



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “หุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความ
ถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งด้วยเทคนิคการ
รักษาสามิติ”

โดย ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อู่ดี และคณะ

เมษายน 2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “หุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความ ถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งด้วยเทคนิคการ รักษาสามิติ”

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.นันทวัฒน์ อยู่ดี	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3. ดร.ฐิติพงศ์ แก้วเหล็ก	ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

โครงการ “หุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็ง
ด้วยเทคนิคการรักษาสามิติ”

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย รหัสโครงการ RDG5950015 ที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำชิ้นงานและการทดสอบชิ้นงาน ตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปหุ่นจำลอง ขอขอบคุณภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร และโรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี จ.ลพบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบจำลองการรักษา การวางแผนการรักษา และวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

รายงานการวิจัยนี้มีความสมบูรณ์โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านจากหน่วยงานดังกล่าวข้างต้นมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร.....	12
ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	12
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	13
ผลการดำเนินงาน	13
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	15
สรุปผลการวิจัย.....	19
ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม.....	20
ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	20
บทคัดย่อ.....	21
ABSTRACT.....	22
บทที่ 1	23
ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	23
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	24
บทที่ 2	25
ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย	25
บทที่ 3	41
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
สมมติฐานการวิจัย	41
ระเบียบวิธีวิจัย.....	41
บทที่ 4	63
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	63
บทที่ 5	100
สรุปผล.....	100
ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก	105

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงหุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2558 จาก http://www.cnmcco.com/dosimetry	28
ภาพที่ 2 แสดงหุ่นจำลองชนิด Cube Phantom สืบค้นเมื่อ 30 มีนาคม 2558 จาก http://www.supertechx-ray.com	28
ภาพที่ 3 แสดงหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก http://www.cirsinc.com/products/all/	29
ภาพที่ 4 แสดงหุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก http://www.supertechx-ray.com/pics/Anthropomorphic/Alderson/ART-1small.jpg	30
ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างไฟล์ภาพสามมิติและวัตถุที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer) สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก http://www.print3dd.com/what-is-3d-printer-how-many-type/#	31
ภาพที่ 6 แสดงหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ระบบฉีดเส้นพลาสติก สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#howitworks	32
ภาพที่ 7 การจำลองการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก http://radiotherapy.in/case2.html	37
ภาพที่ 8 แสดงการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก http://www.aboutcancer.com/throat.htm	37
ภาพที่ 9 फिल्मเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก https://www.researchgate.net	38
ภาพที่ 10 การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก http://img.medscape.com	39
ภาพ 11 การออกแบบหุ่นจำลองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp.....	42
ภาพ 12 การออกแบบหุ่นจำลองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp.....	43

ภาพที่ 13 โครงสร้างและส่วนประกอบหัววัดรังสี IC ขนาด 0.6 cc ของบริษัท PTW และการออกแบบช่องใส่หัววัดรังสีที่มีรูปร่างและขนาดเท่ากับหัววัดรังสีขนาด 0.6 cc ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp....	43
ภาพ 14 การออกแบบฝาปิดหุ่นจำลองทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร พร้อมช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc ที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp.....	44
ภาพ 15 หุ่นจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ประกอบกันโดยมีฟิล์มวัดรังสีอยู่กึ่งกลาง.....	44
ภาพ 16 การตั้งค่าการพิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม CreatBot	45
ภาพ 17 การตั้งค่าการพิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม CreatBot	46
ภาพ 18 การตั้งค่าการพิมพ์ฝาปิดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร พร้อมช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc โดยใช้โปรแกรม CreatBot.....	46
ภาพ 19 การตั้งค่าการพิมพ์ช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc โดยใช้โปรแกรม CreatBot.....	47
ภาพ 20 เครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอ	47
ภาพที่ 21 แสดงเครื่องมือทดสอบความแข็ง.....	52
ภาพที่ 22 แสดงเครื่องมือทดสอบการทนแรงดึง	53
ภาพที่ 23 แสดง Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing.....	53
ภาพที่ 24 แสดง Thermalgravimetric Analyser (TGA).....	54
ภาพที่ 25 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) MV ใน solid water phantom อัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU ความกว้างลำรังสี 30x30 ตารางเซนติเมตร ระยะต้นกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลย์เนื้อเยื่อเท่ากับ 95 เซนติเมตร วางชิ้นงานยางพาราที่ระยะความลึกจากผิววัสดุสมมูลย์เนื้อเยื่อเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	55
ภาพที่ 26 แสดงรูปร่างและตำแหน่งชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ใช้ทดสอบการหดตัว.....	57
ภาพ 27 แม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มีช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 CC ซึ่งยึดด้วยฝาปิดที่เปิดโล่งบางส่วน	63

ภาพ 28 แม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร วางประกบกันในแนวตั้งและแนวนอนทำให้ได้ความยาว 30 เซนติเมตร โดยบริเวณรอยต่อใช้สำหรับการวางฟิล์มวัดรังสีชนิด GafChromic film	64
ภาพที่ 29 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ	68
ภาพที่ 30 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ	69
ภาพที่ 31 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ.....	69
ภาพที่ 33 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ	71
ภาพที่ 34 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ	71
ภาพที่ 35 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ	72
ภาพที่ 36 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่สปีดาร์ต่างๆและ aging (a) และกราฟที่ overlay (b).....	74
ภาพที่ 37 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 1.....	75
ภาพที่ 38 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 2.....	75
ภาพที่ 39 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 3.....	76
ภาพที่ 40 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 4.....	76
ภาพที่ 41 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 5.....	77
ภาพที่ 42 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 6.....	77
ภาพที่ 43 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 2D.....	78
ภาพที่ 44 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 7D.....	78
ภาพที่ 45 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 14D.....	79
ภาพที่ 46 การฉายรังสีชิ้นงานตัวอย่างในช่วงตั้งแต่ 1,000-6,000 cGyด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU	80

ภาพที่ 47 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์.....	81
ภาพที่ 48 TearStrength ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์	82
ภาพที่ 49 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์.....	83
ภาพที่ 50 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์	83
ภาพที่ 51 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์	84
ภาพที่ 52 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์	84
ภาพที่ 53 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่สัปดาห์ต่างๆและ aging (a) และกราฟที่ overlay (b).....	86
ภาพที่ 54 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W1.....	87
ภาพที่ 55 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W2.....	87
ภาพที่ 56 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W3.....	88
ภาพที่ 57 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W4.....	88
ภาพที่ 58 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W5.....	89
ภาพที่ 59 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W6.....	89
ภาพ 60 หุ่นจำลองศีรษะและลำคอรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร ภายในบรรจุยางพารา.....	90
ภาพที่ 61 เปอร์เซ็นต์การหดตัวในแนวนอนของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ.....	92
ภาพที่ 62 เปอร์เซ็นต์การหดตัวในแนวตั้งของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ	92
ภาพ 63 การประเมินค่าความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา	95
ภาพ 64 ทิศทางการเข้าของลำรังสีจากการวางแผนการรักษาแบบสองมิติ	96
ภาพ 65 ทิศทางการเข้าของลำรังสีจากการวางแผนการรักษาแบบสามมิติ	97

ภาพ 66 ผลการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์การรักษา	97
ภาพ 67 การจัดตำแหน่งการฉายรังสีหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ	98

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง ปี 2550–2554 (20)	33
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสด	34
ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (29)	48
ตารางที่ 4 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา	49
ตารางที่ 5 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ	51
ตารางที่ 6 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ	56
ตารางที่ 7 รายละเอียดระยะเวลาการฉายรังสีชิ้นงานตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy	56
ตารางที่ 8 การประเมินความถูกต้องปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา ...	61
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์.....	66
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์	66
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ	67
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ.....	67
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว(Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่สัปดาห์ต่างๆและ aging	73
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ปริมาณ 1000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์	80
ตารางที่ 15 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อฉายรังสี X-Ray ปริมาณ 1000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์.....	81
ตารางที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว(Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่างยางหลังฉายรังสี.....	85
ตารางที่ 17 ค่า %ความชื้นและอุณหภูมิของชิ้นงานยางพาราในแต่ละสัปดาห์	91

ตาราง 18 ผลการทดสอบค่า CT number ของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอในตำแหน่งต่างๆ	93
ตาราง 19 ผลการประเมินค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอในตำแหน่งต่างๆ	94
ตาราง 20 ผลการประเมินค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาในตำแหน่งต่างๆ	95
ตาราง 21 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ	99
ตาราง 22 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 3 มิติ	99

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) หุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งด้วยเทคนิคการรักษาสามมิติ

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาอังกฤษ) Para Rubber Phantom for Radiation Dose Verification of 3D Cancer Treatment Radiation Therapy

หัวหน้าโครงการ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ อู่ดี

หน่วยงานต้นสังกัด : ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

หน่วยงานร่วมโครงการ : คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาควิชารังสีวิทยา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร

โรงพยาบาลมะเร็งลพบุรี จ.ลพบุรี

ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การรักษาด้วยวิธีการฉายรังสีเป็นอีกวิธีการรักษาที่ยอมรับกันในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถรักษาให้หายขาดได้ รูปแบบการรักษาใช้การให้รังสีพลังงานสูงกับผู้ป่วยเพื่อฆ่าเซลล์มะเร็งที่เป้าหมาย โดยกำหนดพื้นที่ในการฉายรังสีให้ครอบคลุมเขตจำกัดเพื่อไม่ให้อวัยวะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องได้รับรังสี ส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการรักษาด้วยวิธีการอื่น เช่น เคมีบำบัด การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษานิยมใช้วิธีการรักษาด้วยรังสีระยะไกล(Teletherapy) (1-4) โดยการรักษาด้วยรังสีระยะไกลเป็นการฉายรังสีปริมาณสูงจากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 ล้านโวลต์ ผ่านอวัยวะปกติและเข้าไปยังก้อนมะเร็ง อย่างไรก็ตามการรักษาด้วยการให้รังสีปริมาณสูงที่ก้อนมะเร็งนั้นต้องการความถูกต้องและแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งการรักษาที่สูงมาก เนื่องจากหากมีการผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้เกิดภาวะข้างเคียงจากการที่อวัยวะปกติได้รับรังสีเป็นอย่างมาก สมาคมนักฟิสิกส์การแพทย์ประเทศอเมริกา (5) ได้ให้ข้อแนะนำว่าควรใช้หุ่นจำลองในการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณรังสีที่ให้กับผู้ป่วยมีความถูกต้องเพียงพอต่อการรักษา ปัจจุบันมีหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีขายในท้องตลาดซึ่งจะต้องนำเข้าแต่เนื่องจากมีราคาที่สูงมากทำให้ในสถานพยาบาลต่างๆ ไม่สามารถซื้อใช้ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีทางรังสีรักษาด้วยหุ่นจำลองแทนผู้ป่วยจริงมีความจำเป็นอย่างมากเนื่องจากจะทำให้แพทย์และนักฟิสิกส์การแพทย์มั่นใจได้ว่าแผนการรักษาของผู้ป่วยมีความถูกต้องและแม่นยำ ตลอดจนป้องกันการผิดพลาดที่เกิดจากการให้ปริมาณคลาดเคลื่อน คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกที่ภายในบรรจุยางพาราซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์เพื่อนำมาใช้ในการเป็นแม่พิมพ์หุ่นจำลอง โดยสามารถทำการออกแบบให้หุ่นจำลองมีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยทำการพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาขนาดมาตรฐานสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีก่อนการ

รักษาผู้ป่วยจริงได้ในทุกตำแหน่งของร่างกายทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้จากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาด

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อให้ได้เทคโนโลยีการสร้างหุ่นจำลองมาตรฐานสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งที่สามารถใช้ได้จริง
- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูงต่อไป
- 3) เพื่อให้โรงพยาบาลและศูนย์มะเร็งต่างๆ สามารถนำหุ่นจำลองทางรังสีรักษาที่สร้างขึ้นไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีสำหรับการรักษาผู้ป่วยมะเร็ง

ผลการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

ออกแบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp โดยให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ภายในมีลักษณะเป็นช่องกลวงสำหรับใส่ยางพาราและหัววัดรังสีที่กึ่งกลางหุ่นจำลอง การศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งหุ่นจำลองออกเป็น 2 ชิ้น โดยหุ่นจำลองชิ้นแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชิ้นที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สำหรับการสร้างหุ่นจำลองทรงกระบอกด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในการเป็นแม่พิมพ์สำหรับเทยางพาราใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั้งความแข็งแรงทนทาน ความสามารถในการกันน้ำรั่ว การทนความร้อนจากการอบน้ำยางพารา และความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐานทำให้ได้สูตรยางพาราเพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ โดยได้ทำการหาปริมาณการใช้ SSF ที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถสร้างหุ่นจำลองยางพาราที่มีความคงรูปได้ จากนั้นศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความหนาแน่นของชิ้นงานยางที่เตรียมได้ตามมาตรฐานสากล

- 1) สมบัติความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03
- 2) สมบัติการทนแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 412
- 3) สมบัติการทนแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 624-00
- 4) ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging
- 5) สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ขึ้นรูปหุ่นจำลองด้วยเทคนิคการหล่อเข้าพิมพ์ (Casting Process) เพื่อให้การควบคุมความหนาแน่นในเนื้ออย่างทั้งตัวหุ่นจำลองได้ดีกว่าและทำให้พัฒนาความหนาแน่นได้ตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการสำหรับการสร้างหุ่นยางพาราประกอบด้วย การตวงน้ำยางพาราและสารเคมี บ่มน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีต่างๆ ในถังที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยกวนน้ำยางพาราอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วรอบประมาณ 20-40 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนน้ำยางพาราเกิดการคงรูปบางส่วนซึ่งทำการทดสอบด้วย Chloroform ประมาณ คลอโรฟอร์มเบอร์ 2.5 ซึ่งทำให้โมเลกุลของยางคงรูปปานกลาง โดยยางพาราที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ไม่เหนียวจนเกินไป ทำการเติม 12.5% SSF และสารเคมีต่างๆ กรองน้ำยางพาราและเทลงในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ ตั้งแม่พิมพ์ที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้ เพื่อให้ น้ำยางพาราเกิดการเซตตัวหรือน้ำยางจับตัวกันดีแล้ว นำน้ำยางพาราที่เทลงในแม่พิมพ์แล้วไปทำการอบให้น้ำยางพาราเกิดการคงรูปด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้แช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อชะล้างสารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด และอบให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

ทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพาราที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการประเมินชิ้นงานตัวอย่างยางเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยทำการฉายรังสีชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU ฉายรังสีตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy โดยทำการฉายรังสีชิ้นงานซ้ำและต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ กำหนดการฉายรังสีแต่ละครั้งในสัปดาห์เท่ากับ 1,000 cGy โดยในสัปดาห์ที่ 2 ฉายปริมาณรังสีเพิ่มอีก 1,000 cGy และทำการฉายรังสีเพิ่มในลักษณะเช่นนี้เป็นระยะเวลาติดต่อกันรวมระยะเวลา 1.5 เดือน ทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการสังเกต ทดสอบการรักษารูปร่างของชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์

สร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราที่ได้จากขั้นตอนการพัฒนาสูตร และเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา โดยทำการเทน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีตามสูตรลงในหุ่นจำลองทรงกระบอกที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ จากนั้นปิดฝาว่างช่องใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลอง และทำการอบให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 5 การศึกษาการหดตัวของชิ้นงาน

ทดสอบการหดตัวของชิ้นงานตลอดระยะเวลา 6 เดือน เพื่อทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว ด้วยการเตรียมชิ้นงานยางพารา จำนวน 5 ชิ้น วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นตัวอย่างด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) โดยทำการวัดค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นงานทุกสัปดาห์เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอน

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

ทำการประเมินค่า CT number ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron density) และค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ภายในหุ่นจำลองเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของน้ำ

ขั้นตอนที่ 7 การวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

วางแผนการรักษาหุ่นจำลองยางพาราด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ทำการวางแผนการรักษาด้วยเทคนิค SAD technique กำหนด isocenter ที่กึ่งกลางหุ่นจำลอง (กึ่งกลาง sensitive volume ของหัววัดรังสี) กำหนดให้ปริมาณรังสีเท่ากับ 100 cGy จากนั้นส่งข้อมูลแผนการรักษาไปห้องฉายรังสีเพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีตามแผนการ

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบหุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสี

ประเมินความถูกต้องของหุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเทคนิคการรักษาตามแผนการรักษา ทำการวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ขนาด 0.6 cc ในตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองจำนวน 3 ครั้ง แก้ค่าอุณหภูมิและความดัน (Temperature & Pressure correction) ระหว่างการวัดค่าปริมาณรังสี คำนวณค่าการดูดกลืนปริมาณรังสีในน้ำ ($D_{w,Q}$) มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gy)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

ผลออกแบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอและสร้างแม่พิมพ์ทำให้ได้แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงกระบอกจำนวน 2 ชิ้น ที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ได้ออกแบบ การออกแบบให้มีช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 CC ซึ่งยึดด้วยฝาปิดที่เปิดโล่งบางส่วนทำให้น้ำยางพาราเกิดการระเหยได้ดีในกระบวนการอบยางพารา เมื่อประกอบหุ่นจำลองทั้ง 2 เข้าด้วยกันทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีความยาว 30 เซนติเมตร โดยระหว่างรอยต่อหุ่นจำลองสามารถวางฟิล์มวัดรังสีชนิด GafChromic film เพื่อประเมินค่าการกระจายปริมาณรังสีได้ทั้งเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติ

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพจากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ โดยการเติมสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) พบว่าปริมาณที่เหมาะสมจากการศึกษาได้จากการเติม 12.5% โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (20 g. SSF) ขนาด 20 กรัม ซึ่งเป็นสูตรที่เวลาในเซตตัวและสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุด ผลการขึ้นรูปชิ้นงานยางพาราพบว่าเมื่อล้างสารเคมีต่างๆ ออกจากชิ้นงานด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 °C แล้วนำไปอบให้แห้ง พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางพารามีสีเหลืองน้ำตาลโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อสัมผัสด้วยตาเปล่า โดยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ที่เกิดจากการ Aging ไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยชิ้นงานที่ผ่านการ Aging ที่ Day 7 และ Day 14 มีลักษณะพื้นผิวและสีไม่แตกต่างกัน แต่การ

ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลอาจจะมีแสงไม่พอเพียงและไม่เท่ากันในการถ่ายรูปแต่ละครั้ง เพื่อความแน่นอนทาง คณะผู้วิจัยทำการวัดสีเปรียบเทียบกับด้วยเครื่อง Colorimeter ซึ่งการทดสอบจะวัดค่า color parameter ; L^* , a^* , b^* พบว่าค่า L^* ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ และ ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging มีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนค่า a^* และ b^* ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging มีค่ามากกว่าเล็กน้อย ค่า a^* และ b^* ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง แสดงว่าชิ้นงานยางพารา มีสีแดงและเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่า a^* เพิ่มขึ้นเพียง 1.34 และค่า b^* เพิ่มขึ้น 2.03 สำหรับความหนาแน่น ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นใช้วิธีการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นและการหดตัวของชิ้นงานเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นสภาวะของการนำไปใช้งานจริง พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง ยางพารามีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง

สำหรับการทดสอบหาสมบัติเชิงกลประกอบด้วยค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทน ต่อการฉีกขาด พบว่าการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) มีค่าความแข็งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ความแข็ง พบว่ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการวัดทั้งหมด 6 สัปดาห์ ส่วนชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging มีแนวโน้มมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาของการ Aging เป็น 14 วัน โดยความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานตัวอย่าง นั้นมีผลต่อค่าความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องกับ ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging จะพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าเล็กน้อย

ผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาด พบว่าค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้น จากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานหุ่นจำลองที่ตั้งไว้ และพบว่าผลการทดสอบค่าการทนแรง ฉีกขาดทุกสัปดาห์ ติดต่อกัน 6 สัปดาห์ของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องมีค่าไม่ แตกต่างกัน แต่ชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ด้วยระยะเวลาที่มากขึ้น มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

ผลการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing พบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยาง ที่พัฒนาขึ้นนี้และทั้งชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่ผ่านการ aging มีค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation สูงกว่าเกณฑ์ มาตรฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่ สภาวะอุณหภูมิห้อง และชิ้นงานที่ผ่านการ aging พบว่าค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ส่วนค่า Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging มีค่าสูงกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความ แข็ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการ aging มีสมบัติความเป็นอิลาสติก (elastic property) ลดลงเล็กน้อย นั้นเอง คาดว่าความร้อนจากการ aging ที่อุณหภูมิ 70 องศา เวลา 14 วันอาจจะทำให้ชิ้นงานยางที่ใช้ทดสอบ นั้น มีการเชื่อมโยงโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลยางที่มีพันธะคู่เหลืออยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเกิดการเชื่อมโยง โมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความแข็งและค่า Modulus at 100% Elongation และสำหรับค่า

Tear Strength ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging ที่มีแนวโน้มที่ลดลง สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันนั้น คือ เนื่องมาจากค่าความแข็งแรงและสมบัติความเป็นอีลาสติคที่ลดลง จึงทำให้ความสามารถในการทนต่อแรงฉีกขาดลดลง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จากการวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงานยางที่ทั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ต่างๆ และชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging และโครมาโตรแกรม TGA พบว่า $T_{d\text{ onset}}$ มีค่าเท่ากับ $316.24 - 344.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{d\text{ peak}}$ มีค่าเท่ากับ $369.07 - 375.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยาง พบว่ามี 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรก อุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ $93.99 - 97.24\%$ และที่เหลือเป็น residue เท่ากับ $2.63 - 6.11\%$ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานยางที่ทั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ต่างๆ และผ่านการ Aging มีค่า $T_{d\text{ onset}}$ และ $T_{d\text{ peak}}$ ไม่แตกต่างกันมากนัก และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานยางตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเช่นกัน เมื่อพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงานยางที่ทั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging จะเห็นว่ามียุคที่มีช่วงการสลายตัวที่กว้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการ Aging ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

ผลการฉายรังสีปริมาณ $1,000\text{ cGy}$ เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางยังมีสีเหลืองน้ำตาล โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งเกิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดจากการฉายรังสีมีค่าเพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคูณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และผลการทดสอบการวัดค่า color parameter ; L^* , a^* , b^* ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อผ่านฉายรังสีพบว่าไม่แตกต่างกัน โดยปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นจนถึง $6,000\text{ cGy}$ ไม่มีผลต่อสีของชิ้นงานยางที่ใช้ทดสอบ แต่ค่า a^* ของชิ้นงานยางที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าเป็นบวกเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ทั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานยางที่ผ่านการฉายรังสีมีสีแดงเพิ่มขึ้นหรือเป็นสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากสีของชิ้นงานยางทั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานยางทั้งสองสภาวะไม่มีค่าที่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA พบว่า $T_{d\text{ onset}}$ มีค่าเท่ากับ $339.88 - 342.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{d\text{ peak}}$ มีค่าเท่ากับ $373.20 - 374.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยาง พบว่ามี 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรก อุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ $94.77 - 96.30\%$ และที่เหลือเป็น residue เท่ากับ $3.80-5.31\%$ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานยางเมื่อฉายรังสีขนาด $1,000\text{ cGy}$ เพิ่มทุกสัปดาห์ มีค่า $T_{d\text{ onset}}$, $T_{d\text{ peak}}$ และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานยางตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ มีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงานยาง จะเห็นว่ามียุคที่มีช่วงการสลายตัวที่กว้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากฉายรังสีให้แก่ชิ้นงานยางตัวอย่างไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์

ผลการสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราที่ได้จากขั้นตอนการพัฒนาสูตร และเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา โดยทำการเทน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีตามสูตรลงในหุ่นจำลองทรงกระบอกที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติทั้งหุ่นจำลองชิ้นแรกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชิ้นที่สองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร จากนั้นปิดฝาวางช่องใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลอง และทำการอบให้แห้งได้หุ่นจำลองศีรษะและลำคอเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

ขั้นตอนที่ 5 การศึกษาการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา

ผลการศึกษาการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา จำนวน 5 ชิ้น โดยการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอน พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวนอนและแนวตั้งของชิ้นงานตัวอย่างยางพารามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นที่วางทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งการทดสอบการหดตัวนี้ทำการประเมินอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 20 จะเห็นว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเริ่มคงที่ ซึ่งการทดสอบกระทั่งไปจนถึงสัปดาห์ที่ 24 พบว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบการหดตัวที่ได้จากการประเมินจะถูกใช้เป็นแนวทางช่วยในการกำหนดขนาดของหุ่นจำลองที่จะสร้างนำไปใช้งานจริงได้

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

ผลการประเมินค่า CT number จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอ จำนวน 4 ตำแหน่งพบว่ามีความอยู่ในช่วง -4.4 ถึง 4.7 และค่าเฉลี่ย CT number เท่ากับ -0.25 ผลการประเมินส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละตำแหน่งอยู่ในช่วง 5.0-7.9 และผลการหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของหุ่นจำลองได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเฉลี่ยเท่ากับ 1.002 g/cm^3

ขั้นตอนที่ 7 การวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ผลการวางแผนการรักษากำหนดให้ใช้วิธีการฉายรังสีบนหุ่นจำลองศีรษะและลำคอตามแผนการรักษาด้วยเครื่องเร่งอนุภาค พลังงาน 6 MV ผลการวางแผนการรักษาทำให้ได้พารามิเตอร์ที่ได้จากการวางแผนการรักษาประกอบด้วยค่าตำแหน่งการหมุนของเตียงผู้ป่วย (couch) เท่ากับ 0 องศา ลำรังสีมีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งด้วยพื้นที่ 10×10 ตารางเซนติเมตร และใช้เทคนิคการรักษา SAD technique เท่ากับ 100 เซนติเมตร

7.1 การวางแผนการรักษา 2 มิติ ได้แผนการรักษาที่มีความลึกก้อนมะเร็งที่ระยะจากผิวหุ่นจำลองเท่ากับ 8.20 เซนติเมตร ระยะ SSD เท่ากับ 91.8 เซนติเมตร ลำรังสีมีทิศทาง Right lateral และ Left lateral โดยค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าเท่ากับ 50.1 cGy ทั้ง 2 ด้านรวมปริมาณรังสีทั้งหมด 100.2 cGy

7.2 การวางแผนการรักษา 3 มิติ ได้แผนการรักษาที่มีความลึกก้อนมะเร็งที่ระยะจากผิวหุ่นจำลองเท่ากับ 8.20 เซนติเมตร ระยะ SSD เท่ากับ 91.8 เซนติเมตร โดยทั้งความลึกของก้อนมะเร็งและ

ระยะ SSD มีค่าเท่ากับการฉายรังสี 2 มิติ เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี ทำการฉายรังสีเข้าทาง Anteroposterior ด้วยค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 19.4 cGy ทิศทางลำรังสี Right lateral และ Left lateral ด้วยค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้านละ 43.6 cGy รวมปริมาณรังสีทั้งหมด 106.7 cGy จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังห้องฉายรังสีเพื่อทำการฉายรังสี และวัดค่าปริมาณรังสี

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบหุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสี

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณค่าปริมาณรังสีของคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษากับการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสี โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับจัดตำแหน่งการฉายรังสี ประกอบด้วยค่าตำแหน่งเตียง การหมุนของหัวเครื่องการหมุนคอลิเมเตอร์ และพื้นที่ฉายรังสีตามค่าที่ได้จากการวางแผนการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ จากนั้นทำการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber ขนาด 0.6 cc ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากยางพาราที่สร้างขึ้นด้วยหัววัดรังสีเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งแผนการรักษาจำนวน 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่วัดได้ พบว่ามีความแตกต่างปริมาณรังสีของแผนการรักษาแบบ 2 มิติ และการรักษาแบบ 3 มิติ เท่ากับ 0.98% และ 1.06% ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้พัฒนาหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากยางพาราสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีจากแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งที่เข้ารับการรักษาดูแลด้วยการฉายรังสีแบบสองมิติและสามมิติ โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา และการฉายรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ผลการออกแบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอประกอบด้วยพลาสติกทรงกระบอกภายในบรรจุยางพาราที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ การประเมินความหนาแน่นของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสี พบว่าสามารถใช้หุ่นจำลองศีรษะและลำคอสำหรับประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีและการวัดปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคได้ ผลการสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอประกอบด้วยหุ่นจำลองทรงกระบอกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร หุ่นจำลองชั้นแรกมีความสูง 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชั้นที่สองมีความสูง 20 เซนติเมตร สามารถนำมาประกอบกันเพื่อวัดปริมาณรังสีด้วยฟิล์มวัดรังสี โดยหุ่นจำลองมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc อยู่บริเวณกึ่งกลางของหุ่นจำลองซึ่งใช้เป็นตำแหน่งจุดหมุนในการฉายรังสีภายในหุ่นจำลองประกอบด้วยยางพาราซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ มีค่า CT number เฉลี่ยเท่ากับ -0.25 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเฉลี่ยภายในหุ่นจำลองมีค่าเท่ากับ 1.002 g/cm^3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองเมื่อประเมินจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 10%

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองกับการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าเท่ากับ 0.98% และ 1.06% ตามลำดับ โดยผลการประเมินด้วยเทคนิคการรักษาทั้งสองแบบมีค่าความ

แตกต่างกันไม่เกิน 3% แสดงให้ทราบว่าหุ่นจำลองศีรษะและลำคอสามารถใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีจากแผนการรักษาการฉายแบบสองมิติและสามมิติได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูงและใช้ในทางคลินิกได้ต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมยางพาราของประเทศไทยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

1. ตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการพิมพ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติตามที่ต้องการทั้งด้านความแข็งแรง ป้องกันน้ำรั่ว และผิวเรียบสวย ดังนั้นควรทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพิ่มเติมเพื่อให้ชิ้นงานสามารถกันน้ำและคงทนแข็งแรงมากขึ้น
2. หุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูง เช่น IMRT หรือ VMAT ได้ ด้วยการปรับปรุงช่องให้หัววัดรังสีให้มีขนาดที่เหมาะสมกับหัววัดรังสีที่ใช้กับเทคนิคการรักษาดังกล่าว
3. เทคนิคและวิธีการขึ้นรูปหุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหุ่นจำลองรูปแบบอื่นได้ เช่น หุ่นจำลองทรวงอก หุ่นจำลองช่องท้อง หรือหุ่นจำลองอุ้งเชิงกราน เป็นต้น
4. นอกจากพลาสติกชนิด ABS ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้อีกยังมีพลาสติกอีกหลายชนิดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างหุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติแตกต่างออกไปได้ เช่น ความทนทาน ความสวยงาม หรือน้ำหนักเบา ซึ่งต้องการการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ได้อนุสิทธิบัตร หุ่นจำลองศีรษะยางพาราตรวจสอบปริมาณรังสี และตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการในวารสาร

บทคัดย่อ

โรคมะเร็งศีรษะและลำคอพบมากในประเทศไทยและมีแนวโน้มเพิ่มจำนวนมากขึ้น การรักษาด้วยวิธีทางรังสีรักษาเป็นวิธีการรักษาที่มีบทบาทในการรักษาโรคมะเร็งและมีประสิทธิภาพในการรักษาสูง การรักษาด้วยรังสีที่มีปริมาณสูงจำเป็นต้องมีความถูกต้องในการกำหนดปริมาณรังสีที่ก้อนมะเร็ง อย่างไรก็ตามสามารถตรวจสอบปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอเพื่อประเมินความถูกต้องการปริมาณรังสีที่ก้อนมะเร็งได้รับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอผู้ป่วยสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ โดยสร้างแม่แบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่ออกแบบให้มีรูปร่างตามขนาดมาตรฐานหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ แม่แบบหุ่นจำลองสร้างจากพลาสติก Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรน้ำยาพาราสำหรับสร้างหุ่นจำลองจากน้ำยาพาราผสมสารเคมีและสารตัวเติมทำให้หุ่นจำลองมีความหนาแน่นใกล้เคียงมนุษย์ โดยมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเฉลี่ย 1.002 g/cm^3 สำหรับกระบวนการขึ้นรูปยาพาราหลังจากผสมน้ำยาพารากับสารเคมีและตัวเติมต่างๆ ลงไปในแม่แบบแล้วทำการอบให้ความร้อนเหมาะสม หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถคงสภาพอยู่ได้ตามแบบที่ต้องการมีความแข็ง และมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและการฉายรังสีในปริมาณ 1,000-6,000 cGy ผลการทดสอบความคงทนต่อการฉายรังสีด้วยการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน พบว่าหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการรักษาโรคมะเร็งศีรษะและลำคอได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีและการคำนวณปริมาณรังสีด้วยแผนการรักษาแบบ 2 และ 3 มิติมีค่าเท่ากับ 0.98% และ 1.06% ตามลำดับ หุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่สร้างขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบปริมาณรังสีจากแผนการรักษาและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกได้จริง นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมยาพาราของประเทศไทยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ได้

คำสำคัญ หุ่นจำลองศีรษะลำคอ การพิมพ์สามมิติ มะเร็งศีรษะลำคอ รังสีรักษา น้ำยาพารา

Abstract

Head and neck cancer is the most common form of cancer in Thailand and is still *increasing* very rapidly. Radiation therapy is an essential part of the treatment of cancer because it is high efficiency treatment. The use of high dose radiation therapy requires appropriate prescribed dose to ensure the desired accuracy of the dose to the tumor. However, the accuracy of radiation dose has to be verify in a Head and neck phantom. Consequently, the purpose of this study was to develop a Head and neck phantom for verification of radiation treatment in Head and neck cancer. A mold of the Head and neck phantom was designed as the reference phantom using 3D printing. This mold was made from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). In this research, a formulation of latex rubber was developed to produce this phantom, which was density closely soft tissue. The phantom having electron density of 1.002 g/cm^3 . In a subsequent stage, the developed formulation used latex rubber with a vulcanizing agent, additives and filler to produce the phantom at appropriates temperature. The phantom product has a high tensile strength and good resistance to aging and radiation in range of 1,000-6,000 cGy. The results of the radiation resistance testing have shown in terms of the mechanical properties and thermal property. As the result, the Head and neck phantom could be used for dose verification in clinical practice for head and neck cancer treatment planning, as well as the use for dose verification in practical head and neck cancer treatment. The percentage of dose difference between measured and calculated of 2D and 3D treatment planning were 0.98% and 1.06%, respectively. In conclusion, head and neck phantom pays an important role for treatment planning dose verification. Additionally, the natural latex rubber can be used to produce medical phantoms perfectly.

