รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก”

โดย สุมาลี ยับสันเทียะและคณะ

ตุลาคม 2557

สัญญาเลขที่ RDG5650117

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ 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 “การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง”

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนุบสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่าย 5 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย รหัสโครงการ RDG5650117ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการขึ้นรูปยางพารา และอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางพารา หน่วยรังสีรักษา กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลพุทธชินราช หน่วยรังสีรักษา ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา เครื่อง C-arm เครื่องมือสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ และเครื่อง treatment planning ของการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้

รายงานการวิจัยนี้มีความสมบูรณ์โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านจากหน่วยงานต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นมา ณ โอกาสนี้ จากการประสานงานเรื่องทุนวิจัย การให้บริการวิเคราะห์และใช้เครื่องมือวิเคราะห์ รวมทั้งคำแนะนำและข้อคิดเห็นงานวิจัยด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัยฯ

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก

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

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ คือวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูกในปัจจุบัน โดยความรู้ทางด้านกายวิภาคศาสตร์ภายในอุ้งเชิงกรานนั้นมีความสำคัญมาก สำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีรักษาและนิสิตรังสีเทคนิค แต่โรงพยาบาลและมหาวิทยาลัยส่วนใหญ่ไม่มีสื่อการเรียนรู้และฝึกปฏิบัติอย่างเพียงพอ โดยเฉพาะหุ่นจำลองที่สามารถจำลองกายวิภาคศาสตร์ของมนุษย์ และสามารถใช้ฝึกทักษะ ทั้งการจัดท่าและการวางแผนการรักษา ในปัจจุบันถือได้ว่ามีค่อนข้างน้อย และที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดก็ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อีกทั้งหุ่นจำลองสำหรับการฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ นั้นยังไม่มีขายในท้องตลาดด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูกจากยางพาราเพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อเป็นสื่อในการเรียนการสอน และฝึกทักษะ ของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก
2. เพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะ และเป็นสื่อในการเรียนการสอนของการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกของการฉายรังสีระยะใกล้
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของหุ่นจำลองที่ผลิตขึ้นในด้านการใช้งานและความสมจริงและการเป็นสื่อการเรียนการสอน

ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการวิจัย

การพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน เริ่มต้นด้วยการออกแบบหุ่นจำลองโดยอาศัยขนาดตามมาตรฐานหญิงไทย ร่วมกับหุ่นจำลองมาตรฐาน และออกแบบอวัยวะภายในหุ่นจำลองที่ประกอบไปด้วยส่วนของมดลูก ปากมดลูก ช่องคลอด กระเพาะปัสสาวะและทวารหนัก พร้อมกับมีกระดูกในส่วนเชิงกรานอยู่ภายในหุ่น จากนั้นสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปหุ่นจำลอง มีการพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปตามมาตรฐานสากลโดยทำการทดสอบสมบัติทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างยางทั้งภาวะปกติและเมื่อฉายรังสีด้วยปริมาณรังสี 200-1,000 cGy ก่อนนำสูตรและวิธีการที่เหมาะสมที่สุดมาขึ้นรูปหุ่นจำลองด้วยกระบวนการผลิตยางฟองน้ำด้วยวิธีดันลอป นำหุ่นจำลองที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางด้านรังสี และประเมินคุณภาพและความพึงพอใจในการใช้งานของหุ่นจำลอง

2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลการวิจัยนี้ได้สูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นจากสูตรโฟมยางมาตรฐาน เพื่อใช้ในการสร้างหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน ซึ่งได้หุ่นจำลองที่มีน้ำหนักโดยรวม 4.5 กิโลกรัม ขนาดรอบเอว 68 เซนติเมตร ขนาดรอบสะโพก 86.5 เซนติเมตร และขนาด ต้นขา 55 เซนติเมตร ภายในอุ้งเชิงกรานมีอวัยวะที่สำคัญ ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ ช่องคลอด มดลูก และทวารหนัก โดยช่องคลอดมีความยาว 7 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตร และความยาวของมดลูก 5 เซนติเมตร หุ่นจำลองมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเนื้อยางพาราเท่ากับ 0.3470 g/cm^3 สำหรับการทดสอบความทนทานต่อการฉายรังสีปริมาณ 200-1,000 cGy เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งค่าความแข็ง Shore A (12.58-15.67) และค่า Stress (855.3-891.4 kN/m^2) ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างยาง Std-Sample (238.4 kN/m^2) ประมาณ 3.5-3.7 เท่า เป็นผลมาจากปริมาณการเกิดฟองโฟมในเนื้อยางที่ลดลงจากการลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวโพแทสเซียมโอลิเอต และการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่าการทนต่อแรงดึงจึงสูงขึ้นมาก ในทำนองเดียวกันปริมาณฟองโฟมในเนื้อยางที่ลดลงส่งผลให้ระยะยืดออก (Strain) ของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้นี้มีค่าสูงขึ้น นั้นคือความสามารถในการรับแรงดึงอย่างต่อเนื่องของเนื้อยางในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้นนั้นเอง ส่วนค่า Modulus at Break พบว่าตัวอย่างยางทั้งหมดมีค่าสูงกว่า Std-Sample เป็นผลมาจากความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ยางที่สูงขึ้นจากการลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวและจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในผลิตภัณฑ์ยางทำให้ความเป็นอีลาสติกของผลิตภณฑ์ยางลดลง สำหรับค่าเปอร์เซนต์การยุบตัวหลังการกดอัดและค่าความทนแรงฉีกขาด (Tear Strength) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางที่ฉายและไม่ฉายรังสีมีค่าต่ำกว่ากว่า Std-Sample (สำหรับค่าเปอร์เซนต์การยุบตัวหลังการกดอัด) และมีค่าสูงกว่า

Std-Sample (สำหรับ Tear Strength) ซึ่งเป็นผลมาจากความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ยางที่สูงขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับค่าการทนแรงดึง ผลการทดสอบสมบัติทางด้านรังสีพบว่าภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองแสดงให้เห็นอวัยวะภายในแตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น กระดูกกับเนื้อเยื่อ มีความแตกต่างของขาว-ดำ เท่ากับ -196.88% และมีความสม่ำเสมอของความดำในภาพอยู่ในเกณฑ์ดี คือ มีค่าความแตกต่างของ HU เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเฉลี่ยเท่ากับ 26.5 ผลประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองในการฝึกทักษะการรักษา และวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูก โดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา มีค่าเฉลี่ยของคะแนนโดยรวมจากทุกด้าน เท่ากับ 4.21±0.63 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก และนิสิตรังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 มีค่าเฉลี่ยของคะแนนโดยรวมจากทุกด้าน เท่ากับ 3.96±0.68 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

3. สรุปผลการวิจัย

โดยสรุปยางพารามีคุณสมบัติเหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองทางการแพทย์ และหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ผลิตจากยางพารานี้ สามารถใช้ฝึกทักษะการรักษา และวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูกได้ โดยมีเกณฑ์ความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม

การจากเตรียมหุ่นจำลองในแต่ละครั้ง พบว่าการตีน้ำยางพาราให้ขึ้นฟูและการทำให้ฟองโฟมยาง มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอนั้นควบคุมได้ยากมาก และหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ต้องการให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อของมนุษย์ ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาปรับปรุงสูตรยางพาราเป็นการขึ้นรูปหุ่นจำลองโดยการหล่อเบ้าพิมพ์ (casting Process) ซึ่งจะทำให้การควบคุมความหนาแน่นในเนื้อยางทั้งตัวหุ่นจำลองได้ดีกว่า

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

เผยแพร่ให้ผู้สนใจโดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษาและหน่วยงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการฝึกทักษะการปฏิบัติงานทางรังสีรักษาเพื่อการรักษาโรคมะเร็งปากมดลูก ที่รักษาด้วยรังสีรักษาระยะใกล้ และเพื่อการเรียนการสอนการสร้างภาพและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูก

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมะเร็งปากมดลูกถือได้ว่ามีอุบัติการณ์การเกิดเป็นอันดับสองของหญิงไทย และการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้คือวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ โดยความรู้ทางด้านกายวิภาคศาสตร์ภายในอุ้งเชิงกรานนั้นมีความสำคัญมาก ซึ่งทั้งผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีรักษาและนิสิตรังสีเทคนิคควรจะทราบ แต่โรงพยาบาลและมหาวิทยาลัยส่วนใหญ่ไม่มีสื่อการเรียนรู้และฝึกปฏิบัติอย่างเพียงพอ โดยเฉพาะหุ่นจำลองที่สามารถจำลองกายวิภาคศาสตร์ของมนุษย์ ยิ่งไปกว่านั้นหุ่นจำลองที่มีใช้ในทางคลินิกนั้นต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่แพง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพาราเพื่อเป็นสื่อในการเรียนการสอน และฝึกทักษะสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ โดยหุ่นจำลองถูกออกแบบให้มีขนาดตามมาตรฐานของหญิงไทย ตัวหุ่นจำลองประกอบด้วย 2 ซีก คือ ด้านซ้ายและขวา โดยแต่ละด้านจะมีโพรงอวัยวะที่สำคัญภายในอุ้งเชิงกราน ได้แก่ มดลูก ช่องคลอด กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก และสร้างแม่พิมพ์จากซิลิโคนและปูนปลาสเตอร์ ในขั้นตอนการขึ้นรูปยางพาราและสารเคมีที่สำคัญจะถูกปั่นรวมกันจนขึ้นฟองได้ที่ และเทลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปนึ่งด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นำหุ่นจำลองที่ได้ไปทดสอบความสม่ำเสมอของเนื้อยางภายในตัวหุ่นจำลอง และหาเปอร์เซ็นความแตกต่างของความขาว-ดำระหว่างเนื้อยางพาราและกระดูกจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองโดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษาและนิสิตรังสีเทคนิคชั้นปีที่ 4 โดยผลการทดลองที่ได้ พบว่าหุ่นจำลองยางพาราทั้งสองด้านมีลักษณะตามที่ออกแบบไว้ โดยมีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อนของชิ้นงานยางพาราที่ได้ โดยทดสอบทั้งภาวะปกติและเมื่อฉายรังสีด้วยปริมาณรังสี 200-1,000 cGy พบว่าไม่แตกต่างกัน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยของ HU เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเท่ากับ 26.5 และค่าความขาว-ดำของกระดูกและเนื้อเยื่อในหุ่นจำลองมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างขาว-ดำ เท่ากับ -196.88% โดยหุ่นจำลองสามารถนำไปใช้ในการจำลองการใส่อุปกรณ์ในการรักษา สร้างภาพถ่ายทางรังสี และวางแผนการรักษา ซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจกระบวนการในการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ จากการประเมินโดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา มีค่าเฉลี่ยของคะแนนความพึงพอใจโดยรวมจากทุกด้านเท่ากับ 4.21±0.63 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก และผลการประเมินโดยนิสิตรังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 มีความพึงพอโดยรวมจากทุกด้าน เฉลี่ยเท่ากับ 3.96±0.68 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก โดยสรุปหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้นี้มีความสำคัญในการเรียนการสอนและการฝึกทักษะสามารถใช้งานได้จริง และยางพารามีคุณสมบัติเหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองทางการแพทย์

คำสำคัญ

มะเร็งปากมดลูก, รังสีรักษาระยะใกล้, หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน, หุ่นจำลองยางพารา

Abstract

Nowadays, cervical cancer has the most second evidence in Thai women, and brachytherapy is one of the best choices for treatment. The knowledge of anatomy within pelvic cavity is very important for both radiotherapy staffs in hospital and radiological technologist students. However, most of all hospital and universities have insufficient materials for learning and practice especially phantom which simulate human anatomy. Moreover, clinical phantoms have to import from foreign countries and they have very expensive price. Therefore, several hospitals and universities can't afford them for used in clinical practice. Consequently, the purpose of this study was to develop the instructional pelvic phantom which was made by Para rubber for clinical practice in brachytherapy for cervical cancer. First of all stages, the pelvic phantom was designed by using reference body of Thai women. This phantom composed of 2 parts; right and left, whereas, each part had essential organs within woman pelvic cavity including uterus, vagina, bladder, and rectum. Next, mold block was produced by using plaster and silicone. In subsequent stage, essential chemicals and Para rubber were mixed and spin until it had sufficient bubble. And after that, this composition was filled in the plaster-silicone mold, and then it was steamed or baked in an oven at 100 degree Celsius. And then, uniformity and %contrast were evaluated from CT images. In the final step, the satisfactions were performed by fourth-year radiological technologist students and staffs in radiotherapy departments. As the result, the pelvic phantom which had 2 parts was produced. It had 4.5 kg weight. The different of HU between interested point and reference point, and percent contrast were 26.5 and -196.88%, respectively. And it was essential for training in clinical practice. The average of satisfaction score from radiotherapy staffs and radiological technologist students were 4.21±0.63 and 3.96±0.68 each. In conclusion, brachytherapy pelvic phantom pay an important role for studying and training, and it can be used practically. Additionally, Para rubber can be used to build medical phantoms perfectly.

Keywords

Cervical cancer, Brachytherapy, Pelvic phantom, Para rubber phantom

1. ความสำคัญและที่มาของโครงการ

การเรียนการสอนเกี่ยวกับเทคนิคทางรังสีรักษารวมถึงในหัวข้อการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ (Brachytherapy) นั้นมีเนื้อหาที่ยากแก่การเข้าใจของผู้เรียนเนื่องจากเป็นกระบวนการรักษาที่ซับซ้อน ทำให้ผู้เรียนเกิดกระบวนการเรียนรู้ที่ไม่สมบูรณ์ ไม่เข้าใจกระบวนการทางการรักษาที่แท้จริง ประกอบกับการไม่ได้พบเจอสถานการณ์จริงระหว่างเรียน เนื่องจากสถาบันการศึกษาไม่มีเครื่องมือและอุปกรณ์จริงอันเอื้อต่อการเรียนรู้ของผู้เรียน อีกทั้งการฝึกงานของผู้เรียนส่วนใหญ่นั้นจะไม่ได้ฝึกงานอย่างเต็มที่ในส่วนของการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ผู้เรียนไม่เข้าใจกระบวนการของการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ นอกจากนี้การทดสอบความถูกต้องของแผนการรักษาจำเป็นต้องอาศัยหุ่นจำลอง ดังนั้นหากมีหุ่นจำลองที่สามารถสอดใส่เครื่องมือวัดปริมาณรังสีเข้าไปได้ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการตรวจสอบความถูกต้องก่อนการฉาย หรือการตรวจสอบปริมาณรังสีที่กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนักจะได้รับ อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์สำหรับการทดสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีที่ออกมาเทียบกับแผนการรักษาได้อีกด้วย

มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่พบมากที่สุดเป็นอันดับต้นๆ ของเพศหญิง และเป็นมะเร็งที่มักจะฉายด้วยรังสีระยะใกล้ เนื่องจากการฉายด้วยรังสีระยะไกลเพียงอย่างเดียวอาจจะส่งผลแทรกซ้อนต่ออวัยวะสำคัญอันได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (Bladder) และทวารหนัก (Rectum) ดังนั้นการรักษามะเร็งปากมดลูกจึงมักจะรักษาด้วยการฉายรังสีระยะไกลร่วมกับการฉายรังสีระยะใกล้ โดยการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้จะช่วยให้ส่งปริมาณรังสีไปที่ก้อนมะเร็งได้โดยตรง โดยที่อวัยวะและเนื้อเยื่อปกติที่อยู่รอบๆ ได้รับปริมาณรังสีน้อย (1)

ปัจจุบันการเรียนการสอนทางการแพทย์มีการผลิตสื่อการเรียนการสอนหลากหลายชนิด เช่น สื่อมัลติมีเดีย และ หุ่นจำลอง โดยเฉพาะหุ่นจำลองถือได้ว่าเป็นหนึ่งตัวช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ด้วยตนเอง และช่วยให้กระบวนการเรียนรู้ของผู้เรียนได้ผลดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเรียนทางการแพทย์บางสถานการณ์นั้นไม่สามารถเรียนกับเหตุการณ์จริง การเรียนจากหุ่นจำลองจึงทำให้ผู้เรียนได้ฝึกปฏิบัติจากสถานการณ์จริงและมีโอกาสทบทวนซ้ำได้ตามที่ตนต้องการ มีงานวิจัยมากมายที่พัฒนาหุ่นจำลองทางการแพทย์ และทดสอบประสิทธิภาพของการเรียนการสอนพบว่าการเรียนการสอนโดยการใช้หุ่นจำลองนั้นให้ประสิทธิภาพการเรียนรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (2-4) และหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นเหล่านี้เป็นผลผลิตมาจากยางพารา โดยหุ่นจำลองจากยางพารานั้นได้มีผู้วิจัยหลายท่านได้นำมาใช้ผลิตเป็นสื่อการเรียนการสอนในทางการแพทย์ (2-8) มากมาย โดยผลงานจากยางพาราที่ออกมาก็มีรูปร่าง คุณสมบัติเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน โดยยางพารานั้นเป็นผลผลิตที่มีมากในประเทศไทย ดังนั้น จึงสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าการใช้เรซิ่น หรือ ซิลิโคนซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

สื่อการเรียนการสอน หุ่นจำลองฝึกทักษะ ทั้งการจัดท่าและการวางแผนการรักษา ในปัจจุบันถือได้ว่ามีค่อนข้างน้อย และที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดก็ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อีกทั้งหุ่นจำลองสำหรับการฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ นั้นยังไม่มีขายในท้องตลาดด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับมะเร็งปากมดลูก จากยางพารา เพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนสำหรับนิสิตรังสีเทคนิค นักรังสีการแพทย์ นิสิตฟิสิกส์การแพทย์ และผู้ที่สนใจ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อเป็นสื่อในการเรียนการสอน และฝึกทักษะ ของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก

2.2 เพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะ และเป็นสื่อในการเรียนการสอนของการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกของการฉายรังสีระยะใกล้

2.3 เพื่อประเมินความพึงพอใจของหุ่นจำลองที่ผลิตขึ้นในด้านการใช้งานและความสมจริงและการเป็นสื่อการเรียนการสอน

3. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย

3.1 มะเร็งปากมดลูก (9)

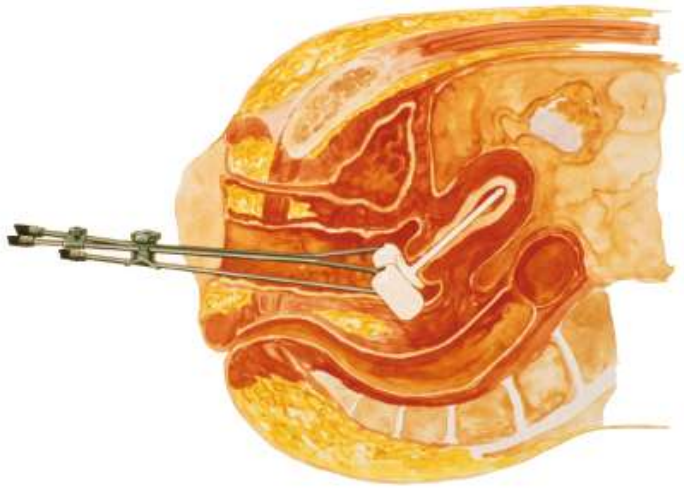
Cervix หรือปากมดลูก คือ ส่วนหนึ่งของระบบสืบพันธ์เพศหญิง โดยมีลักษณะรูปร่างเป็นกรวยเล็กๆ เป็นทางผ่าน หรือเป็นช่องมีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร เป็นฐานของมดลูกและเชื่อมระหว่างมดลูกกับช่องคลอด โดยที่ทางผ่านปากมดลูกโดยปกติจะปิด แต่อย่างไรก็ตามขณะที่คลอดบุตร มันจะเปิดเพื่อยอมให้ทารกคลอดออกมาจากมดลูกของแม่

และมะเร็งปากมดลูก (Cervical cancer) เป็นอย่างไร มะเร็งปากมดลูกเป็นมะเร็งที่เป็นมากที่สุดอันดับที่สองของผู้หญิงทั่วโลก ในแต่ละปีมีผู้หญิงจากทั่วโลกจำนวน 500,000 คนที่เป็นมะเร็งปากมดลูกซึ่งปากมดลูกมีเซลล์ 2 ชั้น คือ ชั้นนอกและชั้นใน โดยที่ถ้าเป็นที่ชั้นนอก เรียกว่า squamous cell carcinoma ซึ่งเป็นชนิดที่พบบ่อยที่สุดของมะเร็งปากมดลูก สำหรับมะเร็งที่เกิดจากเซลล์ชั้นใน หรือ glandular cells ที่สร้าง mucus จะเรียกว่า cervical adenocarcinoma

3.2 การรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยการฉายรังสีระยะใกล้ (1)

มะเร็งปากมดลูกถือได้ว่าเป็นมะเร็งที่พบในอันดับต้นๆ ของเพศหญิง ในประเทศไทย โดยกระบวนการรักษามะเร็งปากมดลูกนั้นมีหลายวิธี ทั้งการผ่าตัด ให้เคมีบำบัด การรักษาด้วยรังสีระยะไกล รวมไปถึงการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้

การรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้มีมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 โดยเริ่มจากการฉายด้วยรังสีเรเดียมแบบอัตราแรงรังสีต่ำ (low dose rate: LDR) จนปัจจุบันฉายด้วยอัตราแรงรังสีสูง (high dose rate: HDR) โดยรังสีชนิดเออริเดียม 192 (Ir-192) จากปี 1967 มีการใช้ HDR ร่วมกับการฉายรังสีภายนอก (external-beam irradiation) หรือการฉายระยะไกลเพื่อการรักษาที่หวังผลให้ผู้ป่วยหายขาดจากมะเร็งโดยรักษาตั้งแต่ผู้ป่วยระยะแรกๆ จนถึงระยะท้ายๆ โดยวิธีที่ใช้ในการรักษาเป็นแบบระบบแมนเชสเตอร์ (Manchester System) ซึ่งใช้อุปกรณ์ร่วมในการรักษาคือ central intrauterine tandem และ small vaginal ovoids 2 อัน (ดังภาพที่ 1) การรักษาด้วย external-beam irradiation นั้น มักจะใช้เทคนิค parallel opposed fields โดยมี Wedge ร่วมด้วย ซึ่งการรักษาด้วย HDR ร่วมกับ external-beam irradiation นั้นจากการวิจัยพบว่าได้ผลการรักษาและภาวะแทรกซ้อนที่ใกล้เคียงกับ LDR



ภาพที่ 1 แสดงการฉาย brachytherapy โดยใช้ applicators วางในปากมดลูก
จาก http://www.aboutbrachytherapy.com/en-us/patients/cancers/cervical-cancer/Pages/brachytherapy-treatment.aspx

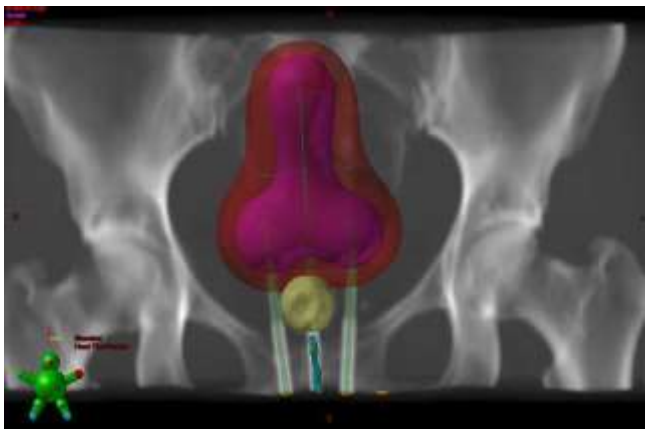
ผู้ป่วย squamous cell cancer ของมะเร็งปากมดลูกนั้นจะมีขนาดของ primary tumor ขนาดหลากหลายตั้งแต่ microscopic subclinical disease จนถึง enlarged tumor ซึ่งอาจจะขยายไปถึงparametrium เข้าไปที่ pelvic side wall รุกรามไปยัง lower vaginal tissues, และ infiltrate ที่ body ของมดลูก uterus อาจจะมีการรุกรามไปยังอวัยวะหรือเนื้อเยื่อข้างเคียง เช่น rectum และ bladder ซึ่งการรักษาเพื่อหวังผลให้หายนั้นต้องรักษาด้วย external-beam irradiation และตามด้วยการฉายรังสีระยะใกล้ ซึ่งขนาดของ primary tumor รวมถึงการขยายไปยังอวัยวะข้างเคียง เป็นตัวที่จะตัดสินใจว่าการรักษาจะเป็นแบบใด ซึ่งการรักษาแต่ละแบบก็จะมี

ประสิทธิภาพที่ต่างกัน การให้ intracavitary irradiation อย่างเดียวเพื่อทำลายก้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่า 3 หรือ 4 เซนติเมตร ส่วน external-beam irradiation เพื่อรักษาผู้ป่วยที่มีการกระจายของมะเร็งไปที่ต่อมน้ำเหลือง แต่โดยปกติแล้วนิยมใช้การร่วมรักษาระหว่างintracavitary และ external-beam

สำหรับมะเร็งปากมดลูกระยะเริ่มแรกอาจจะรักษาด้วย intracavitary irradiation อย่างเดียวหรือ ให้ intracavitary irradiation แล้วตามด้วยการผ่าตัด หรือการรักษาด้วย intracavitary irradiation ร่วมกับ external-beam irradiation สำหรับระยะท้ายๆ มักจะรักษาด้วยการร่วมกันของทั้ง 2 วิธีคือ intracavitary irradiation ร่วมกับ external-beam irradiation

มะเร็งปากมดลูกนั้นถือได้ว่าเหมาะกับการรักษาด้วย intracavitary irradiation ทั้งนี้เนื่องจาก ลักษณะของช่องคลอดและช่องมดลูกเหมาะกับการใส่แร่, โดยปกติแล้วเนื้อเยื่อของปากมดลูกและช่องคลอดนั้นจะค่อนข้างดื้อต่อรังสีและทนต่อการฉายด้วยรังสีอัตราแรงสูง และความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว (rapidly falls off) เมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี จึงเป็นผลดีต่อเนื้อเยื่อปกติที่อยู่หลังจากปากมดลูก

