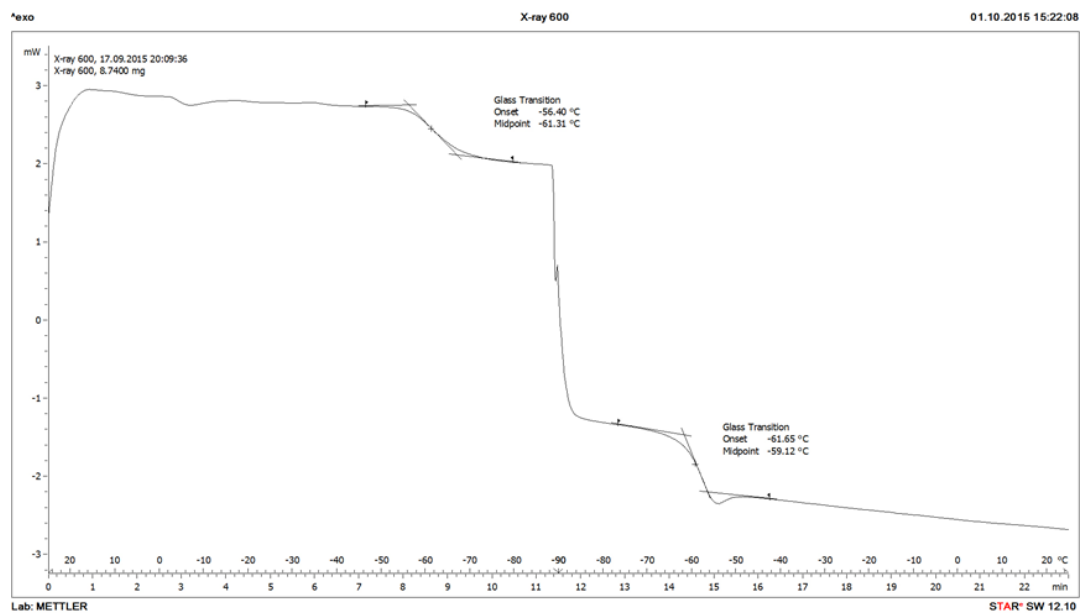
ภาพที่ 55 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการ Aging



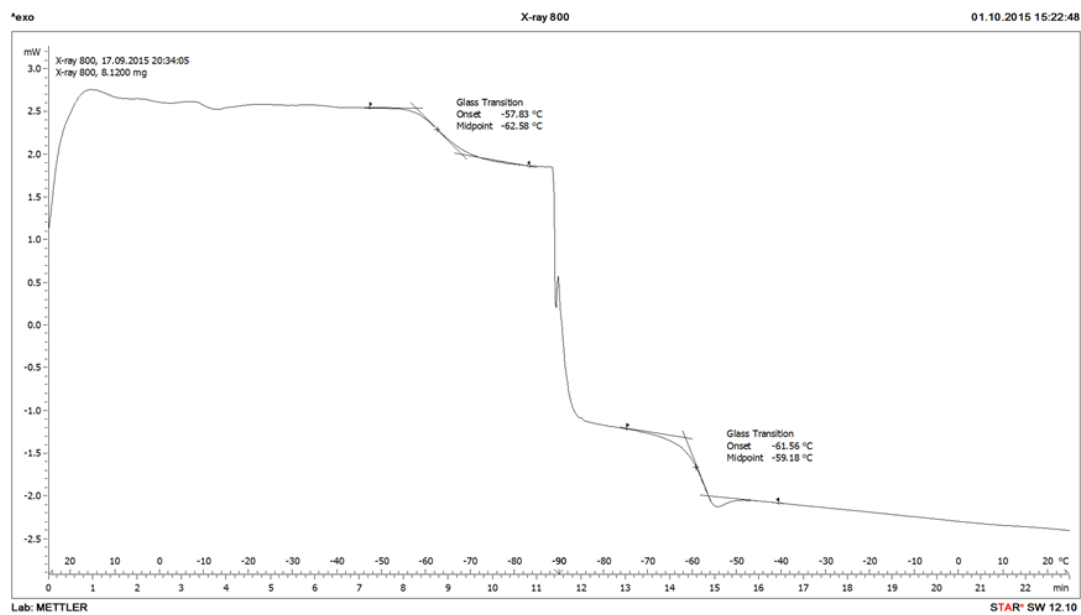
ภาพที่ 56 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 200 cGy



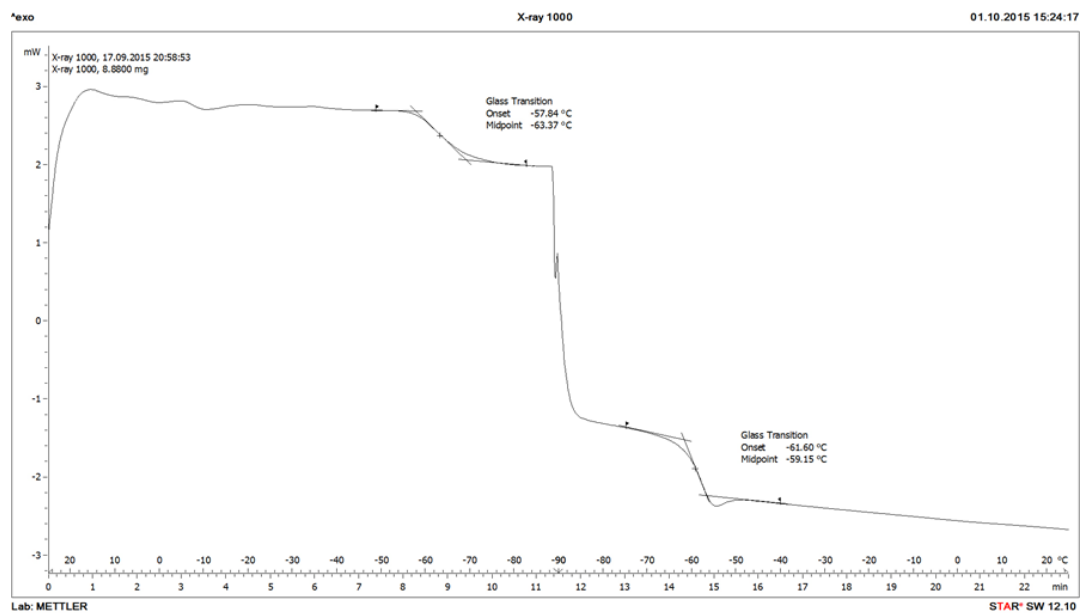
ภาพที่ 57 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 400 cGy



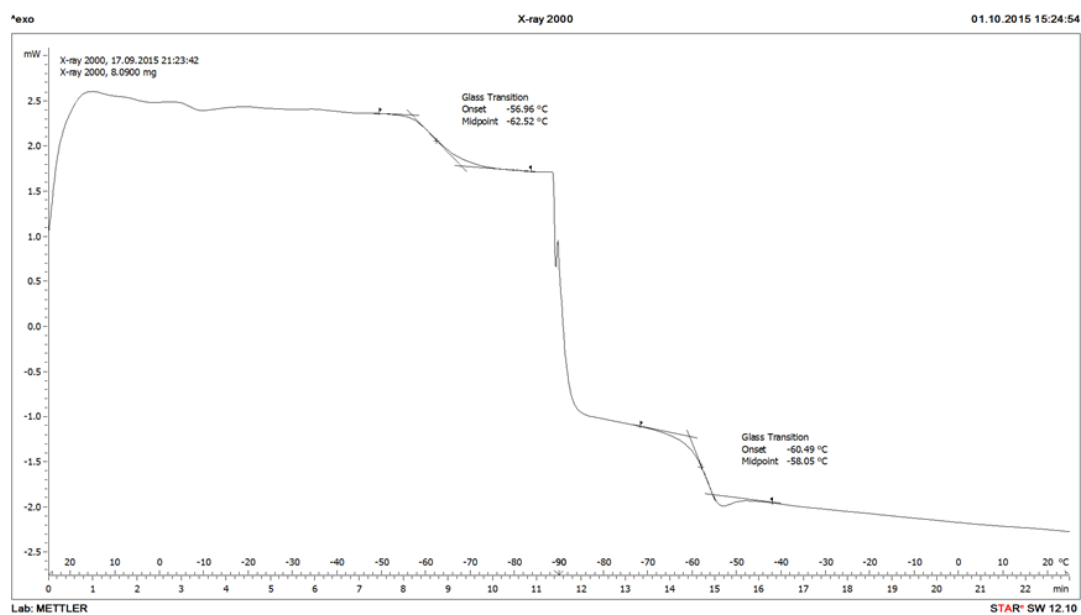
ภาพที่ 58 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 600 cGy



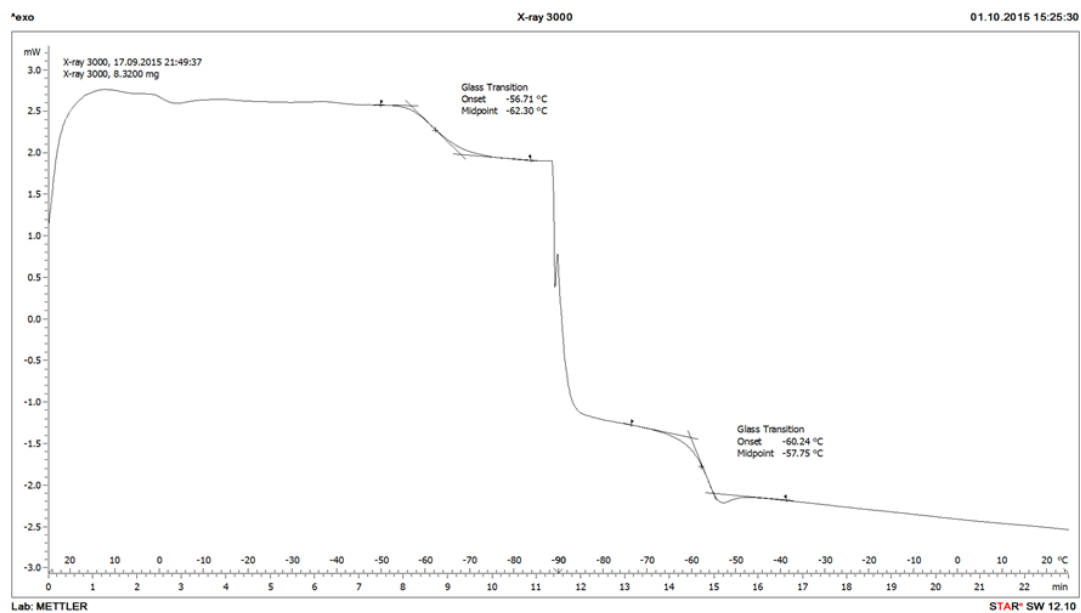
ภาพที่ 59 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี 800 cGy



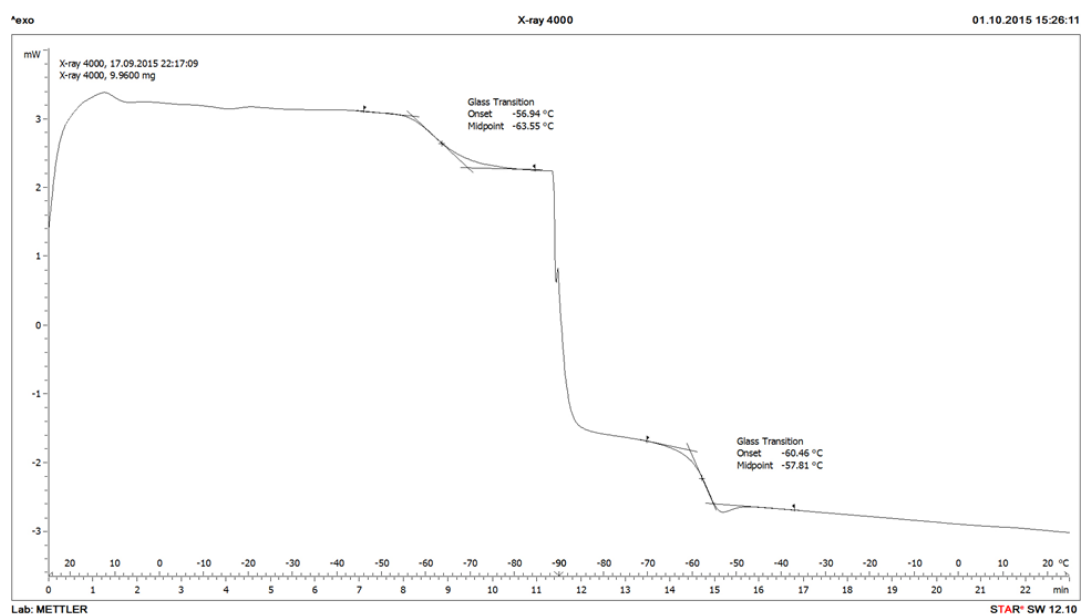
ภาพที่ 60 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 1000 cGy



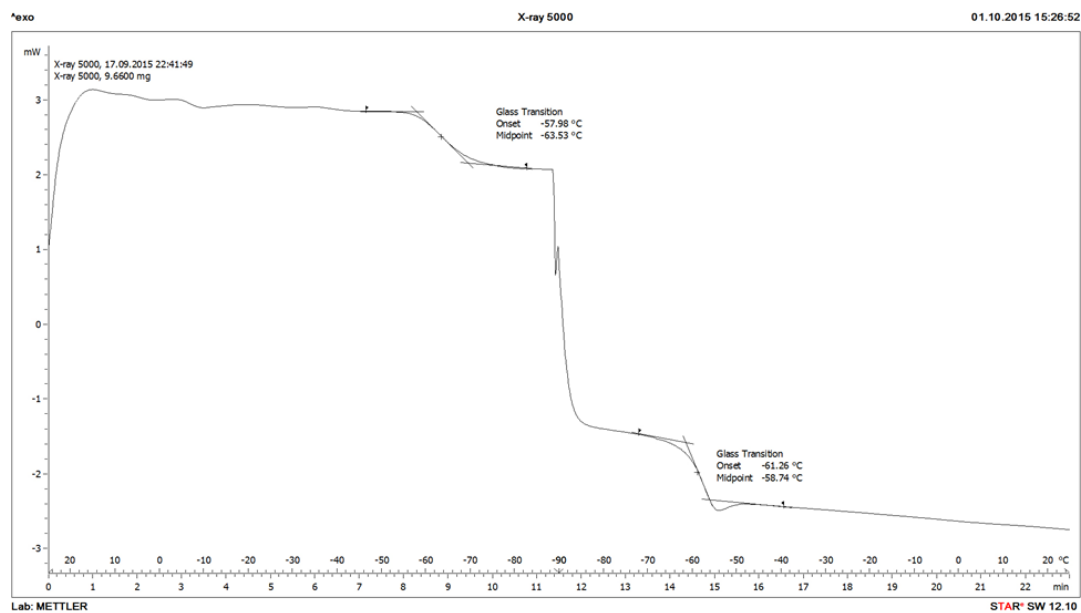
ภาพที่ 61 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 2000 cGy



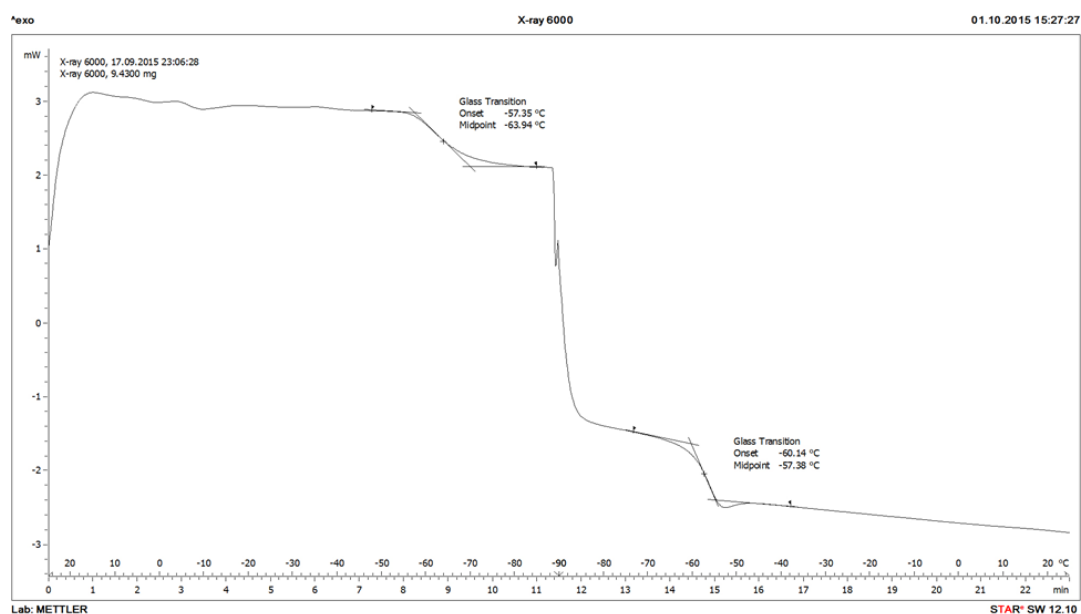
ภาพที่ 62 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 3000 cGy