Keywords Head and Neck Phantom, 3D Printing, Head and Neck Cancer, Radiation Therapy, Latex Rubber

บทที่ 1

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

โรคมะเร็งเป็นภาวะคุกคามที่สำคัญต่อประชากรโลกและเป็นสาเหตุการเสียชีวิตเป็นอันดับต้นๆ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา จากรายงานขององค์การอนามัยโลกปี พ.ศ. 2551 พบผู้ป่วยมะเร็งรายใหม่ทั่วโลกจำนวนมากถึง 12.7 ล้านคน ในจำนวนนี้มีผู้เสียชีวิตประมาณ 7.6 ล้านคน คิดเป็น 13% ของการเสียชีวิตของประชากรทั่วโลกซึ่งมากกว่าการเสียชีวิตด้วยโรคชนิดอื่น เช่น โรคเอดส์ วัณโรค และมาลาเรียรวมกัน (6, 7) สำหรับข้อมูลผู้ป่วยมะเร็งในประเทศไทยจากสำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ ได้รายงานไว้ในปี พ.ศ. 2554 พบว่ามีผู้เสียชีวิตจากโรคมะเร็งจำนวน 61,082 คน เป็นเพศชาย 35,437 คน เป็นเพศหญิง 25,645 คน ซึ่งเป็นสาเหตุของการตายอันดับหนึ่งและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยอัตราการเสียชีวิตในเพศชาย 5 อันดับแรก ได้แก่ มะเร็งตับ มะเร็งปอด มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งช่องปากและคอหอย มะเร็งเม็ดเลือดขาว ส่วนเพศหญิงมีจำนวนผู้เสียชีวิต 5 อันดับแรก ได้แก่ มะเร็งตับ มะเร็งปอด มะเร็งเต้านม มะเร็งปากมดลูก และมะเร็งลำไส้ใหญ่ โรคมะเร็งที่เป็นปัญหาสำคัญ 5 อันดับแรกของประเทศ ได้แก่ มะเร็งตับ มะเร็งปอด มะเร็งเต้านม มะเร็งปากมดลูก และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ซึ่งคิดเป็น 56.38% ของมะเร็งทั้งหมด

การรักษาโรคมะเร็งมีด้วยกันหลายวิธีการทั้งการผ่าตัด การรักษาด้วยเคมีบำบัด การรักษาด้วยฮอร์โมน หรือการฉายรังสี สำหรับการรักษาด้วยวิธีการฉายรังสีเป็นอีกวิธีการรักษาที่ยอมรับกันในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากสามารถรักษาให้หายขาดได้ รูปแบบการรักษาใช้การให้รังสีพลังงานสูงกับผู้ป่วยเพื่อฆ่าเซลล์มะเร็งที่เป้าหมาย โดยกำหนดพื้นที่ในการฉายรังสีให้มีขอบเขตจำกัดเพื่อไม่ให้อวัยวะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องได้รับรังสี ส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการรักษาด้วยวิธีการอื่น เช่น เคมีบำบัด การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การรักษาด้วยรังสีระยะไกล (Teletherapy) และการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ (Brachytherapy) สำหรับการรักษาด้วยรังสีระยะไกลเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมากเนื่องจากให้ผลการรักษาที่ดี (1-4) โดยเป็นการฉายรังสีปริมาณสูงจากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 หรือ 10 ล้านโวลต์ ผ่านอวัยวะปกติและเข้าไปยังก้อนมะเร็ง อย่างไรก็ตามการรักษาด้วยการให้รังสีปริมาณสูงที่ก้อนมะเร็งนั้นต้องการความถูกต้องและแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งการรักษาที่สูงมาก เนื่องจากหากมีการผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้เกิดภาวะข้างเคียงจากการที่อวัยวะปกติได้รับรังสีเป็นอย่างมาก เช่น หากการฉายรังสีโดนไขสันหลังเกินกำหนดอาจส่งผลให้ผู้ป่วยเป็นอัมพาตได้ ตามข้อเสนอแนะของสมาคมนักฟิสิกส์การแพทย์ประเทศอเมริกา (5) ได้ให้ข้อเสนอแนะว่าควรใช้หุ่นจำลองในการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณรังสีที่ให้กับผู้ป่วยมีความถูกต้องเพียงพอต่อการรักษา ปัจจุบันมีหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีขายในท้องตลาดซึ่งจะต้องนำเข้าแต่เนื่องจากมีราคาที่สูงมากทำให้ในสถานพยาบาลต่างๆ ไม่สามารถซื้อใช้ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีทางรังสีรักษาด้วยหุ่นจำลองแทนผู้ป่วยจริงมีความจำเป็นอย่างมากเนื่องจากจะทำให้แพทย์และนักฟิสิกส์การแพทย์มั่นใจได้ว่าแผนการรักษาของผู้ป่วยมีความถูกต้อง

และแม่นยำ ตลอดจนป้องกันการผิดพลาดที่เกิดจากการให้ปริมาณคลาดเคลื่อน โดยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยมีองค์ความรู้ในการสร้างหุ่นจำลองทางรังสีรักษาเนื่องจากได้ทำศึกษาวิจัยในการสร้างหุ่นจำลองทรวงอกและอุ้งเชิงกรานจากยางพาราเพื่อการตรวจสอบปริมาณรังสีในการรักษามะเร็งเต้านมและปากมดลูกซึ่งประสบความสำเร็จอย่างสูง หุ่นจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้แทนผู้ป่วยในตรวจสอบปริมาณรังสีได้เป็นอย่างดี เนื่องจากยางพาราซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพงและสามารถสร้างเป็นหุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ ฟิสิกส์ และความเหมือนของธาตุองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปหุ่นจำลองยางพารายังมีอุปสรรคในเรื่องของการพัฒนาแม่พิมพ์หุ่นจำลองเนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปจะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการอบหรือขึ้นน้ำยางพาราเป็นระยะเวลานาน (4-6 ชั่วโมง) ทำให้วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ทั้งยางซิลิโคน ปูนปลาสเตอร์ และไฟเบอร์ผสมเรซินเกิดการเสียหายส่งผลให้ไม่สามารถใช้งานได้หลายครั้ง นอกจากนี้ขั้นตอนการทำแม่พิมพ์จากวัสดุดังกล่าวจำเป็นต้องให้ผู้เชี่ยวชาญปั้นหุ่นแม่แบบขึ้นและสร้างแม่พิมพ์ตามแบบซึ่งใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานที่นาน คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและทดสอบความเป็นไปได้ในการพัฒนาแม่พิมพ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกซึ่งพบว่าสามารถนำมาใช้ในการเป็นแม่พิมพ์หุ่นจำลองได้เป็นอย่างดี โดยสามารถทำการออกแบบให้หุ่นจำลองมีรูปร่างตามที่ต้องการและใช้เวลาในการสร้างแม่พิมพ์น้อยกว่าการสร้างโดยผู้เชี่ยวชาญในการปั้นหุ่นและสร้างแม่พิมพ์ด้วยมือ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาขนาดมาตรฐานสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีก่อนการรักษาผู้ป่วยจริง โดยสร้างแบบหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกซึ่งสามารถใส่หัววัดรังสีเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ หุ่นจำลองดังกล่าวยังสามารถใช้สำหรับประเมินค่าปริมาณรังสีก่อนการรักษาจริงได้ในทุกตำแหน่งของร่างกายทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้จากการให้ปริมาณรังสีที่ผิดพลาด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อให้ได้เทคโนโลยีการสร้างหุ่นจำลองมาตรฐานสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีจากการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งที่สามารถใช้ได้จริง
- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหุ่นจำลองทางรังสีรักษาสำหรับตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูงต่อไป
- 3) เพื่อให้โรงพยาบาลและศูนย์มะเร็งต่างๆ สามารถนำหุ่นจำลองทางรังสีรักษาที่สร้างขึ้นไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีสำหรับการรักษาผู้ป่วยมะเร็ง

บทที่ 2

ทฤษฎี ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา/กรอบแนวคิดของการวิจัย

รังสีรักษา (Radiation Therapy) (1-3, 8, 9) เป็นวิธีการให้โฟตอนพลังงานสูงทั้งรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์เพื่อการรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ สามารถแบ่งวิธีการรักษาตามระยะจากต้นกำเนิดรังสีได้เป็น 2 แบบ ประกอบด้วยการรักษาระยะไกล (Teletherapy) และการรักษาระยะใกล้ (Brachytherapy) ปัจจุบันการรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงเนื่องจากให้ผลการรักษาที่ดี การให้ปริมาณรังสีที่ถูกต้องและเหมาะสมจะทำให้สามารถกำจัดหรือต่อต้านการก่อตัวและรุกรานของเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี สำหรับจุดมุ่งหมายหลักของการรักษาด้วยรังสีรักษาแบ่งออกเป็น 2 วิธีการประกอบด้วยการรักษาให้หายขาด (Curative Radiotherapy) เป็นการรักษาที่มุ่งเน้นเพื่อรักษาโรคมะเร็งให้หายขาดและการรักษาแบบบรรเทาอาการ (Palliative Radiotherapy) เป็นการรักษาเพื่อยับยั้งหรือบรรเทาอาการจากความรุนแรงของโรคมะเร็งเพื่อให้ผู้ป่วยมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการรักษาด้วยวิธีการรังสีรักษาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยตลอดกระบวนการรักษาตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มแรกที่แพทย์ทางรังสีรักษาทำการพยากรณ์การดำเนินของโรคและกำหนด ปริมาณรังสี (Prescribed dose) เพื่อการรักษา การจำลองการรักษาและการคำนวณค่าปริมาณรังสีที่ถูกต้องแม่นยำในขั้นตอนการวางแผนการรักษาซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแพทย์ นักฟิสิกส์การแพทย์และนักรังสีการแพทย์ และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการฉายรังสีระหว่างการรักษา จะเห็นได้ว่าวิธีการทางรังสีรักษามีการทำงานหลายขั้นตอนและแต่ละขั้นตอนมีแนวทางการรักษาที่ซับซ้อน หากการให้ปริมาณรังสีมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่วางแผนการรักษาไว้อาจส่งผลให้ผู้ป่วยพิการหรือเสียชีวิตจากการได้รับปริมาณรังสีที่ผิดพลาดและด้วยเหตุที่ผลกระทบจากการที่ผู้ป่วยได้รับรังสีมากกว่าหรือน้อยกว่าที่วางแผนการรักษาไว้จะแสดงผลค่อนข้างนานอาจใช้เวลาหลายปีจึงจะทราบว่าผู้ป่วยเกิดภาวะแทรกซ้อนจากผลดังกล่าว ดังนั้นการป้องกันผลที่อาจเกิดขึ้นจากการให้รังสีผิดพลาดจึงเป็นสิ่งที่สมควรได้รับความสนใจเป็นอย่างมากซึ่ง การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษาในประเทศที่พัฒนาแล้วจะให้ความสำคัญในขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณรังสีอย่างสม่ำเสมอ สำหรับในประเทศไทยนั้นเนื่องจากหุ่นจำลองมาตรฐานทางรังสีรักษาจะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาแพงมากกว่าตัวละล้านบาททำให้ยังไม่มีหุ่นจำลองดังกล่าวมากนัก นอกจากนี้คณะกรรมการระหว่างหน่วยและการวัดรังสี (International Commission Radiation Units and Measurements; ICRU) Report no. 40 ซึ่งเป็นหน่วยงานมาตรฐานระดับนานาชาติที่ควบคุมและดูแลการกำหนดปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนตลอดกระบวนการรักษาจะต้องไม่เกิน $\pm 5\%$ ของปริมาณรังสีที่กำหนด (5)

สำหรับขั้นตอนการรักษาในทุกกระบวนการสิ่งที่ผู้ปฏิบัติงานควรคำนึงถึงอยู่เสมอคือการพัฒนาทักษะของขั้นตอนต่างๆ ตลอดจนความสามารถในการจำลองการรักษาและวางแผนการรักษาให้เหมาะสมเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด นอกจากนี้ในขั้นตอนการฉายรังสีนักรังสีการแพทย์จำเป็นต้องมีการจัดทำที่ถูกต้องร่วมกับการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดทำรูปแบบต่างๆ อันนำไปสู่การรักษาที่มี

ประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน เนื่องจากระหว่างการรักษาจะเป็นการปฏิบัติงานของนักรังสีการแพทย์เพียงเท่านั้น โดยหากมีการประสานงานกันของนักรังสีการแพทย์ที่ดีจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงได้มากถึง 82% นอกจากนี้จะตรวจสอบการจัดท่าผู้ป่วยให้ถูกต้องและสม่ำเสมอแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการกำหนดและวางขอบเขตของลำรังสีที่จะฉายในบริเวณที่สนใจและปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรักษา อาทิ การตั้งค่าเครื่องฉายรังสี ได้แก่ Gantry, Collimator angle, Monitoring unit ตลอดจนการกำหนดระยะเวลาในการฉายรังสี เป็นต้น การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงมีความสนใจในการสร้างหุ่นจำลองมาตรฐานทางรังสีรักษาขึ้น

หุ่นจำลอง (Model)

หุ่นจำลอง หมายถึง วัสดุสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบของจริงด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถใช้ของจริงเพื่อประกอบการเรียนการสอนได้ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะและตำแหน่งของอวัยวะภายในร่างกายของคนหรือสัตว์ (10-13) ในทางรังสีวิทยาหุ่นจำลองยังอาจหมายถึงหุ่นที่ลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ซึ่งอาจนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพในงานรังสีวินิจฉัยและการวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) รวมทั้งการวัดปริมาณและการกระจายของรังสีในหุ่นจำลองเทียบเท่าผู้ป่วยจริงในอวัยวะต่างๆ (Dose Measurement and Dose distribution) ในขั้นตอนการวางแผนการรักษาทางรังสีรักษา(14) หุ่นจำลองทั่วไปสามารถทำการแบ่งเป็นประเภทดังนี้ (10)

1. หุ่นรูปทรงภายนอก (Solid Model) เป็นหุ่นจำลองที่ต้องการแสดงรูปร่างหรือรูปทรงภายนอกเท่านั้น โดยในเรื่องของน้ำหนัก ขนาด สีหรือพื้นผิว ลวดลายและมาตราส่วนจะผิดไปจากของจริง
2. หุ่นเท่าของจริง (Exact Model) มีขนาดและรูปร่างรายละเอียดทุกอย่างเท่าของจริงทุกประการสามารถใช้แทนของจริงได้เป็นอย่างดี
3. หุ่นจำลองแบบขยายหรือแบบย่อ (Enlarge, Reduce Model) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหุ่นจำลองแบบมาตราส่วน โดยอาจมีการย่อหรือขยายให้เล็กหรือใหญ่ โดยยังคงเป็นสัดส่วนกับของจริงทุกส่วนและยังสามารถช่วยให้ทราบรายละเอียดและความสัมพันธ์กับของจริงได้
4. หุ่นจำลองแบบผ่าซีก (Cut Away Models) เป็นหุ่นจำลองที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะภายใน โดยตัดพื้นผิวบางภายนอกบางส่วนออก
5. หุ่นจำลองแบบเคลื่อนไหวทำงานได้ (Working Models) หุ่นจำลองแบบนี้สามารถแสดงให้เห็นส่วนที่เคลื่อนไหวซึ่งเป็นการทำงานของวัตถุหรือเครื่องจักร นอกจากนี้ยังมีหุ่นจำลองอีกหลายประเภท อาทิเช่น หุ่นจำลองเลียนของจริง (mockup Models) และหุ่นจำลองแบบแยกส่วน (Build up Models) เป็นต้น

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษา

หุ่นจำลองที่ใช้ในงานรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำมาเพื่อใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการทางรังสีรักษาทั้งในเรื่องของการตรวจสอบการคำนวณปริมาณรังสี การตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือต่างๆ และการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำผู้ป่วยเพื่อทำการฉายรังสีสำหรับการรักษา เช่น การควบคุมคุณภาพการเคลื่อนที่ของ Multi-leaf Collimator (MLC Quality Assurance), การวัดความคงตัวของลำรังสี (Beam Constancy Checks) และการวัดปริมาณรังสี (Dose Measurement) ของเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง รวมทั้งยังใช้สำหรับวัดการกระจายรังสี (Dose distribution) หรือการคำนวณปริมาณรังสี (Dose Calculation) ให้กับผู้ป่วยเพื่อทำการรักษามะเร็งชนิดต่างๆ ในขั้นตอนของการวางแผนการรักษา (Treatment Planning) หุ่นจำลองที่ใช้ทางรังสีรักษาส่วนใหญ่ทำจากวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อเพื่อให้มีความสมจริง คล้ายมนุษย์ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และความเหมือนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยหุ่นจำลองทางรังสีรักษาอาจทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin), ซิลิโคน (Silicone), ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass), พอลิยูรีเทน (Polyurethane), พอลิเมทธีนเมทาอะคริเลต (Polymethymethacrylate, PMMA) หรืออะคริลิก (Acrylics) ซึ่งวัสดุต่างๆ เหล่านี้มีราคาแพงและบางชนิดเป็นสารอันตรายเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง (4) คณะกรรมาธิการระหว่างหน่วยและการวัดรังสี (The International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อและหุ่นจำลองว่า “วัสดุผสมมูลเนื้อเยื่อคือวัสดุใดๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อในแง่ของการทำปฏิกิริยากับรังสีชนิดก่อไอออน” และ “หุ่นจำลอง คือโครงสร้างใดๆ ที่บรรจุด้วยวัสดุที่แทนเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น และใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาของรังสีในร่างกายมนุษย์” โดยหุ่นจำลองมักถูกนำมาทดสอบมาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Image Equipment) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีและการลดทอนรังสีในเนื้อเยื่อมนุษย์ สามารถแบ่งประเภทของหุ่นจำลองทางรังสีรักษาตามลักษณะองค์ประกอบภายในได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. หุ่นจำลองชนิด Homogeneous Phantom

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

1.1 หุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom ทำจากวัสดุประเภทอีพอกซีเรซินมีความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในมีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีชนิด Ionization Chamber ใช้สำหรับการวัดปริมาณรังสีชนิด Photon และ Electron มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีทั้งขนาด 20 x 20 เซนติเมตร และ 40 x 40 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 และมีความหนาแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งานประเภทต่างๆ (15)



ภาพที่ 1 แสดงหุ่นจำลองชนิด Solid Water Phantom สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2558 จาก <http://www.cnmcco.com/dosimetry>

1.2 หุ่นจำลองชนิด Cube Phantom เป็นหุ่นจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพโดยทั่วไป การตรวจสอบความคงตัวของลำรังสี การควบคุมคุณภาพของ Multi -leaf collimator ติดตั้งและใช้งานได้ง่ายดังแสดงในภาพที่ 2 (16)



ภาพที่ 2 แสดงหุ่นจำลองชนิด Cube Phantom สืบค้นเมื่อ 30 มีนาคม 2558 จาก <http://www.supertechx-ray.com>