เมื่อ intracavitary source applicators ถูกวางภายในช่องคลอดและมดลูก ความสัมพันธ์ของ applicators นั้น ขึ้นกับ ขนาดและรูปร่างของก้อนมะเร็ง ดังนั้นอาจจะส่งผลให้ก้อนได้รับปริมาณรังสีต่ำเกินไป และเนื้อเยื่อปกติอาจได้ปริมาณรังสีสูงเกินไปดังนั้นต้องเพิ่มโดย external-beam irradiation สำหรับรูปร่างของการกระจายของปริมาณรังสีจะเป็นในลักษณะลูกชมพู่ ดังภาพ โดยรูปร่างของรังสีนี้อาจจะมาจากการปรับเวลาของ source ร่วมด้วยกับตำแหน่งของ applicators



ภาพที่ 2 แสดงการกระจายของปริมาณรังสีจาก intracavitary brachytherapy ของมะเร็งปากมดลูก โดยลักษณะของการกระจายของปริมาณรังสีเป็นรูปร่างชมพู่
จาก http://www.varian.com/media/oncology/brachytherapy/images/7_IG3D.jpg

Target volume หรือปริมาตรที่ต้องการรักษาจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ primary tumor และ pelvic lymph nodes โดยที่อวัยวะเสี่ยงที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ (bladder) และทวารหนัก (rectum) ดังนั้นการสร้างหุ่นจำลองเพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนในส่วนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยการฉายรังสีระยะใกล้ หรือ intracavitary irradiation จึงจำเป็นจงต้องมีส่วนประกอบของทั้งช่องคลอด มดลูก กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก อย่างชัดเจน

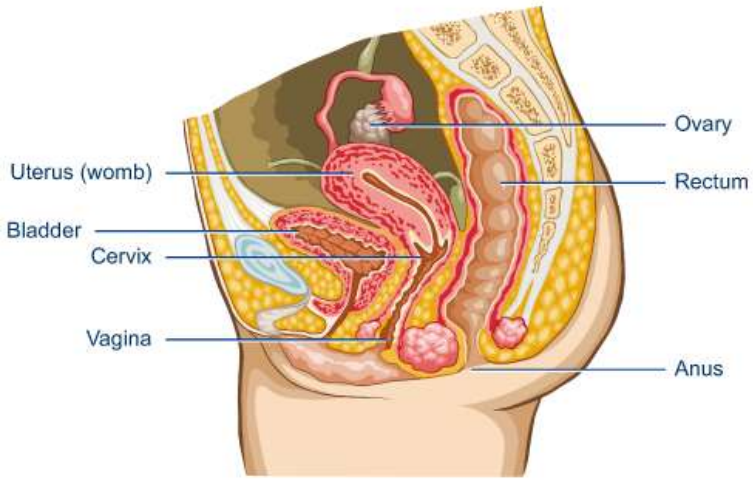
3.3 กระบวนการการรักษา (1)

คนไข้จะนอนอยู่บนขาหยั่งในท่า lithotomy บนเตียงรักษา โดยปกติคนไข้จะถูกทำให้หมดความรู้สึกต่อความเจ็บปวด ถึงแม้ว่าบางวิธีจะไม่ดมยาแต่ก็จะให้ทานยาแก้ปวด เมื่อจัดอุปกรณ์ในห้องใส่อุปกรณ์แล้ว ก็เป็นหน้าที่ของนักรังสีการแพทย์ในการสร้างภาพอาจจะเป็นการสร้างภาพ orthogonal film, semi- orthogonal film หรือ ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือภาพเอ็มอาร์ไอ จากนั้นคนไข้จะถูกเข็นไปยังห้องฉาย และนักฟิสิกส์และแพทย์จะวางแผนการรักษาเพื่อกำหนดเวลาและตำแหน่งในการฉายรังสี

กระบวนการในการใส่อุปกรณ์ ที่เรียกว่า applicators โดยปกติจะเป็นรูปแบบที่คล้ายๆ กันในทุกกรณี สำหรับกระเพาะปัสสาวะ (bladder) จะมีการใส่ bladder catheter โดยภายในบอลลูนจะมีการใส่สารทึบรังสีเพื่อให้ทราบตำแหน่งของกระเพาะปัสสาวะ และมีประโยชน์กรณีที่ต้องการเติมน้ำเพื่อให้น้ำเต็มกระเพาะปัสสาวะ (full bladder) โดยมีประโยชน์เพื่อช่วยให้ผนังของกระเพาะปัสสาวะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุด สำหรับทวารหนักอาจมีการขยายโดยการใส่ผ้ากอซชุบสารทึบรังสีเพื่อเป็นการดันให้ทวารหนักอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี

3.4 กายวิภาคศาสตร์ของอุ้งเชิงกรานเพศหญิง (10)

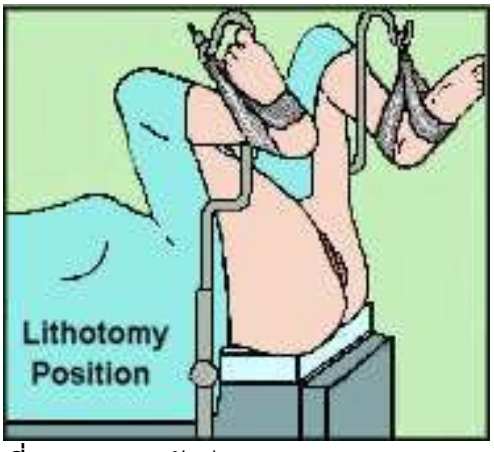
ภายในอุ้งเชิงกรานของเพศหญิงประกอบด้วยอวัยวะต่างๆ ได้แก่ รังไข่ (Overy) มดลูก (Uterus) กระเพาะปัสสาวะ (Bladder) ปากมดลูก (cervix) ช่องคลอด (Vagina) ทวารหนัก (Rectum) และ รูทวารหนัก (Anus) โดยความสัมพันธ์ของแต่ละอวัยวะแสดง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์อวัยวะในอุ้งเชิงกรานเพศหญิง
จาก http://www.aboutbrachytherapy.com/en-us/patients/cancers/cervical-cancer/Pages/default.aspx

3.4.1 ช่องคลอด (10)

ช่องคลอดนั้นเป็นอวัยวะที่เป็นท่อกลวงต่อระหว่างปากมดลูกกับอวัยวะสืบพันธุ์ภายนอกผนังด้านหน้ามีความยาวประมาณ 6-8 เซนติเมตร และผนังด้านหลังมีความยาวประมาณ 7-10 เซนติเมตร ในท่ายืนตรงแนวของช่องคลอดจะขนานกับพื้นโลก แต่ในท่า Lithotomy ซึ่งเป็นท่าที่ให้ผู้ป่วยนอนหงายบนเตียงที่มีขาหยั่ง คลุมผ้า และให้ผู้ป่วยเลื่อนก้นมาที่ขอบเตียง ให้ผู้ป่วยวางเท้าทั้งสองข้างบนขาหยั่ง คลุมผ้าห่มปิดต้นขาทั้งสองข้างและเท้า เปิดเฉพาะบริเวณขาหนีบและอวัยวะสืบพันธุ์ภายนอกซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 (11) โดยท่า Lithotomy นั้นแนวของช่องคลอดจะพุ่งไปด้านหลัง ชี้ไปหา Sacrum ช่องคลอดด้านหน้าจะอยู่ชิดกับท่อปัสสาวะ Bladder Trigone และด้านหลังของกระเพาะปัสสาวะ ส่วนด้านหลังจะอยู่ชิดกับทวารหนัก



ภาพที่ 4 แสดงการจัดท่า Lithotomy Position (12)

3.4.2 ปากมดลูก (10)

ปากมดลูกนั้นเป็นส่วนล่างสุดของมดลูกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่ในช่องท้องและส่วนที่ยื่นโผล่เข้าในช่องคลอด ความยาวของปากมดลูกปกติ ประมาณ 3-4 เซนติเมตร

3.4.3 มดลูก (10)

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

3.4.4 กระเพาะปัสสาวะ (10)

กระเพาะปัสสาวะนั้นอยู่หน้าต่อปากมดลูกและช่องคลอดและหลังต่อ Pubis symphysis โดยบริเวณ Trigone จะวางอยู่ด้านบน 1/3 ของช่องคลอด

3.4.5 ทวารหนัก (10)

ทวารหนักนั้นเป็นส่วนปลายของลำไส้ใหญ่ มีลักษณะเป็นท่อตรงมีความยาวประมาณ 12.5 เซนติเมตร ตรงบริเวณส่วนล่างมีลักษณะพองโตออกมามาก เพื่อเก็บอุจจาระไว้โดยมีลิ้นช่วยพยุงอยู่ ตำแหน่งที่ตั้งในเพศชายอยู่ข้างหลังกระเพาะปัสสาวะ ในเพศหญิงอยู่ข้างหลังมดลูก ตรงปลายของไส้ตรงจะเป็น ทวารหนัก (Anus) โดยมีกล้ามเนื้อหูรูด 2 อัน ควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก กล้ามเนื้อหูรูดด้านใน ถูกควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนมัติ ไม่อยู่ใต้บังคับของจิตใจ ส่วนกล้ามเนื้อหูรูดด้านนอกอยู่ใต้บังคับของจิตใจ และสำคัญมากในการควบคุมการปิดเปิดของทวารหนัก

3.5 สื่อการเรียนการสอน (13-18)

สื่อการเรียนการสอน หมายถึง บุคคล วัสดุ อุปกรณ์ ตลอดจนเทคนิควิธีการที่เป็นช่องทางทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ตามจุดประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เป็นเครื่องมือซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการเรียนการสอนอย่างมาก โดยเป็นตัวนำความต้องการของผู้สอนไปสู่ตัวผู้เรียนได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาบทเรียนได้ตามความต้องการของผู้สอนเป็นผลให้ผู้เรียนเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมไปตามจุดมุ่งหมายการเรียนการสอนได้อย่างถูกต้องเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ประโยชน์ของสื่อการเรียนการสอนต่อผู้เรียนมีดังต่อไปนี้

1) ช่วยพัฒนาคุณภาพการเรียนรู้ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สื่อความหมายต่อผู้เรียนได้อย่างชัดเจน
2) ช่วยให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาที่จำกัด
3) ช่วยกระตุ้นและดึงความสนใจของผู้เรียนต่อกระบวนการเรียนการสอนมากขึ้น
4) ช่วยส่งเสริมกระบวนการคิดและการแก้ปัญหาในขบวนการเรียนรู้ของผู้เรียน

สำหรับการจัดประเภทของสื่อการเรียนการสอนนั้น Robert E. de Kieffer (19) ได้แบ่งสื่อการเรียนการสอนออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

3.5.1 วัสดุที่ไม่ต้องฉาย ได้แก่ รูปภาพ แผนภูมิ กราฟ ของจริง ของตัวอย่าง หุ่นจำลอง แผนที่ กระดาษสาธิต ลูกโลก กระดานชอล์ค กระดานนิเทศ กระดานแม่เหล็ก การแสดงบทบาท นิทรรศการ การสาธิต และการทดลอง เป็นต้น

3.5.2 วัสดุฉายและเครื่องฉาย ได้แก่ สไลด์ ฟิล์มสตริป ภาพโปร่งใส ภาพทึบภาพยนตร์ และเครื่องฉายต่าง ๆ เช่น เครื่องฉายภาพยนตร์ เครื่องฉายสไลด์ และฟิล์มสตริป เครื่องฉายกระจกภาพ เครื่องฉายภาพข้ามศีรษะ เครื่องฉายภาพทึบแสง เครื่องฉายภาพจุลทรรศน์ เป็นต้น

3.6 หุ่นจำลอง (Model) (20)

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

ประเภทของหุ่นจำลอง(20) 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 โดยนอกจากนี้ยังมีหุ่นจำลองอีก

หลายประเภทอาทิเช่น หุ่นจำลองเลียนของจริง (mockup Models) และหุ่นจำลองแบบแยกส่วน (Build up Models) เป็นต้น

สำหรับคณะกรรมาธิการระหว่างว่าด้วยหน่วยและการวัดรังสี (The International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อและหุ่นจำลอง ไว้ดังนี้ “วัสดุสมมูลสมมูลเนื้อเยื่อคือวัสดุใดๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อในแง่ของการทำปฏิกิริยากับรังสีชนิดก่อไอออน” และ “หุ่นจำลอง คือโครงสร้างใดๆ ที่บรรจุด้วยวัสดุที่แทนเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น และใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาของรังสีในร่างกายมนุษย์” โดยหุ่นจำลองมักถูกนำมาทดสอบมาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Image Equipment) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีและการลดทอนรังสีในเนื้อเยื่อมนุษย์ (21) นอกจากนี้หุ่นจำลองยังสามารถนำมาใช้เพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนเพื่อเพิ่มความเข้าใจและทักษะการปฏิบัติงานทางด้านรังสีรักษาที่ต้องการความถูกต้องและมีรายละเอียดในขั้นตอนการทำงานที่ค่อนข้างสูง

3.7 หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา (22)

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการทางรังสีรักษาทั้งในเรื่องของตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสี การตรวจสอบการทำงานเครื่องมือต่างๆ และการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดท่าผู้ป่วยเพื่อทำการฉายรังสีสำหรับการรักษา เช่น การควบคุมคุณภาพการเคลื่อนที่ของ Multi–leaf Collimator (MLC Quality Assurance), การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) และการวัดปริมาณรังสี(Dose Measurement) ของเครื่องเร่งอนุภาค รวมทั้งยังใช้สำหรับวัดการกระจายรังสี (Dose distribution) หรือการคำนวณปริมาณรังสี (Dose Calculation) ให้กับผู้ป่วยเพื่อทำการรักษามะเร็งชนิดต่างๆ ในขั้นตอนของการวางแผนการรักษา (Treatment Planning) หุ่นจำลองที่ใช้ทางรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำจากวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเพื่อให้มีความสมจริงคล้ายมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และความเหมือนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยหุ่นจำลองทางรังสีรักษาอาจทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซิ่น (Epoxy resin), ซิลิโคน (Silicone), ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass, พอลิยูรีเทน (Polyurethane, พอลิเมทธีนเมตาอะคริเลต (Polymethymethaacrylate, PMMA) หรืออะคริลิค (Acrylics) ซึ่งวัสดุต่างๆ เหล่านี้มีราคาที่แพงและบางชนิดเป็นสารอันตรายเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถแบ่งประเภทของหุ่นจำลองทางรังสีรักษาตามลักษณะองค์ประกอบภายในได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

3.7.1 หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom

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

หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom ทำจากอีพอกซีเรซิ่นที่มีความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิด Ionizing Chamber ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีชนิด Photon และ Electron มีลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีทั้งขนาด 20 x 20 เซนติเมตร และ 40 x 40 เซนติเมตร และมีความหนาแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งานประเภทต่างๆ (23) โดยตัวอย่างของหุ่นจำลองชนิด solid water phantom แสดงดังภาพที่ 5

ภาพที่ 5 แสดงหุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom
จากhttp://www.cnmcco.com/dosimetry/PDFdocs/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf

หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom เป็นหุ่นจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพโดยทั่วไป การตรวจสอบความคงตัวของลำรังสี การควบคุมคุณภาพของ Multi – leaf collimator ติดตั้งและใช้งานได้ง่าย มีส่วนประกอบที่ เป็นน้ำประมาณ 1% (24) โดยตัวอย่างของหุ่นจำลองชนิด Cube Phantom แสดงดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 แสดงหุ่นจำลองชนิด Cube Phantom
จาก http://www.supertechx-ray.com/pics/RadiationTherapy/CIRS-009-1small.jpg

หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีการออกแบบสำหรับการวัดปริมาณรังสี ตรวจสอบการวางแผนการรักษา วัดการกระจายของรังสีแบบ 2 มิติ มีขนาด 30 cm x 30 cm x 20 cm ภายในมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 0.5% สามารถนำมาใช้สำหรับการฉายรังสีที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 50 KeV ถึง 25 MeV(24) โดยตัวอย่างของหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom แสดงดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 แสดงหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom
จาก http://www.imagingsol.com.au/product/1788/img/products/1788/IMRT-Homogeneous-Phantom-0.jpg?large

3.7.2 หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีความซับซ้อนกว่าแบบแรก ภายในมีองค์ประกอบที่ใช้แทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอาจมีรูปร่างที่คล้ายกับร่างกายมนุษย์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของลำรังสี เช่น Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) เป็นหุ่นจำลองที่เป็นที่นิยมใช้มากในทางรังสีวิทยามาเป็น

ระยะเวลายาวนานกว่า 30 ปี และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก โดยหุ่นจำลองประเภทนี้ได้รับการตกแต่งและปรับปรุงจนมีคุณสมบัติที่ความเหมาะสมกับการใช้งาน ผลิตจากวัสดุที่สมมูลย์กับเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ กล้ามเนื้อ (Muscle), กระดูก (Bone), ปอด (Lung) และอากาศ

หุ่นจำลองชนิดนี้ได้สร้างให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยตัดให้เป็นสไลด์ตามขวางเพื่อประโยชน์ในการใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีสำหรับการประเมินค่าปริมาณรังสีภายในร่างกาย นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานทางรังสีรักษาตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงการตรวจสอบการรักษา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเต้านมที่สามารถถอดออกได้และมีหลายขนาด เช่น ปริมาตร 200, 400, 600 และ 900 มิลลิลิตร เป็นต้น (24) โดยตัวอย่างของหุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom แสดงดังภาพที่ 8

ภาพที่ 8 แสดงหุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)
จาก http://www.supertechx-ray.com/pics/Anthropomorphic/Alderson/ART-1small.jpg

3.8 ยางพารา (Para rubber) (25)

ต้นยางพารามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติชนิดนี้ประชาชนทั่วไปเรียกว่ายางพารา หรือต้นยางพารา (Para rubber) โดยยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากเป็นพืชยุทธศาสตร์ในการพัฒนาการเกษตรและประเทศไทยมีแนวโน้มในการหันมาใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์มากขึ้น จากข้อมูลปี 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากถึง 3,776,957 ตัน จากการส่งออกทั้งในรูปของวัตถุดิบพร้อมทำผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา คิดเป็นมูลค่ากว่า 647,906 ล้าน

บาท ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่ถือว่ามีศักยภาพ อีกทั้งมีโอกาสที่จะพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ยางพาราได้หลากหลาย โดยยางธรรมชาติเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแล้วสามารถนำมาจำหน่ายได้ในราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นการเรื่องที่ดีหากมีการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางให้มีระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถสร้างผลผลิต และผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างมีคุณภาพและมีมาตรฐาน (26) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ผ่านการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ เช่น กระดูกเทียม, ยางวงจัดฟัน, ยางนวดเหงือก, ดินประดิษฐ์สำหรับเด็ก ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์, แผ่นยางคลุมดินและกระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำยางพารามาใช้ในเป็นสื่อการเรียนการสอนยังมีค่อนข้างน้อยทั้งๆ ที่เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง ปี 2550 –2554 (27)

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

3.8.1 องค์ประกอบของยางพารา (28, 29)

น้ำยางพาราหลังจากการกรีดจะมีค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 6 มีค่าแรงตึงผิวประมาณ 40.5 ดายน์ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิลิตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ $1x10^{15}$ – $2x10^{15}$ ohms–cm น้ำยางจะมีสีขาวข้น เมื่อปั่นด้วยความเร็วรอบสูงๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำยางเกิดการแยกชั้น โดยแบ่งได้เป็นสามส่วนหลักๆ ดังนี้

3.8.1.1 ส่วนเนื้อยาง (Rubber Phase) เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวซึ่งอยู่ชั้นบนสุด คิดเป็นประมาณ 30-36% โดยอนุภาคของยางพาราจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน เป็นทรงกลม

ที่ผิวล้อมรอบไปด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน ทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียรแต่หลังจากการกรีดไม่ถึงชั่วโมง แบคทีเรียและเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมันได้ถ้าปราศจากการเติมสารเคมีที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียซึ่งสามารถทำให้น้ำยางเสียความเสถียรได้

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

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

น้ำยางพาราสดนั้นจะมีองค์ประกอบที่สำคัญคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสด

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

3.8.2 คุณสมบัติทางเคมี (28, 29)

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

3.8.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของยางพารา (28)

3.8.3.1 ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางพารามีความยืดหยุ่นได้ดี สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว

3.8.3.2 ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางพารามีความทนทานต่อแรงดึงมาก เนื่องจากสามารถเกิดการตกผลึกเมื่อได้รับแรงดึง

3.8.3.3 ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ยางพารามีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง โดยผลึกจะเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ส่งผลให้ต้านการฉีกขาดที่จะเกิดขึ้น

3.8.3.4 การกระเด้งกระดอน (Rebound resilience) ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางจะมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยมาก และมีการสะสมความร้อนที่ต่ำด้วยเช่นกันทำให้ยางมีคุณสมบัติที่การกระเด้งกระดอนที่สูงมาก

3.8.3.5 ความทนทานต่อการขัดถู (Rebound resilience) ยางพารามีคุณสมบัติทนการขัดถู ทนต่อแรงเสียดทานที่ดี

3.8.3.6 ความเหนียว (Tack) ยางพาราสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น

3.8.3.7 ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางพารามีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง $1x10^{15}$ – $2x10^{15}$ โอห์ม – ซม

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

3.8.3.9 คุณสมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging Property) ยางพารามีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป

3.8.4 การแปรรูปน้ำยางพารา (25)

เมื่อทำการผสมกันระหว่างน้ำยางพาราและสารเคมีชนิดต่างๆ จะทำให้ยางพาราที่ได้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรการผสมอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน หลักการและขั้นตอนของการออกสูตรการผสมน้ำยางกับสารเคมีนั้นปกติจะต้องคำนึงถึงหลักสำคัญ 3 ประการ ดังนี้ ประโยชน์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิต และต้นทุน

สารเคมีที่นำมาใช้ในการผสมน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มหลักๆ 5 กลุ่ม ดังนี้

3.8.4.1 สารทำน้ำยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากอ่อนเหนียว ไปเป็นยางคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

3.8.4.2 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูปให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ระหว่างกำมะถันและยางนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปช้ามากและต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่สูงมาก

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

3.8.4.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

3.8.4.5 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มระยะเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยาง สารหน่วงปฏิกิริยา

3.8.4.6 สารอื่นๆ เช่น การเติมสารที่ทำให้เกิดสี, กลิ่น และฟอง เป็นต้น

3.8.5 ยางฟองน้ำ (30)

การทำยางฟองน้ำเป็นการผลิตจากน้ำยางให้มีลักษณะภายในเป็นรูพรุนโดยผิวหน้าสามารถระบายอากาศออกได้ นอกจากนี้ยังสามารถกดหรือบิดได้โดยไม่ทำให้ชิ้นยางฟองน้ำเกิดการเสียรูปทรง สามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ป้องกันการกระแทกหรือเพื่อความนุ่มได้ สามารถขึ้นรูปได้ตามแบบแม่พิมพ์ชนิดต่างๆ เช่น ใช้ทำเป็นเบาะรองนั่ง หมอนหนุน ที่รองนอน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นหุ่นจำลองเพื่อการศึกษาได้ โดยเฉพาะการเรียนการสอนทางการแพทย์ สำหรับขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำประกอบด้วย

1) การทำให้น้ำยางเกิดฟองอากาศหรือฟองของแก๊สต่างๆ

2) การทำให้น้ำยางที่เป็นฟองแล้วเกิดเป็นเจลในเบ้าพิมพ์ หรือเป็นแผ่น

3) การทำให้ฟองยางที่ขึ้นรูปต่างๆ แล้วคงรูป

โดยกระบวนการพื้นฐานในการผลิตยางฟองน้ำประกอบด้วย

1) กระบวนการดันลอป (Dunlop process)

2) กระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process) และกระบวนการใช้สารไวต่อความร้อน (Heat sensitive process)

3.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาหุ่นจำลอง

ปี 2546 วรรณดา สุจริต และคณะ ได้พัฒนาและศึกษาผลของการหุ่นจำลองยางพาราลูกสุกรในการเรียนการสอนวิชาวิทยาเอมบริโอ โดย สร้างหุ่นจำลองยางพาราของลูกสุกรขนาด 10 มิลลิเมตร ให้มีลักษณะภายนอกครบถ้วนตามอายุ และเปิดให้เห็นการเจริญของอวัยวะภายในของลูกอ่อนในอายุเดียวกัน มีการทดสอบความรู้ของนิสิต ก่อนและหลังการนำหุ่นจำลองไปใช้ ผลปรากฏว่าหุ่นจำลองช่วยให้เข้าใจเนื้อหาการเรียนได้ดีขึ้นกว่าการไม่ได้ใช้หุ่นจำลอง วัดตามคะแนนของการทดสอบหลังการใช้หุ่นจำลองมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นกว่าก่อนใช้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (3)

ปี 2546 เสรี กุญแจนาค และคณะพัฒนาหุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคจากยางพาราและศึกษาประสิทธิภาพการเรียนการสอนโดยการใช้หุ่นจำลอง โดยนำยางพาราซึ่งเป็นสารธรรมชาติมาทดแทนสารสังเคราะห์ โดยพัฒนาและผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ในรูปหุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคเพศผู้พร้อมต่อมอวัยวะระบบสืบพันธุ์ และระบบสืบพันธุ์เพศเมียพร้อมเต้านม แสดงให้เห็นองค์ประกอบของอวัยวะระบบสืบพันธุ์และความสัมพันธ์กับอวัยวะใกล้เคียง รวมทั้งสามารถถอดประกอบให้เห็นถึงโครงสร้างภายใน หุ่นจำลองนี้ถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพการเรียนการสอนโดยเป็นสื่อการสอนของนิสิตคณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการทดสอบพบว่าการใช้สื่อการสอนทำให้นิสิตเข้าใจและเรียนรู้ได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการเรียนการสอนแบบไม่มีสื่อการเรียนการสอน (2)

ปี 2548 อภินันท์ สุขประเสริฐ พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเลคทรอนิกส์ ผลการประเมินความพึงพอใจในกลุ่มนักเรียนอยู่ในเกณฑ์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 71 โดยมีข้อเสนอแนะในเรื่องการปรับแก้วิธีการใช้งาน ขนาด และต้นทุนการผลิต เป็นต้น (25)

ปี 2549 ผกาวดี พงษ์เกษ และคณะ ได้พัฒนาหุ่นจำลองยางพาราของอวัยวะรับความรู้สึกพิเศษหูและตา และทดสอบประสิทธิภาพการเรียนจุลกายวิภาคศาสตร์โดยใช้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาและหาวิธีการที่เหมาะสมนำมาใช้ในการเพิ่มทักษะในการเรียนรู้และพัฒนาสื่อการเรียน ผลการวิจัยพบว่า หุ่นจำลองยางพาราของอวัยวะรับความรู้สึกช่วยเพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนิสิตมีนัยสำคัญทางสถิติ (4)