ภาพที่ 63 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 4000 cGy



ภาพที่ 64 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 5000 cGy

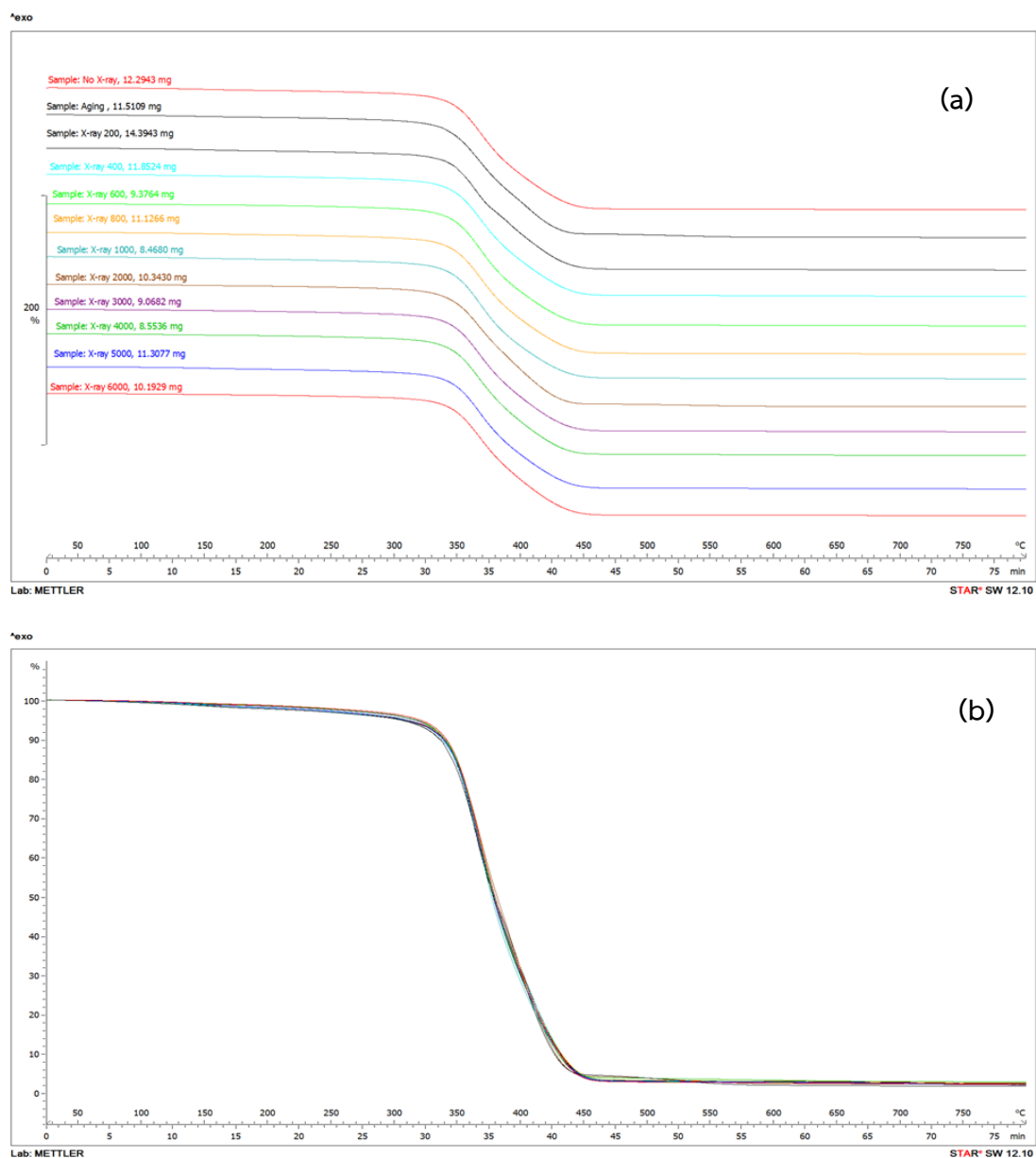


ภาพที่ 65 โคโรมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 6000 cGy

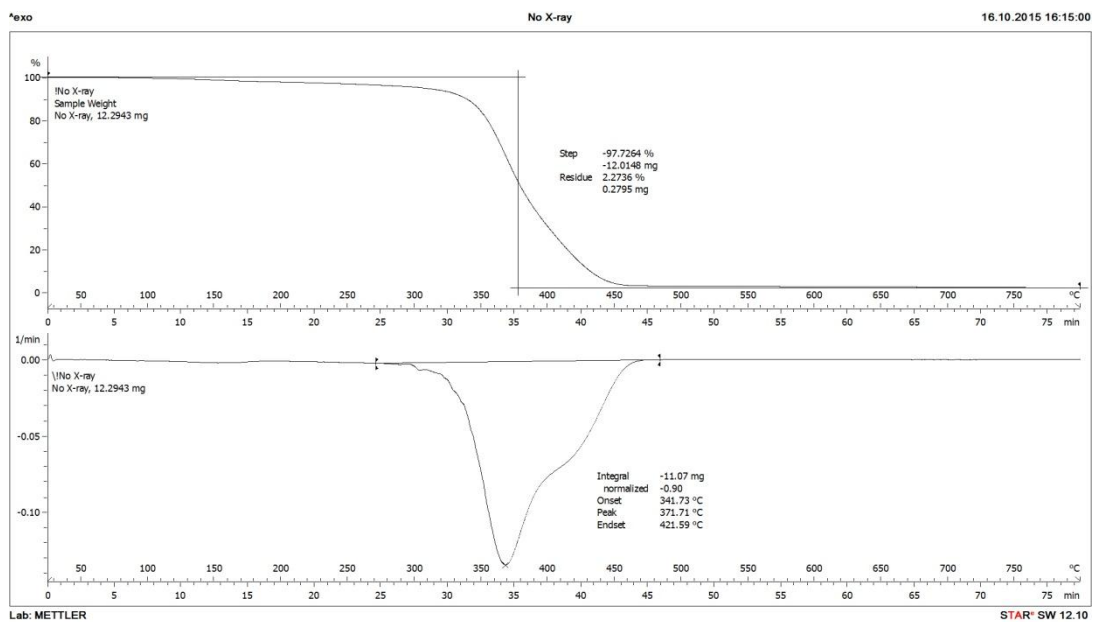
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จะวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงาน Yang ที่ผ่านการ Aging, ก่อนการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีแสดงดังตารางที่ 8 และโครมาโตรแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 66 ซึ่งพบว่าค่า $T_{d\text{ onset}}$ ประมาณ $335.91 - 341.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{d\text{ peak}}$ ประมาณ $365.21 - 371.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงาน Yang ดังกล่าวพบว่ามี 2 องค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบแรกมีอุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ $97.15 - 98.28\text{ \%}$ และที่เหลือเป็น residue $1.72 - 2.85\text{ \%}$ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงาน Yang ที่ผ่านการ Aging และหลังการฉายรังสี จะมีค่า $T_{d\text{ onset}}$ และ $T_{d\text{ peak}}$ ต่ำกว่าชิ้นงาน Yang ที่ไม่ได้ฉายรังสีประมาณ $2-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงาน Yang ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีให้แก่ชิ้นงาน Yang ในช่วง $200 - 6,000\text{ cGy}$ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของ Yang ประกอบด้วยการตัดสายโซ่โมเลกุลในโครงสร้าง Yang ให้สั้นลงในบางสายโซ่โมเลกุลซึ่งเป็นผลมาจากค่า T_d ที่ลดลงและเมื่อพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงาน Yang ที่ Aging ชิ้นงาน Yang ที่ฉายรังสีขนาด 200 และ 2,000 cGy มีลักษณะพิกซ้อนกันอยู่สองพิกแสดงดังภาพที่ 68, 69 และ 74 และมีการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้าง Yang เนื่องมาจากปรากฏการณ์การสลายตัวนั้นมีช่วงการสลายตัวที่กว้างของชิ้นงาน Yang ที่ฉายรังสีขนาด 600, 4,000 และ 6,000 cGy โดยพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG แสดงดังภาพที่ 71, 76 และ 78

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงาน ตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ

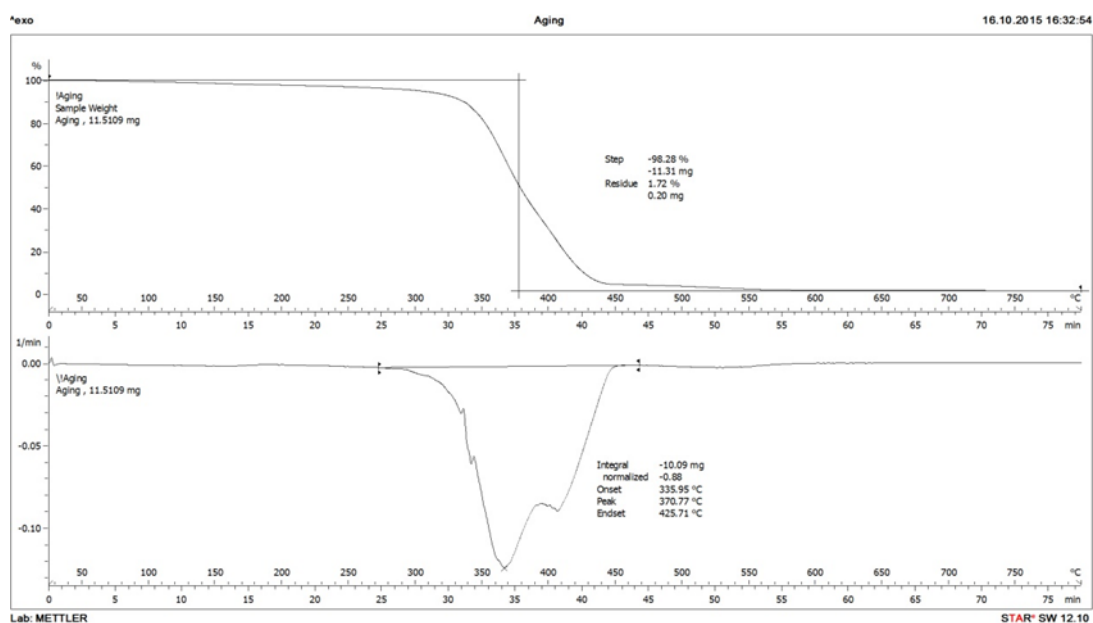
ตัวอย่าง	Decomposition Temperature,		composition	
	T_d ($^{\circ}\text{C}$)		1 st	2 nd
	for 1 st composition $T_{d\text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d\text{ peak}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	composition (%w/w)	composition (Residue) (%w/w)
Non x-ray	341.73	371.71	97.73%	2.27%
Aging	335.95	370.77	98.28%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



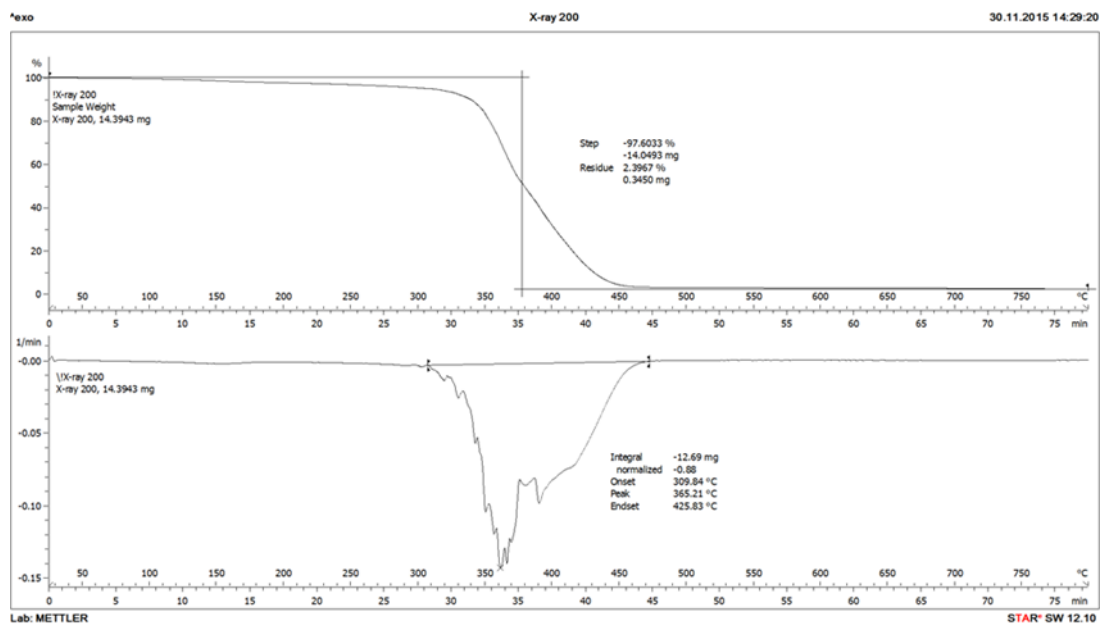
ภาพที่ 66 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่าน และผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ (a) และกราฟที่ overlay (b)



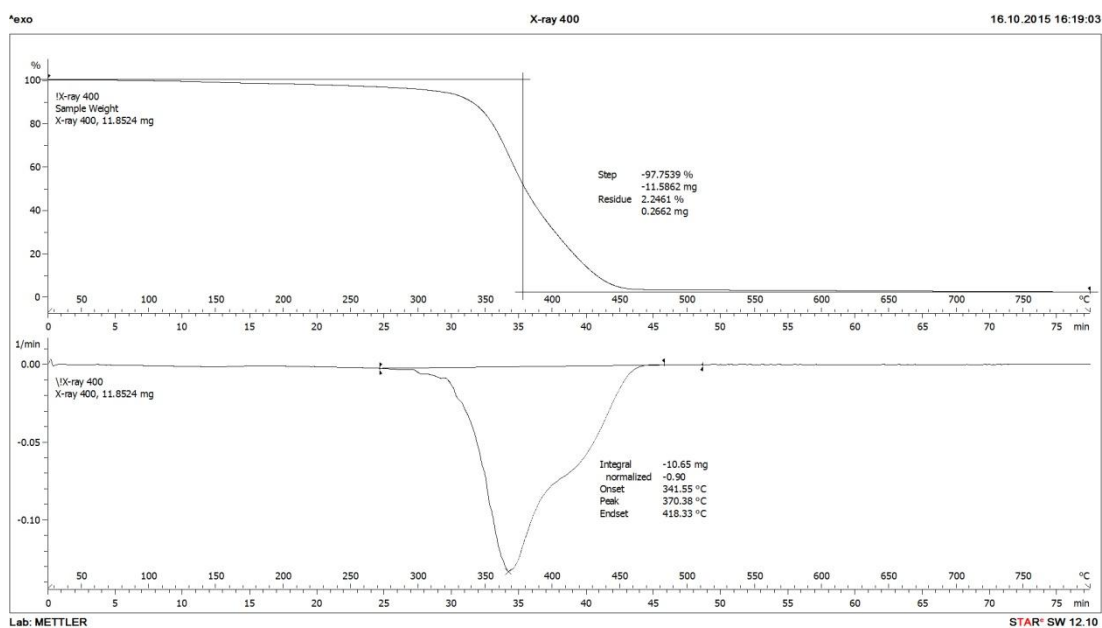
ภาพที่ 67 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (Non x-ray)