1.3 หุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีการออกแบบสำหรับการวัดปริมาณรังสี ตรวจสอบการวางแผนการรักษา วัดการกระจายของรังสีแบบ 2 มิติ ตรวจสอบการฉายรังสีเทคนิคการรักษาขั้นสูง เช่น การรักษาด้วยวิธีการปรับความเข้มรังสี (IMRT) หุ่นจำลองลักษณะดังกล่าวมีหลายขนาด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร หรือทรงกระบอก 30 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3 สามารถใส่ฟิล์มหรือหัววัดรังสีเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสี สร้างจากวัสดุผสมเนื้อเยื่อประเภท epoxy สามารถนำมาใช้สำหรับการฉายรังสีที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 50 KeV ถึง 25 MeV (16)



ภาพที่ 3 แสดงหุ่นจำลองชนิด IMRT Homogeneous Phantom สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก

<http://www.cirsinc.com/products/all/>

2. หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom

หุ่นจำลองชนิด Inhomogeneous Phantom เป็นหุ่นจำลองที่มีความซับซ้อนกว่าแบบแรก ภายในมีองค์ประกอบที่ใช้แทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอาจมีรูปร่างที่คล้ายกับร่างกายมนุษย์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของลำรังสี เช่น Alderson Radiation Therapy Phantom (ART) เป็นหุ่นจำลองที่เป็นที่นิยมใช้มากในทางรังสีวิทยามาเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 30 ปี และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก โดยหุ่นจำลองประเภทนี้ได้รับการตกแต่งและปรับปรุงจนมีคุณสมบัติที่ความเหมาะสมกับการใช้งาน ผลิตจากวัสดุที่สมมูลกับเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ กล้ามเนื้อ (Muscle), กระดูก (Bone), ปอด (Lung) และอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4 หุ่นจำลองชนิดนี้ได้สร้างให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยหุ่นบางชนิดจะตัดให้เป็นสไลด์ตามขวางเพื่อประโยชน์ในการใส่อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีสำหรับการประเมินค่าปริมาณรังสีภายในร่างกาย นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานทางรังสีรักษาตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงการตรวจสอบการรักษา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเต้านมที่สามารถถอดออกได้และมีหลายขนาด เช่น ปริมาตร 200, 400, 600 และ 900 มิลลิลิตร เป็นต้น



ภาพที่ 4 แสดงหุ่นจำลองชนิด Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)

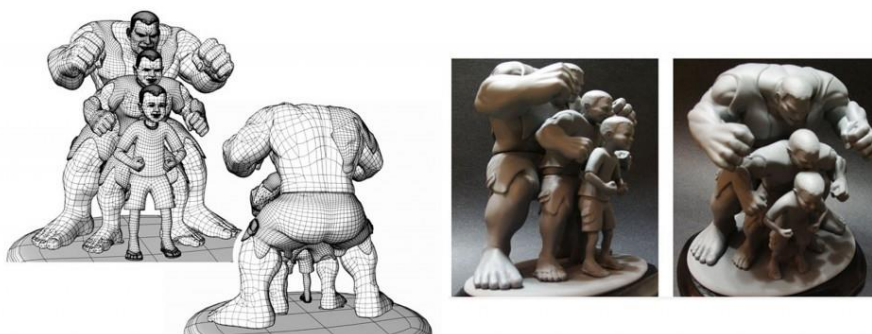
สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก <http://www.supertechx-ray.com/pics/Anthropomorphic/Alderson/ART-1small.jpg>

เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer)

ปัจจุบันการสร้างวัตถุให้มีรูปร่างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติหรือ Rapid Prototype (RP) กำลังเป็นที่นิยมอย่างสูงเนื่องจากสามารถสร้างวัตถุที่จับต้องได้ในรูปแบบสามมิติมีความกว้าง-ลึก-สูง ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากการสร้างภาพสองมิติด้วยเครื่องพิมพ์แบบปกติทั่วไป

หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ

การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติเพื่อสร้างวัตถุใช้หลักการแบบการพิมพ์แบบสองมิติภายในชั้นในซึ่งเป็นแนวระนาบขนานพื้น (แนว X, Y) ก่อน ซึ่งการขึ้นรูปลักษณะดังกล่าวจะเป็นรูปแบบแนวตัดขวาง cross-section ของวัตถุที่สร้างขึ้น จากนั้นเครื่องพิมพ์จะทำการพิมพ์ต่อด้วยการเลื่อนสูงขึ้นตามแนวแกน Z เพื่อให้เกิดเป็นรูปแบบสามมิติ วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปอาจใช้การฉีดเส้นพลาสติก น้ำเรซิน ซีเมนต์ (สำหรับสร้างบ้าน) น้ำตาล (สำหรับทำขนม) หรือ stem cell (สำหรับขึ้นรูปอวัยวะ) สำหรับการสร้างหุ่นจำลองโดยเฉพาะหุ่นจำลองทางรังสีรักษาการฉีดเส้นพลาสติกจะทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีรูปแบบและขนาดใหญ่เหมาะสมกับการใช้งาน ภาพเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer) สำหรับความละเอียดของการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติในปัจจุบันสามารถพิมพ์ด้วยความละเอียดค่อนข้างสูงประมาณ 100 Micron (0.1 mm) ต่อชั้น โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างวัตถุแบบสามมิติ ได้แก่ AutoCAD, SolidWork, 3Ds Max, Zbrush, Maya หรือ SketchUp เป็นต้น ตัวอย่างไฟล์ภาพสามมิติและวัตถุที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer) ดังภาพที่ 5



3D Files

3D Print

ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างไฟล์ภาพสามมิติและวัตถุที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer)
 สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก <http://www.print3dd.com/what-is-3d-printer-how-many-type/#>

ชนิดของเครื่องพิมพ์สามมิติ

1. เครื่องพิมพ์ระบบภาคเรซิน (Stereolithography; SLA หรือ Digital Light Processing; DLP)

การทำงานของเครื่องพิมพ์ระบบภาคเรซินใช้หลักการฉายแสงไปยังภาคบรรจุเรซินชนิดไวแสง (Photo Resin/Photopolymer) ซึ่งจะทำให้เรซินเกิดการแข็งตัวตามตำแหน่งที่ได้รับแสง เมื่อทำการกวาดแสงให้เป็นรูปร่างจะทำให้ได้วัตถุตามที่ต้องการ สำหรับระบบ SLA และ DLP มีความแตกต่างกันในเรื่องของ ต้นกำเนิดแสง โดยระบบ SLA จะเป็นการยิงด้วยลำเลเซอร์ส่วน DLP ใช้การฉายภาพเป็นบริเวณกว้างทำให้ใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่า การขึ้นรูปด้วยระบบภาคเรซินเหมาะสำหรับการสร้างวัตถุชิ้นเล็กที่ต้องการให้มีความละเอียดสูง เช่น การทำเครื่องประดับ Jewelry เป็นต้น

2. เครื่องพิมพ์ระบบผงยิปซัมผสมสี (Powder 3D Printer)

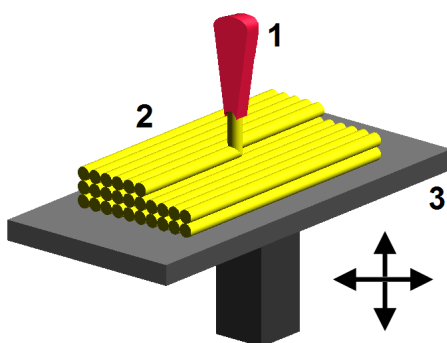
เครื่องพิมพ์ชนิดนี้อาจเรียกว่าเป็นเครื่องพิมพ์ระบบแบ่งเนื่องจากใช้ผงยิปซัมหรือผงพลาสติกเป็นวัสดุในการขึ้นรูปขึ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆ โดยการฉีกาวหรือ Blinder ผสมกับผงยิปซัมให้เป็นรูปร่างตามที่ได้ออกแบบไว้ เครื่องพิมพ์ชนิดนี้สามารถพิมพ์สีได้เหมือนจริงแต่วัตถุที่ได้จะมีความเปราะง่าย

3. เครื่องพิมพ์ระบบหลอมผงพลาสติก ผงโลหะ หรือเซรามิก (Selective Laser Sintering; SLS)

เครื่องพิมพ์ระบบหลอมผงพลาสติกเป็นระบบที่มีการทำงานคล้ายกับเครื่องพิมพ์ระบบภาคเรซิน โดยเครื่องพิมพ์ระบบหลอมผงพลาสติกใช้หลักการหลอมละลายผงพลาสติกด้วยความร้อนจากเลเซอร์ ความเข้มสูงซึ่งจะเกิดเป็นรูปร่างของวัตถุนั้น แต่ระบบดังกล่าวยังมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ

4. เครื่องพิมพ์ระบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modeling; FDM)

เครื่องพิมพ์ระบบฉีดเส้นพลาสติกเป็นระบบนิยมใช้มากในปัจจุบันเนื่องจากใช้งานง่าย สามารถสร้างวัตถุให้มีขนาดที่ใหญ่ได้ โดยเฉพาะหุ่นจำลองทางรังสีรักษาที่ต้องการสร้างหุ่นจำลองให้มีขนาดใกล้เคียงกับมนุษย์ หลักการทำงานให้การหลอมเหลวเส้นพลาสติกให้เป็นของเหลวจากนั้นฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ให้เป็นรูปร่างวัตถุตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 6 วัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่ พลาสติกชนิด Polylactic acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), PET, Nylon, Wood (พลาสติกผสมไม้) หรือ Bronze (พลาสติกผสมทองเหลือง)



ภาพที่ 6 แสดงหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ระบบฉีดเส้นพลาสติก

สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2558 จาก <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#howitworks>

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวของเครื่องพิมพ์สามมิติโดยเฉพาะเครื่องพิมพ์ระบบฉีดเส้นพลาสติกหากนำมาประยุกต์ใช้สำหรับทำเป็นแม่แบบในการสร้างหุ่นจำลองทางการแพทย์จะทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการขึ้นรูปหุ่นจำลองยางพาราที่ต้องการให้ภายในหุ่นจำลองมีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์และมีความสม่ำเสมอสูงเป็นอย่างมาก

ยางพารา (Para rubber) (17-19)

ต้นยางพารามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติชนิดนี้ประชาชนทั่วไปเรียกว่ายางพาราหรือต้นยางพารา (Para rubber) โดยยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากเป็นพืชยุทธศาสตร์ในการพัฒนาการเกษตรและประเทศไทยมีแนวโน้มในการหันมาใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์มากขึ้น จากข้อมูลปี 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากถึง 3,776,957 ตัน จากการส่งออกทั้งในรูปของวัตถุดิบพร้อมทำผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา คิดเป็นมูลค่ากว่า 647,906 ล้านบาท ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่ถือว่ามีความสำคัญ อีกทั้งมีโอกาสที่จะพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ยางพาราได้หลากหลาย โดยยางธรรมชาติเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแล้วสามารถนำมาจำหน่ายได้ในราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นการเรื่องที่ดีหากมีการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางให้

มีระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถสร้างผลผลิต และผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างมีคุณภาพและมีมาตรฐาน (19) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ผ่านการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ เช่น กระดุกเทียม ยางวงจัดฟัน ยางนวดเหงือก ดินประดิษฐ์สำหรับเด็ก ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ แผ่นยางคลุมดินและกระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำยางพารามาใช้ในเป็นหุ่นจำลองทางการแพทย์ยังมีค่อนข้างน้อยทั้งๆ ที่เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานโดยการนำยางพารามาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในประเทศในช่วง ปี 2550-2554 (20)

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

องค์ประกอบของยางพารา (18, 21)

น้ำยางพาราหลังจากการกรีดจะมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 6 มีค่าแรงดึงผิวประมาณ 40.5 ดายน์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ ohms-cm น้ำยางจะมีสีขาวขุ่น เมื่อปั่นด้วยความเร็วรอบสูงๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำยางเกิดการแยกชั้นแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

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

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

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

องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำยางพาราสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยางพาราสด

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

คุณสมบัติทางเคมี (18, 21)

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 ทำใหยางมีสมบัติยืดหยุ่นซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปที่ดี

คุณสมบัติโดยทั่วไปของยางพารา (21)

1. **ความยืดหยุ่น (Elasticity)** ยางพารามีความยืดหยุ่นได้ดี สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว
2. **ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)** ยางพารามีความทนทานต่อแรงดึงมาก เนื่องจากสามารถเกิดการตกลึกเมื่อได้รับแรงดึง
3. **ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)** ยางพารามีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง โดยผลึกจะเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ส่งผลให้ด้านการฉีกขาดที่จะเกิดขึ้น
4. **การกระด้างกระดอน (Rebound resilience)** ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางจะมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยมาก และมีการสะสมความร้อนที่ต่ำด้วยเช่นกันทำให้ยางมีคุณสมบัติที่การกระด้างกระดอนที่สูงมาก
5. **ความทนทานต่อการขัดถู (Rebound resistance)** ยางพารามีคุณสมบัติทนการขัดถู ทนต่อแรงเสียดทานที่ดี
6. **ความเหนียว (Tack)** ยางพาราสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
7. **ความเป็นฉนวน (Insulation)** ยางพารามีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}$ โอห์ม - ซม
8. **ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical Resistant)** เนื่องจากโครงสร้างของยางที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทำให้สามารถถูกละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วจำพวก เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluence) และเฮกเซน (Hexane) ได้ แต่จะสามารถทนได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน (Acetone) และ แอลกอฮอล์ (Alcohol)
9. **คุณสมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging Property)** ยางพารามีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ทั่วไป

การแปรรูปน้ำยางพารา (18)

การแปรรูปน้ำยางพาราด้วยการเติมสารเคมีชนิดต่างๆ ในน้ำยางพาราจะทำให้ยางพาราที่ได้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรการผสมอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน หลักการและขั้นตอนของการออกสูตรการผสมน้ำยางกับสารเคมีนั้นปกติจะต้องคำนึงถึงประโยชน์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตและต้นทุน

สารเคมีที่นำมาใช้ในการผสมน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มหลักๆ 5 กลุ่ม ดังนี้

1. สารทำน้ำยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากอ่อน เหนียว ไปเป็นยางคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
2. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูปให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ระหว่างกำมะถันและยางนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปช้ามากและต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่สูงมาก
3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เป็นสารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากยางจะเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วในอุณหภูมิที่สูง หรืออยู่ในภาวะที่ปนเปื้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะ ทองแดง หรือ แมงกานีส เป็นต้น
4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา
5. สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มระยะเวลาก่อนเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยาง สารหน่วงปฏิกิริยา
6. สารอื่นๆ เช่น การเติมสารที่ทำให้เกิดสี, กลิ่น และฟอง เป็นต้น

การรักษาด้วยวิธีการทางรังสีรักษา

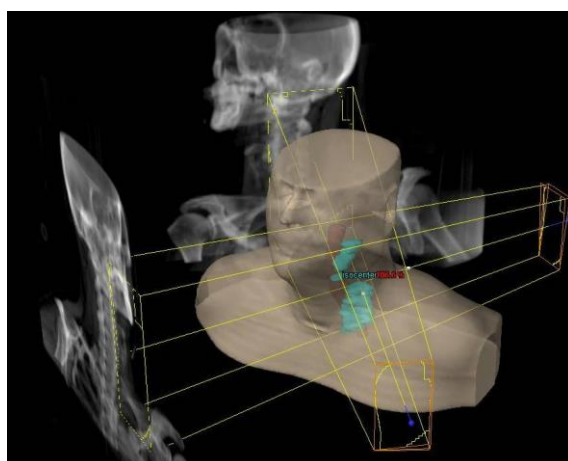
การรักษาโรคมะเร็งด้วยวิธีการทางรังสีรักษาประกอบด้วยขั้นตอนการจำลองการรักษา การวางแผนการรักษา การตรวจสอบและประเมินแผนการรักษา และการฉายรังสี

1.1 การจำลองการรักษา (Treatment Simulation) (8)

การรักษาด้วยรังสีรักษานั้นจะได้ผลได้ดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการให้ปริมาณรังสีที่เหมาะสม โดยการให้ปริมาณรังสีมากที่สุดกับบริเวณที่สนใจและปริมาณรังสีน้อยที่สุดในเนื้อเยื่อรอบข้างมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการรักษา ความถูกต้องของให้ทิศทางลำรังสีในขั้นตอนการจำลองการรักษามีความจำเป็นอย่างมากเพื่อช่วยให้การรักษามีประสิทธิภาพและบรรลุเป้าหมาย เนื่องจากการจำลองการรักษาและการวางแผนการรักษาจะส่งผลต่อเทคนิคการฉายรังสีในขั้นตอนการรักษา ได้แก่ การจัดทำผู้ป่วยและการใช้อุปกรณ์ช่วยจัดทำ สำหรับเทคนิคและขั้นตอนการจำลองการรักษาที่ห้องจำลองการรักษประกอบด้วยการจัดทำและทิศทางลำรังสีบนตัวผู้ป่วยดังแสดงในภาพที่ 7 การกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญและการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญรวมทั้งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 7 การจำลองการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการ
รักษา สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก <http://radiotherapy.in/case2.html>