ปี 2549 อุทุมมา มัฆะเนมี และขวัญชัย รัตนเสถียร ทำการการออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย โดยได้คัดเลือกวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ ด้วยหลักเกณฑ์สากลผลิตเป็นอุปกรณ์ผลการศึกษาพบว่าพอลิสไตรีน มีค่าสัมประสิทธิ์

การลดทอนเชิงมวลสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลจากการใช้โปรแกรม XCOM และความหนาแน่นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อเมื่อนำไปผลิตเป็นหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อแบบแผ่นโดยใช้พิมพ์ซิลิโคนแล้วนำไปทดสอบพบว่าได้ค่าความดำเฉลี่ยของภาพรังสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (31)

ปี 2549 วรนันท์ คีรีสัตยกุล และคณะ ทำการการออกแบบ การผลิต และประเมินหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนช่องเชิงกรานแบบแบ่งส่วนสำหรับวัดปริมาณรังสี เพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีบริเวณอวัยวะสืบพันธ์เพศหญิงเนื่องจากการถ่ายภาพรังสีในส่วนท้องและช่องเชิงกราน โดยส่วนเนื้อเยื่อทำมาจากพอลีสไตรีนและส่วนกระดูกทำมาจาก พอลีสไตรีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 เปอร์เซ็นต์ จากการนำหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมาทดสอบเทียบกับหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อที่สั่งซื้อจากต่างประเทศพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในด้านของการลดทอนรังสี (32)

ปี 2552 บังอร ดวงรัตน์และคณะ วิจัยและพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา ได้หุ่นจำลองที่มีขนาด สี และลักษณะใกล้เคียงกับของจริง และมีค่าเฉลี่ยในการประเมินความพึงพอใจ ความคงทนต่อการใช้งาน การนำกลับมาใช้ใหม่ และการคงสภาพเดิมภายหลังการฝึกเย็บมีค่าสูงสุด (7)

ปี 2554 กานดา ตัณฑพันธ์ สร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย พบว่าได้รับความพอใจในระดับสูงทั้งในด้านโครงสร้างรูปร่างลักษณะของหุ่นเสมือนผู้ป่วยจริงและการทดลองใช้งานที่ผู้เรียนสามารถเตรียมเครื่องใช้สำหรับใส่สายยางเพื่อให้อาหารได้ถูกต้อง ทั้งยังสามารถอธิบายวิธีการให้อาหารทางสายยางและเข้าใจภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากการให้อาหารทางสายยางได้อย่างชัดเจน (33)

ปี 2552 พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์และคณะ พัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ พบว่าการเติมสาร CaCo3 ปริมาณ 5 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำ (34)

ปี 2554 วัณณลภ โกวิท และคณะ ได้ศึกษาและพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่ โดยสร้างเป็น 2 ส่วนที่สามารถสวมใส่เข้าด้วยกันได้ คือตัวหุ่นใบหน้าจำลอง โดยหล่อด้วยยางซิลิโคนและเรซิ่นเสริมด้วยใยแก้ว และหุ่นต้นแบบแสดงภาวะรอยโรคปากแหว่งหล่อจากยางพารา โดยได้นวัตกรรมหุ่นใบหน้าจำลองเพื่อใช้ในเชิงการแพทย์และการพยาบาล เพื่อเป็นสื่อประกอบในการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และน่าสนใจ เมื่อนำไปประเมิน พบว่ากลุ่ม ตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเสนอแนะให้ปรับปรุงในเรื่องสีและรอยแผลเป็นหลังผ่าตัดให้เหมือนจริงมากขึ้น (8)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีหลายงานวิจัยที่พัฒนาสื่อการเรียนการสอนจากงานวิจัยโดยการใช้ยางพารา โดยพบว่ายางพาราสามารถนำมาพัฒนาเป็นหุ่นจำลองเพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนได้โดยให้โดยยางพาราสามารถคงรูปอยู่ได้เช่นเดียวกับเรซิ่นหรือไฟเบอร์กลาส ซึ่ง

ปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจางอ่อนเหนียวเป็นคงรูป ด้วยการใช้กำมะถัน (6)

การสร้างนวัตกรรมสื่อการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้และเข้าใจได้ง่าย โดยเฉพาะการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่จะต้องทำความเข้าใจบทเรียนต่างๆ อย่างถ่องแท้และลึกซึ้ง การสร้างสื่อวัสดุสามมิติโดยการพัฒนาหุ่นจำลองมนุษย์รูปแบบต่างๆ จึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก นอกจากจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจได้ง่ายยังช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจและเป็นการเพิ่มทักษะก่อนการปฏิบัติงานกับผู้ป่วยจริง ปัจจุบันหุ่นจำลองจากยางพาราธรรมชาติแทนวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเป็นที่ต้องการอย่างมากเนื่องจากยางพารามีประโยชน์ที่หลากหลายดังกล่าวไปแล้วข้างต้น โดยมีการพัฒนาหุ่นจำลองเพื่อการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพจำนวนมาก เช่น พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเลคทรอนิกส์ (25) การสร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย (33) การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา (35) การสร้างหุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่โดยใช้วัสดุที่ทำด้วยยางพารา ไม้และซิลิโคนที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (36) โดยหุ่นจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีและที่สำคัญสามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจเพิ่มมากขึ้น เกิดการเรียนรู้และเข้าใจได้ง่ายกว่าการเรียนการสอนรูปแบบเดิม โดยสามารถนำไปใช้งานแทนหุ่นจำลองที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้

สำหรับการสร้างหุ่นจำลองยางพารานั้นสามารถพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางให้มีลักษณะที่หลากหลายตามการใช้งาน เช่น ยางฟองน้ำที่เกิดจากการเติมสาร CaCo3 ปริมาณ 5 phr ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ (34) โดยยางฟองน้ำดังกล่าวสามารถนำมาใช้สร้างเป็นเนื้อเยื่อของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน ที่ต้องการความนิ่มและความยืดหยุ่นได้อีกด้วย

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 สมมติฐานการวิจัย

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสำหรับการฉายรังสีระยะใกล้ ในมะเร็งปากมดลูกที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในเป็นสื่อการเรียนการสอน สามารถถ่ายภาพรังสีเพื่อฝึกปฏิบัติในการสร้างภาพสำหรับประกอบการวางแผนการรักษา และการวางแผนการรักษาสำหรับมะเร็งปากมดลูกด้วยการฉายรังสีระยะใกล้ได้

4.2 ขอบเขตงานวิจัย

พัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน สำหรับนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยวิธีการฉายรังสีระยะใกล้ โดยใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักในหุ่นจำลอง การศึกษาประกอบด้วยการออกแบบสูตรยางพาราเพื่อหาส่วนประกอบและวิธีการที่

เหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิงที่มีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ใกล้เคียงกับมนุษย์มากที่สุด โดยหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งครึ่งในแนวซ้ายและขวา เพื่อแสดงลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะที่สำคัญ ได้แก่ มดลูก ช่องคลอด กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก เพื่อให้สามารถทำการศึกษาการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ นอกจากนี้ยังทำการสร้างกระดูกเชิงกรานขึ้นมาเพื่อความสมจริงในการสร้างภาพถ่ายรังสี

4.3 ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอน ประกอบด้วย

4.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิง

จากการศึกษาและสืบค้นข้อมูลสัดส่วนของผู้หญิงไทยด้วยเทคโนโลยี "3D Body Scanning" แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการสำรวจด้วยมือของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) (15) พบว่าสัดส่วนของผู้หญิงไทยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนัก 57.4 กิโลกรัมและมีสัดส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนสูง 156.9 เซนติเมตร
รอบอก 36.0 นิ้ว
รอบเอว 31.5 นิ้ว
รอบสะโพก 38.0 นิ้ว

จากการศึกษาขนาดของหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom มีสัดส่วนดังต่อไปนี้

รอบอก 34 นิ้ว
รอบเอว 26 นิ้ว
รอบสะโพก 34 นิ้ว

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิง

โดยหุ่นจำลองบริเวณอุ้งเชิงกรานนั้นจะเป็นแบบผ่าครึ่งซีก เพื่อให้เห็นมดลูก ช่องคลอด กระเพาะปัสสาวะ และทวารหนัก ในลักษณะด้านข้าง และมีรูเปิดตรงกระเพาะปัสสาวะ ช่องคลอด และทวารหนัก เพื่อให้ใส่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกได้ โดยการออกแบบจะทำหุ่นจำลองทั้งครึ่งซ้ายและครึ่งขวา เพื่อประโยชน์ในขั้นตอนการสร้างภาพถ่ายรังสีก่อนการวางแผนการรักษา ทั้งนี้เพื่อให้ภาพถ่ายทางรังสีที่ออกมามีความเหมือนจริงกับผู้ป่วยมากที่สุด ผู้วิจัยจึงออกแบบให้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีส่วนของกระดูกเชิงกรานประกอบด้วย

สร้างหุ่นจำลองต้นแบบ

โดยศึกษาจากอวัยวะจริง รูปจากตำรา โดยการปั้นหุ่นจำลองต้นแบบเลียนแบบของจริง โดยมีขนาดของหุ่นใกล้เคียงกับขนาดหุ่นมาตรฐานของหญิงไทยและหุ่นจำลองมาตรฐาน Alderson Rando Phantom และตรวจสอบความถูกต้องตามหลักกายวิภาคศาสตร์โดยผู้เชี่ยวชาญ ได้แก่ แพทย์ทางรังสีรักษา

4.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับหล่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

หุ่นจำลองประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นกระดูกเชิงกราน และเนื้อเยื่อโดยจะทำการจำลองกระดูกเชิงกรานขึ้นมาก่อน จากนั้นใส่กระดูกแทรกเข้าไปในอุ้งเชิงกรานและหล่อส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อด้วยการใช้ยางพารา

4.3.2.1 การเตรียมแม่พิมพ์ และหล่อกระดูกเชิงกราน

4.3.2.1.1 สร้างแม่พิมพ์ โดยใช้กระดูกเชิงกรานอาจารย์ใหญ่เพศหญิง ของภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นต้นแบบ โดยกระดูกที่เป็นต้นแบบแสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งประกอบด้วย hip bone ทั้ง 2 ข้าง กระดูก sacrum กระดูก coccyx กระดูก Femur ทั้ง 2 ข้าง และกระดูกสันหลังส่วนเอว L4 และ L5 โดยแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นทำมาจากซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์

4.3.2.1.2 นำหุ่นจำลองต้นแบบออก และตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย

4.3.2.1.3 ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน พร้อมทั้งอุดรอยรั่ว

4.3.2.1.4 หล่อชิ้นงาน โดยใช้เรซิ่น และแคลเซียมคาร์บอเนตผสมในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และเทลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้

4.3.2.1.5 ทิ้งไว้ให้แห้ง และแข็ง

4.3.2.1.6 แกะแม่พิมพ์กระดูกออก และตกแต่งกระดูกให้มีความสมจริงมากที่สุด

ภาพที่ 9 แสดงโครงกระดูกของอาจารย์ใหญ่เพศหญิงซึ่งใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแม่พิมพ์กระดูก

4.3.2.2 การเตรียมแม่พิมพ์ หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสำหรับฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูก ด้วยรังสีระยะใกล้

4.3.2.2.1 ปั้นหุ่นจำลองต้นแบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้นด้วยดินน้ำมัน โดยภาพที่ 10 แสดงการเริ่มต้นปั้นหุ่นต้นแบบ

ภาพที่ 10 แสดงภาพผลการปั้นหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานต้นแบบ

4.3.2.2.2 และตรวจสอบความถูกต้องโดยรังสีแพทย์ทางรังสีรักษา เพื่อให้หุ่นต้นแบบมีความสมจริงและถูกต้องตามหลักกายวิภาคศาสตร์ โดยต้องมีขนาดของช่องคลอดกว้างเพียงพอต่อการใส่ applicator ที่ใช้ในการนำแร่เพื่อการรักษามะเร็งปากมดลูก

4.3.2.2.3 สร้างแม่พิมพ์ด้วยการหล่อหุ่นจำลองต้นแบบ โดยแบบที่สร้างขึ้นทำมาจากซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์

4.3.2.2.4 นำหุ่นจำลองต้นแบบออกและตกแต่งแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย

4.3.3. ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา และขึ้นรูปหุ่นจำลอง

การพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ยางพาราเพื่อพัฒนาหุ่นจำลอง โดยใช้กระบวนการผลิตยางฟองน้ำด้วยวิธีดันลอปซึ่งมีขั้นตอนที่ประกอบด้วยการเตรียมสารเคมีและการผสมสารเคมีกับน้ำยาง การตีฟอง (Foaming) การขึ้นรูปในเบ้าพิมพ์และทำให้เป็นเจล (Moulding and gellation) และการทำให้ฟองยางคงรูป ล้าง อบแห้ง และตกแต่ง (Vulcanising, washing, drying and finishing)

4.3.3.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับใช้เติมน้ำยางพาราเพื่อการทดสอบคุณสมบัติของยางพารา

จากการศึกษางานวิจัยของพรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ (37) ระบุไว้ว่าการเตรียมสารเคมีที่ใช้เติมในน้ำยางพารานั้นจะต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของของเหลวก่อนการนำไปใช้ โดยการเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของของเหลวนั้นจะขึ้นกับสถานะของสารนั้นๆ หมายถึง ถ้าสารเคมีสามารถละลายน้ำได้ให้เตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) ถ้าสารเคมีเป็นของแข็งที่ไม่สามารถละลายน้ำให้เตรียมในรูปที่เป็นสารที่กระจายตัวในน้ำ (dispersion) โดยอัตราส่วนสารเคมีและน้ำยางข้นมีสูตรมาตรฐานดังตารางที่ 3

น้ำยางและสารเคมี

1) น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia concentrated natural rubber) มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60%

2) สารละลายโพแทสเซียมโอลิเอต (Potassium Oliate solution) เตรียมอยู่ในรูปสารละลาย 10% (w/v) โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดโอเลอิก

3) กำมะถัน (Sulphur, S) เป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นสารวัลคาไนซ์ ทำหน้าที่เป็นสารคงรูป ใช้ในรูป 50% ดิสเพิสชั่น

4) ซิงค์ไดเอททิลไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc–N–diethyldithiocarbamate, ZDEC) ใช้ในอุตสาหกรรมยางทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เป็นสารตัวเร่งที่เร็วที่สุดใช้ในรูป 50% ดิสเพิสชั่น

5) ซิงค์เมอแคปโตเบนโซไธอาโซล (Zinc–2–mercaptobenzothiazole, ZMBT) ใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเสริม (Secondary accelerater) เป็นสารตัวเร่งปกติ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง ใช้ในรูป 50% ดิสเพิสชั่น

6) แอนติออกซิแดนท์ ที่ใช้คือ Wingstay L เป็นสารป้องกันยางเสื่อม เตรียมอยู่ในรูป 50% ดิสเพิสชั่น

7) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ใช้สำหรับเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ใช้ในรูป 50% ดิสเพิสชั่น

8) ไดฟินิลกัวนิดีน (Diphenyl guanidine, DPG) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยการเกิดเจลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เป็นสารตัวเร่งที่ช้า ใช้ในรูป 33% ดิสเพิสชั่น

9) โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodiumsilicofluoride, SSF) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดเจล ใช้ในรูป 25% ดิสเพิสชั่น

ตารางที่ 3 แสดงสูตรที่ใช้เตรียมตัวอย่างยางฟองน้ำ (37)

รายการ	น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก(กรัม)
1	60%น้ำยางข้น	100	167
2	10% โพแทสเซียมโอลิเอต(K-Oleate)	1.5	15.0
3	50% กำมะถัน (Sulfur)	2.0	4.0
4	50% แซดอีดีซี (ZEDC)	1.0	2.0
5	50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	1.0	2.0
6	50% วิงสเตย์แอล (WingStay L)	1.0	2.0
7	50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	5.0	10.0
8	33% ดีพีจี(DPG)	0.67	2.0
9	12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	1.0	8.0

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาสูตรยางพารา

1) เครื่องปั่นขนาดเล็ก แบบปรับระดับได้ 5 ระดับ ใช้สำหรับปั่นน้ำยางให้เกิดฟอง
2) เครื่องปั่นขนาดใหญ่
3) เบ้าพิมพ์ (Mold) ปูนปลาสเตอร์
4) เตาอบลมร้อน
5) เตานึ่งไอน้ำ
6) เครื่องชั่ง แบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง
7) แม่พิมพ์หุ่นจาลอง

4.2.1.2 กระบวนการเตรียมฟองน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรยางที่ต้องการในการเตรียมหุ่นจำลองทางรังสีรักษา ซึ่งได้มีการพัฒนาสูตรยางจากการประเมินความต้องการและพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยประเมินจากชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้น จำนวน 4 สูตร ดังต่อไปนี้

สูตรที่ 1 K-Oleate (สารลดแรงตึงผิว) ความเข้มข้น 10% w/w จำนวน 8.98 กรัม

สูตรที่ 2 ไม่เติมสารเพิ่มฟอง

สูตรที่ 3 $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 4% w/w จำนวน 24.95 กรัม

สูตรที่ 4 NH_4HCO_3 ความเข้มข้น 4% w/w จำนวน 24.95 กรัม

โดยสัดส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้เตรียมในสูตรต่างๆแสดงดังตารางข้างที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนปริมาณน้ำยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้เตรียมตัวอย่างชิ้นงานยาง 4 สูตร

น้ำยางและสารเคมี	ความเข้มข้น (%w/w)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
น้ำยางข้น	60	167.0
กำมะถัน (Sulfur)	50	8.0
แซดอีดีซี (ZEDC)	50	4.0
แซดเอ็มบีที (ZMBT)	50	4.0
วิงสเตย์แอล (WingStay L)	50	4.0
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	50	20.0
ดีพีจี (DPG)	33	4.0
เอสเอสเอฟ (SSF)	12.5	8.0

จากผลการประเมินความต้องการและความพึงพอใจของผู้ใช้ทางด้านความยืดหยุ่น การคืนรูปของชิ้นงานและผิวสัมผัส พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางชิ้นที่ 1 มีผลประเมินความพึงพอใจดีที่สุด (ภาคผนวกที่ 1) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้พัฒนาสูตรยางจากสูตรของชิ้นงานที่ 1 เพื่อเตรียมหุ่นจำลอง โดยมีสัดส่วนของสารเคมีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งสูตรโฟมยางสำหรับหุ่นจำลองนี้ได้มีการลดปริมาณของการใช้สารละลายโพแทสเซียมโอลิเอตจากสูตรเดิม (ตารางที่ 4) และมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป เพื่อทำให้หุ่นจำลองมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความแข็งของยางตามระดับที่ต้องการนั้นคือ ให้มีลักษณะความยืดหยุ่นคล้ายกับผิวหนังและเต้านมในเพศหญิง

ตารางที่ 5 แสดงสัดส่วนปริมาณน้ำยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้เตรียมหุ่นจำลอง

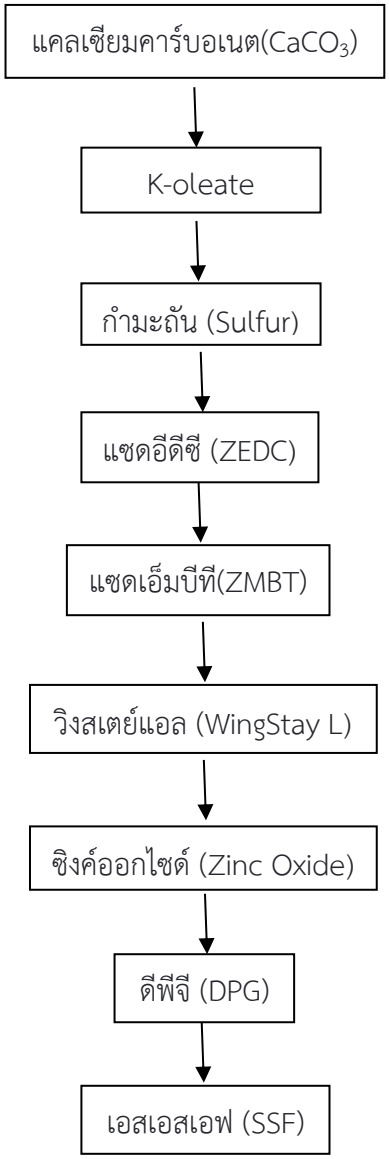
น้ำยางและสารเคมี	ความเข้มข้น (%w/w)	น้ำหนักเปียก (กรัม) ตัวหุ่นอุ้งเชิงกราน
น้ำยางข้น	60	167.0
โพแทสเซียมโอลิเอต (Potassium Oleate)	10	2.25
กำมะถัน (Sulfur)	50	8.0
แซดอีดีซี (ZEDC)	50	4.0
แซดเอ็มบีที (ZMBT)	50	4.0
วิงสเตย์แอล (WingStay L)	50	4.0
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	50	20.0
ดีพีจี (DPG)	33	4.0
เอสเอสเอฟ (SSF)	12.5	8.0
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)	50	29.94

ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการสำหรับการสร้างหุ่นยางพารามีดังต่อไปนี้

1) ตวงน้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้น 60% w/w และสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 5

2) เทน้ำยางใส่เครื่องปั่น แล้วทำการปั่นเพื่อไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยางพารา เป็นเวลาประมาณ 10 นาที

3) เติมสารเคมีที่เตรียมไว้พร้อมกับปั่นด้วยเครื่องปั่น ตามลำดับดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงขั้นตอนและลำดับการใส่สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมหุ่นจำลอง

4) ในการสร้างหุ่นจำลอง และชิ้นงานในการทดสอบ จะทำการผสมน้ำยางพาราและสารเคมีต่างๆ ตามสัดส่วนดังตารางที่ 5 โดยเทน้ำยางพาราผสมสารเคมีต่างๆ ที่เข้ากันดีแล้วลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ของหุ่นจำลองที่ใส่กระดูกไว้แล้วดังแสดงในภาพ 12 และ 13 และเทของผสมน้ำยางนี้ลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 25x25 ตารางเซนติเมตร เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ โดยภาพการเตรียมชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 14

ภาพที่ 12 แสดงแม่พิมพ์ซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์ เมื่อประกบเพื่อเตรียมเทยางพารา

ภาพที่ 13 แสดงการเทน้ำยางพาราที่ปั่นแล้วลงในแม่พิมพ์

ปั่นน้ำยางผสมสารเคมี

เทลงในแม่พิมพ์เตรียมชิ้นงานทดสอบ

หม้อนึ่งผลิตภัณฑ์ยาง

ภาพที่ 14 แสดงขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน และอุปกรณ์ปั่น และนึ่ง

5) ทำการคงรูปหุ่นจำลองและชิ้นงานตัวอย่างยางพาราด้วยความร้อน คงรูปด้วยความร้อนในเตานึ่งอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3–4 ชั่วโมง จนกระทั่งยางสุก เวลาที่ใช้ในการนึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน

6) หุ่นจำลองที่ได้ นำมาตกแต่งโดยการตัดและขลิบยางด้านข้างออก เติมสีให้มีความสมจริงมากที่สุด ดังรูปที่ 15 แล้วนำไปทดสอบการประยุกต์ใช้งาน การประเมินคุณภาพและความพึงพอใจของการใช้งานต่อไป

ภาพที่ 15 แสดงการตกแต่งหุ่นจำลองยางพารา ด้วยการทาสีและพ่นด้วยสียางพารา

7) ชิ้นงานยางตัวอย่างที่เตรียมได้ นำมาหาค่าความหนาแน่นของยางพาราในหน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร หาสมบัติทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อนในขั้นตอนต่อไป

4.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและความหนาแน่นตามมาตรฐานสากล

ชิ้นงานยางตัวอย่างที่เตรียมขึ้นโดยใช้สัดส่วนน้ำยางพารา และสารเคมีเช่นเดียวกับหุ่นจำลอง ในขั้นตอนที่ 3 จะนำมาคำนวนหาความหนาแน่นและวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อนตามมาตรฐานสากล ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป โดยสมบัติเชิงกลของยางพาราที่ต้องการสำหรับสร้างหุ่นจำลองพิจารณาจากค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

ความแข็ง (hardness) = 10.17 Shore A

การทนแรงดึง (Tensile strength) : Stress = 238.40 kN/m^2, Strain = 0.7446

การทนแรงอัด (Compression set) = 7.63%

ความยืดหยุ่น Elasticity = 320.53 kN/m^2

ซึ่งค่าเหล่านี้ที่ใช้อ้างอิงเป็นค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นในสูตรที่ 1 (แสดงในขั้นตอนที่ 3) เนื่องมาจากเป็นชิ้นงานตัวอย่างยางที่ผู้ใช้งาน ให้ผลการประเมินความต้องการและความพึงพอใจมากที่สุด ดังนั้นจึงนำค่าของสมบัติเชิงกลชิ้นงานนี้ มาเป็นค่ามาตรฐานขั้นต้น เหตุผลที่เลือกใช้ค่าอ้างอิงมาตรฐานจากชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้นี้ เนื่องมาจากหุ่นจำลองที่มีขายในเชิงพาณิชย์และมีการนำมาใช้งานในปัจจุบันนี้ เป็นหุ่นจำลองที่ทำจากวัสดุพวกไม้และเทอร์โมพลาสติกดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.3.4.1 ความหนาแน่น

นำชิ้นงานตัวอย่างยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 มาชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง วัดความกว้างและความยาวของชิ้นตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) เป็นตัววัด จากนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นทั้งหมด 4 ค่า นำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

คำนวนความหนาแน่นจากสมการข้างล่างนี้ ในหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$D = M/V$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (Density) หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.3.4.2 ความแข็ง (Hardness)

ซึ่งทดสอบโดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D2240-03 (38, 39)

นำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 จำนวน 5 ชิ้น มาทดสอบหา ค่าความแข็งด้วยเครื่อง Durometer Hardness Tester แสดงดังภาพที่ 16 คำนวนหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาพที่ 16 แสดงชิ้นงานและเครื่องมือทดสอบความแข็ง

4.3.4.3 การทนแรงดึง (Tensile strength)

โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D412

สำหรับในการทดสอบการทนแรงดึงนั้นจะใช้เครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 17 โดยต้องเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปดัมเบลจำนวน 7 ชิ้น แสดงดังภาพที่ 18 ชิ้นงานจะถูกดึงด้วยความเร็ว 5 mm/mim load cell 1 kN ใช้แรงดึง 0.2 kN รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบียงเบนมาตรฐาน ของค่าความเค้น (Stress), ความเครียด (Strain) และ ค่ามอดูลัสที่จุดขาด (Modulus at Break)