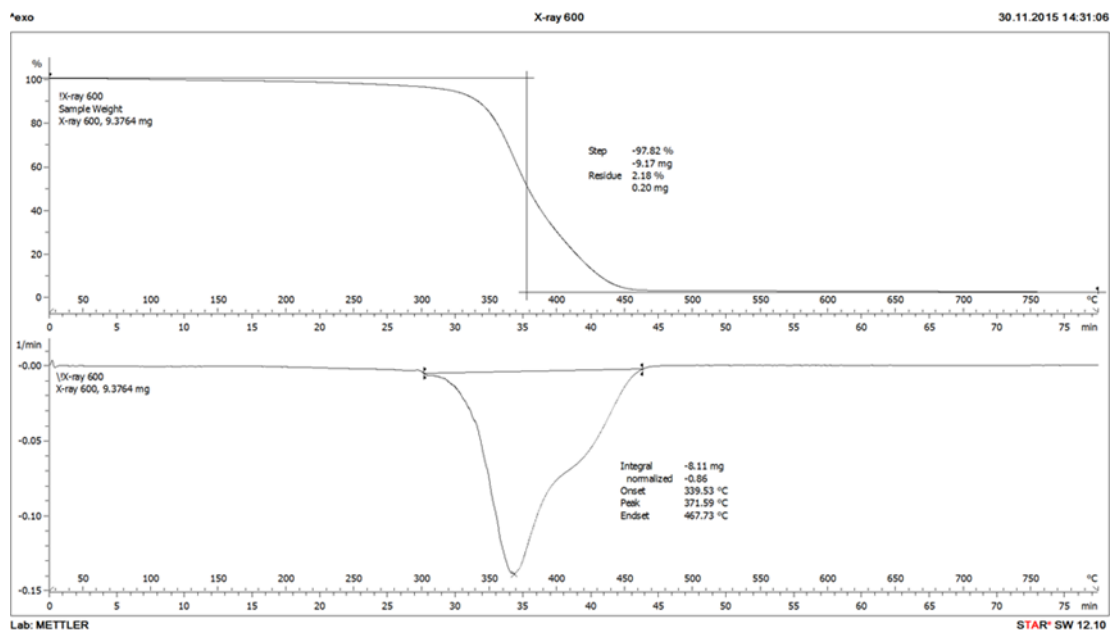
ภาพที่ 68 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging



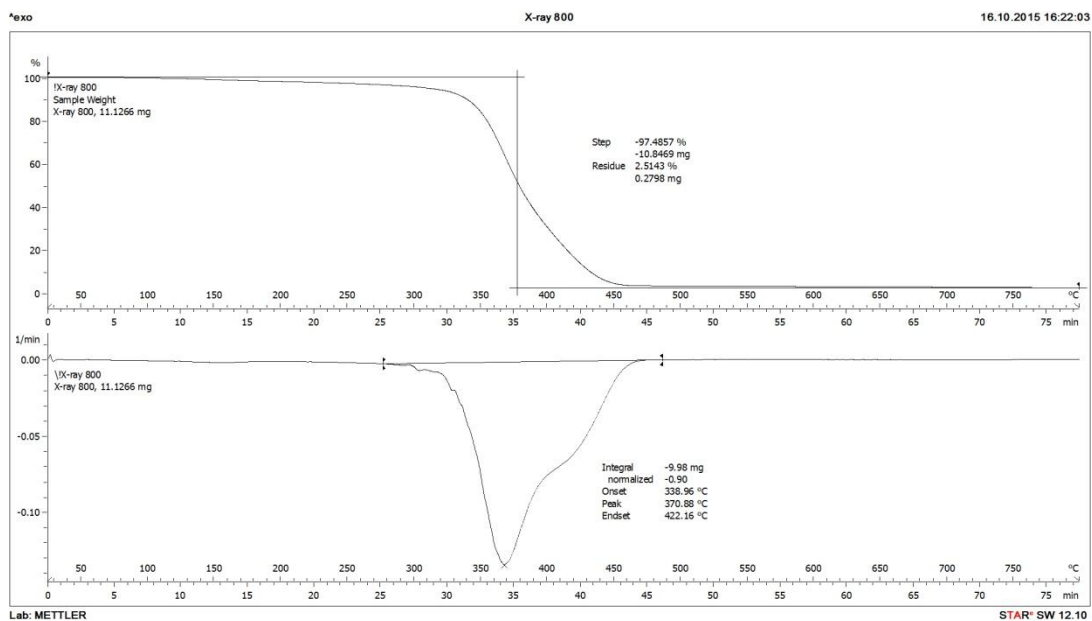
ภาพที่ 69 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 200 cGy



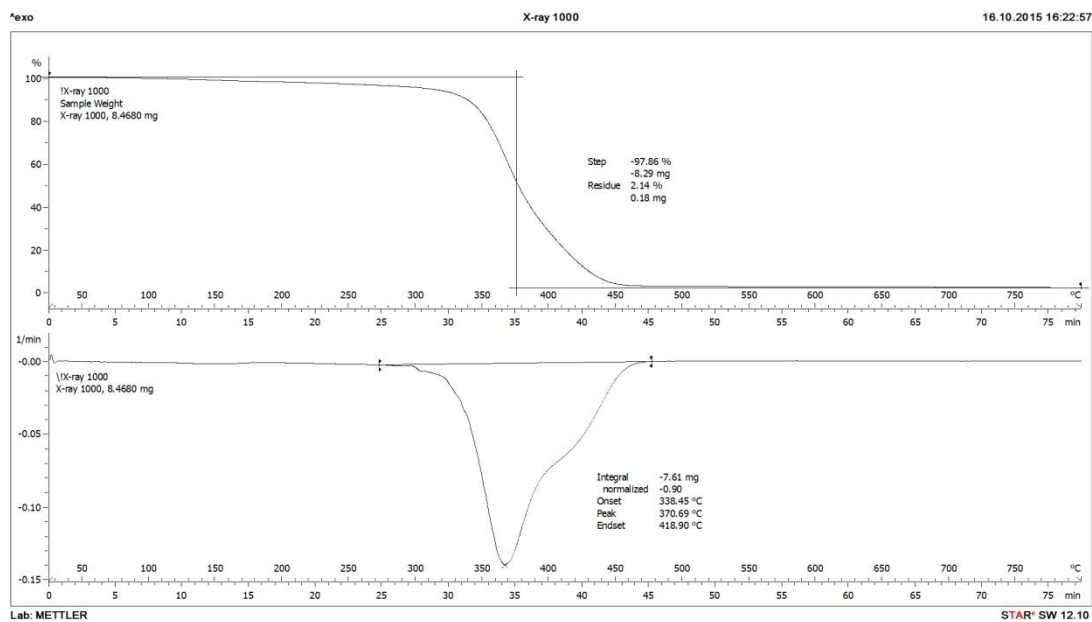
ภาพที่ 70 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 400 cGy



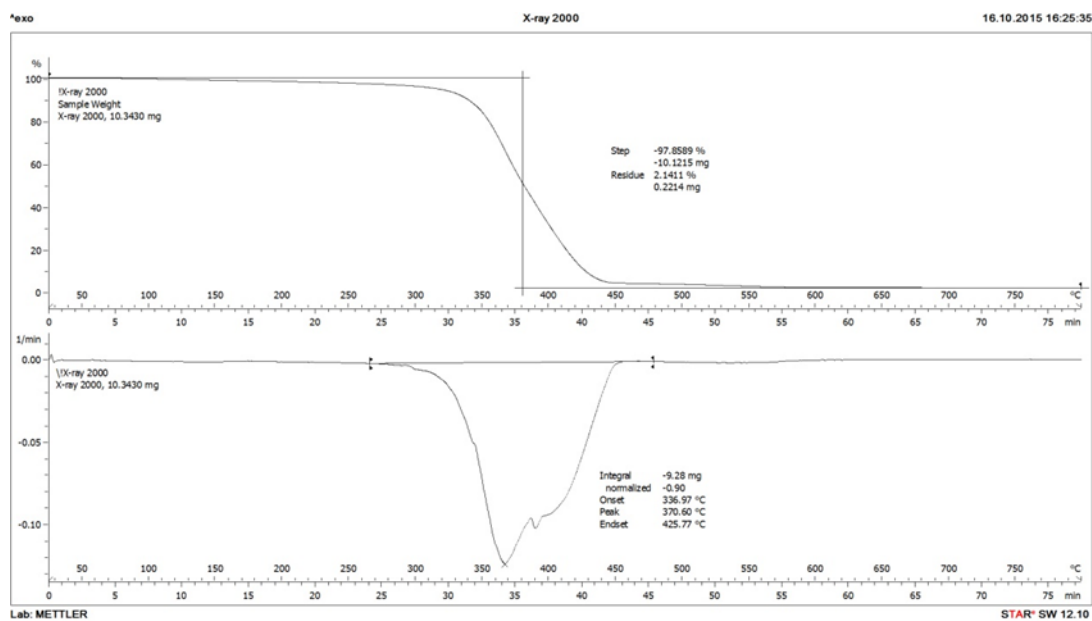
ภาพที่ 71 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 600 cGy



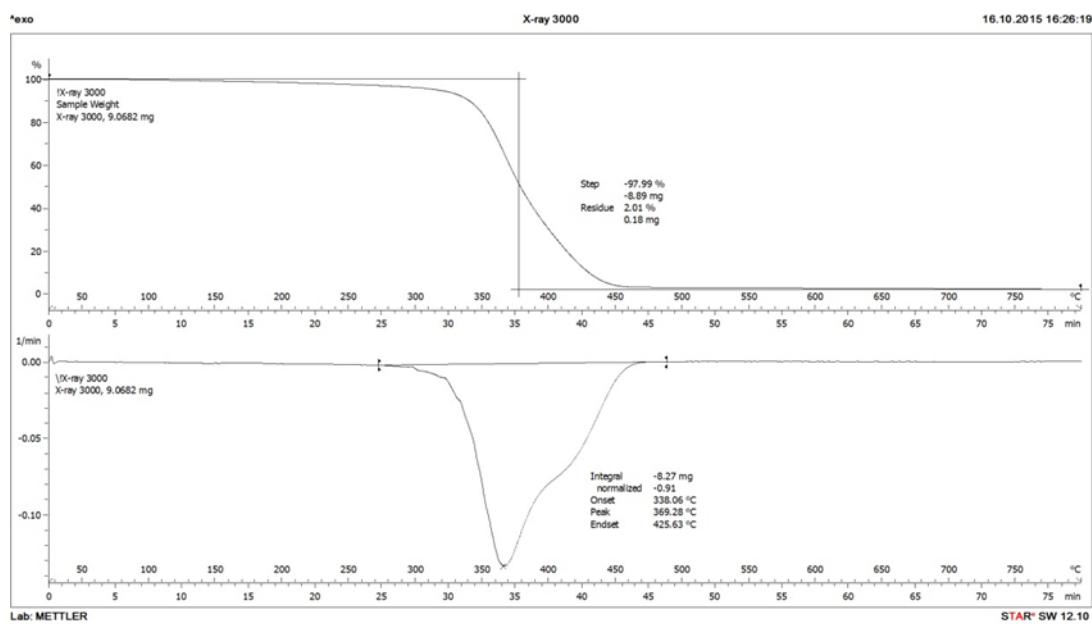
ภาพที่ 72 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 800 cGy



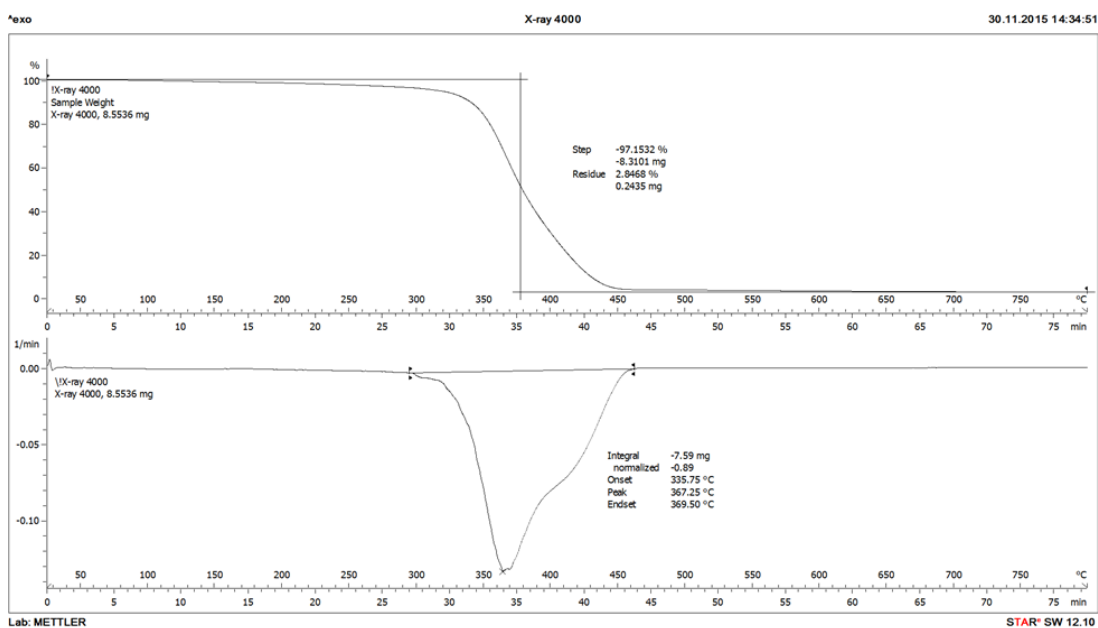
ภาพที่ 73 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 1,000 cGy



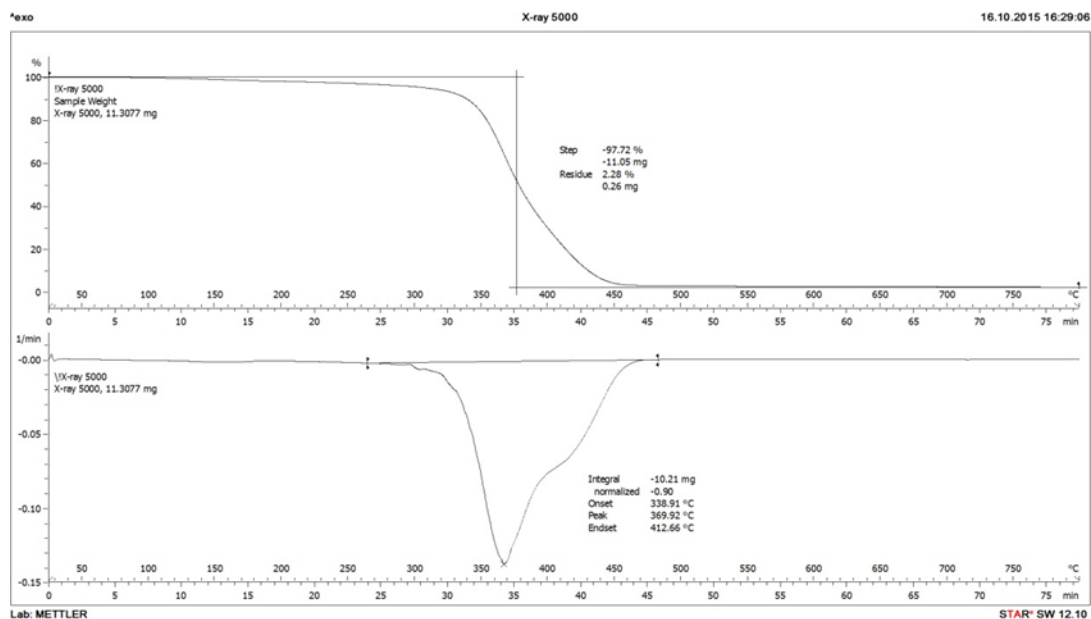
ภาพที่ 74 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 2,000 cGy