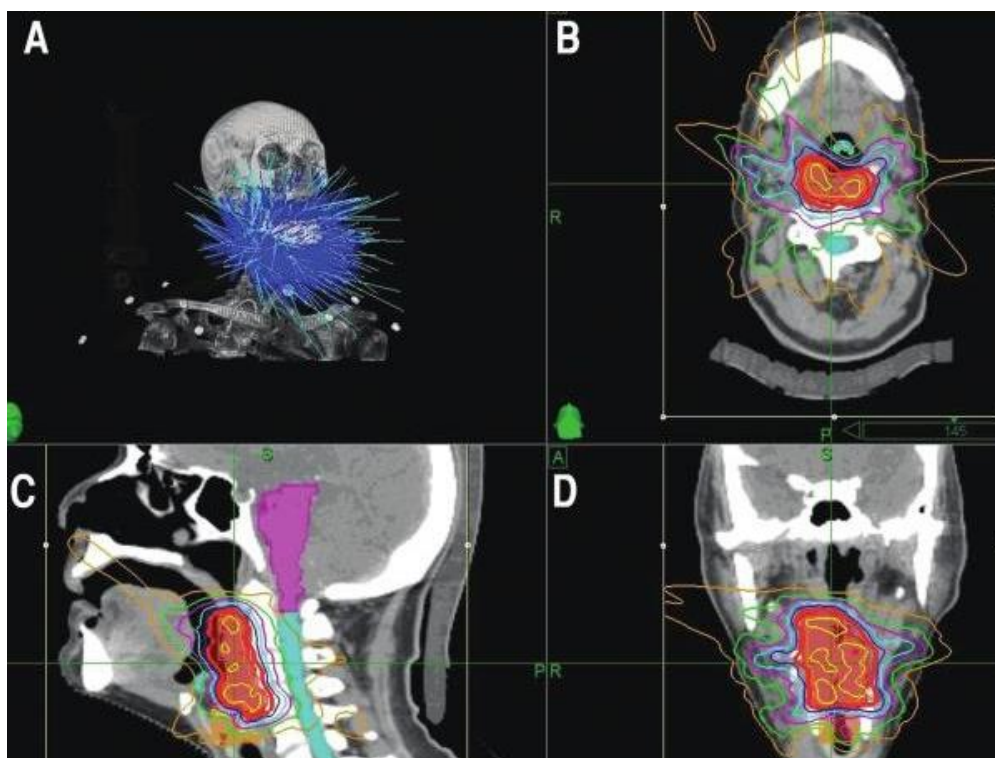
ภาพที่ 8 แสดงการกำหนดขอบเขตก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ
สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก <http://www.aboutcancer.com/throat.htm>

1.2 การวางแผนการรักษา (Treatment Planning System) (8)

การวางแผนการรักษาเป็นการทำงานประสานกันระหว่างรังสีทางด้านการรังสีรักษา นักฟิสิกส์การแพทย์และนักคำนวณปริมาณรังสี สำหรับขั้นตอนการวางแผนการรักษาเริ่มต้นจากการตรวจสอบข้อมูลผู้ป่วยและศึกษาแผนการรักษา ตลอดจนเทคนิคที่ต้องใช้ในการรักษาหลังจากผ่านการจำลองการรักษาทั้งหมดอย่างละเอียด อันประกอบด้วยเทคนิคในการฉายรังสี ตำแหน่งฉายรังสี (Anatomical site) ระยะลึกของก้อนมะเร็ง (Depth) ตรวจสอบปริมาณรังสีที่ฉายในแต่ละวัน (Daily dose) เส้นปริมาณรังสีที่แพทย์เลือก (Selected isodose) พลังงานรังสีที่ใช้และขนาดพื้นที่รังสีตามที่แพทย์กำหนดดังแสดงในภาพที่ 9 เพื่อให้การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 9 फिल्मเอกซเรย์ที่กำหนดขนาดพื้นที่ฉายรังสีในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ
สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก <https://www.researchgate.net>



ภาพที่ 10 การคำนวณปริมาณรังสีถูกต้องตรงตามการวางแผนของแพทย์
 สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2559 จาก <http://img.medscape.com>

ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

การรักษาด้วยรังสีรักษามีเป้าหมายหลักเพื่อทำลายหรือหยุดยั้งการเจริญเติบโตของก้อนมะเร็ง โดยพยายามป้องกันให้อวัยวะปกติที่อยู่ข้างเคียงได้รับปริมาณรังสีต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากการได้รับรังสีปริมาณสูง ดังนั้นความถูกต้องและแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งสำหรับให้ปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วยมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งตามข้อเสนอแนะขององค์กรสากล เช่น สมาคมนักฟิสิกส์การแพทย์ประเทศอเมริกา (5) ได้เสนอแนะว่าควรมีหุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อของผู้ป่วยสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษา สำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การคำนวณปริมาณด้วยมือ (manually dose calculation) หรือการสร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณปริมาณรังสี นอกจากนี้ยังสามารถทำการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิดต่างๆ เพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีว่าเป็นไปตามแผนการรักษาที่กำหนดไว้หรือไม่ แต่เนื่องจากหุ่นจำลองที่มีขายตามท้องตลาดมีราคาแพงมากทำให้สถานพยาบาลต่างๆ ไม่มีหุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีจากการวางแผนการรักษาได้ หากมีความผิดพลาดจากแผนการรักษาอาจส่งผลให้ผู้ป่วยเกิดภาวะแทรกซ้อน เช่น พิการหรือเสียชีวิตได้

อย่างไรก็ตามประเทศไทยได้มีการพัฒนาการออกสูตรยางพาราที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการสร้างหุ่นจำลองให้มีความใกล้เคียงกับมนุษย์ซึ่งคณะผู้วิจัยมีองค์ความรู้ในการพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราให้มีคุณสมบัติดังกล่าวได้ ปัจจุบันการสร้างหุ่นจำลองจากยางพาราธรรมชาติแทนวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากยางพารามีประโยชน์ที่หลากหลายดังกล่าวไปแล้วข้างต้น โดยมีการพัฒนาหุ่นจำลองเพื่อการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพจำนวนมาก เช่น พัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์(22) การสร้างนวัตกรรมการเรียนการสอนโดยพัฒนาหุ่นจำลองยางพาราเพื่อการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย (23) การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา (24) การสร้างหุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่โดยใช้วัสดุที่ทำด้วยยางพารา ไม้และซิลิโคนที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (25) โดยหุ่นจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริงมีผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีและที่สำคัญสามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนมีความสนใจเพิ่มมากขึ้น เกิดการเรียนรู้และเข้าใจได้ง่ายกว่าการเรียนการสอนรูปแบบเดิม โดยสามารถนำไปใช้งานแทนหุ่นจำลองที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้

นอกจากนี้ยังมีการสร้างหุ่นจำลองสำหรับงานรังสีวินิจฉัยเพื่อใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจากการตรวจทางรังสีวินิจฉัย (26) สำหรับการสร้างหุ่นจำลองทางรังสีรักษานั้นได้มีการพัฒนาหุ่นจำลองเต้านมเพื่อประเมินค่าการกระจายของปริมาณรังสีในเต้านมผู้ป่วยได้รับการรักษามะเร็งเต้านม (8, 14, 27) และเพื่อเป็นสื่อสำหรับการเรียนการสอนให้กับแพทย์โดยผลิตจากซิลิโคน (28) สำหรับการสร้างหุ่นจำลองยางพาราสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีในทางรังสีรักษานั้นต้องการให้เนื้อเยื่อมีความสม่ำเสมอและความแน่นสูงกว่าหุ่นจำลองที่ใช้เป็นสื่อการสอนเนื่องจากต้องการให้มีความเหมือนเนื้อเยื่อมนุษย์เพื่อประเมินการกระจายตัวของปริมาณรังสีภายในหุ่นจำลอง การออกสูตรยางพาราให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน แคลเซียมคาร์บอเนต และสารปรับแรงตึงผิว (Teric 16A 16) หรือเพิ่มสารตัวเติม Stabilizer ช่วยเพิ่มความเสถียรและ dispersing agent ช่วยป้องกันการตกตะกอนซึ่งจะทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นจากยางพาราสามารถนำไปใช้ในวัดปริมาณรังสีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวางแผนการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งด้วยการฉายรังสีระยะไกลได้

ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการพัฒนาหุ่นจำลองมาตรฐานจากน้ำยางพาราธรรมชาติด้วยการสร้างแบบหุ่นจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติก หุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้นใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีจากการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง โดยสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อมนุษย์ สามารถใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับการวางแผนการรักษาทั้งแบบสองมิติและสามมิติ มีความคงทนแข็งแรง การทดสอบเพื่อประเมินค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองใช้เครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 ล้านโวลต์ ด้วยแผนการรักษาแบบสองมิติและสามมิติจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร การวิเคราะห์ความถูกต้องของการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นด้วยการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีที่แพทย์กำหนด (prescribed dose) ระหว่างการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นและคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ระเบียบวิธีวิจัย

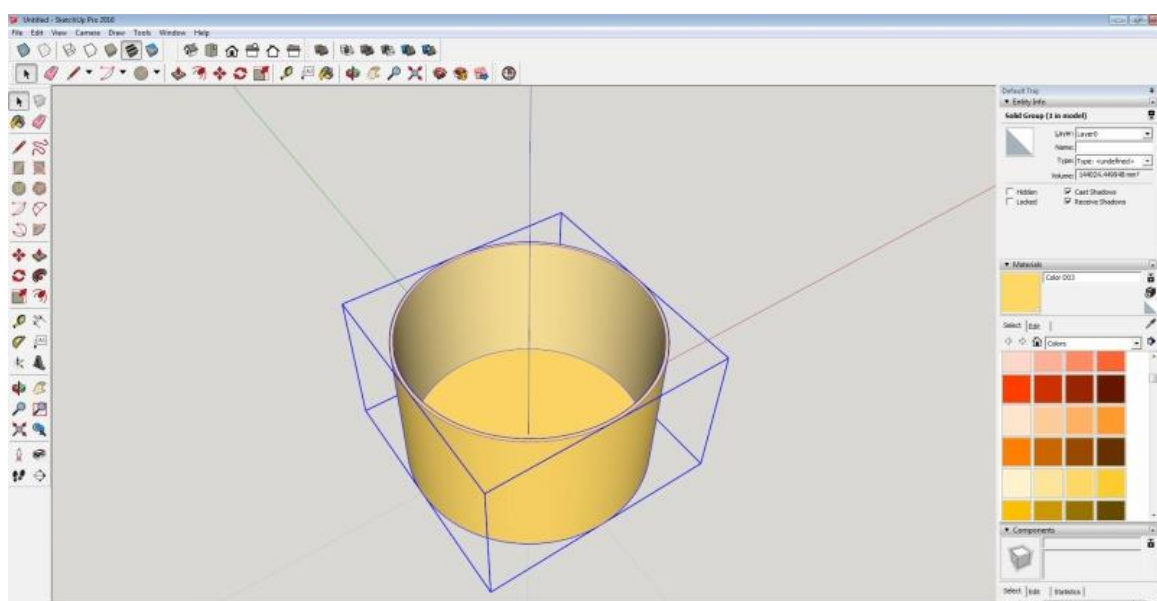
การดำเนินวิจัยในครั้งนี้ใช้เครื่องพิมพ์สามมิติในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์หุ่นจำลองยางพาราขึ้นซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

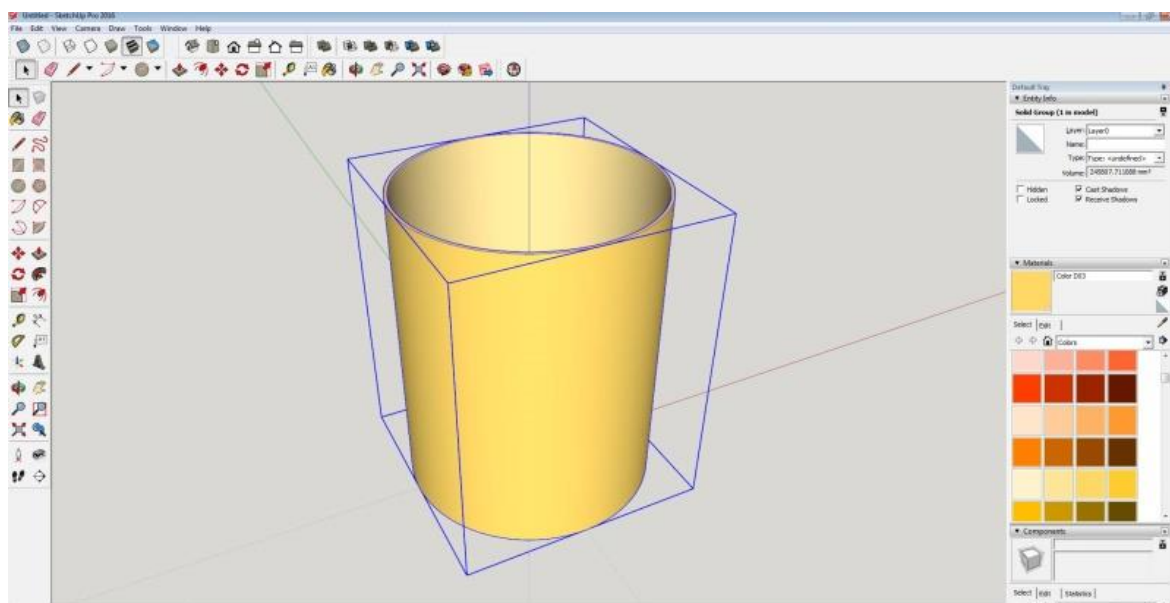
1.1 การออกแบบหุ่นจำลองด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp

การสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp ในการออกแบบให้มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ภายในมีลักษณะเป็นช่องกลวงสำหรับใส่ยางพาราและหัววัดรังสีที่กึ่งกลางหุ่นจำลอง กำหนดให้ผนังมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร เพื่อลดอิทธิพลของการลดทอนปริมาณรังสี (radiation attenuation) ในขณะที่ยังคงความแข็งแรงและกันน้ำรั่วได้ การศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งหุ่นจำลองออกเป็น 2 ชิ้น ซึ่งสามารถนำมาประกอบกันได้ การออกแบบในลักษณะดังกล่าวเพื่อใช้ในการวัดการกระจายของปริมาณรังสี (dose distribution) ด้วยฟิล์มวัดรังสีได้ โดยหุ่นจำลองชิ้นแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 11 และหุ่นจำลองชิ้นที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 12

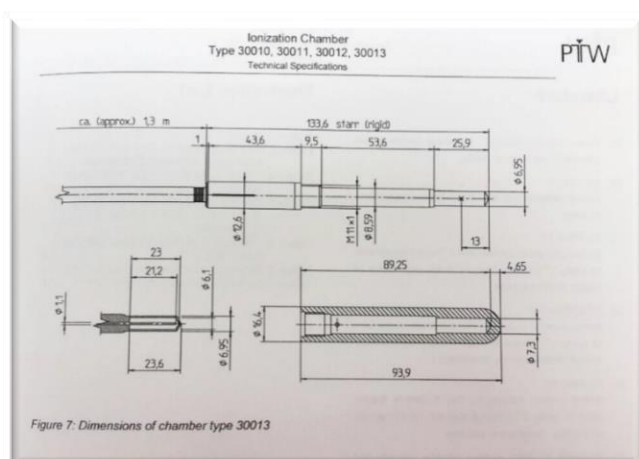
สำหรับหุ่นจำลองชิ้นที่สองได้ออกแบบให้มีช่องใส่หัววัดรังสีชนิด Ionization chamber ขนาด 0.6 cc กำหนดให้ผนังมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยช่องใส่หัววัดรังสีได้ออกแบบให้มีรูปร่างและขนาดเท่ากันกับหัววัดรังสีจริงดังแสดงในภาพที่ 13 (ก) เพื่อป้องกันการเกิดช่องอากาศ (air gap) ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การกระเจิงของปริมาณรังสีและทำให้การวัดปริมาณรังสีผิดพลาดได้ ผลการออกแบบช่องใส่หัววัดรังสีแสดงในภาพที่ 13 (ข) กำหนดให้หัววัดรังสีอยู่บริเวณกึ่งกลางของหุ่นจำลองซึ่งใช้เป็นตำแหน่งจุดหมุน (isocenter) ทำการ ยึดตรึงช่องใส่หัววัดรังสีด้วยฝาปิดที่มีรูเพื่อให้ช่องใส่หัววัดรังสีอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองพอดีดังแสดงใน ภาพที่ 14 การออกแบบดังกล่าวทำให้สามารถใส่หัววัดรังสีชนิด Ionization chamber ขนาด 0.6 cc ได้พอดี และอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง เมื่อนำหุ่นจำลองทั้งสองชิ้นประกบเข้าด้วยกันสามารถใช้ในการวัดปริมาณรังสีด้วย ฟิล์มวัดรังสีดังแสดงในภาพที่ 15



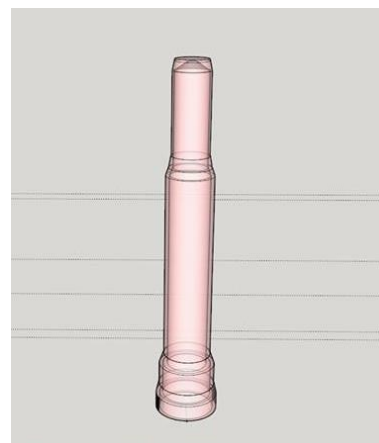
ภาพ 11 การออกแบบหุ่นจำลองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ด้วย โปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp



ภาพ 12 การออกแบบหุ่นจำลองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp

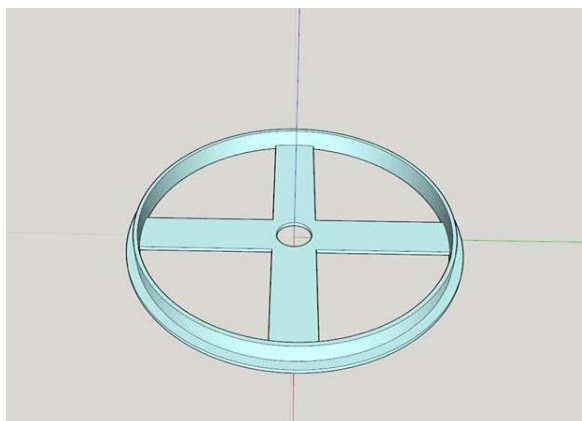


ก)

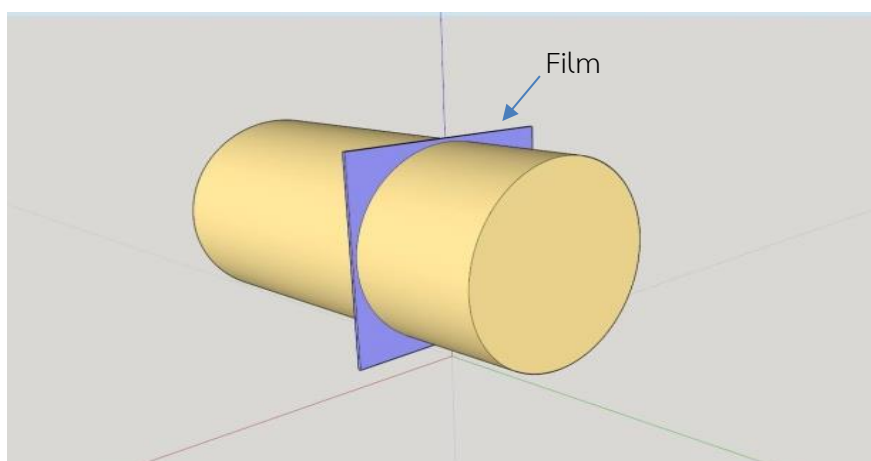


ข)