ภาพที่ 17 แสดงเครื่องมือทดสอบการทนแรงดึง

ภาพที่ 18 แสดงชิ้นงานรูปดัมเบล

4.3.4.4 การทนแรงอัด (Compression set)

โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D395-03 (40)

วิธีการทดสอบการทนแรงกดอัดตาม ASTM D395-03 นั้นจะเหมือนและคล้ายคลึงกับการทดสอบความสามารถของการทนแรงกดอัดของชิ้นงานยางมาตรฐาน มอก.173-2519 โดยที่นำชิ้นงานตัวอย่างยางวางไว้บริเวณกลางฐานของเครื่องกด ที่แสดงดังภาพที่ 19 และเพิ่มแรงกดจนความหนาของชิ้นงานลดลงจากความหนาเดิมร้อยละ 50% จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 $^{\circ}$C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบและเอาแรงกดอัด ออกจากชิ้นงานทดสอบทิ้งไว้ให้เย็น หลังจากนั้นวัดความสูงของชิ้นงานตัวอย่างยางหลังจากการกดอัด แล้วนำค่ามาคำนวณ % การยุบตัวหลังจากการได้รับแรงกดอัด จากสมการข้างล่างนี้ ซึ่งจะใช้ชิ้นงานตัวอย่างยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 จำนวน 5 ชิ้นงาน ในการทดสอบ แล้วคำนวนหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\% \text{ การยุบตัวหลังการได้รับแรงกดอัด} = \left(\frac{A-B}{A}\right) \times 100$$

เมื่อ A = ความสูงของโฟมยางก่อนกด (cm)

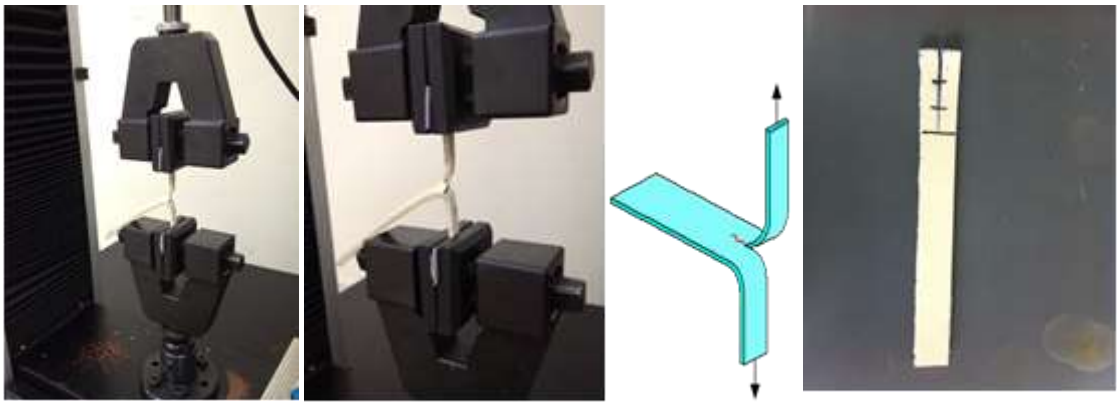
B = ความสูงของโฟมยางหลังกด (cm)

ภาพที่ 19 แสดงเครื่องมือการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัด มอก. 173-2519

4.3.4.5 ทดสอบทนแรงฉีกขาด

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

สำหรับในการทดสอบการทนแรงฉีกขาดนั้นจะใช้เครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 14 โดยต้องเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูป Trouser Test Specimen จำนวน 7 ชิ้น แสดงดังภาพที่ 20 ชิ้นงานจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/mim load cell 1 kN ใช้แรงดึง 0.2 kN รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tear Strength



ภาพที่ 20 แสดง Trouser Test Specimen และเครื่องมือ Tensile Testing

4.3.4.6 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

นำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 มาทดสอบหาค่า glass transition (Tg) ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยมีสภาวะในการทดสอบดังนี้ ขั้นแรก ลดอุณหภูมิจาก 25 ^{O}C ไปที่อุณหภูมิ -90 ^{O}C ด้วยอัตราเร็ว 10 ^{O}C/min ภายใต้บรรยายกาศไนโตรเจน จากนั้นในขั้นตอนที่สอง เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 ^{O}C ไปที่อุณหภูมิ 25 ^{O}C ด้วยอัตราเร็ว 10 ^{O}C/min ภายใต้บรรยายกาศไนโตรเจนเช่นกัน โดยภาพที่ 21 แสดง Sample crucibles, crucible sealing press และ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ภาพที่ 21 Sample crucibles, crucible sealing press และ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

4.3.5 ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

นำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นยางสูตรเดียวกับหุ่นจำลองมาทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างนี้ไปฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU และปริมาณรังสีในช่วง 200-1,000 cGy ดังแสดงในภาพที่ 16 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการสังเกต ทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน โดยมีวิธีทำเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 5

ภาพที่ 22 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยปริมาณรังสีในช่วง 200-1,000 cGy

4.3.6 ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านรังสี ของหุ่นจำลอง

ทำการศึกษาคุณสมบัติของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเมื่อนำไปสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา โดยนำหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ได้ไปสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรโตคอลในการสร้างภาพตามมาตรฐานของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษาของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร

ทำการศึกษาโดยแบ่งการประเมินออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การประเมินคุณสมบัติการแสดงความแตกต่างของความขาว-ดำ และความสม่ำเสมอในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

4.3.6.1 การประเมินคุณสมบัติการแสดงความแตกต่างของความขาว-ดำในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวกลางหรือวัตถุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความขาว-ดำ (Object contrast) (41, 42) ในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ นำมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้น ในด้านคุณสมบัติการแสดงความแตกต่างของความขาว-ดำ ในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ โดยภาพที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของตัวกลางในหุ่นจำลองสูงจะช่วยให้แพทย์สามารถแยกแยะตำแหน่งของอวัยวะที่สำคัญภายในได้อย่างชัดเจนขณะที่ใช้ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา

วิธีการทดสอบ

1) นำหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานไปสแกนด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ 16 สไลด์ (เครื่องหมายการค้า Philips รุ่น Brilliance Big Bore) ด้วยค่าเทคนิคที่ใช้คือ ค่าความต่างศักย์หลอด 120 กิโลวัตต์ และค่ากระแสหลอดคูณเวลา 300 มิลลิแอมแปร์วินาที

2) นำภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ได้มาทำการวัดค่าเลขซีที (CT number) ของตัวกลางที่สนใจ ได้แก่ เนื้อเยื่อ กระดูก และอากาศ ด้วยโปรแกรม Image J โดยกำหนดพื้นที่ในการวัดขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร (mm^2) ดังภาพที่ 23

3) ทำการสุ่มภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์อุ้งเชิงกรานของผู้ป่วยจริงที่มาทำการถ่ายภาพเพื่อจำลองการรักษามาวัดค่าเลขซีที (CT number) ด้วยวิธีการเดียวกับขั้นตอนที่ 2 ดังภาพที่ 24

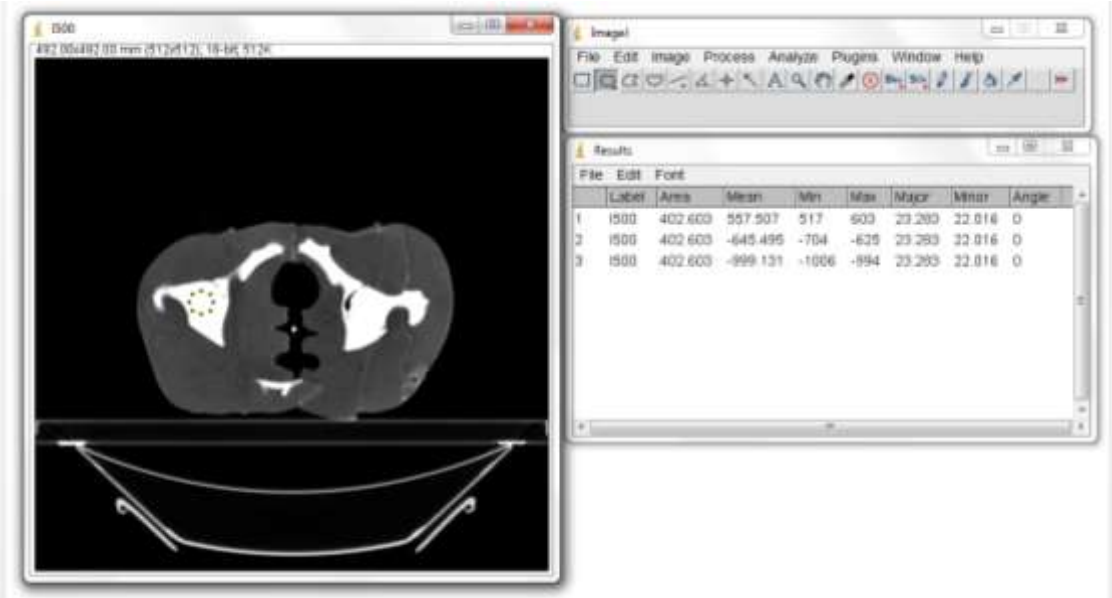
4) บันทึกค่าเลขซีทีที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าร้อยละของความขาว-ดำของตัวกลางภายในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานและในผู้ป่วยจริง ดังสมการ (2)

$$C = \left(\frac{I_t - I_b}{I_b} \right) \times 100$$

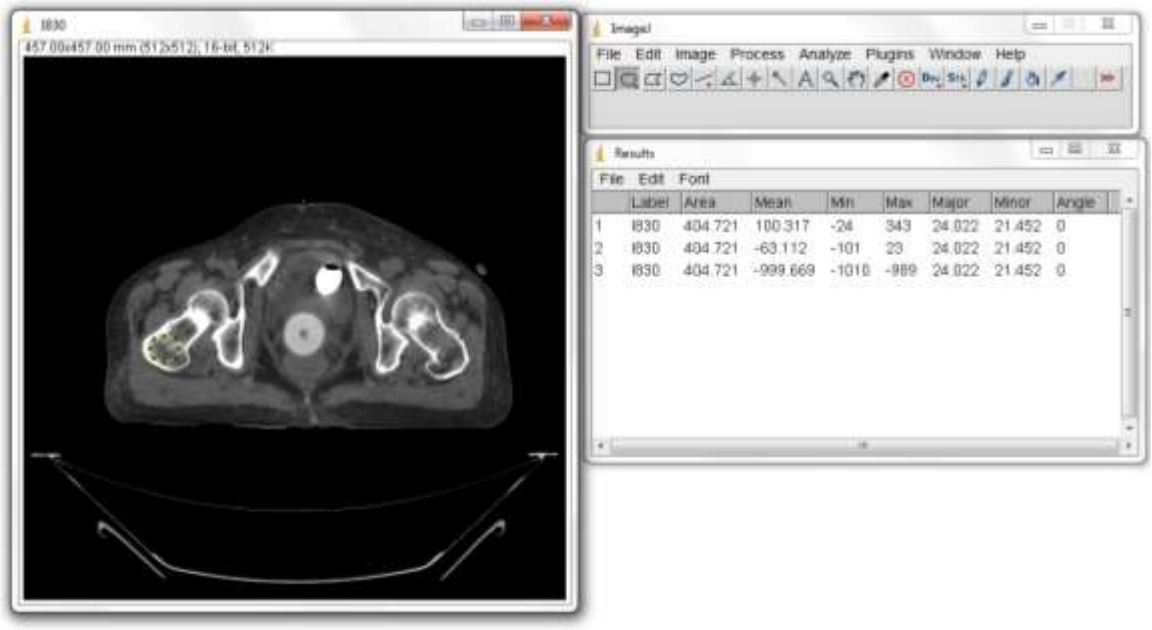
เมื่อ C คือ ร้อยละของความขาว-ดำของตัวกลางที่สนใจ

I_t คือ ค่าเลขซีทีของกระดูก

I_b คือ ค่าเลขซีทีของเนื้อเยื่อ



ภาพที่ 23 การวัดค่าเลขซีทีของตัวกลางในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานด้วยโปรแกรม Image J



ภาพที่ 24 การวัดค่าเลขซีทีของตัวกลางในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์อุ้งเชิงกรานผู้ป่วยด้วยโปรแกรม Image J

4.3.6.2 การประเมินความสม่ำเสมอในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

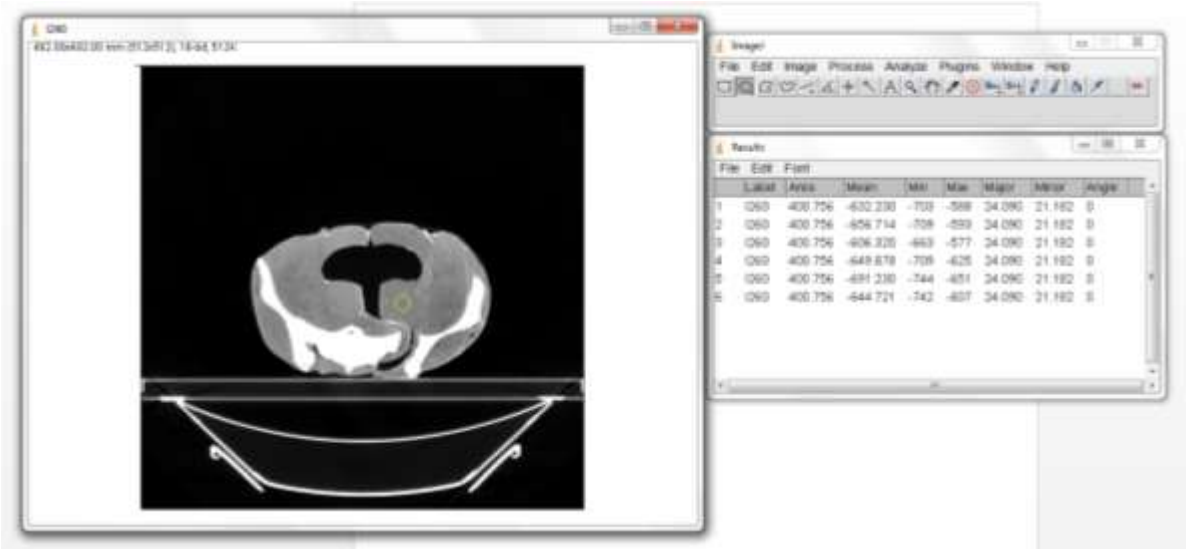
การทดสอบความสม่ำเสมอ(Uniformity) (43) ของเลขซีทีภายในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์นำมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นในด้านความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างภายใน คือ เนื้อยางพาราที่ได้จากสูตรที่ใช้ในการพัฒนา หากมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงการลดทอนรังสีของเนื้อยางพาราจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อนำข้อมูลมาสร้างภาพภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จะได้ภาพที่มีความดำสม่ำเสมอหรือมีค่าเลขซีทีภายในภาพใกล้เคียงกัน

วิธีการทดสอบ

1) นำหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานไปสแกนด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ 16 สไลด์ (เครื่องหมายการค้า Philips รุ่น Brilliance Big Bore) ด้วยค่าเทคนิคที่ใช้คือ ค่าความต่างศักย์หลอด 120 กิโลวัตต์ และค่ากระแสหลอดคูณเวลา 300 มิลลิแอมแปร์วินาที

2) นำภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ได้มาทำการวัดค่าเลขซีที ด้วยโปรแกรม Image J ในบริเวณที่สนใจ (Region of interest) บนภาพจำนวน 6 จุด โดยกำหนดพื้นที่ในการวัดขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร (mm^2) ดังภาพ 25

3) บันทึกค่าเลขซีทีที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งจากนั้นนำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของค่าเลขซีทีในบริเวณที่สนใจเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง



ภาพที่ 25 การวัดเพื่อหาค่าเลขซีทีด้วยโปรแกรม Image J ในบริเวณที่สนใจบนภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

4.3.7 ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบ การประยุกต์ใช้งาน การประเมินคุณภาพและความพึงพอใจในการใช้งานของหุ่นจำลอง

การประเมินคุณภาพและความพึงพอใจในการใช้งานของหุ่นจำลอง นั้น ระดับการประเมินต้องไม่น้อยกว่า 3.00 ซึ่งมีขั้นตอนในการประเมิน ดังต่อไปนี้

4.2.7.1 ประเมินความพึงพอใจของหุ่นจำลองด้านคุณลักษณะทั่วไปและการใช้งานหุ่นจำลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานการเรียนการสอนและการฝึกทักษะทางรังสีรักษาโรคมะเร็งปากมดลูก โดยนิสิตสาขารังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จำนวนอย่างน้อย 30 คน โดยใช้แบบประเมินและแบบบันทึกผลการประเมินแสดงดังตารางในภาคผนวกที่ 2 ตามลำดับ

4.2.7.2 ประเมินคุณภาพของหุ่นจำลองในด้านการประยุกต์ใช้งานจำลองการรักษาและวางแผนการรักษา โดยนักรังสีการแพทย์ นักฟิสิกส์การแพทย์และรังสีแพทย์ จำนวนอย่างน้อย 5 คน โดยใช้แบบประเมินและแบบบันทึกผลการประเมินแสดงดังตารางในภาคผนวกที่ 2

เกณฑ์การให้คะแนนแบบประเมิน เกณฑ์การแปลความหมายของค่าเฉลี่ยโดยใช้เกณฑ์สัมบูรณ์ (Absolute Criteria) (44)

ระดับการประเมินความพึงพอใจแบ่งออก เป็น 5 ระดับ ดังนี้

ระดับ 5 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ระดับ 4 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ระดับ 3 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

ระดับ 2 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับพอใช้

ระดับ 1 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับต้องปรับปรุง

การพิจารณาผลการประเมินความพึงพอใจ พิจารณาจากมาตราส่วนดังนี้

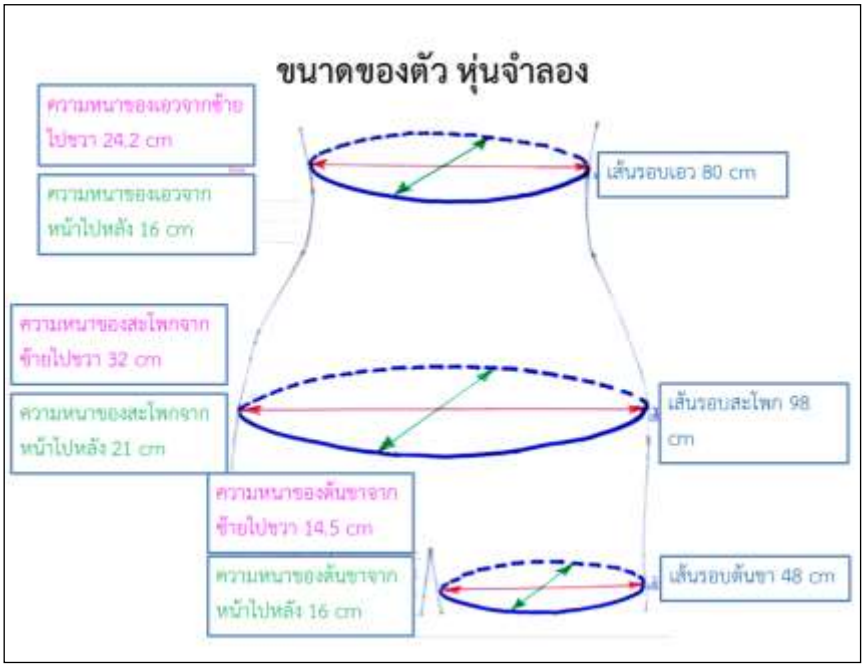
คะแนน	4.51- 5	หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด
คะแนน	3.51-4.50	หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก
คะแนน	2.51-3.50	หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง
คะแนน	1.51 -2.50	หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับพอใช้
คะแนน	1 -1.50	หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับต้องปรับปรุง

5. ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการทดลอง

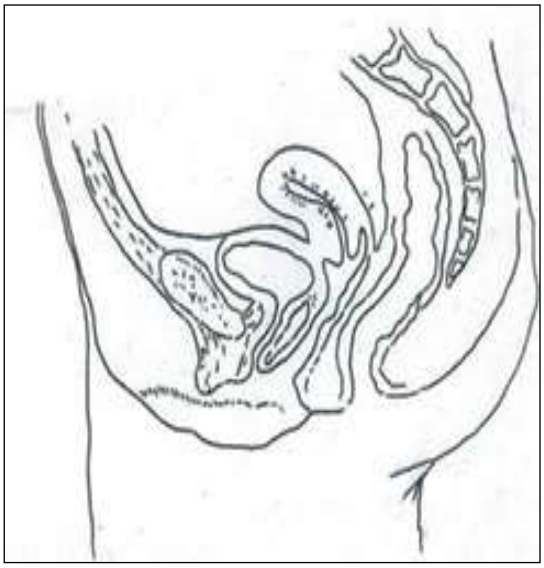
5.1 ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิง

ผลการออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสำหรับฝึกทักษะการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ แสดงดังภาพที่ 26 โดยเป็นแบบที่กำหนดขนาดของหุ่นจำลอง โดยสรุปจะมีขนาดเส้นรอบเอว 80 เซนติเมตร ความหนาของเอวจากซ้ายไปขวา 24.2 เซนติเมตร ความหนาของเอวจากหน้าไปหลัง 16 เซนติเมตร ความยาวเส้นรอบสะโพก 98 เซนติเมตร ความหนาของสะโพกจากซ้ายไปขวา 32 เซนติเมตร ความหนาของสะโพกจากหน้าไปหลัง 21 เซนติเมตร เส้นรอบต้นขา 48 เซนติเมตร ความหนาของต้นขาจากซ้ายไปขวา 14.5 เซนติเมตร และความหนาของต้นขาจากหน้าไปหลัง 16 เซนติเตร

สำหรับอวัยวะภายใน เมื่อออกแบบในลักษณะผ่าซีก แสดงดังภาพที่ 27 โดยช่องคลอดของหุ่นจำลองจะมีความยาวผนังด้านหน้าประมาณ 7 เซนติเมตร ความยาวผนังด้านหลังประมาณ 9 เซนติเมตร ปากมดลูกหุ่นจำลองจะมีขนาดความยาวประมาณ 3 เซนติเมตร สำหรับมดลูกหุ่นจำลองจะมีขนาดความกว้างประมาณ 3 เซนติเมตร ความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 7 เซนติเมตร กระเพาะปัสสาวะหุ่นจำลองจะมีความจุประมาณ 150-500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทวารหนักหุ่นจำลองมีความยาวประมาณ 5 นิ้ว



ภาพที่ 26 แสดงการออกแบบขนาดของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิงโดยใช้ข้อมูลผลการสำรวจรูปร่างทั่วประเทศโครงการ Size Thailand ในปี 2552



ภาพที่ 27 แสดงภาพวาดของการออกแบบจำลองอุ้งเชิงกรานเพศหญิงในรายละเอียดภายในประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญ ได้แก่ มดลูก ช่องคลอด กระเพาะปัสสาวะและทวารหนัก

5.2 ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับหล่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

5.2.1 ผลการสร้างแม่พิมพ์กระดูก

แม่พิมพ์กระดูกที่สร้างจากซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์ แสดงดังภาพที่ 28-31 โดยประกอบด้วย hip bone ทั้ง 2 ข้าง กระดูก sacrum กระดูก coccyx กระดูก Femur ทั้ง 2 ข้าง และกระดูกสันหลังส่วนเอวชิ้นที่ 4 (L4) และชิ้นที่ 5 (L5)

ภาพที่ 28 แสดงรูปแม่พิมพ์ยางพาราและปูนปลาสเตอร์สำหรับ hip bone ทั้ง 2 ข้าง

ภาพที่ 29 แสดงรูปแม่พิมพ์ยางพาราและปูนปลาสเตอร์สำหรับกระดูก sacrum และ coccyx

ภาพที่ 30 แสดงรูปแม่พิมพ์ยางพาราและปูนปลาสเตอร์สำหรับกระดูก Femur ทั้ง 2 ข้าง

ภาพที่ 31 แสดงรูปแม่พิมพ์ยางพาราและปูนปลาสเตอร์สำหรับกระดูกสันหลังส่วนเอว L4 และ L5

5.2.2 ผลการปั้นหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานต้นแบบ

ภาพที่ 32 แสดงภาพที่ได้จากการปั้นโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการปั้น และตรวจสอบความถูกต้องของขนาดของอวัยวะภายในอุ้งเชิงกราน และขนาดของช่องคลอดจากแพทย์ทางรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร โดยปรับปรุงหุ่นจำลองต้นแบบให้ความกว้างของช่องคลอด เหมาะสมและกว้างพอที่จะใส่อุปกรณ์ในการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ และหุ่นต้นแบบที่ได้จะมี 2 ซีก คือ ซ้ายและขวา โดยที่ภายในแสดงอวัยวะภายในได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ ช่องคลอด มดลูก และทวารหนัก และหุ่นต้นแบบที่ปั้นขึ้นสามารถประกบกันด้านซ้ายและขวาได้พอดี ดังแสดงในภาพที่ 33

ภาพที่ 32 แสดงหุ่นอุ้งเชิงกรานต้นแบบที่ปั้นจากดินน้ำมัน โดยแสดงรายละเอียดอวัยวะภายใน

ภาพที่ 33 แสดงหุ่นอุ้งเชิงกรานต้นแบบที่ปั้นจากดินน้ำมันเมื่อนำด้านซ้ายและขวา มาประกบกัน

5.2.3 ผลการสร้างแม่พิมพ์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

จากหุ่นต้นแบบเมื่อทำการถอดแบบจะได้แม่พิมพ์ซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์ของหุ่นจำลองทั้งสองซีกแสดดังภาพที่ 34 โดยสามารถนำมาประกบกันเพื่อเทยางพาราในแต่ละซีก ทั้งซ้ายและขวา