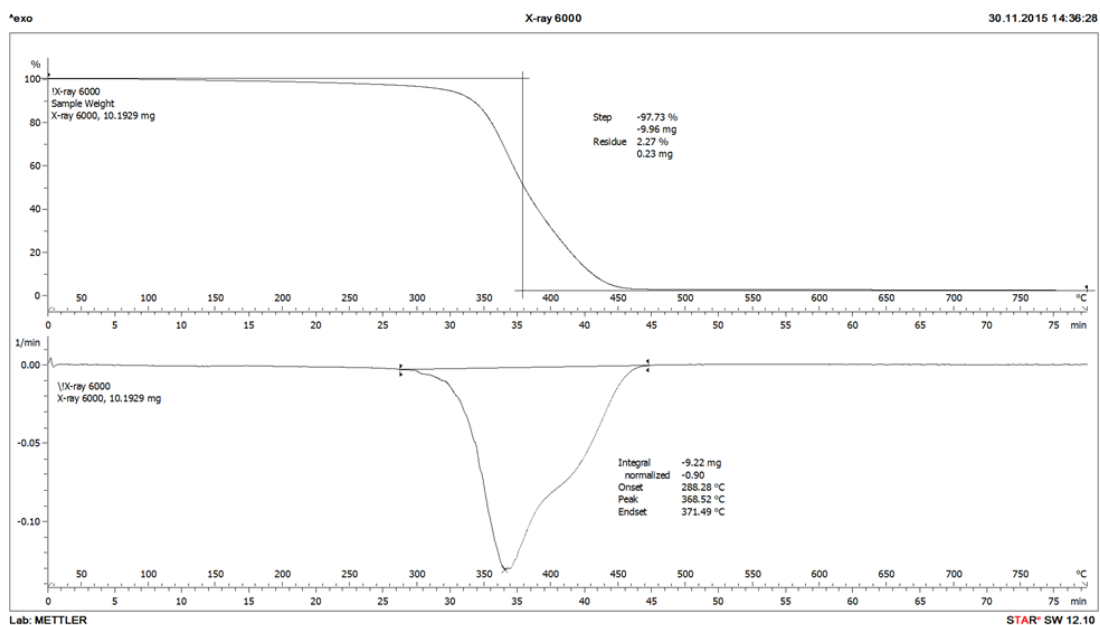
ภาพที่ 75 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 3,000 cGy



ภาพที่ 76 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 4,000 cGy

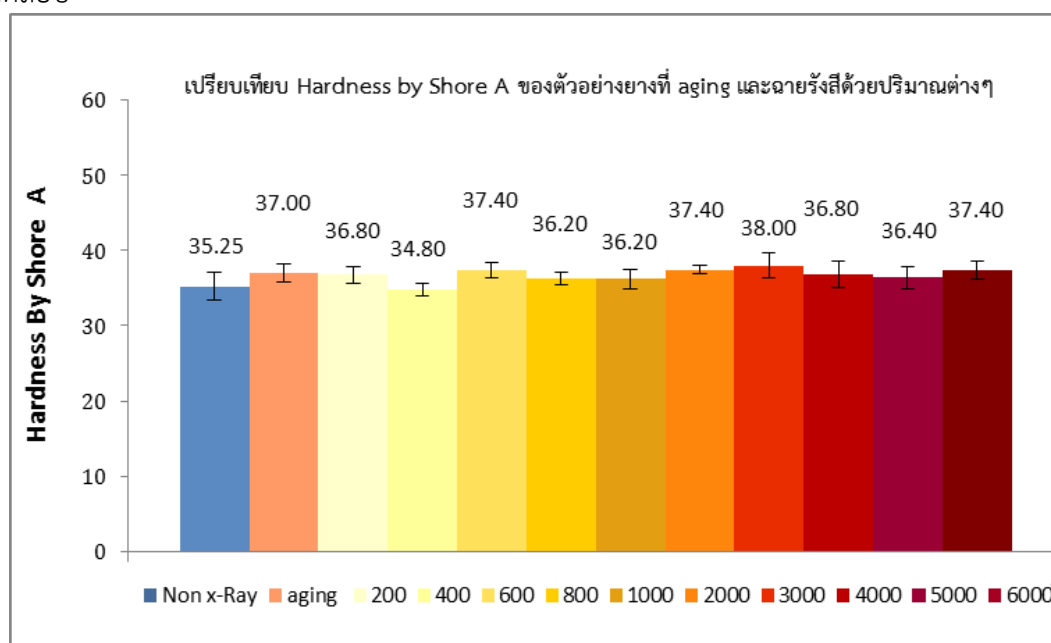


ภาพที่ 77 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 5,000 cGy



ภาพที่ 78 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสี x-ray 6,000 cGy

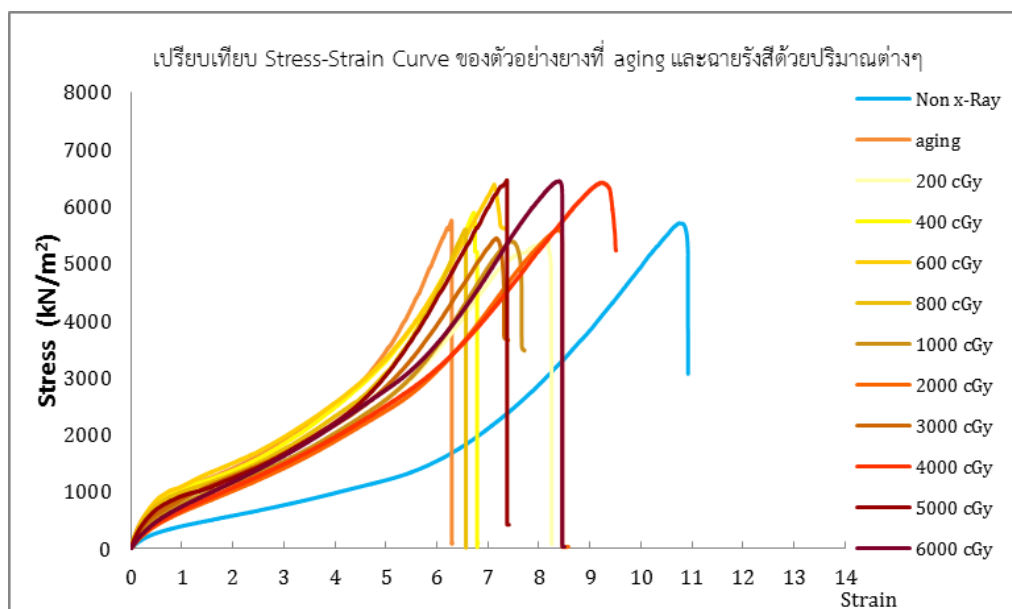
จากภาพที่ 79 ค่าความแข็ง Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองนั้น ทั้ง non x-ray, Aging และ x-ray 200, 400, 600, 800, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 และ 6000 cGy มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วง 34.80-38.00 ซึ่งแสดงว่าปริมาณรังสีที่ให้ปริมาณสูงถึง 6000 cGy ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยางที่ทดสอบ



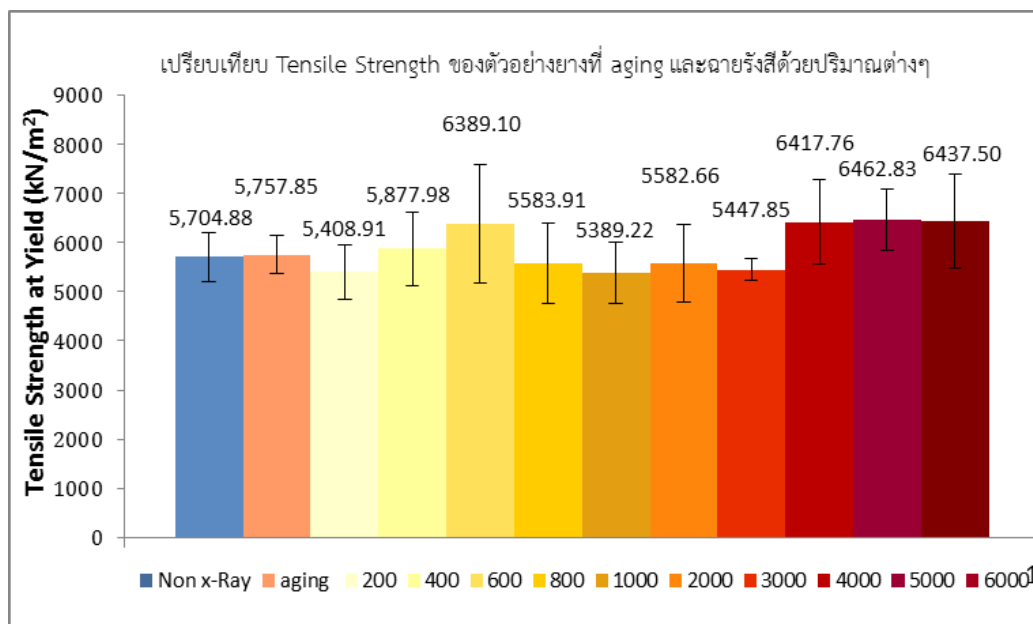
ภาพที่ 79 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน

จากภาพที่ 80, 81, 82 และ 83 แสดง Stress - Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100%Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นพบว่า Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างยางที่ผ่านการฉายรังสีเอกซ์พลังงาน 6 MV ขนาด 200, 800, 1000, 2000 และ 3000 cGy (มีค่า 5389.22 - 5583.91 kN/m²) มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างยาง non x-ray เล็กน้อย (มีค่า 5704.88 kN/m²) นั่นคือมีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ส่วนชิ้นงานยางที่ Aging และ x-ray 400 cGy (มีค่า 5757.85 - 5877.98 kN/m²) จะมีค่าสูงกว่า non x-ray เล็กน้อย แต่ชิ้นงานยางที่ x-ray 600, 4000 และ 6000 cGy (มีค่า 6389.10 - 6462.83 kN/m²) มีค่าสูงกว่า non x-ray เนื่องจากชิ้นงานยางที่นำมาทดสอบนี้เมื่อได้รับความร้อนจากการฉายรังสี มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง โดยเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานตัวอย่างยางที่ฉายรังสีมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่า % Elongation (ภาพที่ 82) และ ค่า Modulus at 100%Elongation (ภาพที่ 83) นั่นคือ ค่า % Elongation ของชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray มีค่าต่ำกว่า non x-ray ส่วนค่า Modulus at 100%Elongation ชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray (มีค่า 636.70 - 1089.53 kN/m²) มีค่าสูงกว่า non x-ray (มีค่า 393.41 kN/m²) อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อ

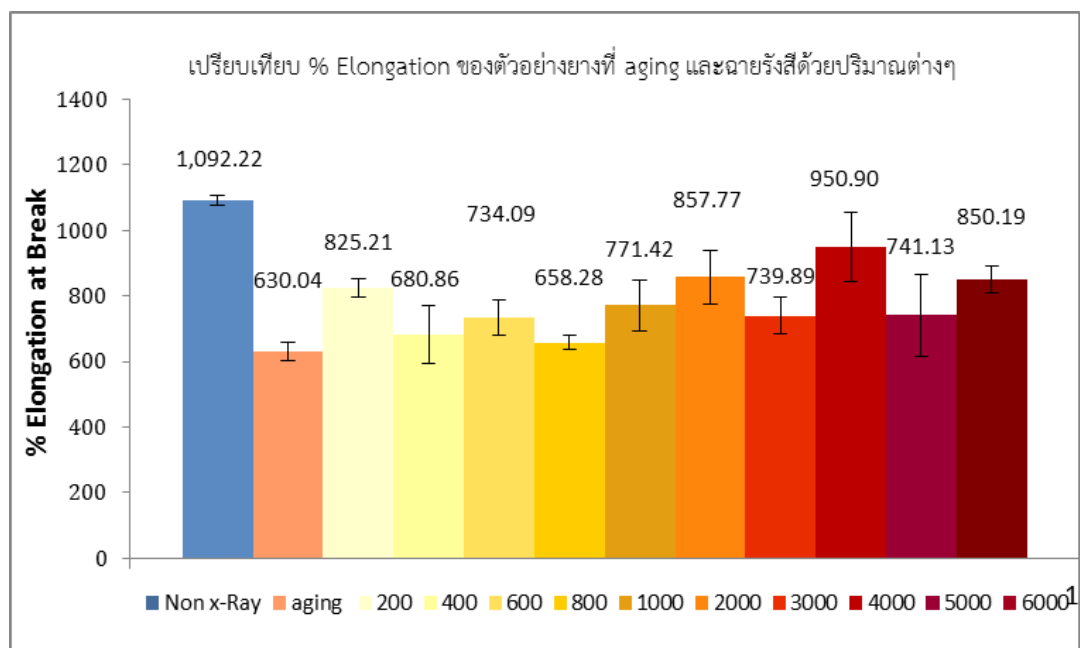
พิจารณาจาก Stress-Strain Curve จะเห็นเส้นกราฟของชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray มีค่าความชันสูงกว่ายาง non x-ray อย่างเด่นชัด แสดงดังภาพที่ 80 นั่นคือชิ้นงานยางที่ Aging และฉายรังสี x-ray จะมีความยืดหยุ่นลดลงนั่นเอง



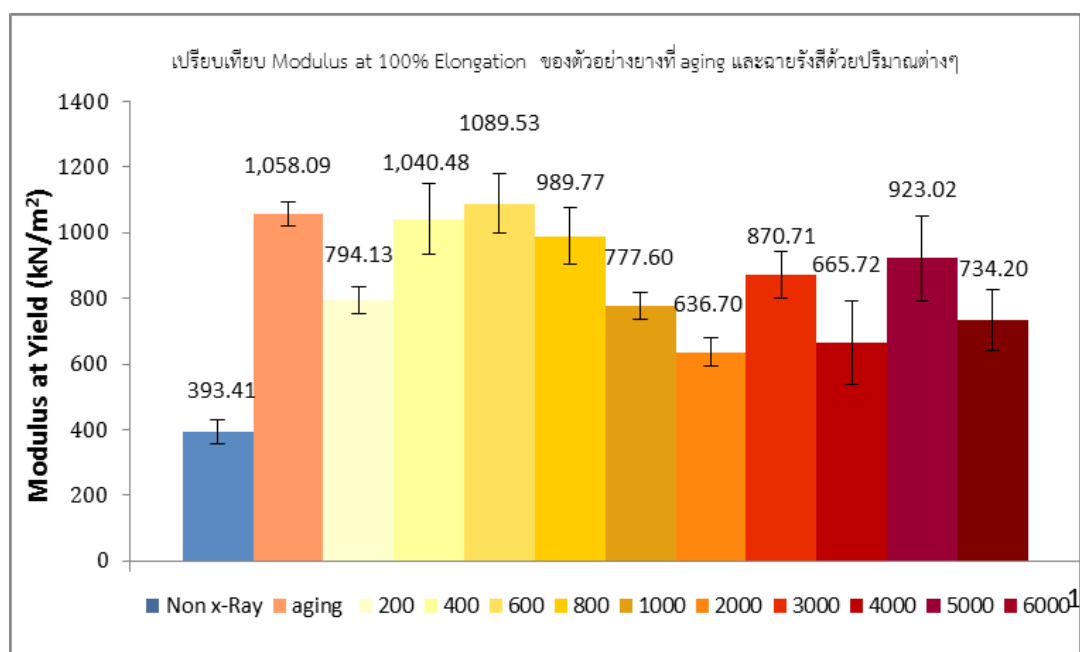
ภาพที่ 80 เปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 81 เปรียบเทียบ Tensile Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน

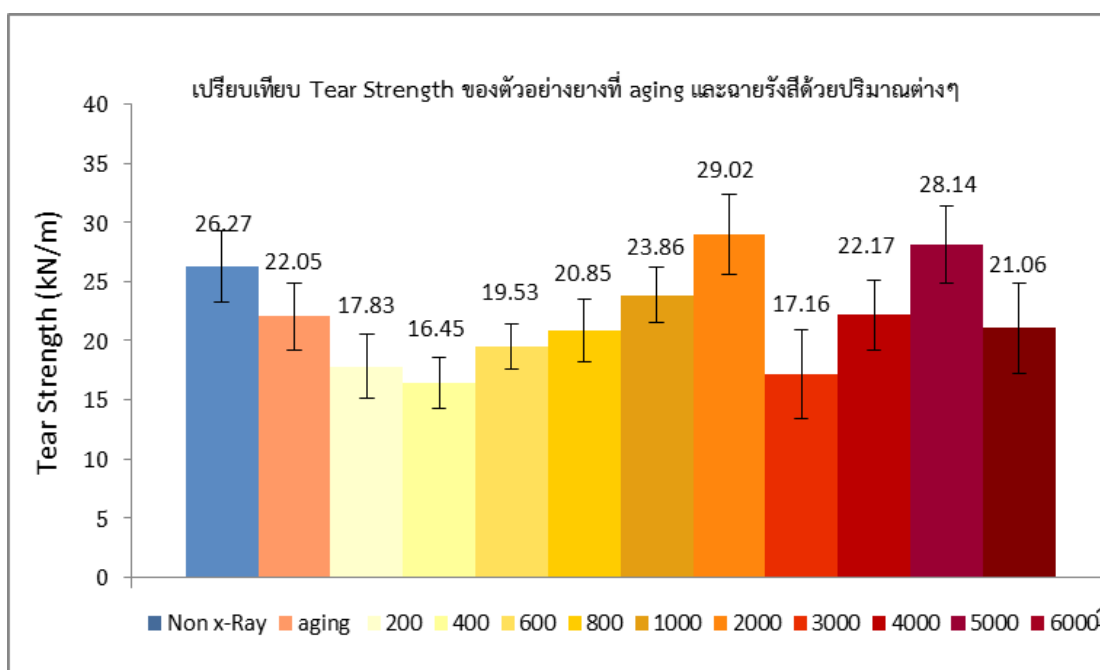


ภาพที่ 82 เปรียบเทียบ %Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 83 เปรียบเทียบ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน

จากภาพที่ 84 แสดง Tear Strength ของของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า Tear Strength ของชิ้นงานยางที่ Aging และผ่านการฉายรังสี 200 – 6000 cGy (มีค่า 16.45 – 23.86 kN/m) มีค่าที่ต่ำกว่าชิ้นงานยาง non x-ray (มีค่า 26.27 kN/m) นั่นคือชิ้นงานยางที่นำมาทดสอบที่ผ่านการฉายรังสี x-ray มีค่าการทนต่อแรงฉีกขาดลดลง ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ฉายรังสี x-ray 2000 มีค่า Tear Strength เท่ากับ 29.02 kN/m และชิ้นงานยาง x-ray 5000 cGy มีค่า Tear Strength เท่ากับ 28.14 kN/m จะเห็นว่ามีค่า Tear Strength สูงกว่าชิ้นงานยาง non x-ray เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 84 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่ Aging, ชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านและผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณต่าง ๆ กัน

5. ผลการปั้นหุ่นจำลองต้นแบบ

ผลจากการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานทำให้ได้แม่แบบหุ่นจำลองจากการปั้นที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดตามที่ได้ออกแบบจากข้อมูลอ้างอิงขนาดของมาตรฐานหญิงไทย และหุ่นจำลองมาตรฐาน Rando rando phantom โดยได้หุ่นต้นแบบที่ปั้นจากดินเหนียวที่มีขนาดรอบเอว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) รอบสะโพก 99 เซนติเมตร (39 นิ้ว) สูง 24 เซนติเมตร (9.44 นิ้ว) ดังภาพที่ 85



ภาพที่ 85 ผลการปั้นแบบหุ่นจำลองต้นแบบจากดินเหนียว

6. ผลการสร้างแม่พิมพ์

ผลการสร้างแม่พิมพ์เรซินผสมไฟเบอร์สำหรับขึ้นหุ่นจำลองอู่เชิงกรานจากยางพาราแสดงดังภาพที่ 86 โดยแม่พิมพ์หุ่นจำลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ด้านหน้าและหลัง สามารถประกบกันได้แนบสนิทและยึดติดกันด้วยน็อตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เมื่อทำการทดสอบด้วยการเทน้ำลงในแม่พิมพ์พบว่าการรั่วซึมเพียงเล็กน้อย สำหรับความคงทนในการขึ้นรูปหุ่นจำลองยางพาราได้ทำการทดสอบความทนความร้อนด้วยการนำแม่พิมพ์ไปทำการอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นสามารถทนต่อความร้อนได้และไม่เสียรูปทรงไปจากเดิม



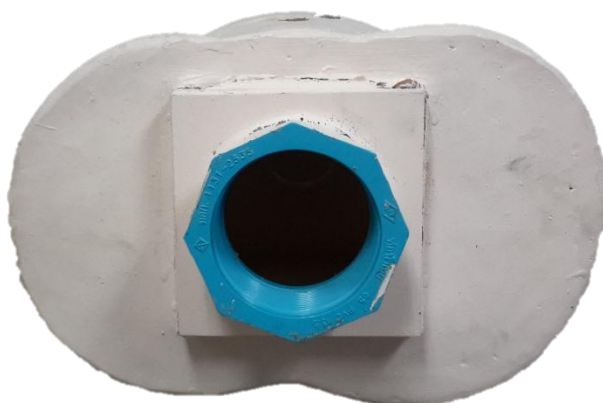
ภาพที่ 86 แม่พิมพ์หุ่นจำลองอู่เชิงกรานที่ผลิตจากเรซินและไฟเบอร์

7. ผลการสร้างหุ่นยางพาราสำหรับวัดปริมาณรังสี

ผลการสร้างหุ่นจำลองยางพาราอั่งเชิงกรานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 87-89 หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดรอบเอว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) รอบสะโพก 99 เซนติเมตร (39 นิ้ว) สูง 24 เซนติเมตร (9.44 นิ้ว) ความสูงจากปากกล่องถึงเอว 24 เซนติเมตร ความกว้างด้านหน้าหลัง 19.5 เซนติเมตร ความกว้างด้านซ้ายขวา 30 เซนติเมตร น้ำหนักรวม 8 กิโลกรัม เมื่อไม่ได้เติมน้ำ หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ ภายในบรรจุกล่องอะคลิลิกสำหรับใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ได้และสามารถเจาะรูที่มีขนาดพอดีสำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีในตำแหน่งต่างๆ ได้ดังภาพที่ 87



ภาพที่ 87 หุ่นจำลองอั่งเชิงกรานจากยางพาราในท่าด้านหน้า โดยมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่งจุด Point A และ Bladder point



ภาพที่ 88 หุ่นจำลองอั่งเชิงกรานจากยางพาราในด้านตัดขวาง

จากภาพหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ในการรักษามะเร็งปากมดลูก และช่องสำหรับใส่หัววัดรังสี โดยมีกล่องอะคลิลิกปริมาตร 12x12x15 ลูกบาศก์เซนติเมตรเพื่อบรรจุน้ำและอุปกรณ์สอดใส่แร่



ภาพที่ 89 ภาพแสดงหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานจากยางพาราในท่าด้านข้าง

สำหรับเหตุผลที่ไม่ได้ออกแบบให้หุ่นจำลองอู้งเชิงกรานเป็นเนื้อยางพาราทั้งหมด เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้สามารถใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่เข้าไปในหุ่นจำลองได้โดยไม่มีช่องอากาศภายใน อย่างไรก็ตามหากสร้างหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานจากยางพาราทั้งหมดสามารถนำไปใช้ในการประกันคุณภาพการรักษาในงานรังสีรักษาร่วมกับอุปกรณ์สอดใส่แร่ชนิดอื่นๆ เช่น cylinder หรือ สาย catheter ซึ่งมีท่อนำแร่เพียงเส้นเดียวแทน Tandem และ Ovoids ได้ สำหรับหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้การเลือกใช้กล่องอะคริลิกเพื่อให้สามารถรองรับน้ำที่เติมเข้าไปได้ แต่ข้อเสียของการใช้กล่องอะคริลิก ได้แก่ ความหนาแน่นของตัวผนังของกล่องทำให้เกิดสิ่งแปลกปลอมโลหะ (artifact) ขึ้นบนภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และอาจส่งผลต่อการลดทอนปริมาณรังสีสำหรับการรักษาด้วยรังสีรักษาระยะไกล อย่างไรก็ตามไม่มีผลต่อการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในกล่องอะคริลิกซึ่งบรรจุในหุ่นจำลอง

อย่างไรก็ตามหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โดยไม่ได้จำเพาะเพียงการวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบการวางแผนการรักษาสำหรับมะเร็งปากมดลูกเท่านั้น เช่น สามารถประยุกต์ใช้ในการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ที่ใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่รูปแบบอื่นๆ ได้ เนื่องจากผู้วิจัยได้ออกแบบให้หุ่นจำลองอู้งเชิงกรานมีช่องขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตรสำหรับการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่แบบต่างๆ ได้ ทำให้สามารถนำหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานไปใช้ประโยชน์สำหรับประกอบการฝึกทักษะในการสร้างภาพสำหรับนักรังสีการแพทย์ ฝึกทักษะการวางแผนการรักษาสำหรับนักฟิสิกส์การแพทย์ และที่สำคัญตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อนำไปใช้เป็นหุ่นสำหรับวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณค่าปริมาณรังสีจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาตามกระบวนการของการประกันคุณภาพ และการควบคุมคุณภาพในงานรังสีรักษา

ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อทดสอบแผนการรักษาสำหรับการรักษาด้วยการฉายรังสีระยะไกลได้ สำหรับคู่มือการใช้งานหุ่นจำลองอู่เชิงกราน คณะผู้วิจัยได้จัดทำร่างภาคผนวก ก ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวปฏิบัติในการใช้งานให้ถูกต้องให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานหุ่นจำลองอู่เชิงกรานจากยางพาราที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

8. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของชิ้นงาน

ผลการวัดค่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและค่าความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อภายในของหุ่นจำลองอู่เชิงกรานที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 10 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยภายในหุ่นจำลองเท่ากับ 1.03 ลูกบาศก์เซนติเมตร และความสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 0.03 โดยหุ่นจำลองมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยแสดงถึงเนื้อเยื่อของหุ่นจำลองมีความสม่ำเสมอที่ดี หากประมาณช่วงจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้พบว่าหุ่นจำลองมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1 – 1.06 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 10 ผลของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของหุ่นจำลองอู่เชิงกราน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.03	0.03

9. ผลการทดสอบและการประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองอู่เชิงกรานยางพารา

ผลที่ได้จากการวัดค่าปริมาณรังสีในตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ในการกำหนดค่าปริมาณรังสีเพื่อการรักษาจากการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งตำแหน่ง Point A, rectal point และ bladder point เมื่อกำหนดปริมาณรังสีที่ให้กับตำแหน่ง normalization point (Point A) เท่ากับ 0.5 Gy ส่งผลให้ใช้เวลาในการส่งแร่เพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามที่กำหนดเป็นเวลา 37.6 วินาที และปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 11 โดยคำนวณวัดและผลการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข

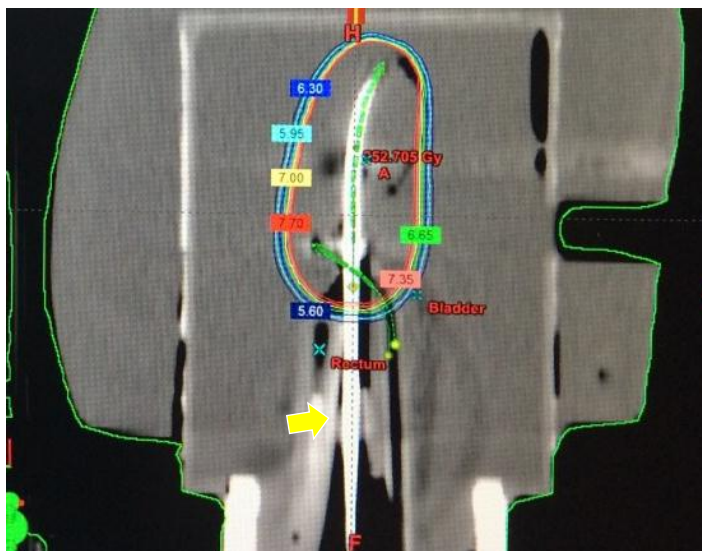
ตารางที่ 11 ปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่งต่างๆ

	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 11 พบว่าค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ตำแหน่ง Point A, Rectal Point และ Bladder point เท่ากับ 28.97, 0.82 และ 11.91 ตามลำดับ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างของการนับวัดปริมาณรังสีประเด็นแรกมีสาเหตุจากระยะจาก source ถึงหัววัดรังสีที่สั้นอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของปริมาณรังสีที่นับวัดได้เนื่องจากที่บริเวณใกล้ source มีความแตกต่างของปริมาณรังสีสูง (high dose gradient) ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีค่อนข้างมาก (ปริมาณรังสีลดลงอย่างรวดเร็วจากระดับ 100 Gy ถึง 0.5 Gy ที่ตำแหน่ง Point A ในระยะ 2 เซนติเมตร) นอกจากนี้การวิจัยในครั้งนี้ใช้หัววัดรังสีที่มีขนาดใหญ่ปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เพิ่มระยะทางการวัดค่าปริมาณรังสีซึ่งอาจส่งผลให้ค่าที่นับวัดปริมาณรังสีมีความแตกต่างกันสูง การเลือกหัววัดรังสีที่มีขนาดเล็กลงอาจทำให้การวัดค่าปริมาณรังสีมีความแตกต่างลดลงได้ นอกจากนี้เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินบริเวณที่ dose gradient ต่างกันควรมีเกณฑ์ที่ต่างกัน (36) โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณรังสีจากการวัดปริมาณรังสี brachytherapy dosimetry นั้น การใช้ความแตกต่างของปริมาณรังสีเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอต่อการประเมิน การพิจารณาค่า distance to agreement (DTA) จากค่า gamma index มาร่วมในการประเมินค่าความแตกต่างในทาง Brachytherapy (37, 38) ด้วยจะทำให้เพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ผลได้มากยิ่งขึ้น

จากผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอู้งาชิงกรานด้วยการให้ปริมาณรังสีด้วยรังสีรักษา ระยะใกล้ที่มีคุณลักษณะเฉพาะของการกระจายปริมาณรังสี (dose distribution) ซึ่งมีการลดลงของปริมาณรังสีอย่างรวดเร็วในระยะทางสั้น ส่งผลให้ค่าปริมาณรังสีที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงอย่างมากหากจัดวางตำแหน่งหัววัดรังสีผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การวางหัววัดรังสีในน้ำมีโอกาสดังกล่าวที่ความผิดพลาดของตำแหน่งได้ง่ายกว่าการวางใน solid water phantom ที่กำหนดตำแหน่งคงที่ไว้อย่างไรก็ตาม solid water phantom ไม่สามารถออกแบบให้จัดวางอุปกรณ์สอดใส่แร่ให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ทั้งหมด ดังนั้นสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ด้วยการออกแบบอุปกรณ์ยึดจับหัววัดรังสีให้มีลักษณะแบบเดียวกับ jig ซึ่งอาจช่วยให้สามารถจัดตำแหน่งได้อย่างเที่ยงตรงทั้งในระหว่างขั้นตอนการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดปริมาณรังสี

จากผลการทดลองในตาราง 11 พบว่าที่ตำแหน่ง Rectal point มีความแตกต่างของปริมาณรังสีที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าน้อยกว่า 1% เนื่องจากตำแหน่ง rectal point (ลูกศรชี้) อยู่ห่างจากบริเวณที่เป็น high dose gradient ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่ง point A และ Bladder point ที่อยู่ในบริเวณ high dose gradient ดังแสดงในภาพที่ 90 ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการจัดอุปกรณ์และความถูกต้องของการวัดปริมาณรังสีสำหรับการประยุกต์ใช้หุ่นจำลองควรเลือกตำแหน่งในการเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่ห่างจาก high dose gradient นอกเหนือจากตำแหน่ง Point A



ภาพที่ 90 ภาพตัดขวางด้านข้างแสดงตำแหน่งของ Rectal point ที่ห่างจากบริเวณ high dose gradient