ภาพที่ 13 โครงสร้างและส่วนประกอบหัววัดรังสี IC ขนาด 0.6 cc ของบริษัท PTW และการออกแบบช่องใส่หัววัดรังสีที่มีรูปร่างและขนาดเท่ากับหัววัดรังสีขนาด 0.6 cc ด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp



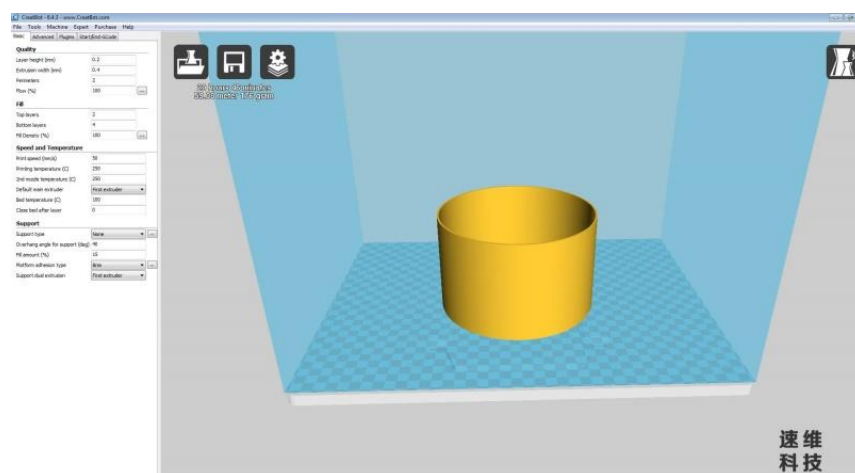
ภาพ 14 การออกแบบฝาปิดหุ่นจำลองทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร พร้อมช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc ที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองด้วยโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ SketchUp



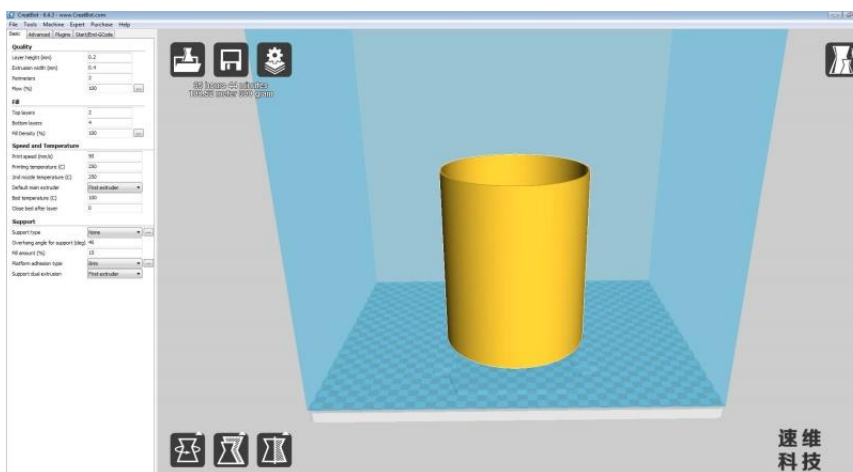
ภาพ 15 หุ่นจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ประกัปกันโดยมีฟิล์มวัดรังสีอยู่กึ่งกลาง

1.2 การสร้างหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

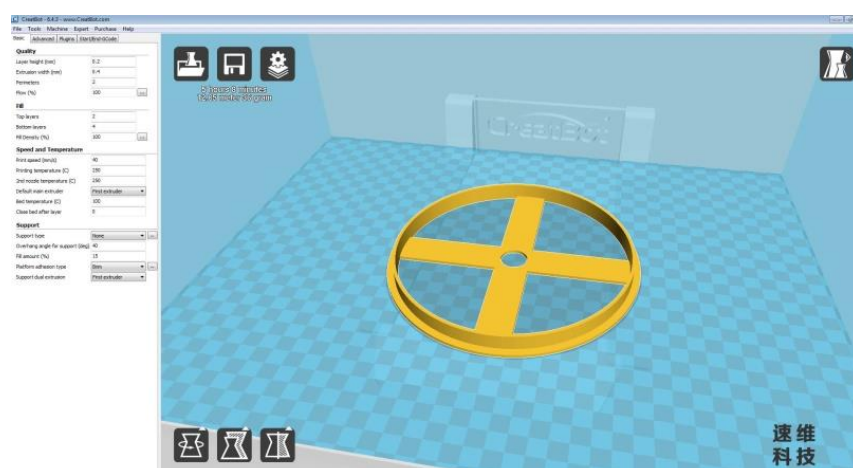
สำหรับการสร้างหุ่นจำลองทรงกระบอกด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในการเป็นแม่พิมพ์สำหรับเทยางพาราใช้วิธีการส่งไฟล์ข้อมูลการออกแบบหุ่นจำลองที่ได้จากโปรแกรม SketchUp ในขั้นตอน 1.1 เข้าสู่โปรแกรม CreateBot ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการพิมพ์สำหรับการสั่งให้เครื่องพิมพ์สามมิติสร้างชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในภาพที่ 16-17 โดยโปรแกรม CreateBot สามารถทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เช่น ความแข็งแรงทนทาน ความสามารถในการกันน้ำรั่ว การทนความร้อนจากการอบน้ำยางพารา และความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยอัตราการฉีดเส้นพลาสติก (Flow) เท่ากับ 92.5% ความหนาแน่นของเส้นพลาสติก (Fill density) เท่ากับ 100% อุณหภูมิของหัวฉีดเส้นพลาสติกเท่ากับ 245 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของฐานเครื่องพิมพ์สามมิติเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส สำหรับการขึ้นรูปช่องใส่หัววัดรังสีและปลอกสำหรับใส่หัววัดรังสีกำหนดให้พารามิเตอร์สำหรับขึ้นรูปเท่ากับการขึ้นรูปแม่พิมพ์หุ่นจำลอง ภาพช่องใส่หัววัดรังสีและภาพช่องใส่หัววัดรังสีเพื่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยโปรแกรม CreateBot ดังแสดงในภาพที่ 18-19 หลังจากกำหนดพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้วทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .gcode จากนั้นส่งดังกล่าวไปยังเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดพลาสติกเพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 20



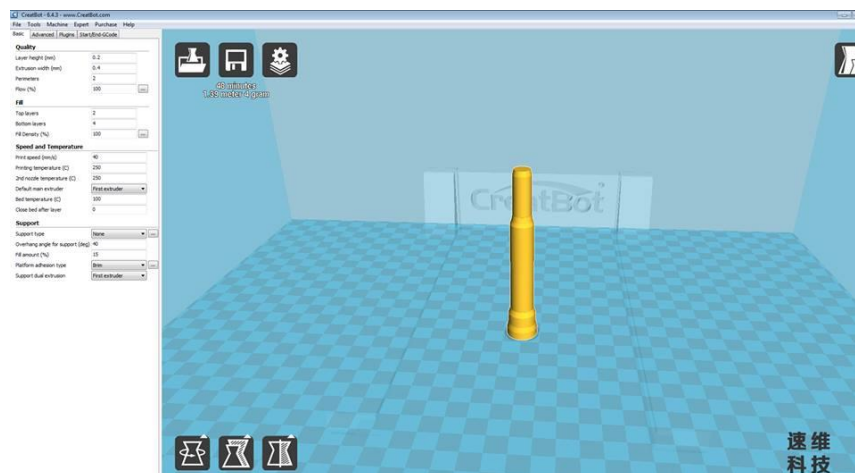
ภาพ 16 การตั้งค่าการพิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม CreatBot



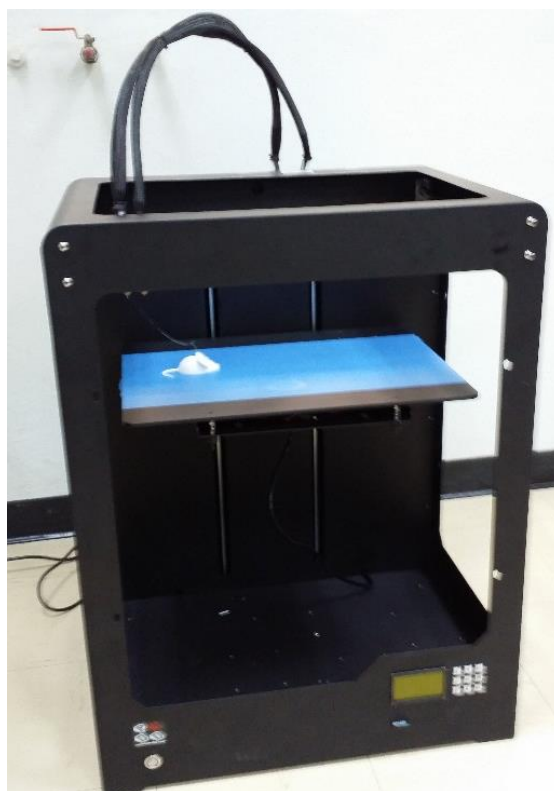
ภาพ 17 การตั้งค่าการพิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม CreatBot



ภาพ 18 การตั้งค่าการพิมพ์ฝาปิดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร พร้อมช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc โดยใช้โปรแกรม CreatBot



ภาพ 19 การตั้งค่าการพิมพ์ช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc โดยใช้โปรแกรม CreatBot



ภาพ 20 เครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

การพัฒนาหุ่นจำลองสีธรรมชาติและลวดลายในการวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบให้มีรูปร่างทรงกระบอกกลางผนังสร้างขึ้นจากพลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ภายในบรรจุยางพาราตามอัตราส่วนสารเคมีและน้ำยางชั้นตามสูตรมาตรฐานดังตารางที่ 3 สำหรับน้ำยางพาราที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นน้ำยางพาราชนิด LATEX HIGH AMMONIA ของบริษัท ไทยรับเบอร์ลาคัทเช์กรุป จำกัด โดยใช้ น้ำยางพาราเพียงแหล่งเดียวตลอดงานวิจัยเพื่อควบคุมตัวแปรด้านคุณสมบัติของน้ำยางพารา

ตารางที่ 3 สูตรมาตรฐานที่ใช้เตรียมยางเพื่อทดสอบคุณสมบัติของยางพารา (29)

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

หมายเหตุ : ดิตาเนียมไดออกไซด์เป็นสารทำให้มีสีขาวซึ่งอาจไม่ใส่กรณีต้องการให้หุ่นจำลองเปลี่ยนเป็นสีอื่น

จากการเตรียมชิ้นงานยางพาราตามสูตรในตารางที่ 3 ด้วยเทคนิคการหล่อเข้าเบ้า (Casting process) พบว่าการเทน้ำยางแต่ละชั้นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบเพื่อให้ น้ำยางแต่ละชั้นให้แห้งที่นานมากถึง 3 - 4 ชั่วโมง ดังนั้นการสร้างหุ่นจำลองทั้งตัวหากใช้เทคนิคการหล่อโดยการเทน้ำยางที่ละชั้นจึงใช้เวลานานมาก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทดสอบนำสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium sillicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัว โดยงานวิจัยของวราภรณ์และคณะ ได้ใช้สาร SSF ในการทำให้น้ำยางผสมสารเคมีจับตัวในการผลิตดอกไม้ประดิษฐ์จากน้ำยางด้วยเทคนิคแบบหล่อเข้าพิมพ์ซึ่งช่วยทำให้น้ำยางจับตัวได้เร็ว

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้พัฒนาสูตรยางพาราจากสูตรมาตรฐาน (ตามตารางที่ 3) ทำให้ได้สูตรยางพาราที่พัฒนาขึ้นแสดงดังตารางที่ 4 เพื่อสร้างหุ่นจำลองให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัวหุ่นจำลอง โดยได้ทำการหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ SSF ที่สามารถทำให้น้ำยางพาราที่สร้างขึ้น

สามารถอบแห้ง คงรูปได้ และมีสมบัติตามมาตรฐานสมบัติของหุ่นจำลองสำหรับการตรวจสอบปริมาณรังสีที่ต้องการซึ่งมีดังต่อไปนี้

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

ตารางที่ 4 สูตรยางพาราที่พัฒนาเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองยางพารา

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

หมายเหตุ สูตรที่เติม 12.5% โซเดียม ซิลิโคฟลูออไรด์ (20 g. SSF) 20 กรัม เป็นสูตรที่เวลาในเซตตัวและสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุด ที่นำมาใช้ในการสร้างหุ่นจำลอง ซึ่งการรายงานการทดสอบได้รายงานในงานวิจัย “การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง ระยะที่ 2 ปีงบประมาณ 2557

ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความหนาแน่นของชิ้นงานยางที่เตรียมได้จากสูตรในตารางที่ 4 ตามมาตรฐานสากล ดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03
- 2) ทดสอบสมบัติการทนแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 412
- 3) ทดสอบสมบัติการทนแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 624-00
- 4) ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 Hot Air Aging
- 5) ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

2.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางเพื่อใช้การทดสอบสมบัติของยางพาราก่อนการหล่อแบบจริง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้เทคนิคการหล่อเข้าพิมพ์ (Casting Process) สำหรับการขึ้นรูปหุ่นจำลอง เพื่อให้การควบคุมความหนาแน่นในเนื้อยางทั้งตัวหุ่นจำลองได้ดีกว่าและทำให้สามารถพัฒนาความหนาแน่นได้ตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยขั้นตอนการเตรียมสารเคมีผสมในยางพาราเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการสำหรับการสร้างหุ่นยางพารามีดังต่อไปนี้

- 2.1.1 ตวงน้ำยางพาราและสารเคมี (รายการที่ 1-6) ตามสูตรยางที่ใช้ดังตารางที่ 4
- 2.1.2 บ่มน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีต่างๆ จากข้อที่ 2.1.1 ในถังที่ควบคุมอุณหภูมิได้ตลอดเวลาที่มีการกวนน้ำยางพาราอย่างช้าๆ ความเร็วรอบประมาณ 20-40 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนน้ำยางพาราเกิดการคงรูปบางส่วนซึ่งทำการทดสอบด้วย Chloroform ประมาณคลอโรฟอร์มเบอร์ 2.5 ซึ่งทำให้โมเลกุลของยางคงรูปปานกลาง โดยยางพาราที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ไม่เหนียวจนเกินไป
- 2.1.3 ทำการเติม 12.5% SSF และสารเคมีต่างๆ ตามปริมาณสูตรดังแสดงในตารางที่ 4
- 2.1.4 กรองน้ำยางพาราในข้อที่ 2.1.3 ลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปสี่เหลี่ยมขนาด 200 * 200 * 60 มิลลิเมตร โดยการเทลงในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ
- 2.1.5 ตั้งแม่พิมพ์ที่มีน้ำยางพาราทิ้งไว้ เพื่อให้น้ำยางพาราเกิดการเซตตัวหรือน้ำยางจับตัวกันดีแล้ว
- 2.1.6 นำน้ำยางพาราที่เทลงในแม่พิมพ์แล้วไปทำการอบให้น้ำยางพาราเกิดการคงรูปด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำยางเซตตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งยางสุก
- 2.1.7 แกะแม่พิมพ์ออก นำชิ้นงานยางที่เตรียมได้ ไปแช่ล้างสารเคมียางที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด โดยการแช่ในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 นาที และนำมาล้างผ่านน้ำสะอาด จนกระทั่งสังเกตเห็นน้ำล้างมีสีใสสะอาดเป็นเวลา 5 นาที (ตามเอกสารอ้างอิง [1 และ 2]) แล้วนำไปอบให้แห้ง
- 2.1.8 ทำการทดสอบนำตัวอย่างชิ้นงานยางที่เตรียมได้จากข้อ 2.1.7 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐานสากล

สำหรับการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างยางพาราได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในทุกสัปดาห์ที่สถานะอุณหภูมิห้อง โดยทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ติดต่อกัน สำหรับการเรียกชื่อชิ้นงานยางพาราที่ทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อให้เป็นการง่ายในการเรียกชื่อชิ้นงานตัวอย่างยางพาราจึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียดตัวอย่างของชื่อที่ใช้แทนตัวอย่างที่แสดงในกราฟและตารางบอกค่าสมบัติต่างๆ

ชื่อใช้แทน ตัวอย่าง	รายละเอียดตัวอย่าง
WEEK 1	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 1 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
WEEK 2	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
WEEK 3	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 3 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
WEEK 4	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 4 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
WEEK 5	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 5 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
WEEK 6	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ที่ทิ้งไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ที่ 6 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในข้อที่ 2.2.1-2.2.4
Aging 2D	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ซึ่งชิ้นงานนี้จะทำการทดสอบการต้านต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน 2 วัน ดังข้อที่ 2.1.5
Aging 7D	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ซึ่งชิ้นงานนี้จะทำการทดสอบการต้านต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน 7 วัน ดังข้อที่ 2.1.5
Aging 14D	ชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางในข้อที่ 2.17 ซึ่งชิ้นงานนี้จะทำการทดสอบการต้านต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน 14 วัน ดังข้อที่ 2.1.5

2.2 การทดสอบตัวอย่างชิ้นงานยางพาราเพื่อศึกษาความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

ตามมาตรฐานสากล

2.2.1 ความหนาแน่น

นำชิ้นงานตัวอย่างยางพาราทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.1.7 มาชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง วัดความกว้างและความยาวของชิ้นตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Calipers) จากนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นทั้งหมด 5 ค่า นำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ความหนาแน่นของชิ้นงานในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรคำนวณจากสมการ

$$D = M/V$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (Density) หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงานตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.2.2 ความแข็ง (Hardness) ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) D2240-03