ภาพที่ 34 แสดงแม่พิมพ์ซิลิโคน และปูนปลาสเตอร์

5.3 ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา และขึ้นรูปหุ่นจำลอง

การพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้น้ำยางพาราเพื่อพัฒนาหุ่นจำลอง โดยใช้กระบวนการผลิตยางฟองน้ำด้วยวิธีดันลอปซึ่งมีขั้นตอนที่ประกอบด้วยการเตรียมสารเคมีและการผสมสารเคมีกับน้ำยาง การตีฟอง (Foaming) การขึ้นรูปในเบ้าพิมพ์และทำให้เป็นเจล (Moulding and gellation) และการทำให้ฟองยางคงรูป ล้าง อบแห้ง และตกแต่ง (Vulcanising, washing, drying and finishing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรยางเพื่อใช้สร้างหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน โดยมีสัดส่วนของน้ำยางพาราและสารเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งสูตรโฟมยางสำหรับหุ่นจำลองนี้ได้มีการลดปริมาณของการใช้สารละลายโพแทสเซียมโอลิเอตจากสูตรเดิม (ตารางที่ 4) และมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป เพื่อทำให้หุ่นจำลองมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความแข็งของยางตามระดับที่ต้องการนั้นคือ ให้มีลักษณะความยืดหยุ่นคล้ายกับเนื้อเยื่อ

ผลการสร้างหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน จากยางพารา

ภาพที่ 35 แสดงหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา โดยหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นเป็นไปตามหุ่นต้นแบบที่ออกแบบไว้ โดยมีน้ำหนักประมาณรวมทั้ง 2 ซีก โดยประมาณ 4.5 กิโลกรัม เมื่อประกบทั้งสองซีก วัดขนาดของหุ่นจำลองที่สร้างจริง ได้ดังนี้ รอบเอว 68 เซนติเมตร ขนาดรอบ

สะโพก 86.5 เซนติเมตร และขนาด ต้นขา 55 เซนติเมตร โดยทั้งสองด้าน แสดงรายละเอียดของอวัยวะที่สำคัญภายในอุ้งเชิงกราน ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ ช่องคลอด มดลูก และทวารหนัก โดยช่องคลอดมีความยาว 7 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตร และความยาวของมดลูก 5 เซนติเมตร โดยเมื่อประกบทั้ง 2 ซีก จะได้หุ่นจำลองที่หมาะสมต่อการสร้างภาพ แสดงดังภาพที่ 36

ภาพที่ 35 แสดงหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่แสดงอวัยวะที่สำคัญภายในอุ้งเชิงกราน

ภาพที่ 36 แสดงหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเมื่อประกบด้านซ้ายและด้านขวา

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้น เมื่อทำทั้งสองด้านจะมีปัญหาด้านการประกบกัน เนื่องจากไม่สามารถประกบกันได้พอดี ดังนั้นหากต้องสร้างหุ่นที่เหมาะแก่การนำไปสร้างภาพควรเป็น

หุ่นจำลองที่เป็นทั้งตัวไม่ควรแบ่งครึ่ง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการสร้างหุ่น anthropomorphic phantom (45) สำหรับ quality assurance และ training โดยการสร้าง applicator สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูกไว้ภายในหุ่นจำลอง และตัวหุ่นสร้างจากเรซิ่น อีกทั้งมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิดไอออไนเซชั่น เพื่อประโยชน์ในการทำ quality assurance ซึ่งหากต้องการฝึกทักษะด้านการสร้างภาพและการวางแผนการรักษาควรสร้างหุ่นทั้งอุ้งเชิงกราน เพื่อไม่ให้เกิดอากาศระหว่างรอบต่อของหุ่นทั้งสองด้าน

หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดแตกต่างไปจากการออกแบบทั้งในส่วน รอบเอว สะโพก และต้นขาทั้งนี้ เนื่องจากในการปั้นดินน้ำมันต้นแบบนั้นจะต้องให้พอดีกับกระดูกจริงที่เราจะนำมาใช้ด้วย ดังนั้นจึงทำให้ขาดต่างๆ แตกต่างไปจากแบบที่วางไว้ ส่วนสิ่งที่เพิ่มเติมจากคือขนาดของช่องคลอดที่กว้างกว่าการออกแบบ เนื่องจากต้องการให้หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใส่อุปกรณ์ที่เรียกว่า ovoid ได้

5.4 ผลการทดลองในขั้นตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน และขั้นตอนที่ 5 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

จากสูตรยางที่ได้พัฒนาขึ้นในการสร้างหุ่นจำลองนั้น ได้มีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยสูตรยางเดียวกันตามตารางที่ 5 และใช้เทคนิคในการ ทำให้เป็นโฟมยางเช่นเดียวกัน ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในวิธีดำเนินการวิจัย ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งในการทดสอบสมบัติแต่ละค่านั้นได้อธิบายรายละเอียดในการเตรียมชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และวิธีการคำนวนไว้ใน ขั้นตอนที่ 2 แล้วและเพื่อให้เป็นการง่ายไม่ยุ่งยากในการเรียกชื่อชิ้นงานตัวอย่าง จึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่าง ที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ

ชื่อใช้แทนตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
Std- Sample	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางโดยใช้ K-oleate ดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ 1 ที่ได้ผลการประเมินคุณภาพ และความพึงพอใจจากผู้ใช้งานมากที่สุด
Pelvic	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางดังตารางที่ 5
Phantom Non x-ray	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 ไม่ได้ฉายรังสี
x-ray 200 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 มีการฉายรังสี ปริมาณ 200 cGy

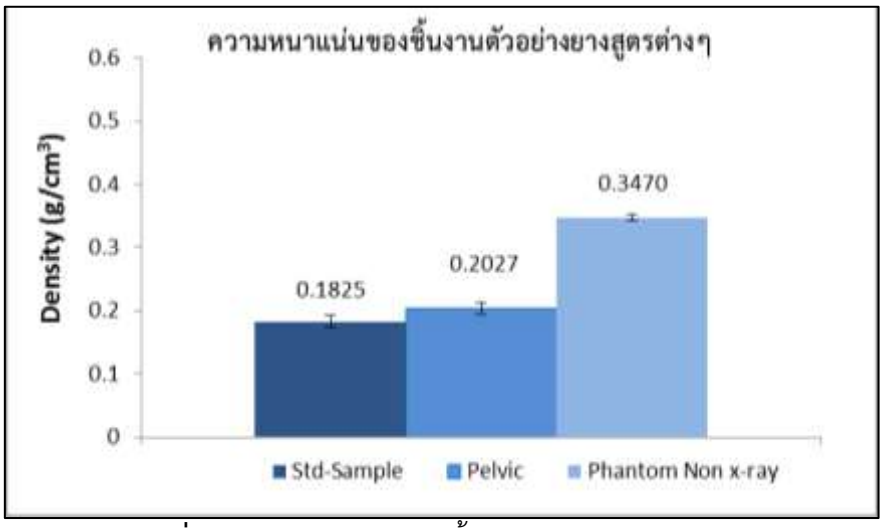
x-ray 400 cGY	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 มีการฉายรังสี ปริมาณ 400 cGy
x-ray 600 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 มีการฉายรังสี ปริมาณ 600 cGy
x-ray 800 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 มีการฉายรังสี ปริมาณ 800 cGy
x-ray 1000 cGy	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางของหุ่นจำลองดังตารางที่ 5 มีการฉายรังสี ปริมาณ 1000 cGy

ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นได้ถูกนำมาทดสอบการทนต่อรังสี โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างยางนี้ไปฉายรังสี ในช่วง 200-1000 cGy ซึ่งตารางที่ 7 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสีปริมาณต่างๆ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางยังมีสีเหลืองนวลๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการรับปริมาณรังสีถึง 1000 cGy ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดจากการฉายรังสีนี้ มีค่าเพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

ตารางที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ

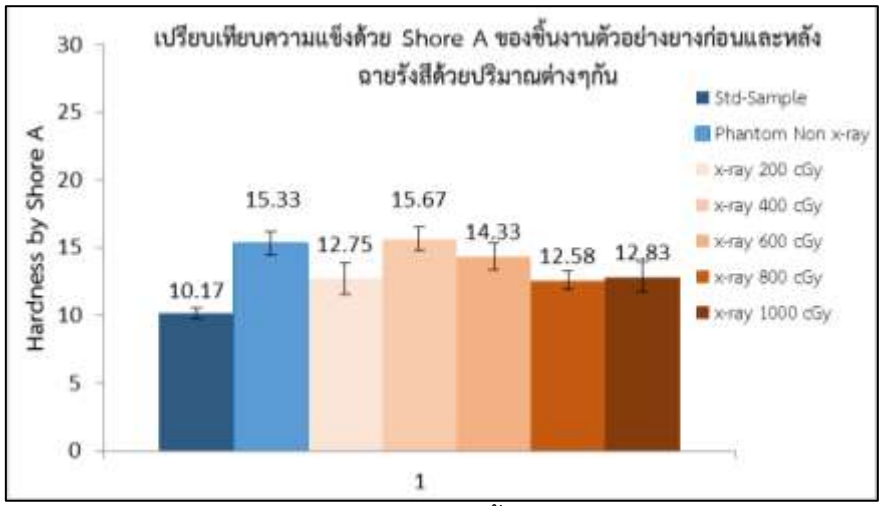
ตัวอย่าง	Phantom Non x- ray	x-ray 200 cGy	x-ray 400 cGy	x-ray 600 cGy	x-ray 800 cGy	x-ray 1000 cGy
ภาพถ่าย						
ลักษณะที่ สังเกตุเห็น	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล	ผิวเรียบ สีเหลืองนวล

สำหรับค่าความหนาแน่นนั้น พบว่า Phantom non x-ray ที่เตรียมได้จากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองจะมีค่าสูงสุด (แสดงดังภาพที่ 37) เนื่องมาจากการลดปริมาณสารลดแรงตึงผิว โพแทสเซียมโอลิเอต ทำให้การเกิดฟองในเนื้อยางมีปริมาณลดลงและจากการเติมสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีผลโดยตรงที่ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางนี้เพิ่มขึ้นนั้นเอง



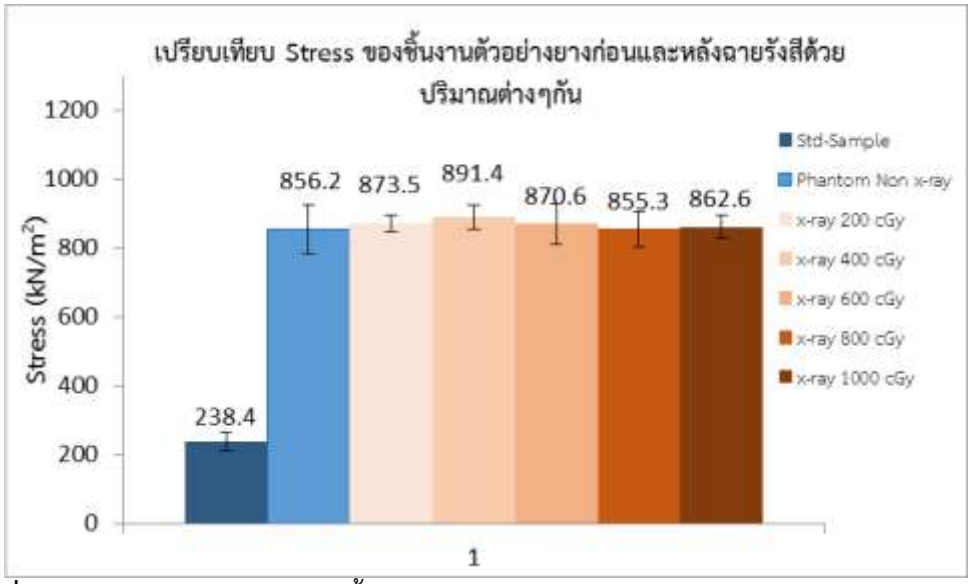
ภาพที่ 37 ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางสูตรต่างๆ

ค่าความแข็ง Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองนั้น ทั้ง Phantom non x-ray และ x-ray 200, 400, 600, 800, 1000 cGy จะมีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วง 12.58-15.67 ซึ่งแสดงว่าปริมาณรังสีที่ให้ปริมาณสูงถึง 1000 cGy ก็ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของ ตัวอย่างยางที่ทดสอบ ค่าความแข็งของ Phantom non x-ray และ x-ray ยังมีค่าที่สูงกว่าชิ้นงาน Std-Sample เท่ากับ 10.17 (แสดงดังภาพที่ 38) ซึ่งเป็นผลมาจากการเติม สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเอง ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้มีค่าความแข็งสูงขึ้น

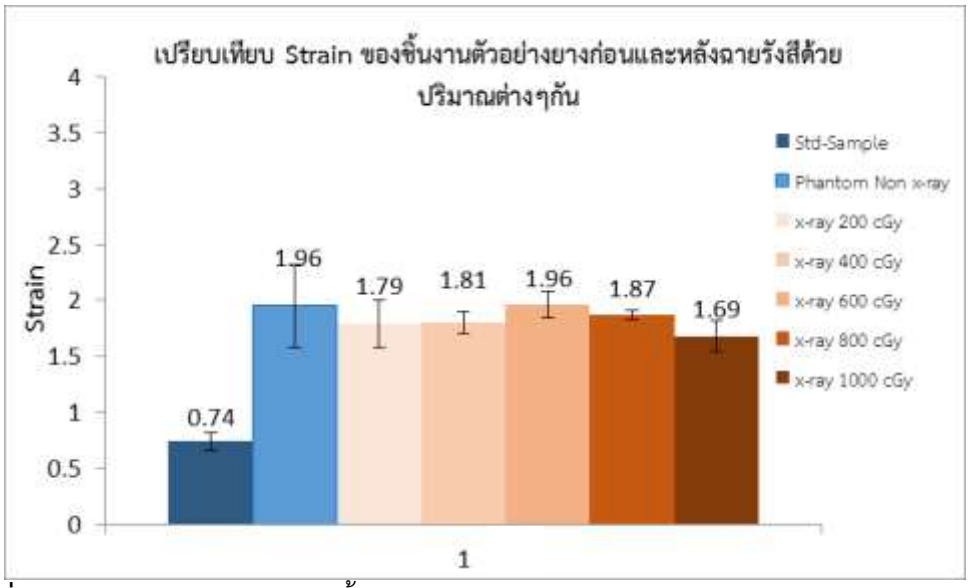


ภาพที่ 38 เปรียบเทียบความแข็งด้วย Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

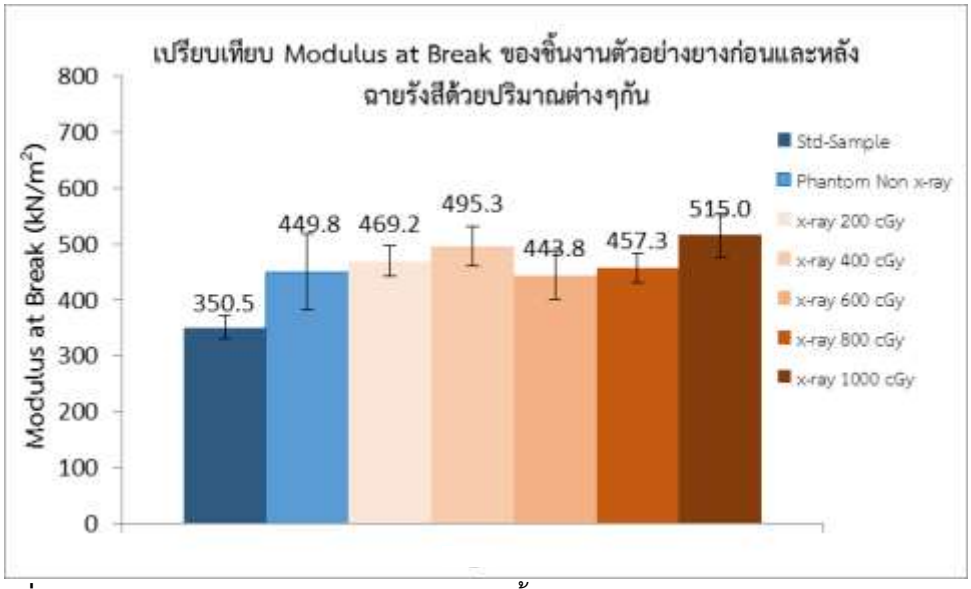
จากภาพที่ 39, 40 และ 41 แสดงค่า Stress, Strain และ Modulus at Break ชิ้นงานตัวอย่างยาง ที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น ซึ่งพบว่าค่า Stress ของตัวอย่างยาง Phantom non x-ray และ x-ray 200, 400, 600, 800, 1000 cGy นั้น มีค่า Stress ใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ในช่วง 855.3-891.4 kN/m^2 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าตัวอย่างยาง Std-Sample (มีค่าเท่ากับ 238.4 kN/m^2) ประมาณ 3.5-3.7 เท่า เป็นผลมาจากปริมาณ การเกิดฟองโฟมในเนื้อยางที่ลดลงจากการลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวโพแทสเซียมโอลิเอต และการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้นั้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นค่าการทนต่อแรงดึงจึงสูงขึ้นมากนั้นเอง ในทำนองเดียวกันปริมาณฟองโฟมในเนื้อยางที่ลดลงส่งผลให้ระยะยืดออก (Strain) ของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้นี้มีค่าสูงขึ้น นั้นคือความสามารถในการรับแรงดึงอย่างต่อเนื่องของเนื้อยางในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้นนั้นเอง ส่วนค่า Modulus at Break นั้น เป็นการคำนวนค่าจาก Stress และ Strain ที่จุดขาด ซึ่งพบว่าตัวอย่างยาง Phantom non x-ray และ x-ray 200-1000 cGy ทั้งหมดนั้น มีค่าสูงกว่า Std-Sample เป็นผลมาจากความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ยางที่สูงขึ้นจากการลดปริมาณ สารลดแรงตึงผิวและจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้ความเป็นอีลาสติกของผลิตภณฑ์ยางลดลงนั้นเอง



ภาพที่ 39 เปรียบเทียบ Stress ของชิ้นงานตัวอย่างยาง ก่อนและหลังฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน



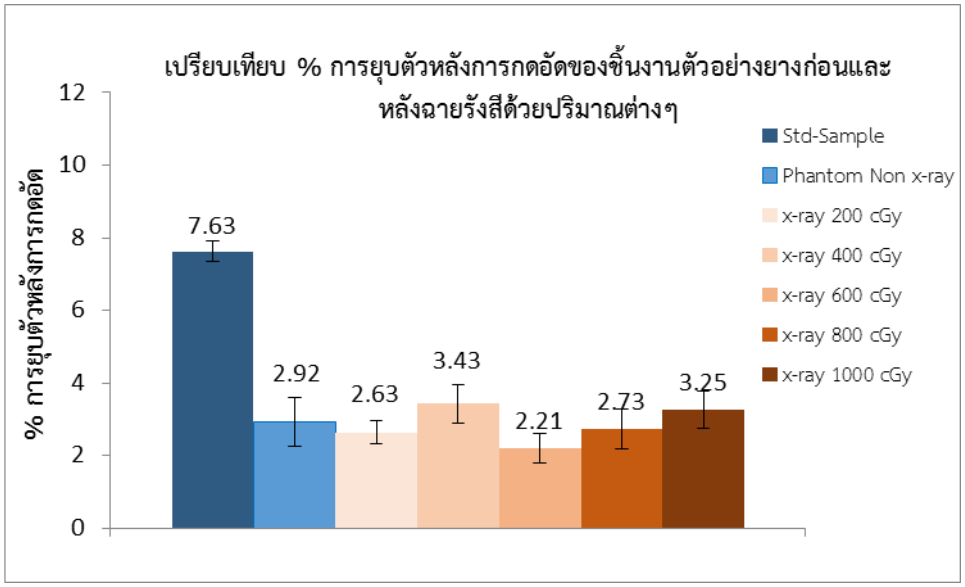
ภาพที่ 40 เปรียบเทียบ Strain ของชิ้นงานตัวอย่างยาง ก่อนและหลังฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน



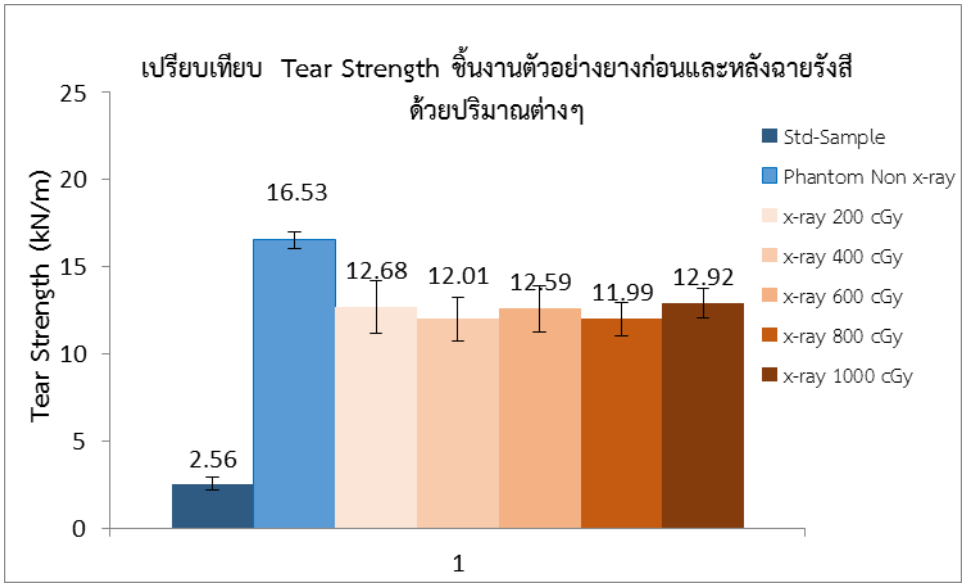
ภาพที่ 41 เปรียบเทียบ Modulus at Break ของชิ้นงานตัวอย่างยาง ก่อนและหลังฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆกัน

สำหรับค่าเปอร์เซนต์การยุบตัวหลังการกดอัดและค่าความทนแรงฉีกขาด(Tear Strength) ของชิ้นงานตัวอย่างยางแสดงดังภาพที่ 42 และ 43 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างยาง Phantom non x-ray และ x-ray 200-1000 cGy ทั้งหมดนั้น มีค่าต่ำกว่ากว่า Std-Sample (สำหรับ % การยุบตัวหลังการกดอัด)และมีค่าสูงกว่า Std-Sample (สำหรับ Tear Strength) ซึ่งเป็น

ผลมาจาก ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ยางที่สูงขึ้นนั้นเอง สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับค่าการทนแรงดึง



ภาพที่ 42 เปรียบเทียบ %การยุบตัวหลังการกดอัดของชิ้นงานตัวอย่างยาง ก่อนและหลังฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

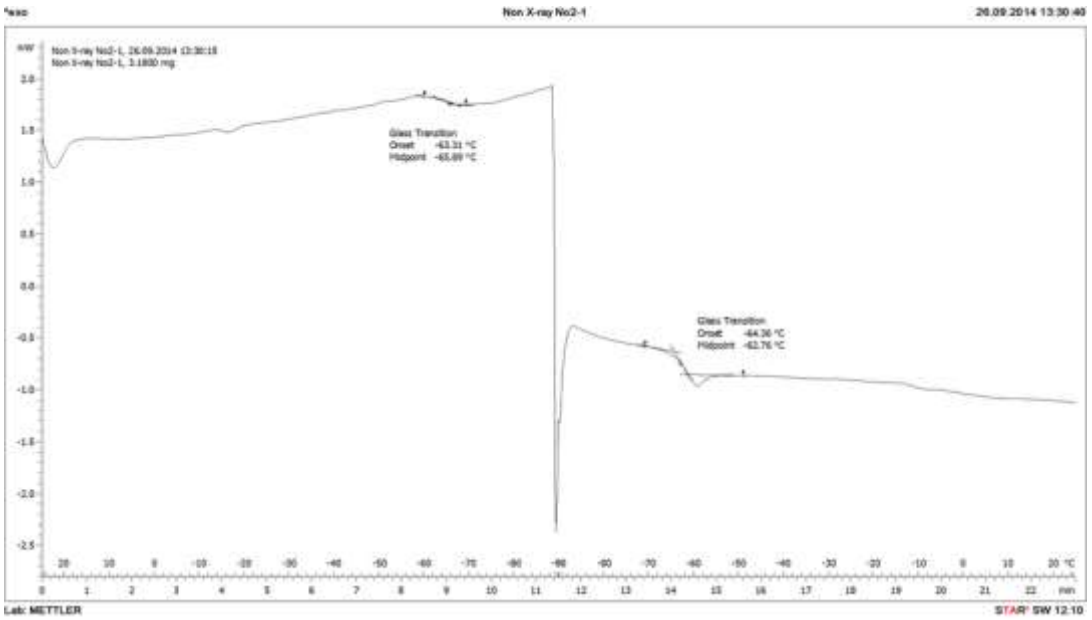


ภาพที่ 43 เปรียบเทียบ Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลัง ฉายรังสีด้วยปริมาณต่างๆ กัน

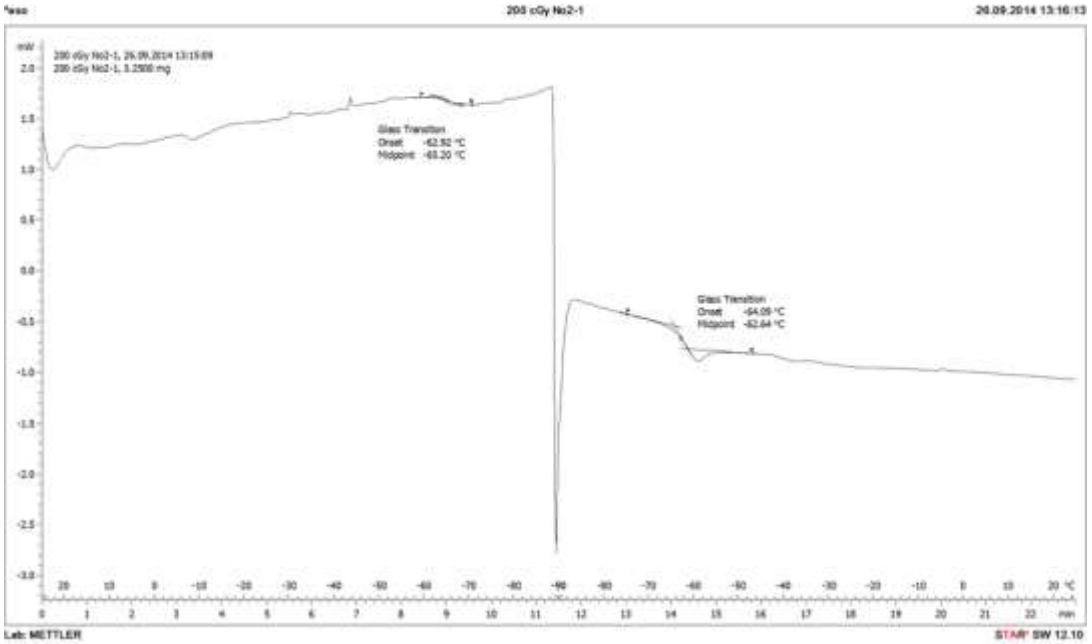
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย DSC จะวิเคราะห์หาค่า T_g ของชิ้นงาน Phantom non x-ray และ x-ray 200, 400, 600, 800, 1000 cGy แสดงดังตารางที่ 8 และโครมาโตรแกรม DSC แสดงดังภาพที่ 44-49 ซึ่งพบว่าค่า $T_{g\ onset}$ ทั้งขั้นแรก ที่ลดอุณหภูมิจาก 25 ^{O}C ไปที่อุณหภูมิ -90 ^{O}C ด้วยอัตราเร็ว 10 ^{O}C/min ภายใต้บรรยายกาศไนโตรเจน และในขั้นตอนที่สอง เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 ^{O}C ไปที่อุณหภูมิ 25 ^{O}C ด้วยอัตราเร็ว 10 ^{O}C/min ภายใต้บรรยายกาศไนโตรเจนเช่นกันนั้น มีค่า $T_{g\ onset}$ ใกล้เคียง มีค่าในช่วง -61.38 ^{O}C ถึง -64.70 ^{O}C ซึ่งมีค่าต่างกันเล็กน้อยเพียง 1-3 ^{O}C เท่านั้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ยางได้ จากการฉายรังสี x-ray ในช่วง200-1000 cGy นั้น ไม่มีผลทำให้สายโซ่โครงสร้างโมเลกุล ของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้นี้เปลี่ยนแปลง นั้นคือไม่มีเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุล หรือเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 8 อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature, T_g) ของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังฉายรังสีปริมาณต่างๆ

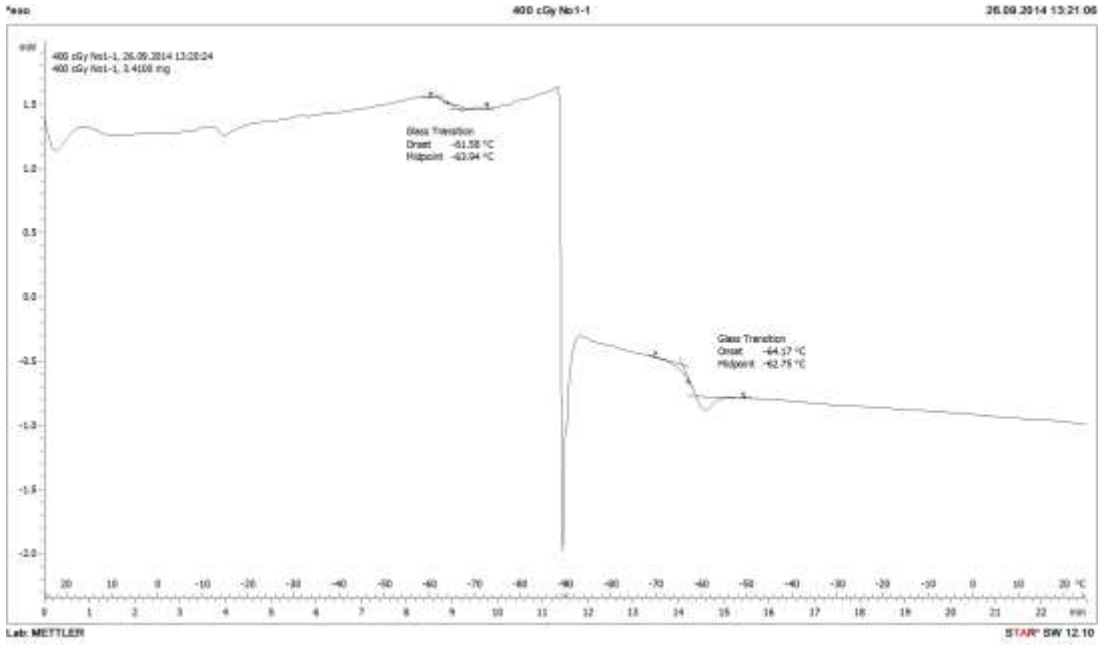
ตัวอย่าง	$T_{g\ onset}$ (^{O}C)	
	1st ลดอุณหภูมิจาก 25 ^{O}C ไปที่ -90 ^{O}C	**2nd เพิ่มอุณหภูมิจาก -90 ^{O}C ไปที่ 25 ^{O}C**
Phantom Non x-ray	-64.36	-63.31
x-ray 200 cGy	-64.09	-62.92
x-ray 400 cGy	-61.58	-64.17
x-ray 600 cGy	-61.22	-64.86
x-ray 800 cGy	-64.70	-62.91
x-ray 1000 cGy	-61.38	-64.47



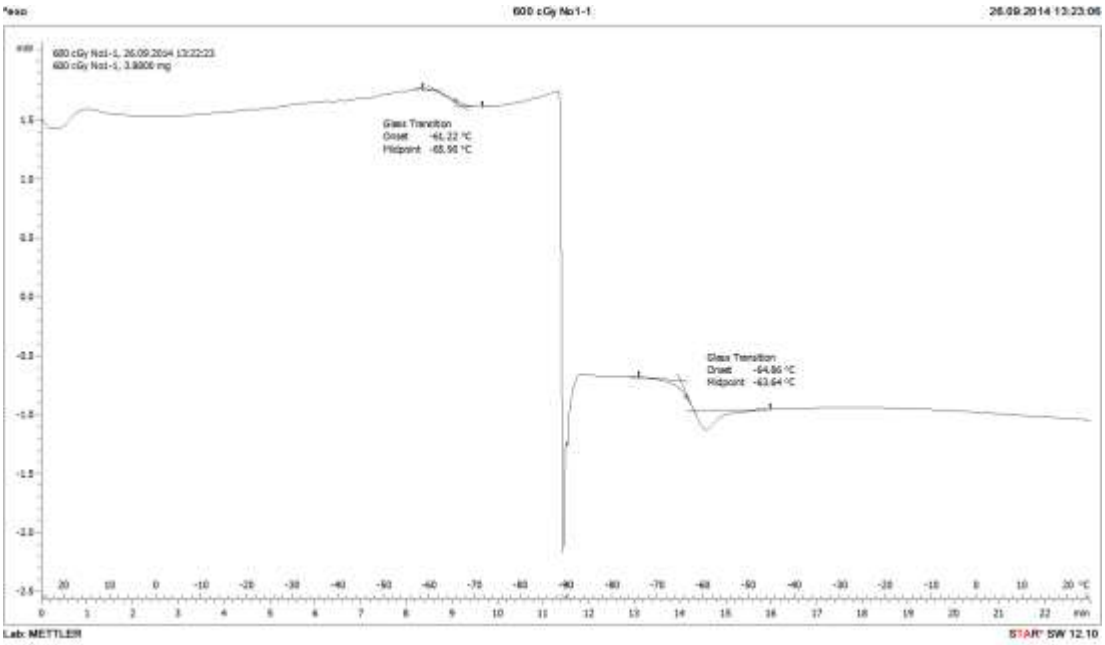
ภาพที่ 44 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง Phantom Non x-ray



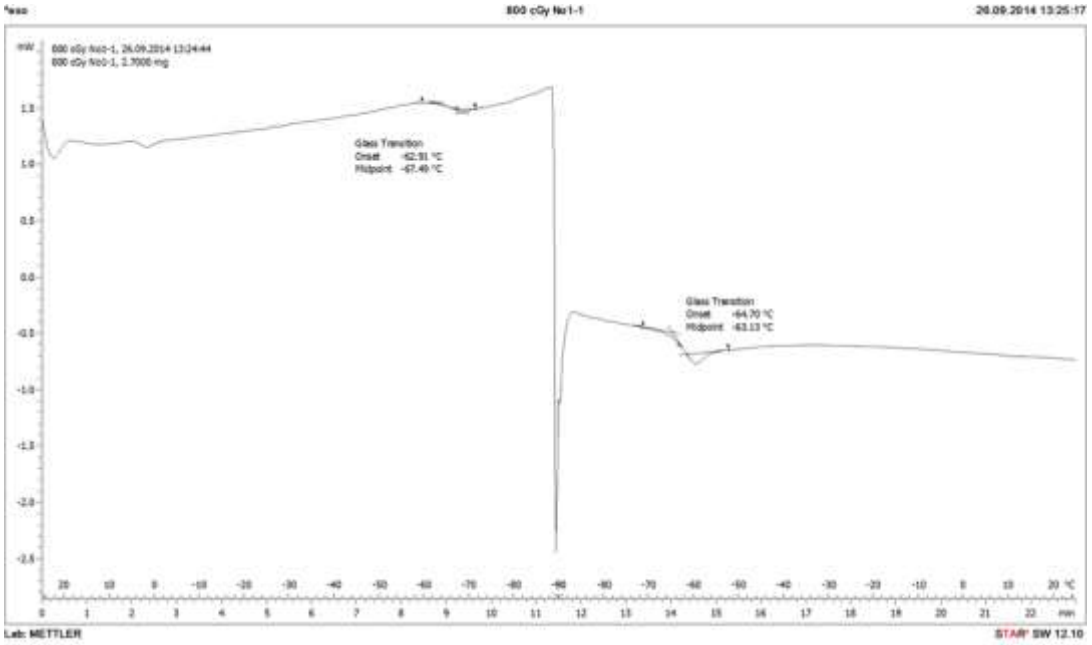
ภาพที่ 45 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง x-ray 200 cGy



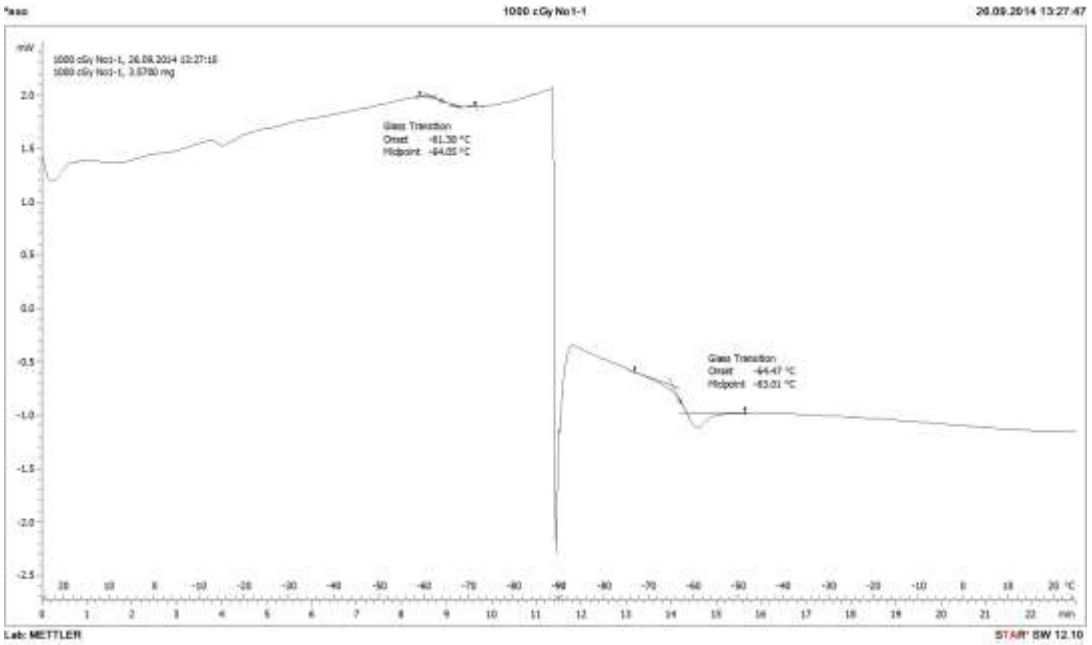
ภาพที่ 46 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง x-ray 400 cGy



ภาพที่ 47 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง x-ray 600 cGy



ภาพที่ 48 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง x-ray 800 cGy



ภาพที่ 49 โครมาโตรแกรม DSC ของชิ้นงานตัวอย่างยาง x-ray 1000 cGy

5.5 ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านรังสี ของหุ่นจำลอง

นำหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้น ไปสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และหาค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) และ ค่าร้อยละของความขาว-ดำ (Percent contrast) ระหว่างส่วนที่เป็นกระดูกและส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ

5.5.1 ค่าร้อยละของความขาว-ดำ

ผลการทดสอบหาคุณสมบัติของตัวกลางที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความขาว-ดำภายในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของอุ้งเชิงกรานผู้ป่วยจริงในหน่วย Hounsfield Unit (HU) แสดงดังตารางที่ 9

จากผลการทดสอบพบว่าค่าร้อยละของความขาว-ดำของกระดูกในหุ่นจำลองมีค่าสูงกว่าในผู้ป่วยจริง ในขณะที่เนื้อเยื่อมีค่าต่ำกว่าในผู้ป่วยจริง อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินภาพด้วยสายตาพบว่าความขาว-ดำของกระดูกและเนื้อเยื่อในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองที่ได้ สามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นกระดูกและเนื้อเยื่อได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือทางรังสีที่สามารถสร้างภาพของตัวกลางที่มีร้อยละของความขาว-ดำแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยได้ดี เช่น เนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายมนุษย์ (ค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.25-0.5%) (46-48) ดังนั้นกระดูกและเนื้อเยื่อในหุ่นจำลองที่มีค่าร้อยละของความขาว-ดำสูงกว่าประมาณ 6-10 เท่า จึงสามารถเห็นความขาว-ดำในภาพแตกต่างกันอย่างชัดเจน

ตารางที่ 9 ค่าร้อยละของความขาว-ดำของตัวกลางในอุ้งเชิงกรานของผู้ป่วยจริงเปรียบเทียบกับหุ่นจำลองที่สร้างขึ้น

ตัวกลาง	ค่าเลขซีที (HU)		%Contrast ระหว่าง Bone และ Soft tissue		%ความแตกต่างระหว่าง contrast ของหุ่นจำลองกับผู้ป่วยจริง
	ในอุ้งเชิงกรานของผู้ป่วย	ในหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน	ผู้ป่วย	หุ่นจำลอง	
Bone	110.6	614.8	-261.46	-196.88	64.58
Soft tissue	-68.5	-634.6			

5.5.2 ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของเลขซีที

ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของเลขซีทีภายในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 10 โดยสรุปผลการหาค่าเลขซีทีเฉลี่ยของหุ่นจำลองที่วัดได้เท่ากับ -642.0 HU โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 25.8 และ

ความแตกต่างของเลขซีทีในตำแหน่งที่สนใจเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงสูงสุดเท่ากับ 59.0 HU และต่ำสุดเท่ากับ 7.9 HU

เกณฑ์การทดสอบความสม่ำเสมอของเลขซีทีตามมาตรฐานของ AAPM no.66 ใช้หุ่นจำลองที่มีตัวกลางเป็นเนื้อเดียวกันคือน้ำ (Water Phantom) กำหนดให้ความแตกต่างของค่าเลขซีทีในตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งที่สนใจอยู่ในช่วง ±10 HU (49) ในขณะที่การทดสอบโดยใช้หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานนั้นมีค่าความแตกต่างของของเลขซีที เมื่อเทียบจากจุดอ้างอิงเฉลี่ยเท่ากับ 26.5 HU แสดงให้เห็นว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นยังมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของตัวกลางน้อยที่กว่า Water Phantom อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาหุ่นจำลองนี้เพื่อใช้ในการสร้างภาพสำหรับจำลองการรักษาซึ่งแตกต่างจากหุ่นจำลอง Water Phantom ที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (49) จึงจำเป็นต้องใช้หุ่นจำลองที่มีความเป็นเนื้อเดียวสูงกว่า

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของเลขซีทีในภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

ตำแหน่ง Slice	**ตำแหน่ง ROI**	**ค่าเลขซีที (HU)**	**ความแตกต่าง (HU)**
Slice 1	1	-632.2	-
	2	-656.7	24.5
	3	-606.3	25.9
	4	-649.9	17.7
	5	-691.2	59.0
	6	-644.7	12.5
Slice 2	1	-646.7	-
	2	-622.3	24.4
	3	-673.1	26.4
	4	-607.0	39.7
	5	-654.6	7.9
	6	-619.5	27.2
ค่าเฉลี่ย		**-642.0**	**26.5**
SD		**25.8**	

5.6 ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบ การประยุกต์ใช้งาน การประเมินคุณภาพและความพึงพอใจในการใช้งานของหุ่นจำลอง

เมื่อนำหุ่นจำลองไปทำการประเมิน โดยสามารถสร้างภาพร่วมกับเครื่องมือที่ใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูก และให้เห็นโครงสร้างของกระดูกได้จริง อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ในการฝึกการวางแผนการรักษาได้ ดังแสดงตัวอย่างของภาพในภาคผนวกที่ 3 และได้ผลการประเมินดังนี้

ผลประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานในการฝึกทักษะการรักษา และวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูก โดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา จังหวัดพิษณุโลก 19 คนโดยสรุปเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 11 จากตารางค่าเฉลี่ยของคะแนนโดยรวมจากทุกด้านอยู่ที่ 4.21±0.63 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก เมื่อพิจารณาหัวข้อใหญ่ในแต่ละด้านพบว่า ด้านความเหมือนจริง มีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ที่ 4.07±0.59 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ด้านการประยุกต์ใช้งานทั่วไปมีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ที่ 4.22±0.64 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก และ ด้านการประยุกต์ใช้งานฝึกทักษะการรักษามีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ที่ 4.28±0.63 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

สำหรับคะแนนการประเมินจากผู้ปฏิบัติงานพบว่าด้านความเหมือนจริงของหุ่นจำลองนั้นได้คะแนนประเมินน้อยที่สุด 4.07±0.59 และเมื่อดูรายละเอียดของหัวข้อย่อยพบว่าความสวยงามได้คะแนนต่ำที่สุด คือ 3.89±0.66 ทั้งอาจเนื่องมาจากไม่ได้ตกแต่งสีให้เหมือนจริง และไม่ได้ทาสีอวัยวะภายใน และผิวด้านนอกยังมีรอยต่อของแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องแก้ไขจากแม่พิมพ์จึงจะทำให้ปัญหาตรงนี้หมดไป ในทางตรงกันข้ามด้านที่มีคะแนนประเมินมากที่สุด คือ ด้านการประยุกต์ใช้งานฝึกทักษะการรักษา ด้วยคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยเท่ากับ 4.22±0.64 เนื่องจากหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้งานได้จริง และช่วยเพิ่มการฝึกทักษะแก่ผู้ปฏิบัติงานจริง อีกทั้งยังสามารถสร้างภาพทางรังสีได้ด้วยโดยแยกกระดูกกับเนื้อเยื่อได้อย่างชัดเจน

ผลการประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อใช้เป็นสื่อในการเรียนการสอน สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูก โดยนิสิตรังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 จำนวน 47 คน โดยสรุปเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 12 จากตารางค่าเฉลี่ยของคะแนนโดยรวมจากทุกด้านอยู่ที่ 3.96±0.68 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก โดยด้านที่มีผลความพึงพอใจสูงสุด คือ ประโยชน์ของการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลองในการเรียนการสอน โดยมีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย เท่ากับ 4.30±0.62 ด้านที่มีผลความพึงพอใจต่ำสุด คือ ด้านความสวยงาม โดยมีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย เท่ากับ 3.49±0.72 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

ตารางที่ 11 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน ในการฝึกทักษะการรักษาและวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูก โดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา จังหวัดพิษณุโลก โดยสรุปเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้ประเมิน 19 คน (n=19)

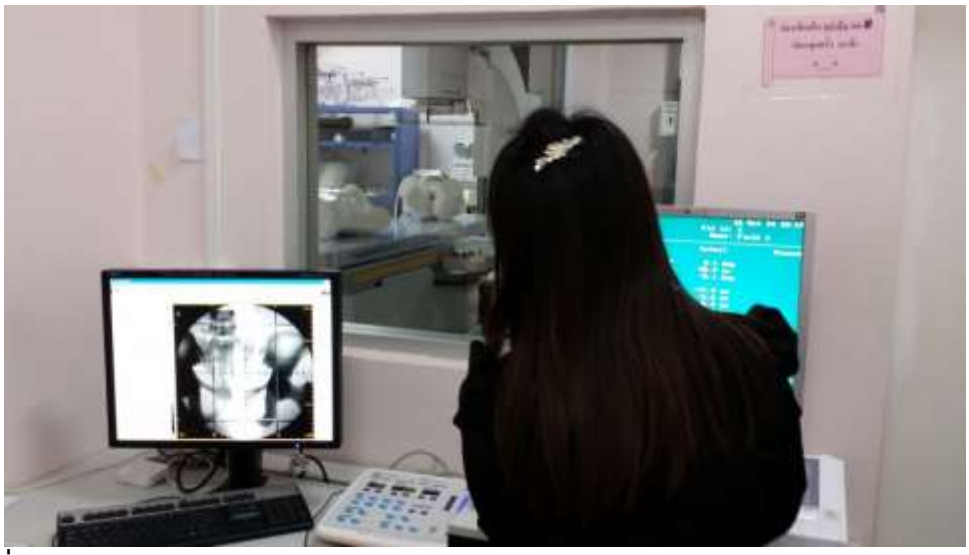
รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความพึงพอใจ
ด้านความเหมือนจริง			
1. ความเหมือนจริงของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์	4.11	0.57	มาก
2. ความสวยงาม	3.89	0.66	มาก
3. ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้	4.21	0.54	มาก
เฉลี่ย	**4.07**	**0.59**	มาก
ด้านการประยุกต์ใช้งานทั่วไป			
4. ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย	4.47	0.61	มาก
5. ความสะดวกในการใช้งาน	4.11	0.66	มาก
6. ความคงทนในการใช้งาน	4.16	0.69	มาก
7. ความสะดวกในการเก็บรักษา	4.16	0.60	มาก
เฉลี่ย	**4.22**	**0.64**	มาก
ด้านการประยุกต์ใช้งานฝึกทักษะการรักษา			
8. สามารถจัดท่าฉายรังสีได้เหมือนจริง	4.16	0.69	มาก
9. ภาพถ่ายรังสีแสดงโครงสร้างอวัยวะที่เหมือนจริง	4.11	0.57	มาก
10. การกำหนดขอบเขตของอวัยวะที่ต้องการฉายและอวัยวะสำคัญ	4.11	0.57	มาก
11.หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มทักษะการรักษา	4.47	0.61	มาก
12.หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสมจริงสำหรับฝึกทักษะการรักษา	4.58	0.61	มากที่สุด
เฉลี่ย	**4.28**	**0.63**	มาก
เฉลี่ยโดยรวมทุกด้าน	**4.21**	**0.63**	มาก

สำหรับคะแนนที่ประเมินโดยนิสิตด้านที่มีผลความพึงพอใจต่ำสุด คือ ด้านความสวยงาม นั้นอาจเป็นเหตุผลเดียวกันจากที่กล่าวมาข้างต้นคือผู้วิจัยไม่ได้ตกแต่งหุ่นจำลองด้วยสีอื่นและความไม่เรียบของผิวหุ่นอันเกิดจากแม่พิมพ์

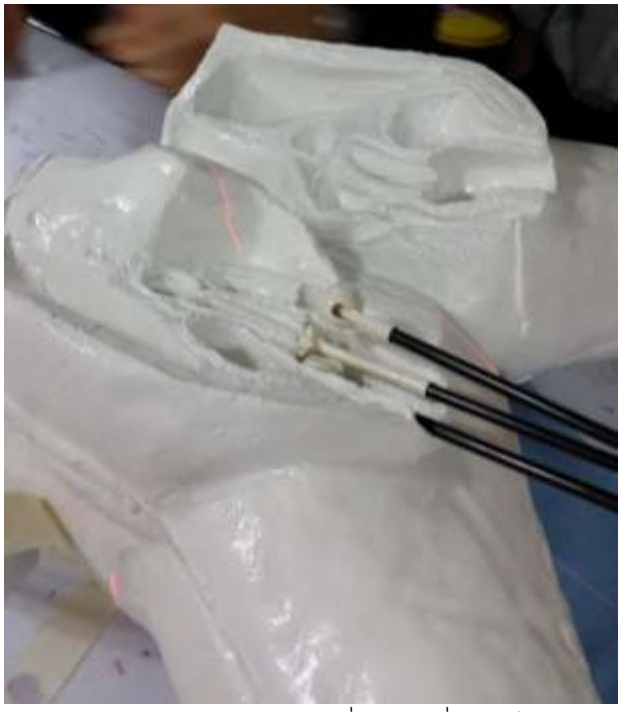
ตารางที่ 12 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อใช้เป็นสื่อในการเรียนการสอน สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูก จากนิสิตรังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 โดยสรุปเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้ประเมิน 47 คน (n=47)

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความพึงพอใจ
1. ความเหมือนจริงของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์	3.94	0.57	มาก
2. ความสวยงาม	3.49	0.72	ปานกลาง
3. ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้	3.85	0.75	มาก
4. น้ำหนักของหุ่นจำลอง	3.96	0.66	มาก
5. หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยให้เข้าใจขั้นตอนและกระบวนการทางรังสีรักษา	4.21	0.59	มาก
6. ต้นทุนในการพัฒนาหุ่นจำลอง	3.70	0.75	มาก
7. ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลอง	4.00	0.55	มาก
8. ประโยชน์ของการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลองในการเรียนการสอน	4.30	0.62	มาก
9. ท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานหุ่นจำลองการเรียนการสอน	4.19	0.54	มาก
เฉลี่ย	**3.96**	**0.68**	มาก

สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้วยการนำจำลองอุ้งเชิงกรานไปจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกทั้งการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ พบว่าหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสามารถนาไปใช้จำลองการรักษาและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกได้จริงแสดงดังภาพที่ 50-57



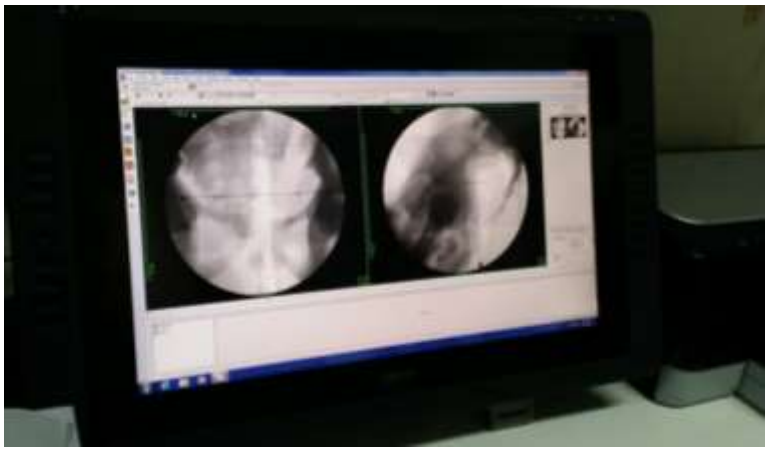
ภาพที่ 50 การสร้างภาพหุ่นจำลองในห้อง conventional simulator หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช



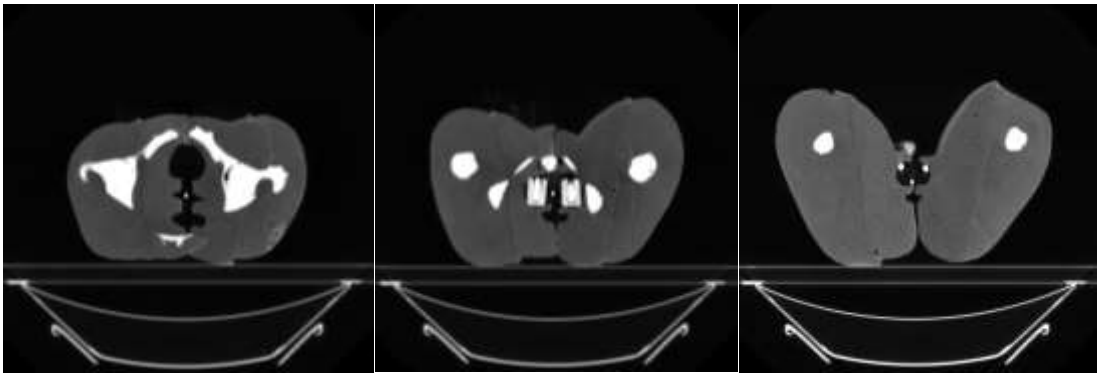
ภาพที่ 51 การใส่ applicator ในหุ่นจำลอง แบบครึ่งเดียวเพื่อให้เห็นการวางตัวของ applicator ภายในช่องคลอดและมดลูก

ภาพที่ 52 แสดงการจำลอง การใส่เครื่องมือสำหรับมะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้

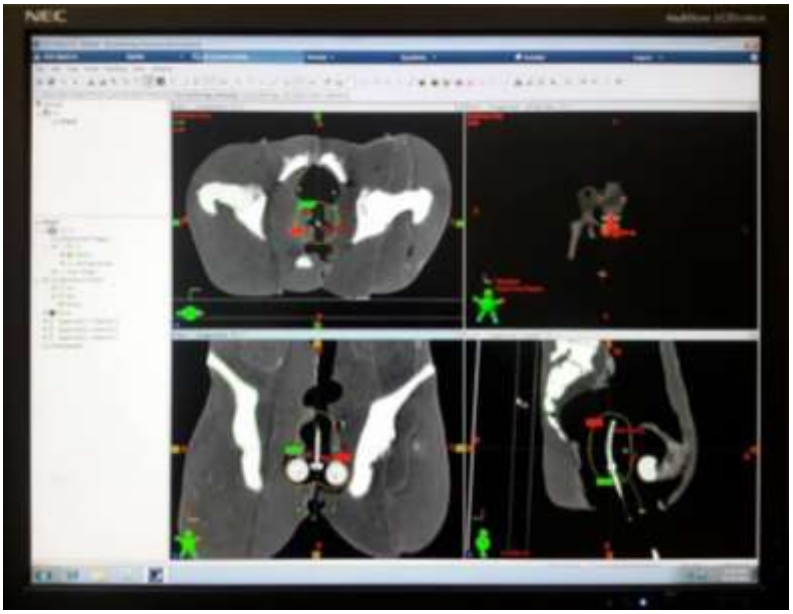
ภาพที่ 53 แสดงภาพ semi-orthogonal radiography ที่ถ่ายจากหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน



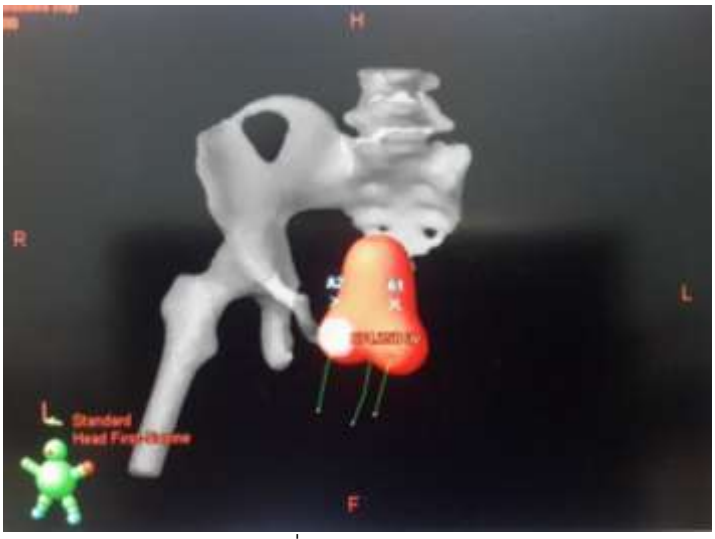
ภาพที่ 54 แสดงการวางแผนการรักษา สำหรับมะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้แบบ 2 มิติ



ภาพที่ 55 แสดงตัวอย่างของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน



ภาพที่ 56 แสดงภาพการวางแผนการรักษามะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ โดยใช้หุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน



ภาพที่ 57 แสดงภาพ 3 มิติของ isodose ที่ได้จากการวางแผนการรักษาจากหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยนี้ได้สูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน ซึ่งสูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ปรับปรุงจากสูตรโฟมยางมาตรฐาน (34) โดยการลดปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวโพแทสเซียมโอลิเอตและเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป ใช้กระบวนการผลิตโฟมยางด้วยวิธีดันลอปด้วยการอบให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งไอน้ำ แม่พิมพ์สำหรับหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานทำขึ้นจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์และซิลิโคน

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานที่ได้สร้างจากสูตรยางพาราที่ได้พัฒนาในงานวิจัยนี้ และจากการใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบขึ้นมีความหนาแน่นประมาณ 0.3470 g/cm^3 สมบัติเชิงของกลของหุ่นจำลอง เช่น ความแข็ง Shore A ความทนแรงดึง (stress, strain and modulus at break) การทนแรงอัด (% การยุบตัวหลังการกดอัด) และการทนแรงฉีกขาด ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากชิ้นงาน Std-sample ยกเว้น %การยุบตัวหลังการกดอัด มีค่าที่ต่ำกว่า Std-sample นั้น เป็นผลมาจากการลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวและมีการเติมสารตัวเติมลงไปซึ่งทำให้ปริมาณฟองในเนื้อยางลดลง และมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความเป็นอีลาสติกของผลิตภัณฑ์ยางลดลง สำหรับการทดสอบความทนทานต่อการฉายรังสีปริมาณ 2-10 เกรย์ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างยางก่อนและหลังการฉายรังสี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานในที่มีรังสีปริมาณ 2-10 เกรย์ โดยสมบัติต่างๆของหุ่นจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานจากยางพารา มีน้ำหนักโดยรวม 4.5 กิโลกรัม ขนาดรอบเอว 68 เซนติเมตร ขนาดรอบสะโพก 86.5 เซนติเมตร และขนาด ต้นขา 55 เซนติเมตร ภายในอุ้งเชิงกรานมี

อวัยวะที่สำคัญ ได้แก่ กระเพาะปัสสาวะ ช่องคลอด มดลูก และทวารหนัก โดยช่องคลอดมีความยาว 7 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตร และความยาวของมดลูก 5 เซนติเมตร สามารถสร้างภาพถ่ายทางรังสีได้ และฝึกทักษะทางด้านการวางแผนการรักษาได้

ผลการทดสอบทางรังสีด้านความแตกต่างของความขาว-ดำในภาพ ระหว่างกระดูกเทียบกับเนื้อเยื่อเท่ากับ -196.88% ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทำให้สามารถสร้างภาพทางรังสีได้ โดยแยกกระดูกกับเนื้อเยื่อได้ ผลการทดสอบด้านความสม่ำเสมอ มีค่าความแตกต่างของเลขซีทีเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเฉลี่ยเท่ากับ 26.5 HU

ผลประเมินความพึงพอใจต่อหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานในการฝึกทักษะการรักษาและวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีระยะใกล้สำหรับมะเร็งปากมดลูกโดยผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา มีค่าเฉลี่ยของคะแนนโดยรวมจากทุกด้านอยู่ที่ 4.21±0.63 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก และผลการประเมินโดยนิสิตรังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 มีความพึงพอใจโดยรวมจากทุกด้าน เฉลี่ยเท่ากับ 3.96±0.68 ซึ่งมีเกณฑ์ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

7. ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างหุ่นในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทั้งแสดงอวัยวะภายในที่สำคัญ และต้องการให้สร้างภาพถ่ายทางรังสีได้เหมือนจริง ดังนั้นจึงเกิดปัญหาในส่วนของการประกบกันของหุ่นจำลองทั้งสองด้านที่ไม่แนบสนิทกัน ดังนั้นผู้วิจัยคิดว่าหากต้องการให้การสร้างภาพมีความเหมือนจริงยิ่งขึ้น และกระดูกจัดวางเรียงอย่างถูกต้องตามหลักกายวิภาคศาสตร์นั้น ควรที่จะแยกวัตถุประสงค์ของหุ่นจำลองโดย หากต้องการศึกษาอวัยวะภายในก็สร้างแบบผ่าครึ่ง แต่หากต้องการสร้างเพื่อประยุกต์ฝึกถ่ายภาพ ก็ควรที่จะทำแบบเต็มตัว ซึ่งหากทำแบบเต็วตัวของอุ้งเชิงกรานนั้นหุ่นจำลองจะสามารถช่วยในการฝึกใส่อุปกรณ์ของรังสีแพทย์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. **C.A. Joslin AF, E.J. Hall**. Principles and Practice of Brachytherapy using afterloading systems. London: Arnold; 2001.

2. เสรี กุญแจนาค, ธีระศักดิ์ พราพงษ์, ขจร กอบสันเทียะ, มาลีวรรณ เหลี่ยมศิริเจริญ, ศิริรักษ์ จันทครุ, ดลดา ศรีใส, ณฐนันท์ มากมี, กรรณิการ์ วงษ์พานิชย์, ทวีวัฒน์ ทัศนวัฒน์,อภินันท์ สุประเสริฐ. การศึกษาประสิทธิภาพการเรียนการสอนโดยการใช้หุ่นจำลองอวัยวะระบบสืบพันธุ์โคจากยางพารา การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาภายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2546. p. 719-24.

3. วรรณดา สุจริต, ศิริรักษ์ จันทครุ, ณฐนันท์ มากมี, ขจร กอบสันเทียะ, อภินันท์ สุประเสริฐ, ดลดา ศรีใส, และ นที นิลนพคุณ ผลของการใช้หุ่นจำลองยางพาราลูกสุกรในการเรียนการสอนวิชาวิทยาเอมบริโอ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2546. p. 714-8.

4. ผกาวดี พงษ์เกษ, และคณะ. ประสิทธิภาพการเรียนจุลกายวิภาคศาสตร์ของอวัยวะระบบรับความรู้สึกพิเศษโดยการใช้หุ่นจำลองยางพารา. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44; กรุงเทพมหานคร: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549. p. 527-32.

5. อภินันท์ สุขประเสริฐ. สื่อรูปหุ่นจำลอง จากยางพารา เพื่อพัฒนาการศึกษา เพิ่มมูลค่ายางพาราไทย. วารสารสัตวแพทย์. 2545;12(2):36-9.

6. อภินันท์ สุประเสริฐ. สิ่งประดิษฐ์หุ่นจำลองยางพารา สื่อการศึกษา สร้างมูลค่าเพิ่ม เสริมการส่งออก. กรุงเทพมหานคร: โครงการวิจัยหุ่นจำลองยางพารา มหาวิทยาลัยเษตรศาสตร์; 2550.

7. บังอร ดวงรัตน์, อรุณี ยันตรปกรณ์, ธัญรดี จิรสินธิปก, วินัย สยอวรรณ, นลินภัสร์ รตนวิบูลย์สุข, นวลปราง สาลีเพ็ง. การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา. วารสารสาธารณสุขและการพัฒนา. 2552;7(1):47-60.

8. วัณณลภ โกวิท, สุธีรา ประดับวงษ์,กฤษฎา สิมมะลี, บวรศิลป์ เชาวน์ชื่น. การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. ศรีนครินทร์เวชสาร. 2554;26(4):259-65.

9. About Cevical cancer. Available from: <http://www.aboutbrachytherapy.com/en-us/patients/cancers/cervical-cancer/Pages/default.aspx>.

10. ชวนชม สกนธวัฒน์ นรีเวชวิทยา. 2535;สำนักพิมพ์ คอมเพรส แอนด์ ดีไซน์ ขอนแก่น(2):9-14.

11. จิรพรรณ แรขาว. การจัดท่า การผลิกตัวผู้ป่วย. 2554 สืบค้นเมื่อวันที่ 21 เมษายน 2556.: เข้าถึงได้จาก : http://www.moondragon.org/obgyn/procedures/symphysiotomy.html.

12. Leather D. Symphysiotomy. 1999 สืบค้นเมื่อวันที่ 21เมษายน 2556:เข้าถึงได้จาก: http://www.moondragon.org/obgyn/procedures/symphysiotomy.html.

13. วาทวัฒนศัก อ. สื่อกับการจัดการเรียนการสอน. 2548 [cited 2556 11 มีนาคม]; Available from: http://www.school.net.th/library/create-web/10000/generality/10000-13295.html.

14. ศรีดาโคตร เ. ระบบและความสำคัญของสื่อการเรียนการสอน. [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: http://www.lib.ubu.ac.th/techno/Down%20Load/bod39.pdf.

15. ลุนอุบล เ, ผาจ้ำ จ, สัมพโว ป, เสาสิมมา ศ. สื่อการเรียนการสอนสมัยใหม่. [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: https://sites.google.com/site/suxkarreiynkarsxnsmayhim/khna-phu-cad-tha.

16. แก้วเครือ พ. สื่อการเรียนการสอน. 2554 [cited 2556 4 เมษายน]; Available from: http://sps.lpru.ac.th/script/show_article.pl?mag_id=5&group_id=23&article_id=194.

17. วิลาทอง ส. นวัตกรรมทางการศึกษา. 2553 [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: http://pomsukanya.blogspot.com/2010/08/blog-post_11.html.

18. โคตะขุน ป. สื่อการสอน / นวัตกรรม. 2011 [cited 2556 12 เมษษยน]; Available from: https://sites.google.com/site/prapasara/p2-5.

19. ประเภทของสื่อการสอน. 2550 [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: http://kanok-orn.blogspot.com/2007/09/blog-post_11.html.

20. และคณะ เ. สื่อวัสดุสามิติ. กรุงเทพมหานคร: เอกสารการสอนวิชาสื่อและเทคโนโลยีการสอน; ม.ป.ป. [cited 2556 30 มีนาคม]; Available from: http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355201/p32-3.html.

21. กาแดง น, แสนอินทร์ต๊ะ ย, ทรัพย์พร้อม ส. การออกแบบ และ ประดิษฐ์หุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบคุณภาพของเอกซเรย์เต้านม The Design and Invention of Mammographic Image Quality Evaluation Phantom. 1 ed. พิษณุโลก: ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเศวร; 2553.

22. 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.

23. Center CsNM. Solid Water Phantom materials. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: http://www.cnmcco.com/dosimetry/PDFdocs/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf.

24. Phantoms RTQC. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: http://www.supertechx-ray.com/QualityControlPhantoms/RadiationTherapyQC.html.

25. สุขประเสริฐ อ. การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็คทรอนิกส์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. [รายงานการวิจัย]. 2548:1-24.

26. กรมวิชาการเกษตร คส. ยางพารา. Para rubber electrnic bulletin [รายงาน]. 2556;1.

27. ภัทรไพบูลย์ชัย อ. การวิจัยเพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติ. 2554 [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: http://www.mtec.or.th/nnrc2011/images/pdf/24june/08.pdf.

28. ศักดาภิพานิชย์ จ. เทคโนโลยียางพารา Natural Rubber Technology. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคโนบิซคอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด 2553.

29. ขจรไชบกูล ว. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน Natural Rubber : Production and Application. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนวิจัย (สกว.); 2549

30. ขจรไชยกูล ว. ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2537.

31. มัฆะเนมี อ, รัตนเสถียร ข. การออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่. 2549;39: 54-63.

32. วรนันท์ คีรีสัตยกุล, ขวัญชัย รัตนเสถียร, อุทุมมา มัฆะเนมี. การออกแบบ การผลิต และประเมินหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนช่องเชิงกรานแบบแบ่งส่วนสำหรับวัดปริมาณรังสี. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่. 2549;39(3):99-106.

33. ตัณฑพันธ์ ก. หุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย. 2554 [cited 2556 16 มีนาคม]; Available from: http://library.dip.go.th/multim5/News/2554/N05975.pdf.

34. ประกายมณีวงศ์ พ, ระนอง นณ, วิชิตชลชัย ณ, พัฒนากุล ว, แจ่มเสมือน ส. การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. 2552.

35. ดวงรัตน์ บ, ยันตรปกรณ์ อ, จิรสินธิปก ธ, สยอวรรณ ว, รตนวิบูลย์สุข น, สาลีเพ็ง น. การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา. วาระสารสาธารณสุขและการพัฒนา. 2552;7(1).

36. ประดับวงษ์ ส, โกวิท ว, สิมมะลี ก, เชาวน์ชื่น บ. การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. ศรีนครินทร์เวชสาร. 2554;26(4).

37. พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์, และคณะ. การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กลุ่มอุตสาหรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. 2552.

38. 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.

39. ASTM. Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams. ASTM D3574-95. Annual Book of ASTM Standards: American Society for Testing and Materials International.

40. ASTM. Standard Test Methods for Rubber Property- Compression set. ASTM D 395-03. Annual Book of ASTM Standards: American Society for Testing and Materials International; 2003.

41. Jerry L. Prince, Links JM. Medical imaging Signals and Systems. New Jersey: Pearson Education; 2006.

42. Sprawls P. Physical Principles of Medical Imaging. 2, editor: Medical Physics Publishing; 1995.

43. AAPM. Quality control in diagnostic radiology. Report No 74 [serial on the Internet]. 2002.

44. บุญชม ศรีสะอาด. การวิจัยเบื้องต้น. 2554;สำนักพิมพ์ สุวีริยาสาส์น จำกัด(9):206-10.

45. 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.

46. Willi A. Kalender. Computed Tomography,. edition n, editor2005.

47. Stewart C. Bushong. Radiologic Science for Technologists: Physics Biology and Protection. 9th
ed2008.

48. Euclid Seeram. Computed Tomography: Physics Principles, Clinical Applications, and Quality Control. Philadelphia2001.

49. Sasa Mutica, Jatinder R. Palta, Elizabeth K. Butker, Indra J. Das, M. Saiful Huq, Leh-Nien Dick Loo, et al. Quality assurance for computed-tomography simulators and the computed-tomography-simulation process: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 66. Medical Physics. 2003;30(10):2762-92.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลอง

ในการพัฒนาสูตรยางเพื่อใช้ทำหุ่นจำลองในขั้นตอนเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยาง เพื่อนำไปประเมินความต้องการและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จะมีการออกแบบสูตรยางเหมือน กับการทำโฟมยาง ซึ่งมี 4 สูตร ดังนี้

สูตรที่ 1 K-Oleate (สารลดแรงตึงผิว) ความเข้มข้น 10% w/w

สูตรที่ 2 ไม่เติมสารเพิ่มฟอง

สูตรที่ 3 $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 4% w/w

สูตรที่ 4 NH_4HCO_3 ความเข้มข้น 4% w/w

โดยสัดส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้เตรียมในสูตรต่างๆแสดงดังตารางข้างล่างนี้

ซึ่งกระบวนการทำให้โฟมยางคงรูปนั้นใช้กระบวนการโฟมยางแบบดันลอป (Dunlop process) ด้วยการเทยางลงแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ให้ความร้อนด้วยเครื่องนึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียล เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างสารเคมีที่ตกค้างที่ชิ้นงานตัวอย่าง แล้วนำชิ้นงานโฟมยางที่ได้ผึ่งลมเป็นเวลาประมาณ 2 วัน

ตารางแสดงสัดส่วนปริมาณน้ำยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้เตรียมตัวอย่างชิ้นงานยาง 4 สูตร

น้ำยางและสารเคมี	ความเข้มข้น %w/w	น้ำหนักเปียก (กรัม)
60% น้ำยางข้น	60	167.0
กำมะถัน (Sulfur)	50	8.0
แซดอีดีซี (ZEDC)	50	4.0
แซดเอ็มบีที (ZMBT)	50	4.0
วิงสเตย์แอล (WingStay L)	50	4.0
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	50	20.0
ดีพีจี (DPG)	33	4.0
เอสเอสเอฟ (SSF)	12.5	8.0

สำหรับชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จะนำมาหาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และนำชิ้นงานไปทดสอบความพึงพอใจของผู้ใช้งานหุ่นจำลอง โดยผู้ประเมินประกอบด้วยแพทย์ทางรังสีรักษา นักฟิสิกส์การแพทย์ และนักรังสีการแพทย์ โดยประเมินในด้านความยืดหยุ่น การคืนรูปและผิวสัมผัสของชิ้นงาน

ภาพแสดงแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์และชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้

สำหรับสมบัติของวัสดุที่ต้องการในการสร้างหุ่นจำลองของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้มาจากการนำข้อมูลที่ได้จากการประเมินความต้องการและความพึงพอใจของผู้ใช้งานในแต่ละด้านมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติที่ต้องการเพื่อให้ภาพถ่ายทางรังสีมีคุณภาพเพียงพอต่อการฝึกทักษะการรักษาทางรังสีรักษาด้วยการพิจารณาจากค่า Uniformity และ Low Contrast detectability สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางพาราใช้การวิเคราะห์ Elasticity, Hardness, Compression, Tensile strength และ Tear strength

1. การประเมินความต้องการและความพึงพอใจของผู้ใช้งานแต่ละด้าน

การประเมินความต้องการและความพึงพอใจชิ้นงานยางพาราเริ่มทำตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2557 โดยได้สอบถามความต้องการใช้งานหุ่นจำลองยางพาราและสอบถามความพึงพอใจในด้านความยืดหยุ่นของชิ้นงาน การคืนรูปของชิ้นงานและผิวสัมผัส โดยมีผู้ประเมินทั้งหมด 27 คน จากโรงพยาบาลพุทธชินราชและโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร แบ่งเป็นเพศชาย 9 คน และหญิง 18 คน ซึ่งทั้งหมดเป็นผู้ที่ปฏิบัติงานในแผนกรังสีรักษา โดยแบ่งตามลักษณะงาน ดังนี้ แพทย์ทางรังสีรักษา 5 คน นักรังสีการแพทย์ 10 คน ผู้ช่วยเหลือคนไข้ 7 คน พยาบาล 4 คน ไม่ระบุ 1 คน ผลการประเมินมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชิ้นงานแสดงดังตาราง

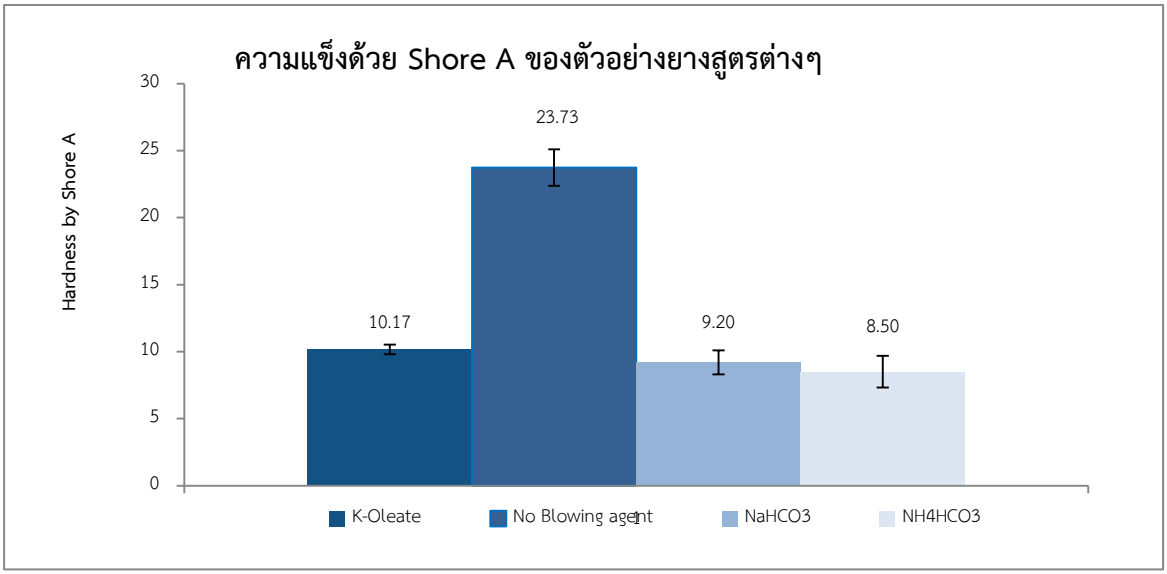
ชิ้นงานที่ / ผลการประเมิน	เกณฑ์ในการประเมิน											
	ความยืดหยุ่นของชิ้นงาน				การคืนรูปของชิ้นงาน				ผิวสัมผัส			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mean	4.11	2.11	2.59	2.37	3.74	2.44	2.85	2.48	3.56	2.48	2.67	2.44
SD	0.89	0.93	1.22	1.04	0.98	1.01	1.23	0.98	1.01	1.01	1.3	1.01

จากระดับผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 นั้น จะได้รับความพึงพอใจทางด้านความยืดหยุ่น การคืนรูปของชิ้นงานและผิวสัมผัสมากที่สุด ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้นั้นพบว่า ชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 มีค่าความแข็งด้วย Shore A เท่ากับ 10.17 ซึ่งเมื่อเทียบกับชิ้นงานตัวอย่าง ที่มีการเติมสารเพิ่มฟองแล้ว (ชิ้นที่ 3 และ 4) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุด ส่วน %การยุบตัวหลังการกดอัดเท่ากับ 7.63 ซึ่งมีค่าการยุบตัวที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ 3 และ 4 นั้นแสดงว่าชิ้นงานตามสูตรที่ 1 นี้มีการคืนรูปหลังจากการกดอัดส่วนการทดสอบทางด้วยการทนแรงดึง และการฉีกขาด พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 นั้นจะมีค่า Stress และ Tear strength ที่สูงที่สุด นั่นแสดงว่าชิ้นงานสูตรนี้จะมีแข็งแรงดีที่สุด