ประเด็นที่ 2 จากการออกแบบการยึดอุปกรณ์สอดใส่แร่ และหัววัดรังสี จากงานวิจัยของ de Almeida และคณะ (18) ได้มีการออกแบบหุ่นจำลองในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยครั้งนี้ แต่การใส่ อุปกรณ์สอดใส่แร่มีความแตกต่างกัน โดยเป็นการจัดวางอุปกรณ์สอดใส่แร่ในหุ่นอย่างถาวรส่งผลให้ สามารถจัดอุปกรณ์ในการทำการประกันคุณภาพได้ง่ายและไม่ต้องหาตำแหน่งความสัมพันธ์ของ point A, bladder point และ rectal point กับตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อ ผู้ใช้งาน อีกทั้งงานวิจัยดังกล่าวยังคำนึงถึงการมีและไม่มีอยู่ของอุปกรณ์สอดใส่แร่ซึ่งช่วยแก้ปัญหาของ การคำนวณซึ่งไม่ได้คิดถึงการลดทอนปริมาณรังสีของอุปกรณ์สอดใส่แร่ ดังนั้น ค่าที่ได้จากการวัดจริง มีการแก้ค่าการลดทอนที่เกิดจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ด้วย แต่งานวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้ศึกษาถึงการลดทอน ดังกล่าว โดยการศึกษาในอนาคตควรพิจารณาประเด็นดังกล่าวร่วมด้วยเพื่อให้สามารถนำค่าที่ได้จาก การวัดมาใช้ในการประกันคุณภาพของงานทางรังสีรักษาได้ นอกจากนี้งานวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้ทำการ สร้างอุปกรณ์สอดใส่แร่จำลอง ดังนั้นการวัดปริมาณรังสีจึงใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่จริงซึ่งผู้วิจัยพยายาม แก้ปัญหาในเรื่องของการจัดตำแหน่งหัววัดรังสีด้วยการสร้างฐานยึดอุปกรณ์สอดใส่แร่ที่ออกแบบเพื่อ ช่วยจัดตำแหน่งในระหว่างการสร้างภาพและตำแหน่งการวัดปริมาณรังสีให้เป็นตำแหน่งเดียวกันเพื่อ ลดความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าปริมาณรังสี โดยฐานที่ออกแบบสร้างจากสแตนเลสมีน้ำหนักมาก ทำให้สามารถยึดและป้องกันการเคลื่อนของอุปกรณ์สอดใส่แร่จากแรงดันของน้ำได้เป็นอย่างดี อีกทั้ง ยังประดิษฐ์ฐานรองหุ่นจำลองเพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายไปยังห้องใส่แร่ภายหลังการสร้างภาพ เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่ฝังในหุ่นจำลองของ de Almeida และคณะ ทำให้หุ่นจำลองมีราคาแพงตามราคาของอุปกรณ์สอดใส่แร่

ประเด็นที่ 3 การใช้หัววัดรังสีที่ใช้วัดปริมาณรังสีและระยะที่เหมาะสมในการวัดได้มีการวิจัย จำนวนที่สร้างหุ่นจำลองและหาวิธีการเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในน้ำ (absorbed dose to water) สำหรับเครื่องใส่แร่ HDR Ir-192 source ด้วยหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber เช่น งาน ของ Austerlitz C และคณะ (28) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีที่วัดได้จาก

BrachyPhantom เปรียบเทียบกับการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาไม่เกิน $\pm 3\%$ ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวได้มีการกำหนดระยะ source-detector distance เท่ากับ 3 เซนติเมตร และใช้การเคลื่อนที่ของ source เป็นระนาบเดียว และงานของ Araki F และคณะ (29) ที่ได้ออกแบบเครื่องมือเพื่อช่วยยึดจับหัววัดรังสีชนิด ionization chamber แบบ sandwich ซึ่งช่วยให้การวัดปริมาณรังสีง่ายขึ้น แต่งานวิจัยทั้งสองเป็นการวัดปริมาณรังสีซึ่งมีความแตกต่างจากเงื่อนไขของการรักษาผู้ป่วยจริง โดยเฉพาะกรณีของการรักษามะเร็งปากมดลูกที่มีอุปกรณ์สอดใส่แร่จำนวน 3 แห่ง โดยระนาบของการส่งปริมาณรังสีมาจาก source แบบหลายทิศทาง ดังนั้นอาจจะไม่สามารถทดสอบความถูกต้องได้จริงในทางคลินิกอันเนื่องมาจากมีความซับซ้อนของการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สอดใส่แร่ได้อย่างแท้จริง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งมีความซับซ้อนของปริมาณรังสีมากกว่าเนื่องจากการส่งปริมาณรังสีจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ที่ใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูกจริง แต่การออกแบบการทดสอบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ส่งผลให้การวัดปริมาณรังสีทำได้ยากเนื่องจากการกระจายของปริมาณรังสี (dose distribution) มีความซับซ้อนกว่าการใส่แร่เพียงแห่งเดียว อีกทั้งผู้วิจัยต้องการวัดปริมาณรังสีที่จุดที่กำหนดต่าง ๆ ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณที่เป็น high dose gradient ดังนั้นจึงส่งผลให้มีความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณที่มาก ดังนั้น จึงมีหลายงานวิจัยที่เลือกใช้ฟิล์มในการวัดปริมาณรังสีสำหรับ Brachytherapy (39, 40) (41) เนื่องจากสามารถประเมินได้แบบระนาบที่มีความละเอียดสูง ช่วยให้สามารถประเมินการกระจายของปริมาณรังสีและประเมินค่า gamma index ได้ ซึ่งจะให้ผลการประเมินที่ดีกว่าการประเมินแบบ point dose จากการวัดด้วยหัววัดรังสี ionization chamber เพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยการปรับระยะความกว้างของ ovoids จำนวน 3 ระยะซึ่งประกอบด้วยขนาดกว้าง ปานกลาง และแคบตามสเกลบนที่ยึดจับ ovoids เพื่อทดสอบการวางแผนการรักษากรณีมดลูกมีขนาดแตกต่างกันตามขนาดตัวผู้ป่วย ซึ่งให้ผลการทดลองดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีตำแหน่ง Point A และ Bladder point เมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids

ตำแหน่ง		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

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนระยะความกว้างของ ovoids ส่งผลให้ปริมาณรังสีมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากในบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่ขึ้นกับระยะความกว้างของ ovoids ดังนั้น ความกว้างของ ovoids ที่ใช้ในการทำการควบคุมคุณภาพโดยใช้หุ่นจำลองจึงไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของปริมาณรังสีที่วัดได้ จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าความถูกต้องของปริมาณรังสีเกิดจากการจัดวางหัววัดรังสีระหว่างการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและการวัดจริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ทราบว่าปริมาณการเติม SSF เพื่อทำให้น้ำยางจับตัวและอบให้แห้งมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางพารา โดยตัวอย่างยางพาราที่มีการเติมสาร SSF ในปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวเร็วขึ้น และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทุกค่ามีแนวโน้มที่ลดลงทำให้ต้องคำนึงถึงปริมาณการใช้ SSF เพื่อให้ยางสามารถจับตัวและอบแห้งได้โดยที่ยังมีสมบัติเชิงกลอยู่ในระดับค่าที่ยอมรับได้ สำหรับตัวอย่างยางพาราที่เติม SSF ปริมาณ 20 กรัม/น้ำหนักเปียก พบว่าการใช้เวลาที่น้ำยางเริ่มจับตัวด้วยระยะเวลาประมาณ 27.60 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเทน้ำยางลงในแม่พิมพ์ของหุ่นจำลองเนื่องจากเป็นช่วงเวลาก่อนที่น้ำยางจะจับตัวกันเป็นก้อน และปริมาณ SSF ดังกล่าวมีระดับค่าของสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นและการทนแรงฉีกขาด) ที่สูงกว่าตัวอย่างยางที่ไม่ได้เติมงานวิจัยนี้สร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นตามตารางที่ 4 โดยใช้ปริมาณ SSF ขนาด 20 กรัม/น้ำหนักเปียก

ชิ้นงานยางพาราที่เตรียมได้จากสูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยมีความหนาแน่น 0.87 g/cm^3 โดยได้ทำการทดสอบการทนต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ด้วยความร้อนและการทนทานต่อรังสีพลังงาน 6 MV ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคที่ปริมาณรังสีในช่วง 200 – 6,000 cGy พบว่าสมบัติทางกายภาพลักษณะพื้นผิวและสีไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยังคงมีผิวเรียบและสีเหลืองน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานยางที่ทดสอบ aging, ชิ้นงานยางที่ก่อนและหลังฉายรังสี พบว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วมีค่าใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานที่ aging และชิ้นงานยางที่ฉายรังสีมีค่าลดลงเล็กน้อย และช่วงของอุณหภูมิการสลายตัวกว้างขึ้นเล็กน้อย ($T_d \text{ onset}$ ถึง $T_d \text{ end}$) ซึ่งแสดงว่าความร้อนจากการ aging และฉายรังสีมีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดทั้งการตัดสายโซ่โมเลกุลอย่างให้สั้นลงและเกิดแบบเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งเป็นเกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณไม่มากนัก จากผลการทดสอบหาจำนวนองค์ประกอบชิ้นงานยางก่อนและหลังการฉายรังสีนั้นยังแสดง 2 องค์ประกอบหลักที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ aging, ชิ้นงานยางที่ก่อนและหลังฉายรังสีมีค่าความแข็ง Shore A ใกล้เคียงกัน แต่ค่าการทนแรงฉีกขาดของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังฉายรังสีมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานก่อนฉายรังสีเล็กน้อย ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength at Yield) และค่าโมดูลัส (Modulus at 100% Elongation) ของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังการฉายรังสี มีค่าสูงกว่าชิ้นงานก่อนฉายรังสี แต่ค่าการยืดออก (Elongation at Break) ของชิ้นงานยางที่ Aging และหลังการฉายรังสี มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนฉายรังสี ซึ่งสรุปได้ว่ายางที่ผ่านการให้ความร้อน (aging) และการฉายรังสีมีความยืดหยุ่นลดลงหรือความเป็นอีลาสติกลดลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นของหุ่นจำลองยางพารา สรุปได้ว่าการฉายรังสีในช่วงการใช้งานจริงตั้งแต่ 200 – 6,000 cGy ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของ

หุ่นจำลองยางพาราเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ผลการสร้างหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานยางพาราทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีน้ำหนักเมื่อไม่ใส่น้ำเท่ากับ 8 กิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อยางพาราเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีค่าแตกต่างจากความหนาแน่นของน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์ ความสม่ำเสมอ (uniformity) ของเนื้อยางพาราที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่น 0.03 และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการวัดและการคำนวณจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีความแตกต่างของปริมาณรังสีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในบริเวณที่ห่างจาก high dose gradient (Rectal point) และความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 29% ในช่วง high dose gradient (Point A) จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้หุ่นจำลองยางพาราที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนการรักษา มะเร็งปากมดลูกได้ โดยทำการวัดค่าปริมาณรังสีในช่วงที่ห่างจากบริเวณที่เป็น high dose gradient โดยสามารถกำหนดจุดในการวัดที่จุดใดๆ ได้ นอกเหนือจากตำแหน่ง point A

นอกจากนี้ยังสามารถนำหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานยางพาราไปประยุกต์ใช้กับแผนการรักษาอื่น ๆ ที่ใช้อุปกรณ์สอดใส่แร่ที่แตกต่างได้ อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ในการวัดรังสีระยะไกลได้ ซึ่งนอกจากเป็นประโยชน์ต่อการวัดปริมาณรังสีแล้วยังสามารถนำหุ่นจำลองที่ได้ไปประยุกต์ในการฝึกทักษะการสร้างภาพและการวางแผนการรักษาของนักฟิสิกส์การแพทย์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. C.A. Joslin AF, E.J. Hall. Principles and Practice of Brachytherapy using afterloading systems. London: Arnold; 2001.
2. Seymour H, Khan FM, Roger A. Levitt and Taplay's technological basis of radiation therapy : practical clinical application. 1992(2):1-36,232-47.
3. ชวนชม สกนธวัฒน์ นรีเวชวิทยา. 2535;สำนักพิมพ์ คอมเพรส แอนด์ ดีไซน์ ขอนแก่น(2):9-14.
4. Khan FM. The Physics of Radiation Therapy. 3rd edn. MD: Lippincott, Williams and Wilkins; 2003.
5. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. ICRU report 62. Dose and Volume. Specifications for Reporting. Intracavitary Therapy in Gynecology. Maryland: ICRU; 1985.
6. เรืองวิทย์ น. สื่อวัสดุสามมิติ. กรุงเทพมหานคร: เอกสารการสอนวิชาสื่อและเทคโนโลยีการสอน; 2556 [cited 2558 30 มีนาคม]; Available from: <http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355201/p32-3.html>.
7. กาแดง น, แสงอินทร์ตะ ย, ทรัพย์พร้อม ส. การออกแบบ และ ประดิษฐ์หุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบคุณภาพของเอกซเรย์เต้านม The Design and Invention of Mammographic Image Quality Evaluation Phantom. 1 ed. พิษณุโลก: ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2553.
8. Podgorsak EB. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. 2005; Available from: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf.
9. Center CsNM. Solid Water Phantom materials. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: http://www.cnmc.co.com/dosimetry/PDFdocs/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf.
10. Phantoms RTQC. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: <http://www.supertechx-ray.com/QualityControlPhantoms/RadiationTherapyQC.html>.
11. PTW. Afterloading Calibration Phantom. PTW; [cited 2015]; Available from: http://www.ptw.de/afterloading_calibration_phantom.html.
12. CIRS. Brachytherapy QA program. Available from: <http://www.cirsinc.com/products/all/71/brachytherapy-qa-phantom/>.
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation oncology physics : a handbook for teachers and students. Vienna: IAEA; 2005.
14. สุขประเสริฐ อ. การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. [รายงานการวิจัย]. 2548:1-24.
15. กรมวิชาการเกษตร คส. ยางพารา. Para rubber electronic bulletin [รายงาน]. 2556;1.
16. จิตต์ศักดิ์ ศ. เทคโนโลยียางพารา Natural Rubber Technology. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคโนโลยี ชคมมวินเคชั่นส์ จำกัด 2553.

17. วราภรณ์ ข. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน Natural Rubber : Production and Application. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนวิจัย (สกว.); 2549
18. de Almeida CE, Rodriguez M, Vianello E, Ferreira IH, Sibata C. An anthropomorphic phantom for quality assurance and training in gynaecological brachytherapy. *Radiother Oncol.* 2002 Apr;63(1):75-81.
19. วรณดา สุจริต, ศิริรักษ์ จันทกร, ฌฐนันท์ มากมี, ขจร กอบสันเทียะ, อภินันท์ สุประเสริฐ, คลดา ศรีไธ, และ นที นิลนพคุณ ผลของการใช้หุ่นจำลองยางพาราปลูกสุกรในการเรียนการสอนวิชาวิทยาอเมบริโอ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2546. p. 714-8.
20. เสรี ภูญจนาค, ชีระศักดิ์ พรพวงษ์, ขจร กอบสันเทียะ, มาลีวรรณ เหลี่ยมศิริเจริญ, ศิริรักษ์ จันทกร, คลดา ศรีไธ, ฌฐนันท์ มากมี, กรรณิการ์ วงษ์พานิชย์, ทวีวัฒน์ ทศนวัฒน์, อภินันท์ สุประเสริฐ. การศึกษาประสิทธิภาพการเรียนการสอนโดยใช้หุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคจากยางพารา การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2546. p. 719-24.
21. ผกาวดี พงษ์เกษ, และคณะ. ประสิทธิภาพการเรียนจุลกายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะระบบรับรู้สัมผัสพิเศษโดยใช้หุ่นจำลองยางพารา. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549. p. 527-32.
22. อุทุมมา ม, ขวัญชัย ร. การออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย. *วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่.* 2549;39: 54-63.
23. วรนันท์ ศิริสัตยกุล, ขวัญชัย รัตนเสถียร, อุทุมมา มั่นะเนมิ. การออกแบบ การผลิต และ ประเมินหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนช่องเชิงกรานแบบแบ่งส่วนสำหรับวัดปริมาณรังสี. *วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่.* 2549;39(3):99-106.
24. บังอร ดวงรัตน์, อรุณี ชันทรปรกรณ, ธัญรดี จิรสันธิปก, วินัย สยอวรรณ, นลินภัทร์ รตนวิบูลย์สุข, นवलปราณ สาลีเพ็ง. การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา. *วารสารสาธารณสุขและการพัฒนา.* 2552;7(1):47-60.
25. ตันตพันธ์ ก. หุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย. 2554 [cited 2556 16 มีนาคม]; Available from: <http://library.dip.go.th/multim5/News/2554/N05975.pdf>.
26. ประกาศมณีวงศ์ พ, ระนอง นณ, วิจิตรชัช ณ, พัฒนกุล ว, แจ่มเสมือน ส. การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางพองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. 2552.
27. วันฉลก โกวิท, สุธีรา ประดับวงษ์, ฤทธยา สิมะลิต, บวรศิลป์ เชาว์นั้ง. การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. *ศรีนครินทร์เวชสาร.* 2554;26(4):259-65.
28. Austerlitz C, Campos CA. A BrachyPhantom for verification of dose calculation of HDR brachytherapy planning system. *Med Phys.* 2013 Nov;40(11):112103.