นำชิ้นงานตัวอย่างมาเตรียมได้จากข้อที่ 2.1.7 จำนวน 5 ชิ้น มาทดสอบหาความแข็งด้วยเครื่อง Durometer Hardness Tester แสดงดังภาพที่ 21 จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 21 แสดงเครื่องมือทดสอบความแข็ง

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

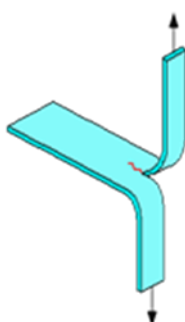
การทดสอบการทนแรงดึงใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 22 โดยการเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปดัมเบลจำนวน 7 ชิ้น ชิ้นงานดังกล่าวจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/min load cell 1 kN ด้วยแรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at Yield), %การยืดออก ณ จุดขาด (Strain at Break) และค่ามอดูลัส ณ 100 % การยืดออก (Modulus at 100% Elongation)



ภาพที่ 22 แสดงเครื่องมือทดสอบการทนแรงดึง

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

การทดสอบการทนแรงฉีกขาดใช้การทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Testing แสดงดังภาพที่ 23 โดยเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูป Trouser Test Specimen จำนวน 7 ชิ้น ชิ้นงานจะถูกดึงด้วยความเร็ว 20 mm/min load cell 1 kN ใช้แรงดึง 1 kN จากนั้นรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tear Strength



ภาพที่ 23 แสดง Trouser Test Specimen สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Tensile Testing

2.2.5 ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Resistance to aging) ตามมาตรฐาน

ASTM D 573 Hot Air Aging

การทดสอบความต้านทานความเสื่อมสภาพใช้วิธีการนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อที่ 2.1.7 มาเร่งบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 2, 7 และ 14 วัน จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ตามวิธีในข้อที่ 2.2.2, 2.2.3 และ 2.2.4 และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ตามข้อที่ 2.2.6

2.2.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

นำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จาก ขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 2.1.7, ข้อที่ 2.2.5 และ ขั้นตอนที่ 4 มาทดสอบหาค่าหา Decomposition Temperature และสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยางตัวอย่างในแต่ละสูตรด้วย Thermalgravimeitric Analysis (TGA) แสดงดังภาพที่ 24 โดยมีสถานะในการทดสอบด้วยเทคนิค TGA ดังนี้ ให้อุณหภูมิจาก 25 °C ไปที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม



ภาพที่ 24 แสดง Thermalgravimeitric Analyser (TGA)

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

ทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพาราที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 2 มาทดสอบสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยทำการฉายรังสีชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) บริษัท Varian รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV ในวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อมาตรฐานชนิด solid water phantom ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU ความกว้างลำรังสี (Treatment field size) เท่ากับ 30x30 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ครอบคลุมวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อและชิ้นงานทั้งหมด กำหนดระยะต้นกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อ (SSD) เท่ากับ 95 เซนติเมตร วางชิ้นงานยางพาราที่ตำแหน่ง isocenter ที่ระยะความลึก (Depth) จากผิววัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเท่ากับ 5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 25 เพื่อให้เป็นการง่ายในการเรียกชื่อชิ้นงานตัวอย่างยางพาราจึงได้มีการกำหนดชื่อใช้แทนชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นแสดงดังตารางที่ 6 ทำการฉายปริมาณรังสีในตั้งแต่ 1,000-6,000 cGy โดยฉายรังสีชิ้นงานซ้ำและต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ กำหนดการฉายรังสีแต่ละครั้งในสัปดาห์เท่ากับ 1,000 cGy โดยในสัปดาห์ที่ 2 ฉายปริมาณรังสีเพิ่มอีก 1,000 cGy และทำการฉายรังสีเพิ่มในลักษณะเช่นนี้เป็นระยะเวลาติดต่อกันรวมระยะเวลา 1.5 เดือนดังตารางที่ 7 จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการสังเกต ทดสอบการรักษารูปร่างของชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ดังขั้นตอนในข้อที่ 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4 และ 2.2.6



ภาพที่ 25 การฉายรังสีตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) MV ใน solid water phantom อัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU ความกว้างลำรังสี 30x30 ตารางเซนติเมตร ระยะต้นกำเนิดรังสีถึงวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเท่ากับ 95 เซนติเมตร วางชิ้นงานยางพาราที่ระยะความลึกจากผิววัสดุสมมูลเนื้อเยื่อเท่ากับ 5 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์

สร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราที่ได้จากขั้นตอนการพัฒนาสูตรในขั้นตอนที่ 2 และเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา โดยทำการเทน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีตามสูตรลงในหุ่นจำลองทรงกระบอกที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติทั้งหุ่นจำลองชิ้นแรกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชิ้นที่สองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร จากนั้นปิดฝาว่างช่องใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลอง และทำการอบให้แห้งตามขั้นตอนที่ 2.1

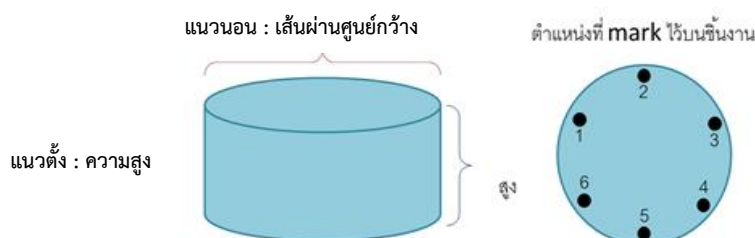
ขั้นตอนที่ 5 การศึกษาการหดตัวของชิ้นงาน

ทำการศึกษาเพื่อประเมินการหดตัวของชิ้นงานซึ่งส่งผลให้สามารถกำหนดชิ้นงานให้มีขนาดตามต้องการ โดยทดสอบการหดตัวของชิ้นงานตลอดระยะเวลา 6 เดือน เพื่อทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว ด้วยการเตรียมชิ้นงานยางพาราตามขั้นตอนที่ 2 นำชิ้นงานตัวอย่างยางพาราจากข้อที่ 2.1.7 จำนวน 5 ชิ้น เพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นตัวอย่างด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Calipers) ตามตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนดเพื่อบ่งบอกขนาดที่ทำการวัดได้อย่างถูกต้องแสดงดังภาพ 26 ทำให้ได้ค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นงาน โดยทำการวัดค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นงานทุกสัปดาห์ตามจุดที่ได้กำหนดตำแหน่งไว้เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอนทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอน จากนั้นหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงาน สำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \frac{\text{ความยาว Week}_0 - \text{ความยาว Week}_i}{\text{ความยาว Week}_0} \times 100$$

เมื่อ ความยาว Week₀ คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความสูงของชิ้นงาน เริ่มต้น

ความยาว Week_i คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความสูงของชิ้นงานสัปดาห์ที่ 2, 3, 4, 5, 6,....



ภาพที่ 26 แสดงรูปร่างและตำแหน่งชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ใช้ทดสอบการหดตัว

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

ทำการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอเพื่อประเมินความสามารถในการวัดค่าปริมาณรังสีในทางรังสีรักษา โดยประกอบด้วยการประเมินค่า CT number ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron density) และค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ภายในหุ่นจำลอง

6.1. การประเมินค่า CT number

6.1.1 ทำการสร้างภาพหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเครื่อง CT simulator

6.1.2 ส่งข้อมูลภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอไปยังระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา (Computerized treatment planning system) เพื่อประเมินค่า CT number ด้วยการเปรียบเทียบกับค่า CT number ของน้ำซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับการประเมิน

6.1.3 บันทึกค่า CT number จากพื้นที่ที่สนใจบนหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

6.1.4 กำหนดช่วง tolerance จากเลข CT number สูงสุดและต่ำสุด

6.1.5 ประเมินผลโดยการเปรียบเทียบค่า Median ของ CT number ของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอกับน้ำ

6.2 การทดสอบค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ใช้การประเมินจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ซึ่งกำหนดให้มีค่า CT number ไม่เกิน 10 HU

6.3 การทดสอบค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron density)

6.3.1 ประเมินค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในภาพหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

6.3.2 กำหนดบริเวณที่สนใจ (ROI) ด้วยการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในหุ่นจำลองจำนวน 4 ตำแหน่งทั่วทั้งหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

6.3.3 บันทึกค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ได้จากภาพคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาหุ่นจำลองศีรษะและลำคอเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของน้ำ

ขั้นตอนที่ 7 การวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ทำการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองอย่างพาราด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา Pinnacle³ ด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ทำการวางแผนการรักษาด้วยเทคนิค SAD technique กำหนด isocenter ที่กึ่งกลางหุ่นจำลอง โดยกำหนดให้ isocenter ตำแหน่งเดียวกับกึ่งกลาง sensitive volume ของหัววัดรังสีชนิด ionization chamber กำหนดให้ปริมาณรังสีที่ isocenter เท่ากับ 100 cGy/fraction คำนวณปริมาณรังสีด้วยอัลกอริทึม Collapsed Cone Convolution Superposition (CCCS) dose algorithm ขนาดกริดสำหรับคำนวณปริมาณรังสีเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร จากนั้นส่งข้อมูลแผนการรักษาไปห้องฉายรังสีเพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีตามแผนการรักษา โดยการวางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษาโรคมะเร็งศีรษะและลำคอแบบสองมิติและสามมิติในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอประกอบด้วย

7.1 วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษาโรคมะเร็งศีรษะและลำคอแบบสองมิติ

7.1.1 กำหนดทิศทางลำรังสี 2 ทิศทางประกอบด้วยลำรังสีชนิด lateral opposing technique ซึ่งเป็นการฉายรังสีเข้าด้านข้างทั้งซ้ายและขวา (Left and right lateral) ของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

7.1.2 เปิดลำรังสีให้มีขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$ เท่ากันทั้ง 2 ทิศทาง

7.1.3 กำหนดค่าน้ำหนักปริมาณรังสี (beam weighting) เท่ากันทั้ง 2 ทิศทาง

7.2 วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษาโรคมะเร็งศีรษะและลำคอแบบสามมิติ

7.2.1 กำหนดทิศทางลำรังสี 3 ทิศทางประกอบด้วยลำรังสีชนิด lateral opposing technique ซึ่งเป็นการฉายรังสีเข้าด้านข้างทั้งซ้ายและขวา (Left and right lateral) และ anterior field ด้วยมุม 0 องศา

7.2.2 เปิดลำรังสีให้มีขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$ เท่ากันทั้ง 3 ทิศทาง กำหนดรูปร่างก้อนมะเร็ง (PTV) ให้มีขนาดใกล้เคียงกับลำรังสี โดยเปิดลำรังสีให้ครอบคลุมก้อนมะเร็งด้วยการใช้อุปกรณ์กำหนดลำรังสีชนิดมัลติลีฟคอลลิเมเตอร์ (MLC)

7.2.3 กำหนดค่าปริมาณรังสีทั้ง 3 ทิศทางด้วยการแบ่งค่าน้ำหนักปริมาณรังสีตามความเหมาะสมของการวางแผนการรักษาด้วยนักฟิสิกส์การแพทย์

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบหุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสี

ทำการประเมินความถูกต้องของหุ่นจำลองสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีโดยการฉายรังสีด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติและ 3 มิติลงบนหุ่นจำลองตามแผนการรักษาจากระบบคอมพิวเตอร์ วางแผนการรักษา ทำการวัดค่าปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด ionization chamber ขนาด 0.6 cc ในตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองจำนวน 3 ครั้ง แก้ค่าปัจจัยอุณหภูมิและความดัน (Temperature & Pressure correction) จากการวัดค่าปริมาณรังสี คำนวณค่าการแตกตัวของปริมาณรังสีในอากาศ (Exposure) เป็นการดูดกลืนปริมาณรังสีในน้ำ ($D_{w,Q}$) มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gy) ดังสมการ

$$D_{w,Q} = M_Q \times N_{D,w,Q_0} \times k_{Q,Q_0}$$

เมื่อ N_{D,w,Q_0} คือ ค่าแก้การดูดกลืนปริมาณรังสีในน้ำ (absorbed dose to water calibration factor) ซึ่งเป็นค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบหัววัดรังสีกับหัววัดรังสีมาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (secondary standard laboratory) มีค่าเท่ากับ 54.15 mGy/nC

k_{Q,Q_0} คือค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบของหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber ระหว่างวัดในลำรังสีของเครื่อง Co-60 เป็นอ้างอิงกับวัดในลำรังสีของเครื่องเร่งอนุภาค

M_Q คือค่าที่อ่านได้จากการแก้ค่าของอิทธิพลที่มีผลต่างๆ หาได้จากสมการ

$$M_Q = M_1 k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s$$

เมื่อ M_1 คือ ค่าที่อ่านได้จริงจากเครื่อง Electrometer มีหน่วยเป็น nC

k_{TP} คือ ค่าแก้อุณหภูมิและความดันเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

T คือ อุณหภูมิขณะทำการวัด มีหน่วยองศาเซลเซียส

P คือ ความดันขณะทำการวัด มีหน่วยเป็น kPa หาได้จากสมการ

$$k_{TP} = \left[\frac{273.15+T}{273.15+20} \right] \left[\frac{1013.25}{P} \right]$$

เมื่อ k_{elec} คือ ค่าแก้ของเครื่อง electrometer ที่ได้ทำการสอบเทียบกับกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

k_{pol} คือ ค่าแก้ของหัววัดรังสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับหัววัดรังสีหาได้จากสมการ

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M}$$

k_s คือ ค่าแก้การตอบสนองของหัววัดรังสีเนื่องจากการรวมตัวกันของไอออนที่เกิดจากการแตกตัวในหัววัดรังสี หาได้จากสมการ

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2$$

เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณปริมาณรังสีที่ได้จากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและหุ่นจำลองที่สร้างขึ้น โดยเกณฑ์ประเมินความถูกต้องปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาใช้การประเมินตามมาตรฐานสากลของสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) (32) โดยทำการทดสอบฉายรังสี 3 มิติด้วย MLC shape fields สำหรับ homogenous phantom ที่ตำแหน่ง central ray ผลความแตกต่างระหว่างการวัดจริงและการคำนวณปริมาณรังสีต้องมีค่าไม่เกิน 2% ตามตารางที่ 8 จึงสามารถประยุกต์ใช้หุ่นจำลองในงานทางรังสีรักษาได้ สำหรับขั้นตอนการวางแผนการรักษาคณะผู้วิจัยจะทำการวางแผนการรักษาร่วมกับแพทย์ทางรังสีรักษา โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อให้แผนการรักษามีความใกล้เคียงกับรูปแบบการรักษาจริงมากที่สุด

ตารางที่ 8 การประเมินความถูกต้องปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

Situation	Absolute dose at normalization point (%) ^a	Central ray (%)	Inner beam (%)	Penumbra (mm)	Outer beam (%)	Buildup region (%)
Homogeneous phantoms						
Square fields	0.5	1	1.5	2	2	20
Rectangular fields	0.5	1.5	2	2	2	20
Asymmetric fields	1	2	3	2	3	20
Blocked fields	1	2	3	2	5	50
MLC shaped fields	1	2	3	3	5	20
Wedged fields	2	2	5	3	5	50
External surface variations	0.5	1	3	2	5	20
SSD variations	1	1	1.5	2	2	40
Inhomogeneous phantoms^b						
Slab inhomogeneities	3	3	5	5	5	—
3-D inhomogeneities	5	5	7	7	7	—

Note: Percentages are quoted as per cent of the central ray normalization dose.

^a Absolute dose values at the normalization point are relative to a standard beam calibration point.

^b Excluding regions of electronic disequilibrium.