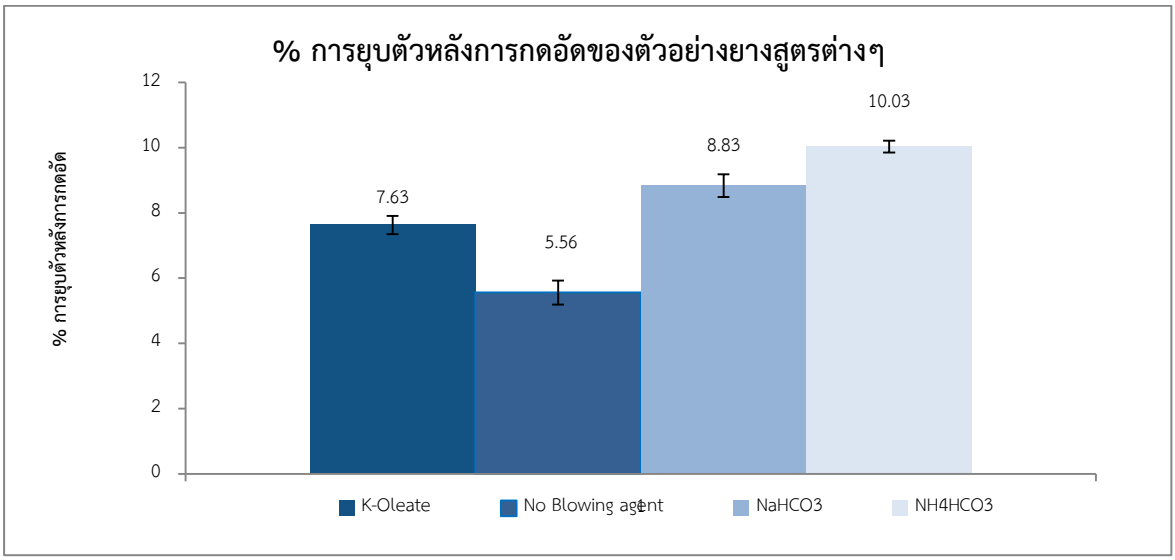
2. การทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยาง 4 สูตร

สมบัติเชิงกลของตัวอย่างยางที่เตรียมได้ทั้ง 4 สูตร

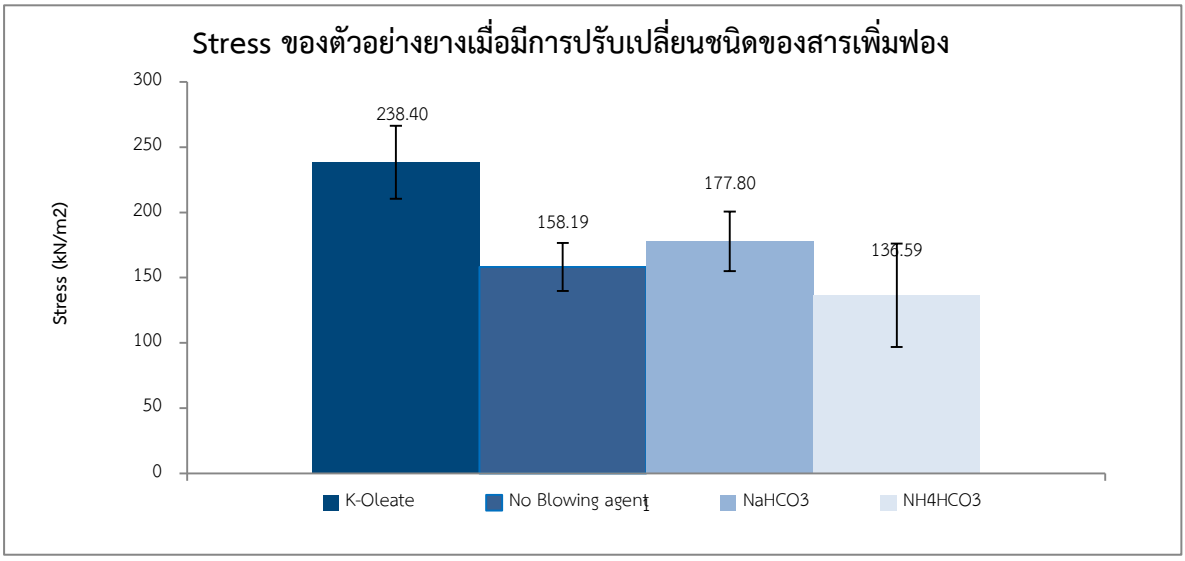
- ความแข็ง (Hardness): ASTM D2240-03

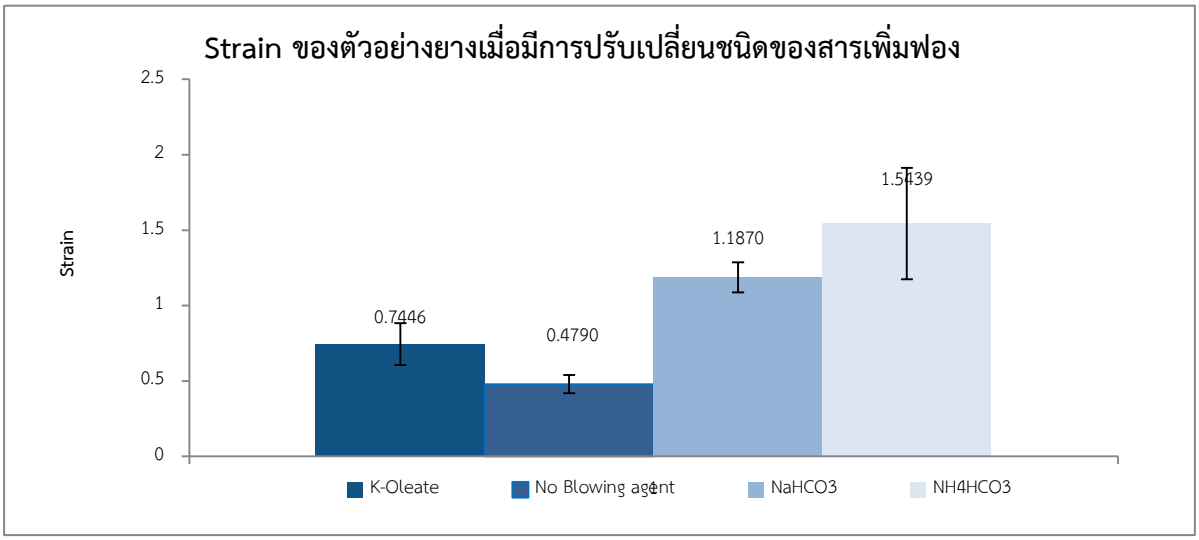


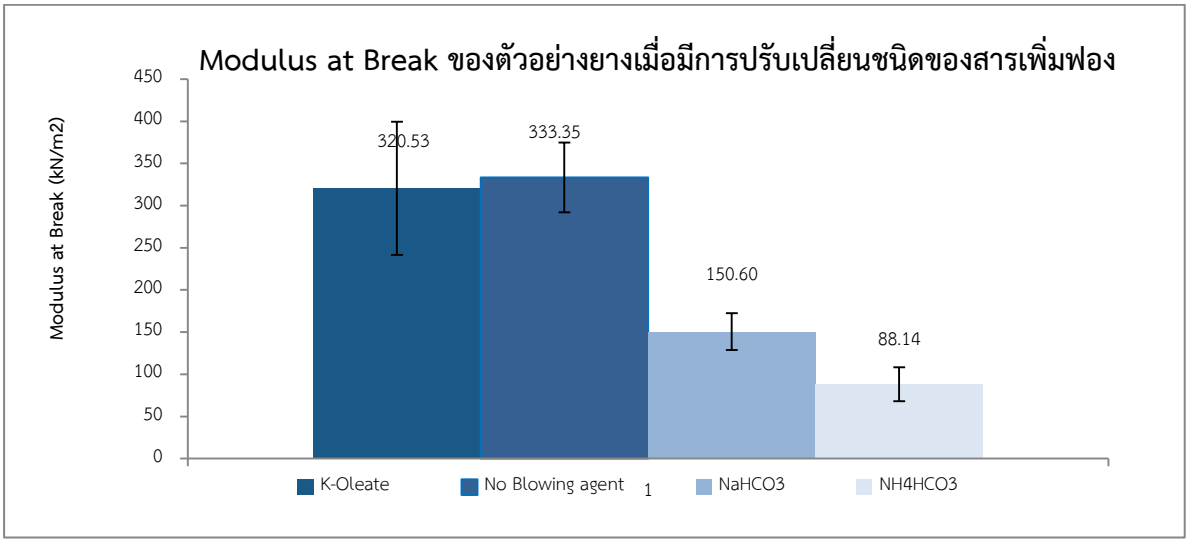
- การทนแรงอัด (Compression Set): ASTM D395-03



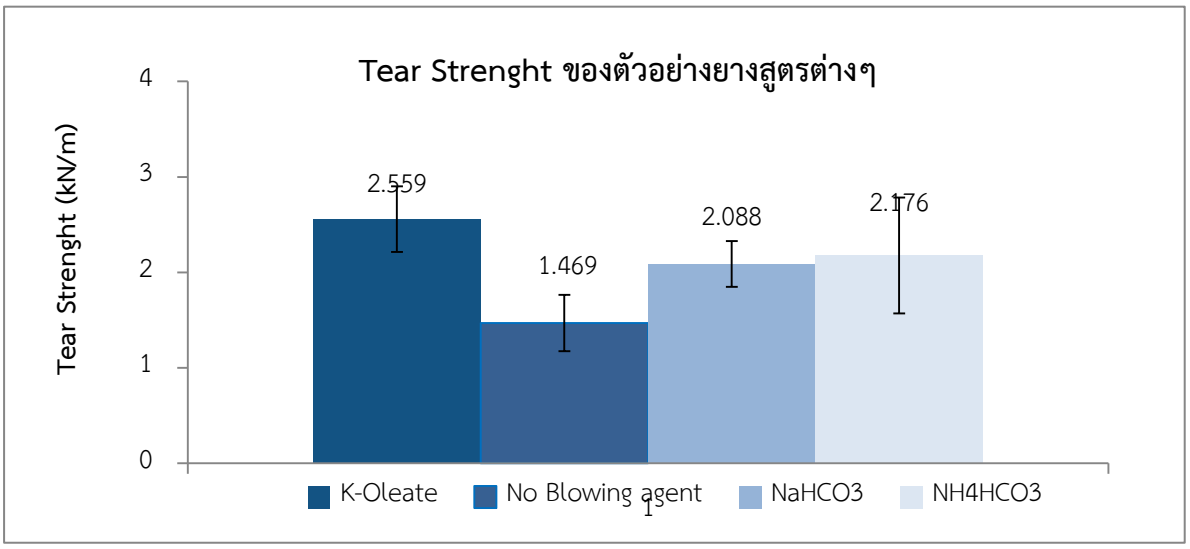
- การทนแรงดึง (Tensile strength): ASTM D 412







- การทนแรงฉีกขาด (Tear strength): ASTM D624-00


Tear Strenght ของตัวอย่างยางสูตรต่างๆ
Tear Strenght (kN/m)
4
3
2
1
0
2.559
1.469
2.088
2.176
K-Oleate
No Blowing agent
NaHCO3
NH4HCO3

ภาคผนวก ข

แบบประเมินความพึงพอใจ

หุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานสำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก

ผู้ประเมิน นิสิตสาขารังสีเทคนิค ชั้นปีที่ 4 คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ระดับการประเมินความพึงพอใจแบ่งออก เป็น 5 ระดับ ดังนี้

ระดับ 5 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ระดับ 4 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ระดับ 3 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

ระดับ 2 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับพอใช้

ระดับ 1 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับต้องปรับปรุง

รายการประเมิน	**ระดับความพึงพอใจ**				
	5	4	3	2	1
1. ความเหมือนจริงของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์					
2. ความสวยงาม					
3. ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้					
4. น้ำหนักของหุ่นจำลอง					
5. หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยให้เข้าใจขั้นตอนและกระบวนการทางรังสีรักษา					
6. ต้นทุนในการพัฒนาหุ่นจำลอง					
7. ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลอง					
8. ประโยชน์ของการประยุกต์ใช้งานของหุ่นจำลองในการเรียนการสอน					
9. ท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานหุ่นจำลองการเรียนการสอน					

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

แบบประเมินความพึงพอใจ

การประยุกต์ใช้งาน การประเมินคุณภาพและความพึงพอใจในการใช้งานของหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก

ผู้ประเมิน

☐ สำหรับนักรังสีการแพทย์ ☐ นักฟิสิกส์การแพทย์ ☐ รังสีแพทย์ ☐ อื่นๆ.....

ระดับการประเมินความพึงพอใจแบ่งออก เป็น 5 ระดับ ดังนี้

ระดับ 5 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ระดับ 4 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ระดับ 3 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

ระดับ 2 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับพอใช้

ระดับ 1 หมายถึง ความพึงพอใจอยู่ในระดับต้องปรับปรุง

รายการประเมิน	**ระดับคุณภาพ**				
	5	4	3	2	1
ด้านความเหมือนจริง					
1. ความเหมือนจริงของลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์					
2. ความสวยงาม					
3. ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้					
ด้านการประยุกต์ใช้งานทั่วไป					
4. ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย					
5. ความสะดวกในการใช้งาน					
6. ความคงทนในการใช้งาน					
7. ความสะดวกในการเก็บรักษา					
ด้านการประยุกต์ใช้งานฝึกทักษะการรักษา					
8. สามารถจัดท่าฉายรังสีได้เหมือนจริง					
9. ภาพถ่ายรังสีแสดงโครงสร้างอวัยวะที่เหมือนจริง					
10.การกำหนดขอบเขตของอวัยวะที่ต้องการฉายและอวัยวะสำคัญ					
11.หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มทักษะการรักษา					
12.หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสมจริงสำหรับฝึกทักษะการรักษา					

ข้อเสนอแนะ

.....

ภาคผนวก ค

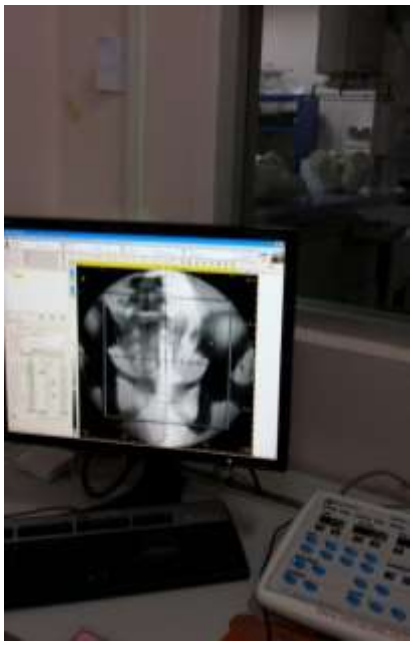
การนำหุ่นจำลองไปประยุกต์ใช้ และประเมินความพึงพอใจ

การนำไปใช้ประโยชน์

หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์เพื่อ เป็นสื่อในการเรียนการสอนโดยให้รายละเอียดด้านกายวิภาคศาสตร์ภายในอุ้งเชิงกราน และสามารถประยุกต์เพื่อฝึกทักษะในการปฏิบัติงาน ได้แก่การสาธิตการใส่อุปกรณ์ เพื่อเพิ่มความเข้าใจแก่ผู้ปฏิบัติงาน การสร้างภาพถ่ายรังสีที่เป็นภาพ semi-orthogonal, orthogonal radiography หรือจำลองการรักษาด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และสามารถใช้ภาพที่ได้ไปประยุกต์ในการจำลองการรักษาทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

การประยุกต์สร้างภาพหุ่นจำลองในห้อง conventional simulator แผนกรังสีรักษาโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร

การประยุกต์สร้างภาพหุ่นจำลองในห้อง conventional simulator หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช จ.พิษณุโลก



การประยุกต์สร้างภาพหุ่นจำลองในห้อง conventional simulator หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช จ.พิษณุโลก

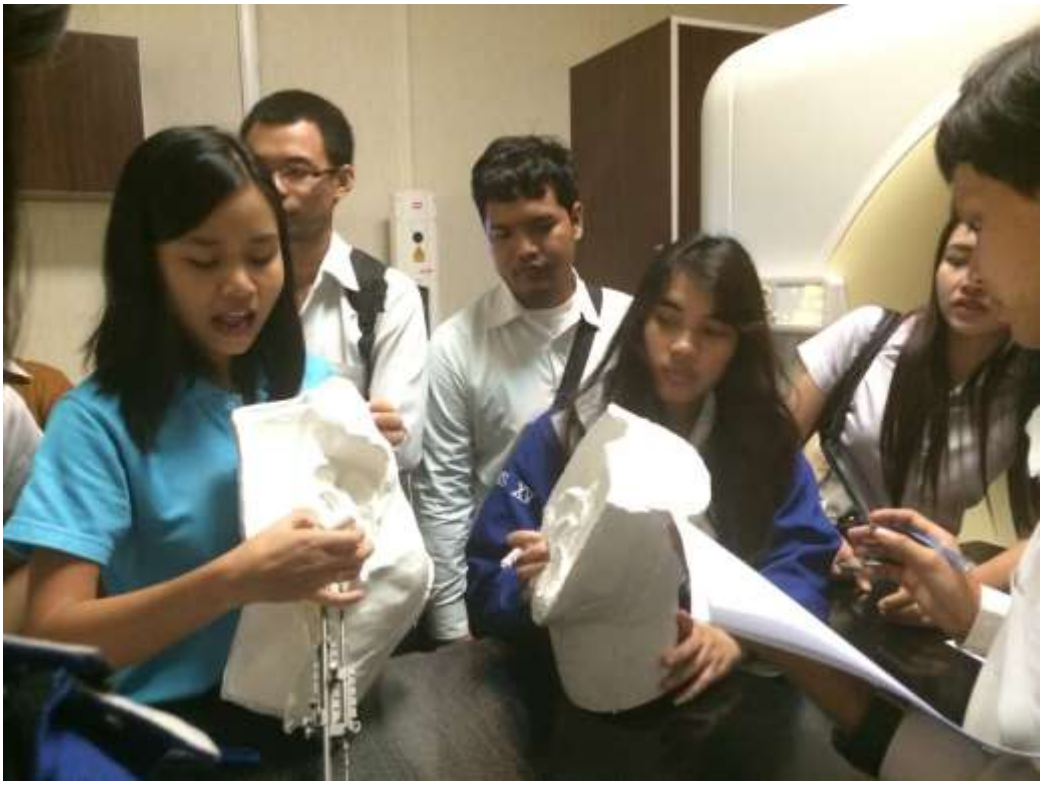
ขั้นตอนการประเมินความพึงพอจต่อหุ่นจำลอง โดยรังสีแพทย์ นักฟิสิกส์การแพทย์และนักรังสีการแพทย์ ด้วยเครื่อง conventional simulator หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช จ. พิษณุโลก

แสดงการจำลอง การใส่เครื่องมือสำหรับมะเร็งปากมดลูกด้วยรังสีระยะใกล้ พร้อมกับการฝึกสร้างภาพในห้อง C-arm หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช จ.พิษณุโลก

แสดงการจำลองการใส่แร่ โดยใช้หุ่นจำลองแทนตัวอยู่ป่วย หน่วยรังสีรักษา โรงพยาบาลพุทธชินราช จ.พิษณุโลก

แสดงการประยุกต์หุ่นจำลองในการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เพื่อประโยชน์ต่อการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติ

แสดงภาพ scout view จากเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา



ภาพแสดงการประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำาหรับการเรียนการสอน การใส่ applicator สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก แผนกรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ภาพแสดงการประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำาหรับการเรียนการสอนด้วยเครื่อง CT simulator แผนกรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ภาคผนวก ง

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินมา	ผลที่ได้รับ
1. เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานเพื่อเป็นสื่อในการเรียนการสอนและฝึกทักษะ ของการฉายรังสีระยะใกล้ สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก 2. เพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะและเป็นสื่อในการเรียนการสอนของการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปากมดลูกของการฉายรังสีระยะใกล้ 3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของหุ่นจำลองที่ผลิตขึ้นในด้านการใช้งานและความสมจริง และการเป็นสื่อการเรียนการสอน	1. พัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางฟองน้ำสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา โดยสร้างชิ้นงานจากสูตรต่างๆ และนำไปให้ผู้ใช้งานประเมินความพึงพอใจ	สร้างชิ้นงานจากสูตรต่างๆ และนำไปให้ผู้ใช้งานประเมินความพึงพอใจ จากนั้นใช้สูตรที่พัฒนาและเทคนิคการทำยางฟองน้ำสร้างหุ่นจำลองจากยางพารา	ได้สูตรยางพาราที่ได้ความหนาแน่นของยางพารามีคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการตามชิ้นงานที่ผู้ใช้งานพึงพอใจมากที่สุด
	2. ออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน โดยพัฒนาสำหรับการศึกษาด้านกายวิภาคศาสตร์ และการจำลองการใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่	ออกแบบหุ่นจำลองอุ้งเชิงกรานโดย ให้มีขนาดตามมาตรฐานที่ศึกษามา ออกแบบให้มีส่วนที่สามารถใส่อุปกรณ์สอดใส่แร่ เพื่อจำลองให้เห็นตัวอย่างการใส่อุปกรณ์จริง และสร้างภาพเอกซเรย์หุ่นจำลอง	ได้แบบของหุ่นจำลอง ที่ต้องการ
	3. ปั้นหุ่นต้นแบบตามที่ออกแบบไว้	ปั้นหุ่นจำลองต้นแบบโดยอาจารย์จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร	ได้หุ่นจำลองต้นแบบจากดินน้ำมัน ที่มีขนาดรูปร่างตามที่ออกแบบไว้
	4. สร้างแม่พิมพ์และหล่อแบบหุ่นจำลอง และสร้างแม่พิมพ์ของกระดูกส่วนต่างๆ	สร้างแม่พิมพ์จากปูนปลาสเตอร์และซิลิโคน โดยถอดแบบโดยอาจารย์จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	ได้แม่พิมพ์
	5. สร้างหุ่นจำลอง	สร้างหุ่นจำลอง ที่มีกระดูกอุ้งเชิงกรานภายใน	ได้หุ่นจำลอง ทั้ง 2 ด้าน ที่สามารถนำมาประกบกันได้
	6. ประยุกต์ใช้หุ่นจำลอง	นำหุ่นจำลองมาประยุกต์ใช้	ได้ผลการประเมินความพึง

	เพื่อการศึกษาของนิสิต เพื่อให้เห็นภาพของการใส่อุปกรณ์ รวมถึงการนำหุ่นไปประยุกต์สร้างภาพเอกซเรย์ 2 มิติ และ ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	ในการเรียนการสอน และการใช้งาน สร้างภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และภาพเอกซเรย์ 2 มิติ และประเมินความพึงพอใจของนิสิตรังสีเทคนิค และผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรักษา	พอใจเพื่อวิเคราะห์ ความเหมาสมของการใช้งานของหุ่นจำลอง
	7. ทำการวิเคราะห์และเขียนรายงานผลสำหรับหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน เพื่อการฝึกทักษะการสร้างภาพเอกซเรย์คอมพิเตอร์สำหรับการรักษามะเร็งปากมดลูก ด้วยรังสีระยะใกล้	เขียนรายงาน วิเคราะห์ผลการทดลอง และจัดพิมพ์รายงานฉบับสมบูรณ์	ได้รายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

โครงการ การพัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับฝึกทักษะวางแผนการรักษามะเร็งเต้านมทางรังสีรักษา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินมา	ผลที่ได้รับ
1. พัฒนาหุ่นจำลองทรวงอกเพื่อการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาและจำลองการรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งเต้านม 2. ประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองในการฝึกทักษะการวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมในงานรังสีรักษา 3. เพื่อทดสอบ/ประเมินคุณภาพและความพึงพอใจของหุ่นจำลองที่ผลิตขึ้นในด้านการใช้งานและความสมจริง	- ออกแบบหุ่นจำลองทรวงอก - พัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา - ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล	- ออกแบบหุ่นจำลองทรวงอกให้มีขนาดใกล้เคียงกับมนุษย์จริง - พัฒนาสูตรยางพาราและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา -สร้างชิ้นงานจากสูตรการขึ้นรูปชนิดต่างๆ และนำไปประเมินความพึงพอใจโดยผู้ใช้งาน - ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล	- ได้แบบหุ่นจำลองยางพาราสำหรับทำแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปยางพารา - สูตรยางพาราที่ได้มีความหนาแน่นและคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการที่ผู้ใช้งานพึงพอใจมากที่สุด
	- สร้างหุ่นจำลองสำหรับฝึกทักษะการจำลองการรักษา	-ปั้นแม่แบบหุ่นจำลองต้นแบบโดยอาจารย์จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร -นำสูตรการขึ้นรูปยางพาราที่เหมาะสมที่สุดจากการประเมินไปทำการสร้างหุ่นจำลองด้วยเทคนิคการทำยางฟองน้ำ	- ได้แบบของหุ่นจำลองตามที่ต้องการ
	- ประยุกต์ใช้และประเมินความพึงพอใจหุ่นจำลองสำหรับฝึกทักษะการจำลองการรักษา	- ประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับการจำลองและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยเครื่องเอกซเรย์จำลองการรักษาและเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV โดยประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนทั้งนิสิตรังสีเทคนิคและผู้ปฏิบัติงานรังสีรักษา	ได้ผลการประเมิณความพึงพอใจการประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองทรวงอกสำหรับการฝึกทักษะการจำลองและวางแผนการรักษาผู้ป่วยมะเร็งเต้านม

	- วิเคราะห์ เขียนรายงานผล สรุป และนำเสนอรายงาน	- วิเคราะห์ข้อมูลสูตรยางพารา และเทคนิคการทำยางคงรูป สำหรับการทำหุ่นจำลองจาก ยางพารา -วิเคราะห์ข้อมูลผลการ ประเมินความพึงพอใจการ ประยุกต์ใช้งานหุ่นจำลองทรวง อกสำหรับการฝึกทักษะการ จำลองและวางแผนการรักษา ผู้ป่วยมะเร็งเต้านม	ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับ การเขียนรายงานและสรุปผล รายงานฉบับสมบูรณ์