29. Araki F, Kouno T, Ohno T, Kakei K, Yoshiyama F, Kawamura S. Measurement of absorbed dose-to-water for an HDR (192)Ir source with ionization chambers in a sandwich setup. *Med Phys*. 2013 Sep;40(9):092101.
30. อภินันท์ สุประเสริฐ. สิ่งประดิษฐ์หุ่นจำลองยางพารา สื่อการศึกษา สร้างมูลค่าเพิ่ม เสริมการส่งออก. กรุงเทพมหานคร: โครงการวิจัยหุ่นจำลองยางพารา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2550.
31. พรทิพย์ ประภาคมฉวีวงศ์, และคณะ. การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. 2552.
32. วิศิษฐ์ชัย ฒ. “เอกสารประกอบบทปฏิบัติการ หลักสูตร การผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง”. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร 2550.
33. ASTM. Standard Test Methods for Rubber Property- Durometer Hardness. ASTM D 2240-03. Annual Book of ASTM Standards: American Society for Testing and Materials International; 2003.
34. 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.
35. Van Dyk J, Barnett RB, Cygler JE, Shragge PC. Commissioning and quality assurance of treatment planning computers. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 1993 May 20;26(2):261-73.
36. Venselaar J, Welleweerd H, Mijneer B. Tolerances for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems. *Radiother Oncol*. 2001 Aug;60(2):191-201.
37. Yang Y, Melhus CS, Sioshansi S, Rivard MJ. Treatment planning of a skin-sparing conical breast brachytherapy applicator using conventional brachytherapy software. *Med Phys*. 2011 Mar;38(3):1519-25.
38. Bannon EA, Yang Y, Rivard MJ. Accuracy assessment of the superposition principle for evaluating dose distributions of elongated and curved 103Pd and 192Ir brachytherapy sources. *Med Phys*. 2011 Jun;38(6):2957-63.
39. Palmer AL, Lee C, Ratcliffe AJ, Bradley D, Nisbet A. 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*. 2013 Oct 7;58(19):6623-40.
40. Uniyal SC, Naithani UC, Sharma SD, Srivastava AK. Radiochromic film dosimetry of rectal inhomogeneity and applicator attenuation in high dose rate brachytherapy of uterine cervix. *J Appl Clin Med Phys*. 2012;13(1):3654.
41. Uniyal SC, Sharma SD, Naithani UC. A dosimetry method in the transverse plane of HDR Ir-192 brachytherapy source using gafchromic EBT2 film. *Phys Med*. 2012 Apr;28(2):129-33.

ภาคผนวก ก

แบบฟอร์มสรุปผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก

(ภาษาอังกฤษ) Development of Brachytherapy Pelvic Phantom for Cervical Cancer

โดย (ชื่อนักวิจัย) นางสาวสุมาลี ยับสันเทียะ¹ นางสาวธัญรัตน์ ชูศิลป์¹ ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์² และ นายสมบัติ บุญขวาง³

(หน่วยงานที่สังกัด) ¹ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ³หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช

ประเด็นปัญหาก่อนการวิจัย

มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่พบบ่อยเป็นอันดับต้นในเพศหญิงและมีแนวโน้มพบผู้ป่วยมากขึ้นเรื่อยๆ การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษา เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการรักษาค่อนข้างสูง สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกโดยใช้รังสีนิยมรักษาด้วยรังสีรักษาระยะไกล (Teletherapy) และรังสีระยะใกล้ (Brachytherapy) ควบคู่กัน สำหรับวิธีการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้เป็นการรักษาด้วยการใช้สารกัมมันตรังสีสอดใส่ไปที่ก้อนมะเร็งโดยตรงทำให้สามารถกำหนดปริมาณรังสีให้กับก้อนมะเร็งได้โดยตรงในขณะที่อวัยวะและเนื้อเยื่อปกติที่อยู่โดยรอบได้รับปริมาณรังสีเพียงเล็กน้อย ความถูกต้องในการรักษาขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญของทีมแพทย์และความถูกต้องของเครื่องมือ ซึ่งการควบคุมให้เครื่องมือทำงานได้อย่างถูกต้องเป็นเรื่องที่สำคัญ ซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาก็เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญต่อการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ ในปัจจุบันประเทศไทยยังขาดหุ่นจำลองที่เหมาะสมในการประเมินความถูกต้องของแผนการรักษาที่ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (computer treatment planning system) และความถูกต้องของการทำงานของเครื่องใส่แร่สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้โดยเฉพาะ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของทั้งระบบเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาหรือเครื่องใส่แร่สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้จำเป็นต้องอาศัยหุ่นจำลองที่สามารถสอดใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีเข้าไปได้เพื่อประเมินความถูกต้องของการทำงานของเครื่องมือก่อนการให้ปริมาณรังสีจริง

ถึงแม้ว่าหุ่นจำลองสำหรับวัดปริมาณรังสีทางรังสีรักษามีความสำคัญต่อความถูกต้องของการกำหนดปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยอย่างมากแต่ปัจจุบันมีหุ่นจำลองดังกล่าวค่อนข้างน้อย สำหรับหุ่นจำลองที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดนั้นมีข้อจำกัดค่อนข้างมากเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง การพัฒนาหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีและฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ที่เหมาะสมสำหรับการใส่อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูก จึงมีประโยชน์ในรักษาอย่างมาก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะเชิงกรานเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการสอดใส่สารกัมมันตรังสีด้วยวิธีการรังสีรักษาระยะใกล้สำหรับมะเร็ง

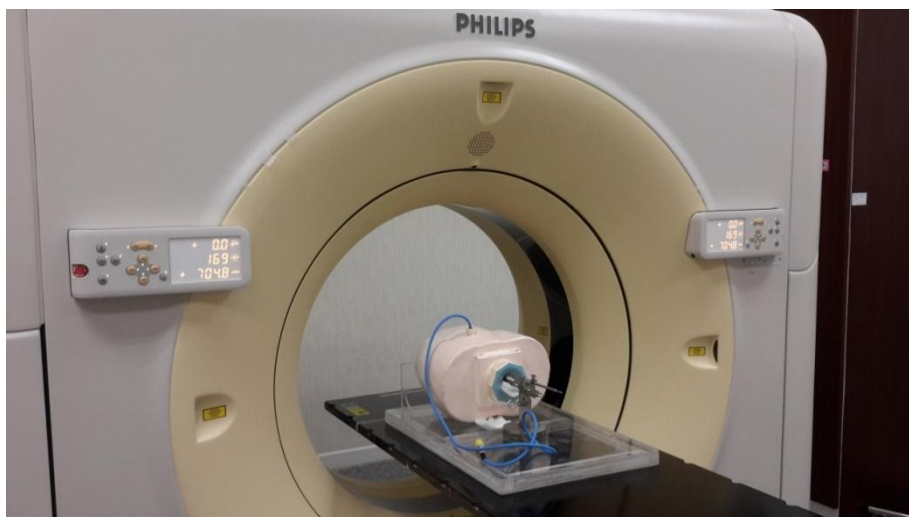
ปากมดลูกจากยางพารา เพื่อการประกันคุณภาพ และการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาซึ่งจะทำให้การรักษามีประสิทธิภาพสูงสุด

การแก้ไขปัญหาโดยใช้ผลงานวิจัย

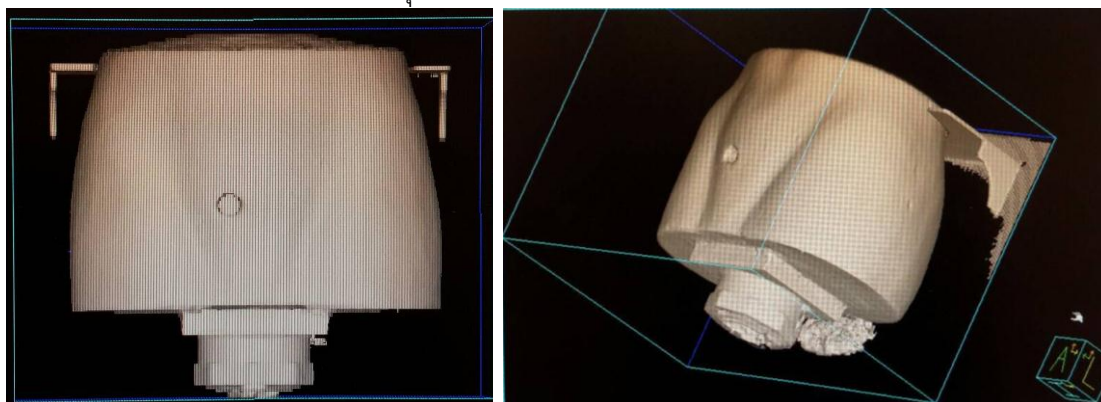
หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้เพื่อการวัดปริมาณรังสีทางรังสีรักษา ดังนั้นจึงสามารถใช้หุ่นจำลองดังกล่าวมาเป็นตัวแทนมนุษย์ที่มีความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อสำหรับการวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ซึ่งช่วยให้เราสามารถตรวจสอบได้ว่า แผนการรักษาที่เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณนั้นมีความถูกต้องหรือไม่เมื่อเทียบกับการวัดจริงด้วยหัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชัน

อีกทั้งหุ่นจำลองที่ได้ยังมีประโยชน์เพื่อใช้ในการฝึกทักษะให้กับผู้ปฏิบัติงาน ได้แก่ นักรังสีการแพทย์สำหรับการฝึกการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือภาพถ่ายรังสี และสำหรับนักฟิสิกส์การแพทย์สำหรับการฝึกการวางแผนการรักษา และสามารถนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนสำหรับนิสิตรังสีเทคนิค และฟิสิกส์การแพทย์ได้อีกด้วย

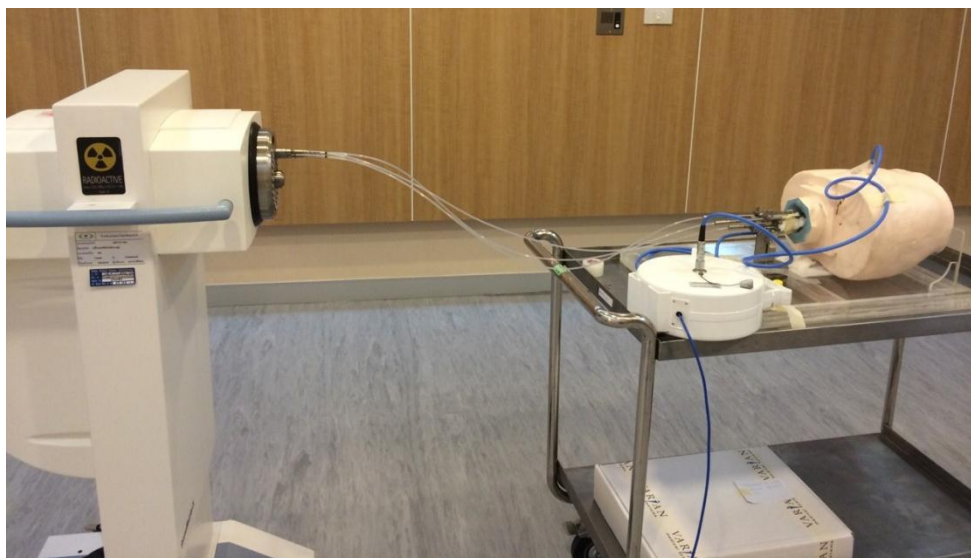
รูปภาพประกอบ



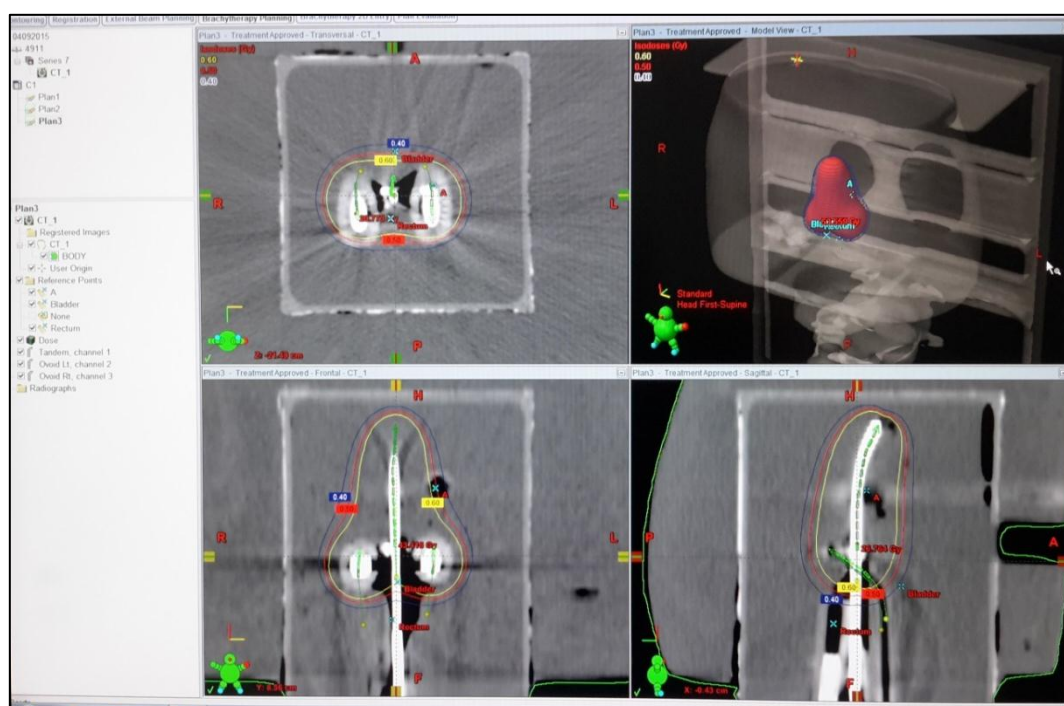
การจัดตำแหน่งหุ่นจำลองเพื่อสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์



ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองแบบ 3 มิติ



การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าปริมาณรังสีจากการใส่แร่ในหุ่นจำลอง



หน้าต่างของการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองที่ได้ โดยลักษณะการกระจายของปริมาณรังสีเป็นไปตามมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นลูกชมพู

(ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2558)

ภาคผนวก ข

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

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

การรายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

๑. ชื่อโครงการ / กิจกรรมที่ได้รับการสนับสนุน การพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก
๒. ชื่อนักวิจัย นางสาวสุมาลี ยันสันเทียะ นางสาวธัญรัตน์ ชูศิลป์ ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์ และ นายสมนัติ บุญขวาง
๓. งบประมาณที่ได้รับการสนับสนุน ๔๕๖,๑๐๐ บาท
๔. ปีงบประมาณที่ดำเนินการ ๒๕๕๖
๕. การนำผลผลิตจากงานวิจัยไปสู่การใช้ประโยชน์ ☒ มีการนำไปใช้ประโยชน์ ☐ ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์
๖. ช่วงเวลาที่งานวิจัยได้นำไปสู่การใช้ประโยชน์.....ปี ๒๕๕๘.....
๗. เป้าหมายดำเนินการ การนำหุ่นจำลองไปใช้ในการฝึกทักษะให้กับเจ้าหน้าที่ทางรังสีรักษา และใช้ในการเรียนการสอน และถาวรวิจัยเกี่ยวกับสวทวรังสีเทคนิค และฟิสิกส์การแพทย์
๘. พื้นที่การใช้ประโยชน์ มหาวิทยาลัยที่เปิดสอนรังสีเทคนิค ฟิสิกส์การแพทย์ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ และโรงพยาบาล ที่มีแผนรังสีรักษา
๙. รูปแบบการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยตามข้อ ๗ และ ๘ (สามารถเลือกได้มากกว่า ๑ รูปแบบ เนื่องจากถ้าเป็นเรื่องเดียวกันสามารถนำไปใช้มากกว่า ๑ มิติได้)

☐ ๙.๑. การใช้ประโยชน์มิตินโยบาย ได้แก่ การนำข้อมูลไปประกอบการตัดสินใจในการบริหาร / กำหนดนโยบาย โดย

☐ ได้รับหนังสือขอข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในเรื่องใดเรื่องหนึ่ง
 ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ / กำหนดนโยบาย
 ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

☐ ๙.๒. การใช้ประโยชน์มิติเศรษฐกิจ / พาณิชย์ โดย

☐ ได้รับหนังสือหรือหลักฐานอื่น แสดงความสนใจเพื่อเจรจาธุรกิจ
 ☐ มีการซื้อ - ขาย เทคโนโลยีระหว่างนักวิจัยและผู้นำไปใช้ประโยชน์
 ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

☐ ๙.๓. การใช้ประโยชน์มิติการพัฒนาสังคม / ชุมชน / ท้องถิ่น โดย

☐ การถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้รับจากงานวิจัยในชุมชน / ท้องถิ่น (อบรม , คู่มือ , แผ่นพับ , โปสเตอร์ , เว็บไซต์ ฯลฯ)
 ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ความรู้จากชุมชน / องค์กร / หน่วยงานในพื้นที่ต่างๆ
 ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

☒ ๙.๔. การใช้ประโยชน์มิติวิชาการ โดย

☐ ได้มีการอ้างอิงผลงานที่ตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับประเทศ / ระดับนานาชาติ
 ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญเป็นวิทยากรเพื่อให้ความรู้ในกรอบของผลงานวิจัยจากหน่วยงานต่างๆ

☑ อื่นๆ(โปรดระบุ) นำหุ่นจำลองไปใช้ในงานวิทยานิพนธ์ของนิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ การแพทย์ และการนำไปใช้เพื่อฝึกทักษะการสร้างภาพทางรังสี และการฝึกทักษะการวางแผนการรักษา มะเร็ง ปากมดลูก

๑๐. รายละเอียดผลการดำเนินงานตามข้อ ๙ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการนำผลผลิตจากงานวิจัยไปใช้อย่างไร

งานวิจัยของนิสิตป.โท สาขาฟิสิกส์การแพทย์ ในหัวข้อ “การพัฒนาอัลกอริทึมชนิดหาขอบเขตอัตโนมัติสำหรับลดสิ่งแปลกปลอมโลหะจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ของมะเร็งปากมดลูกในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์” โดยนำหุ่นจำลองอวัยวะที่ใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ในการรักษามะเร็งปากมดลูก และนำไปสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และศึกษาวิจัย เพื่อการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อลดสิ่งแปลกปลอมโลหะ (Metal artifact) ที่เกิดจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ ในการรักษามะเร็งปากมดลูก ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

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

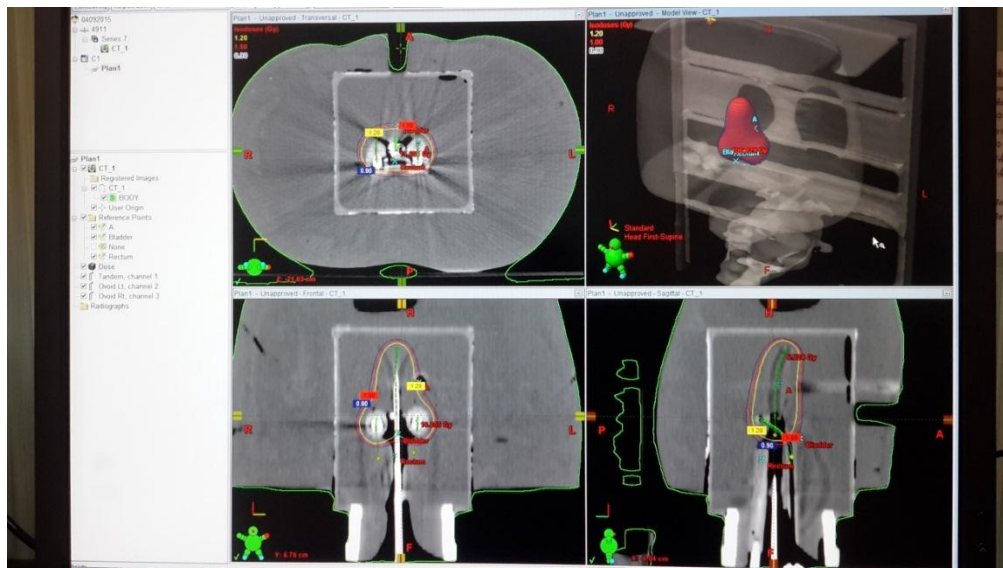
ภาพด้านล่างแสดงภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอวัยวะจากยางพารา ที่นำไปใช้ในการศึกษา “เรื่อง การพัฒนาอัลกอริทึมชนิดหาขอบเขตอัตโนมัติสำหรับลดสิ่งแปลกปลอมโลหะจากอุปกรณ์สอดใส่แร่ของมะเร็งปากมดลูกในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์” โดยนางสาววิมลมาศ ทองงาม นิสิตปริญญาโท หลักสูตรฟิสิกส์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2558 โดยจะเห็นว่านอกจากหุ่นจำลองสามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ของเครื่องฉายรังสีระยะใกล้ และการฝึกทักษะในการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอวัยวะที่ใช้ในงานวิจัย ระหว่างภาพที่ยังไม่ได้ใช้อัลกอริทึม (ซ้ายมือ) และภาพหลังจากใช้อัลกอริทึมลดสิ่งแปลกปลอมโลหะแล้ว (ขวามือ)

นอกจากนี้หุ่นจำลองอวัยวะที่สร้างขึ้นอาจนำไปประยุกต์ใช้สำหรับฝึกทักษะการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ให้กับนักรังสีการแพทย์ และฝึกทักษะการวางแผนการรักษาให้กับนักฟิสิกส์การแพทย์ได้ ดังภาพด้านล่างซึ่งเป็นภาพของการวางแผนการรักษา จะเห็นได้ว่าหุ่นจำลอง

สามารถใส่อุปกรณ์ และนำมาใช้ในการฝึกทักษะได้จริง และสามารถประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนของนิสิตได้



หน้าต่างของแผนการรักษาของมะเร็งปากมดลูก ที่ได้จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอู้งเชิงกราน

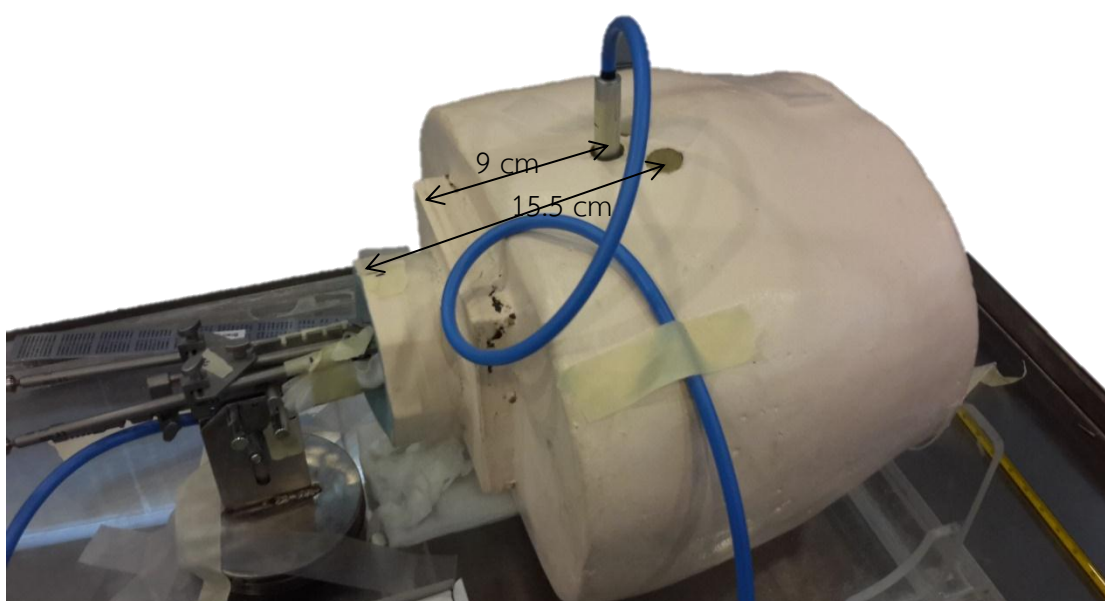
ภาคผนวก ค

คู่มือการจัดอุปกรณ์ สำหรับการประเมินความถูกต้องของเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ด้วยหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานจากยางพารา

แนวทางการวัดปริมาณรังสีที่จุดใดๆ ในหุ่นจำลอง

1. วางหุ่นจำลองอู้งเชิงกรานจากยางพาราบนแผ่นอะคลิลิก (ผู้วิจัยออกแบบสำหรับใช้วางหุ่นจำลองเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย) บนเตียงของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์
2. ประกอบชุด Applicators ทั้ง Ovoids และ Tandem ตามขนาดที่มีการใช้งานจริง และยึด Applicators ไว้กับแท่นยึด (ผู้วิจัยออกแบบสำหรับใช้ยึดจับ Applicators เพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่)
3. ใส่ชุด Applicators เข้าไปในหุ่นจำลอง โดยวัดระยะจากปลาย flange (ตำแหน่งที่อยู่ปากมดลูก) ลงมาจนถึงปากของกล่องอะคลิลิก เท่ากับ 11 เซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของ point A (สามารถใส่ที่ความยาวได้ตามความเหมาะสม แต่ให้ส่วนของอุปกรณ์อยู่ภายในตัวหุ่นจำลอง) และทำการยึดอุปกรณ์ต่างๆ ให้อยู่ตำแหน่งเดิมทั้งในการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดปริมาณรังสีที่ห้อง High Dose Rate
4. หุ่นจำลองมีรูสำหรับใส่หัววัดรังสีปริมาตร 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้นำหัววัดรังสีใส่เข้าไปในรู และทำการยึดให้อยู่ตำแหน่งเดิม ทั้งในการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดปริมาณรังสีที่ห้อง High Dose Rate (โดยสามารถหาจุดกึ่งกลางของ sensitive volume

- ของหัววัดรังสีได้จากคอมพิวเตอรืวางแผนการรักษา) แนะนำว่าควรให้จุดที่วัดห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี เพื่อให้บริเวณที่วัดไม่อยู่ในช่วง High dose gradient
5. สแกนเก็บข้อมูลภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอรืด้วยโปรโตคอลปกติที่ใช้งาน และส่งภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอรืไปที่เครื่องคอมพิวเตอรืวางแผนการรักษา
 6. วางแผนการรักษาโดยกำหนดปริมาณรังสีที่ point A เท่ากับ 0.5 เกรย์ กำหนด Reference points ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสี (จากหุ่นจำลองสามารถใส่ได้ 2 ตำแหน่ง)
 7. ต่อหัววัดรังสีเข้ากับอิลิคโตรมิเตอร์ และวัดอุณหภูมิและความดัน
 8. ส่งแผนการรักษาเข้าเครื่องใส่แร่ และทำการโหลดแร่ เพื่อวัดปริมาณรังสี โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย
 9. คำนวณปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด โดยแก้ค่าอุณหภูมิ ความดัน และค่า $N_{D,W}$
 10. นำค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอรืวางแผนการรักษา โดยความแตกต่างต้องไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ (ต้องจัดให้จุดที่วัดห่างจาก high dose gradient)



การจัดอุปกรณ์สำหรับการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองอู้งเชิงกราน

ภาคผนวก ง
การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด

ตารางแสดงผลการวัดปริมาณรังสีที่ Point A, Rectal point และ Bladder point

ค่าพารามิเตอร์		Point A	Rectal point	Bladder point
ค่านับวัด (nC)	1	12.02	4.432	10.53
	2	12.08	4.475	10.67
	3	12.03	4.458	10.56
ค่าเฉลี่ย ⁽¹⁾		12.04	4.46	10.59
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.03	0.02	0.07
ค่า $N_{DW}^{(2)}$ (mGy/nC)		54.05	53.97	54.05
อุณหภูมิ (°C)		19	19	19
ความดัน (kPa)		1010	1010	1010
ค่า $k_{TP}^{(3)}$ $k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$		0.9995	0.9995	0.9995
$k_{Q,Q0}^{(4)}$		~1	~1	~1
ปริมาณรังสี (mGy) (1)×(2)×(3)×(4)		650.44	240.59	572.1
ปริมาณรังสี (Gy)		0.650	0.241	0.572

การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด สำหรับการวัดที่จุดใดๆ

ตารางแสดงผลการวัดปริมาณรังสีที่จุดใด ๆ

ค่าพารามิเตอร์		Point 1	Point 2
ค่านับวัด (nC)	1	2.056	1.943
	2	2.050	1.959
	3	2.061	1.946
ค่าเฉลี่ย ⁽¹⁾		2.056	1.949
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.006	0.009
ค่า $N_{DW}^{(2)}$ (mGy/nC)		54.05	53.97
อุณหภูมิ (°C)		19	19
ความดัน (kPa)		1012.5	1012.5
ค่า $k_{TP}^{(3)}$ $k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$		0.997	0.997
$k_{Q,Q0}^{(4)}$		~1	~1
ปริมาณรังสี (mGy) (1)x(2)x(3)x(4)		110.79	104.87
ปริมาณรังสี (Gy)		0.111	0.105
ปริมาณรังสีจาก plan		0.102	0.094
%different		8.8%	11.7%

ตารางแสดงผลการวัดปริมาณรังสีที่ Point A และ Bladder point เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้างของ ovoids

ตำแหน่งที่ 3 ความกว้างของ Ovoids ระดับ 3 ซึ่งกว้างที่สุด

ค่าพารามิเตอร์		Point A	Bladder point
ค่านับวัด (nC)	1	8.717	5.591
	2	8.732	5.566
	3	8.712	5.559
	4	8.745	5.572
	5	8.742	5.566
ค่าเฉลี่ย ⁽¹⁾		8.7296	5.5708
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.015	0.012
ค่า N _{DW} ⁽²⁾ (mGy/nC)		54.05	53.97
อุณหภูมิ (°C)		22.5	21.5
ความดัน (kPa)		1006	1006
ค่า k _{TP} ⁽³⁾ $k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$		1.016	1.012
k _{Q,Q0} ⁽⁴⁾		~1	~1
ปริมาณรังสี (mGy)		479.17	304.30
(1)x(2)x(3)x(4)			
ปริมาณรังสี (Gy)		0.479169168	0.304296964

ตำแหน่งที่ 2 ความกว้างของ Ovoids ระดับ 2 ซึ่งกว้างปานกลาง

ค่าพารามิเตอร์		Point A	Bladder point
ค่านับวัด (nC)	1	7.288	2.361
	2	7.216	2.356
	3	7.227	2.362
	4	7.25	2.357
	5	7.236	2.364
ค่าเฉลี่ย ⁽¹⁾		9.909	7.2434
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.031	0.028
ค่า N _{DW} ⁽²⁾ (mGy/nC)		54.05	54.05
อุณหภูมิ (°C)		24.5	25.5
ความดัน (kPa)		1006	1009
ค่า k _{TP} ⁽³⁾ $k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$		1.022	1.023
k _{Q,Q0} ⁽⁴⁾		~1	~1
ปริมาณรังสี (mGy)		547.59	400.43
(1)x(2)x(3)x(4)			
ปริมาณรังสี (Gy)		0.55	0.400

ตำแหน่งที่ 1 ความกว้างของ Ovoids ระดับ 1 ซึ่งแคบที่สุด

ค่าพารามิเตอร์		Point A	Bladder point
ค่านับวัด (nC)	1	9.707	7.135
	2	9.723	7.142
	3	9.787	7.151
	4	9.749	7.141
	5	9.763	7.138
ค่าเฉลี่ย ⁽¹⁾		9.7458	7.1414
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.032	0.006
ค่า N _{DW} ⁽²⁾ (mGy/nC)		54.05	53.97
อุณหภูมิ (°C)		25.5	25.5
ความดัน (kPa)		1006	1006
ค่า k _{TP} ⁽³⁾ $k_{TP} = \left(\frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \right) \times \left(\frac{1013}{P} \right)$		1.026	1.026
k _{Q,Q0} ⁽⁴⁾		~1	~1
ปริมาณรังสี (mGy)		540.38	395.38
(1)x(2)x(3)x(4)			
ปริมาณรังสี (Gy)		0.54	0.40