ขั้นตอนที่ 9 การวิเคราะห์และสรุปผล

การวิเคราะห์ความถูกต้องของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอยางพาราที่สร้างขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ใช้การเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ในหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นและการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติ โดยใช้เกณฑ์การประเมิน homogeneous phantom ด้วย MLC shaped fields ตามมาตรฐานสากลของสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ดังตารางที่ 8

โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage difference) หาได้ดังสมการ

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

เมื่อ D_{mea} คือ ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี

D_{TPS} คือ ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้จากการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

บทที่ 4

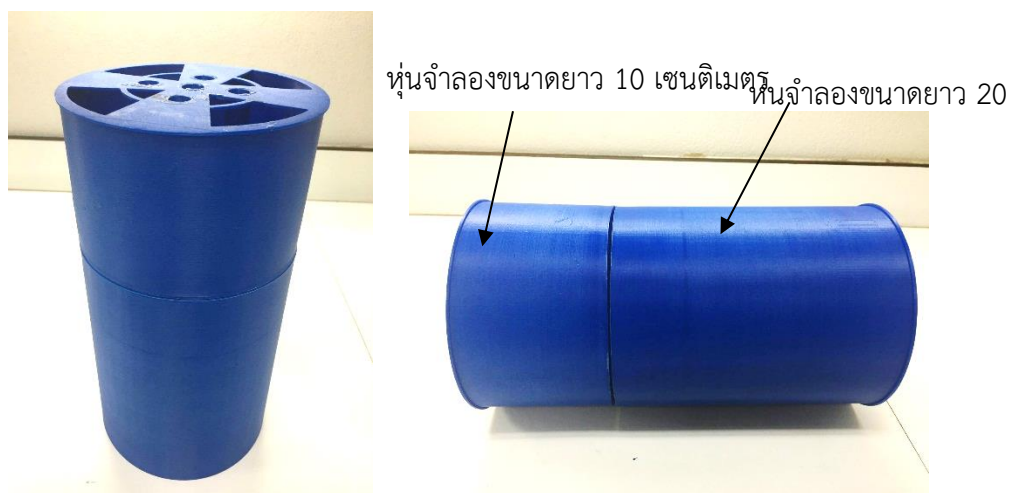
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างหุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

1.1 ผลออกแบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยโปรแกรมออกแบบภาพสามมิติ sketch up และสร้างแม่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติกด้วยพลาสติกชนิด ABS ทำให้ได้แม่พิมพ์หุ่นจำลองทรงกระบอกจำนวน 2 ชิ้น โดยหุ่นจำลองชิ้นแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชิ้นที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 27 ผลการออกแบบให้หุ่นจำลองมีช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 CC ซึ่งยึดด้วยฝาปิดที่เปิดโล่งบางส่วนทำให้น้ำยางพาราเกิดการระเหยได้ดีในกระบวนการอบยางพาราดังภาพที่ 27 เมื่อประกอบหุ่นจำลองทั้ง 2 เข้าด้วยกันทำให้ได้หุ่นจำลองที่มีความยาว 30 เซนติเมตร โดยระหว่างรอยต่อหุ่นจำลองสามารถวางฟิล์มวัดรังสีชนิด GafChromic film เพื่อประเมินค่าการกระจายปริมาณรังสีได้ทั้งเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติดังภาพที่ 28



ภาพ 27 แม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มีช่องใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 CC ซึ่งยึดด้วยฝาปิดที่เปิดโล่งบางส่วน



ภาพ 28 แม่พิมพ์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร วางประกบกันในแนวตั้งและแนวนอนทำให้ได้ความยาว 30 เซนติเมตร โดยบริเวณรอยต่อใช้สำหรับการวางฟิล์มวัดรังสีชนิด GafChromic film

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสูตรและเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา

2.1 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ โดยการเติมสารโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยาง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาปริมาณของ SSF ที่เหมาะสม เพื่อให้หุ่นจำลองยางพาราที่สร้างขึ้นสามารถคงรูปและอบแห้งได้ โดยปริมาณที่เหมาะสมจากการศึกษา ได้แก่ สูตร (20 g. SSF) ตามตารางที่ 4 ซึ่งเป็นสูตรที่เวลาในเซตตัวและสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการสร้างหุ่นจำลอง โดยการรายงานการทดสอบได้รายงานในงานวิจัย “การพัฒนาหุ่นจำลองรังสีรักษาสำหรับฝึกทักษะการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง ระยะที่ 2” ปีงบประมาณ 2557 สำหรับรายงานวิจัยนี้รายงานสมบัติทางกายภาพที่สังเกตได้จากชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้น เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ แสดงดังตารางที่ 9 สำหรับการเตรียมชิ้นงานยางพาราที่ใช้ทดสอบ ในขั้นตอนสุดท้ายชิ้นงานจะถูกล้างสารเคมีต่างๆ ออกด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 °C แล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อให้ชิ้นงานที่เตรียมได้แห้งจริงและมีการเซตตัวที่แน่นอนก่อน โดยได้ทั้งชิ้นงานทดสอบนี้ไว้ที่สภาพเดียวกัน (ความชื้นและอุณหภูมิเดียวกัน) ก่อนเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่จะทำการทดสอบสมบัติต่างๆ และชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ตามการทดสอบดังข้อที่ 2.2.5 แสดงดังตารางที่ 11 พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางพารามีสีเหลือง

น้ำตาลโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ที่เกิดจากการ Aging ไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยชิ้นงานที่ผ่านการ Aging ที่ Day 7 และ Day 14 มีลักษณะพื้นผิวและสีไม่แตกต่างกัน แต่การถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลอาจจะมีแสงไม่พอเพียงและไม่เท่ากันในการถ่ายรูปแต่ละครั้ง เพื่อความแน่นอนทางคณะผู้วิจัยทำการวัดสีเปรียบเทียบกับกันด้วยเครื่อง Colorimeter ดังตารางที่ 10 และ 12 ซึ่งการทดสอบจะวัดค่า color parameter ; L*, a*, b* โดยการตรวจวัดทั้งหมด 8 จุดต่อ 1 ชิ้นงาน

ในส่วนของค่าสี (L*, a*, b*) ที่เป็นค่าที่นิยมใช้ในการประเมินลักษณะปรากฏของตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการศึกษา โดยค่า L* ที่เข้าใกล้ 100 หมายถึง ตัวอย่างชิ้นงานมีความสว่างมากจนเป็นสีขาวหรือสีขาวจาง แต่ถ้าค่า L* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ตัวอย่างชิ้นงานมีความสว่างน้อยลงจนเป็นสีดำ ส่วนค่า a* ที่เป็นบวกแสดงว่าตัวอย่างชิ้นงานเป็นสีแดง แต่ค่า a* ที่เป็นลบ แสดงว่าตัวอย่างชิ้นงานเป็นสีเขียว และในค่า b* ที่เป็นบวกแสดงว่าตัวอย่างชิ้นงานเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b* เป็นลบแสดงว่าตัวอย่างชิ้นงานเป็นสีน้ำเงิน

จากสมการความแตกต่างของค่าสี L* a* และ b* ดังต่อไปนี้

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

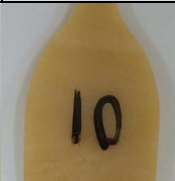
ทำการเปรียบเทียบค่าสีของตัวอย่างชิ้นงาน โดยใช้ค่าสีของสัปดาห์ที่ 1 (WEEK1) เป็นค่า L*₁ a*₁ และ b*₁ ในการคำนวณด้วยสมการข้างต้น ซึ่งค่า ΔE ที่คำนวณได้จะแสดงในตารางที่ 10 และ 12

จากตารางที่ 10 และ 12 จะพบว่าค่า L* ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ และชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging มีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนค่า a* และ b* ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging มีค่ามากกว่าเล็กน้อย ค่า a* และ b* ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานยางพาราเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ มีสีแดงและเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่า a* เพิ่มขึ้นเพียง 1.34 และค่า b* เพิ่มขึ้น 2.03 แต่เมื่อมองด้วยตาเปล่าสีของชิ้นงานยางตัวอย่างทั้งสองสภาวะนั้น จะมองไม่เห็นความแตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาค่า ΔE ชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์จากตารางที่ 10 พบว่ามีค่า ΔE เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยระหว่างสัปดาห์ที่ 2 และ 3 และตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 ถึงสัปดาห์ที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จากตารางที่ 12 จะพบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging 14 วัน มีค่า ΔE เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากจากค่า ΔE ของชิ้นงานที่ผ่านการ Aging 2 และ 7 วัน ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging 14 วัน จะมีสีที่เข้มขึ้นเล็กน้อย

สำหรับความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นใช้วิธีการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นและการหดตัวของชิ้นงานเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นสภาวะของการนำไปใช้งานจริง

พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แสดงดังภาพ 29 ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง ดังรายงานในขั้นตอนที่ 5

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์

ตัวอย่าง	WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4	WEEK 5	WEEK 6
ภาพถ่าย						
ลักษณะที่สังเกตเห็น	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์

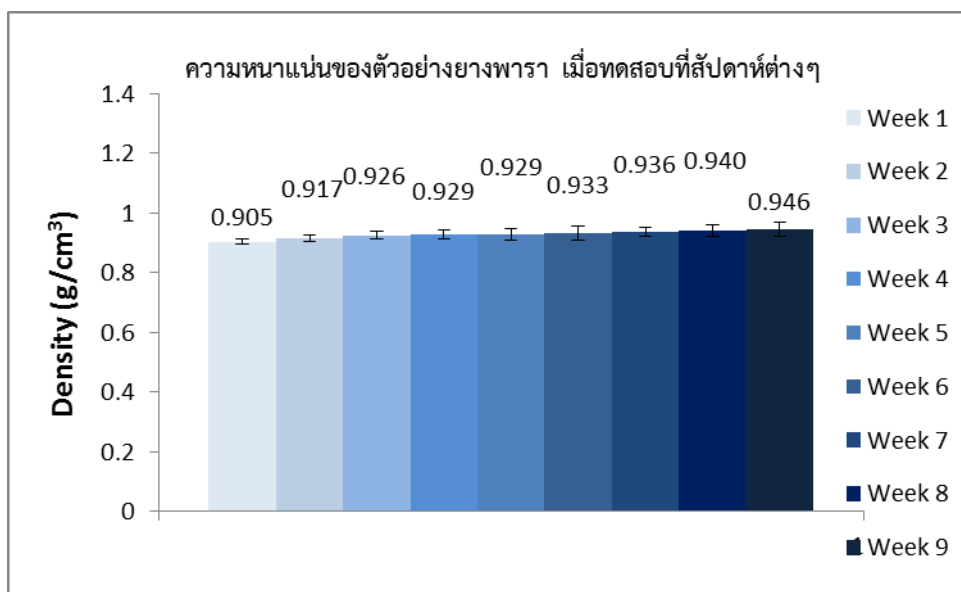
ตัวอย่าง	WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4	WEEK 5	WEEK 6
L^*	46.77	46.09	45.85	48.59	48.44	48.19
a^*	-0.39	-0.89	-0.40	-0.60	-0.63	-0.54
b^*	11.89	10.78	11.26	11.12	11.03	10.76

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

ตัวอย่าง	Aging 2D	Aging 7D	Aging 14D
ภาพถ่ายชิ้นงาน			
ลักษณะที่สังเกตเห็น	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล	ผิวเรียบ สีเหลือง น้ำตาล

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

ตัวอย่าง	Aging 2D	Aging 7D	Aging 14D
L^*	45.78	46.27	45.25
a^*	0.67	0.84	1.10
b^*	12.26	12.81	12.41

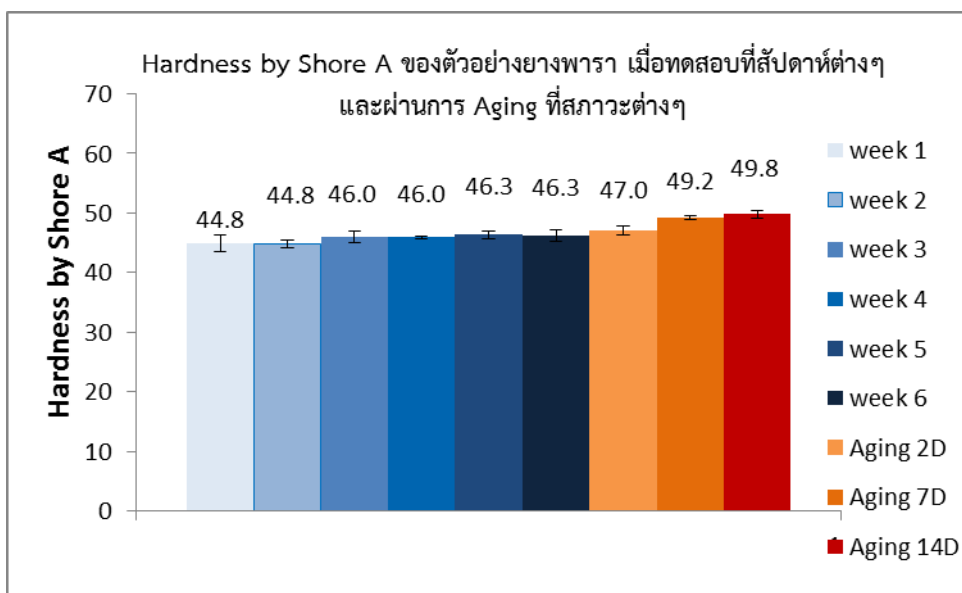


ภาพที่ 29 ความหนาแน่นของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ

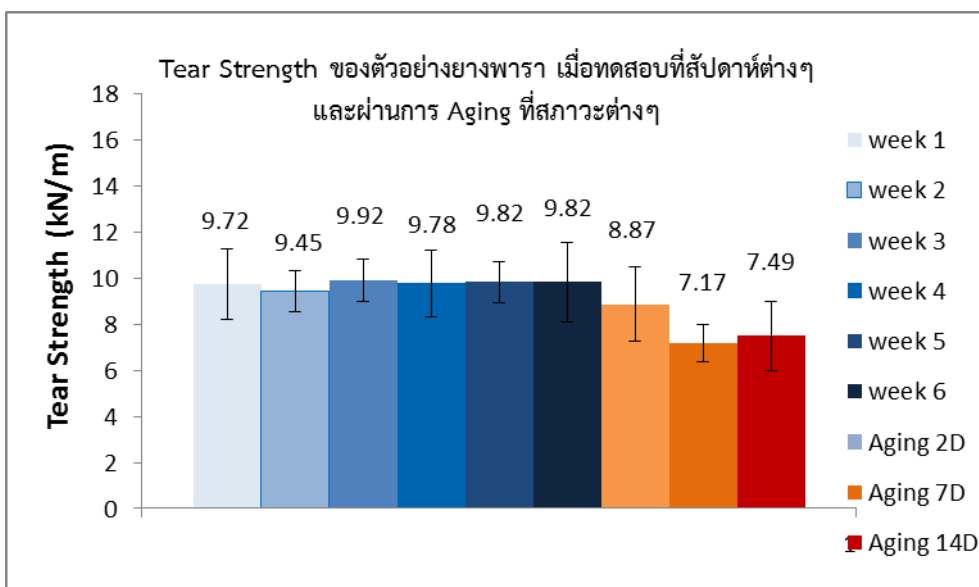
2.2 สมบัติเชิงกลของตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลองรังสีรักษา

จากชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมขึ้นจากการพัฒนาสูตรยางเพื่อสร้างหุ่นจำลอง ได้นำมาทดสอบหาสมบัติเชิงกลต่างๆ ประกอบด้วยค่าความแข็ง ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนต่อการฉีกขาด ตามวิธีทดสอบในข้อ 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness by Shore A) แสดงดังภาพที่ 30 พบว่าตัวอย่างยางพาราที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าความแข็งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานความแข็งที่ตั้งไว้คือไม่ต่ำกว่า 23 และชิ้นงานตัวอย่างยางพารา เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความแข็งในทุกสัปดาห์เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging นั้น มีแนวโน้มมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาของการ Aging เป็น 14 วัน ซึ่งจะเห็นว่าความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานตัวอย่างยางนั้นมีผลต่อค่าความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องกับชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging จะพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ Aging จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าเล็กน้อย

สำหรับผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดแสดงดังภาพที่ 31 พบว่าค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานหุ่นจำลองที่ตั้งไว้ และพบว่าผลการทดสอบค่าการทนแรงฉีกขาดทุกสัปดาห์ ติดต่อกัน 6 สัปดาห์ของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการ Aging ด้วยระยะเวลาที่มากขึ้น มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

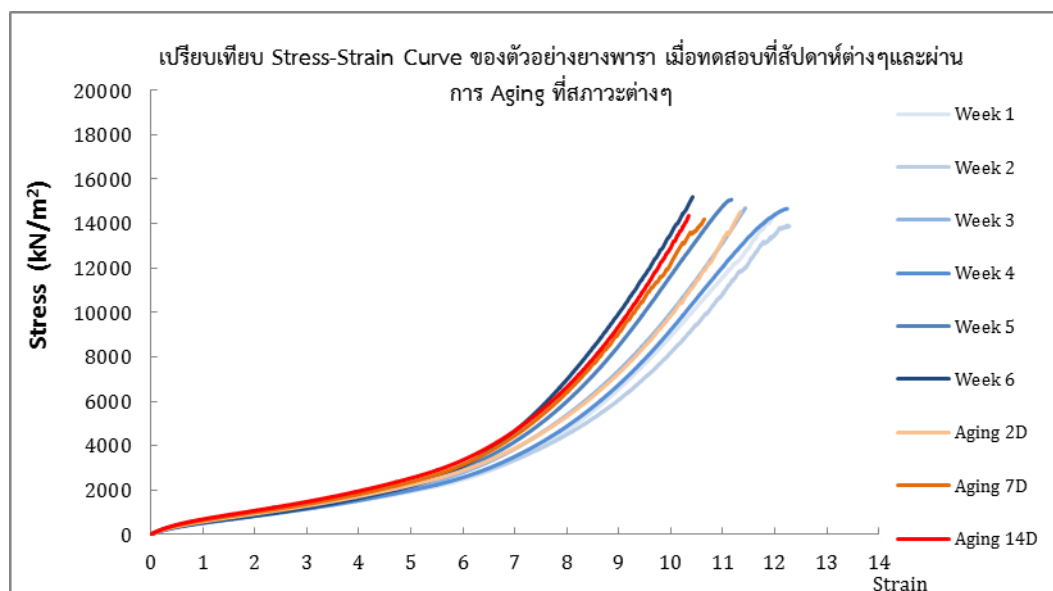


ภาพที่ 30 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

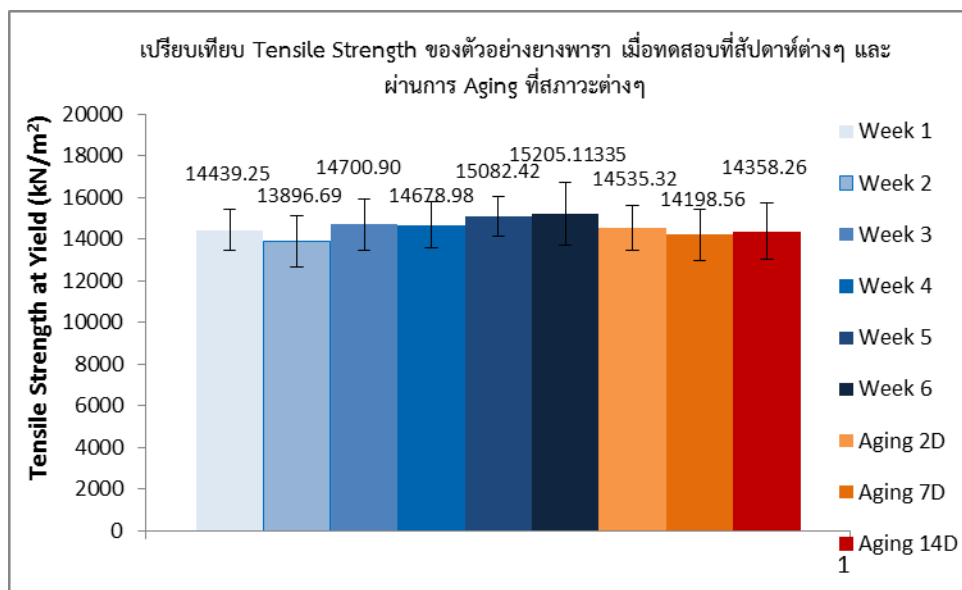


ภาพที่ 31 Tear Strength ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

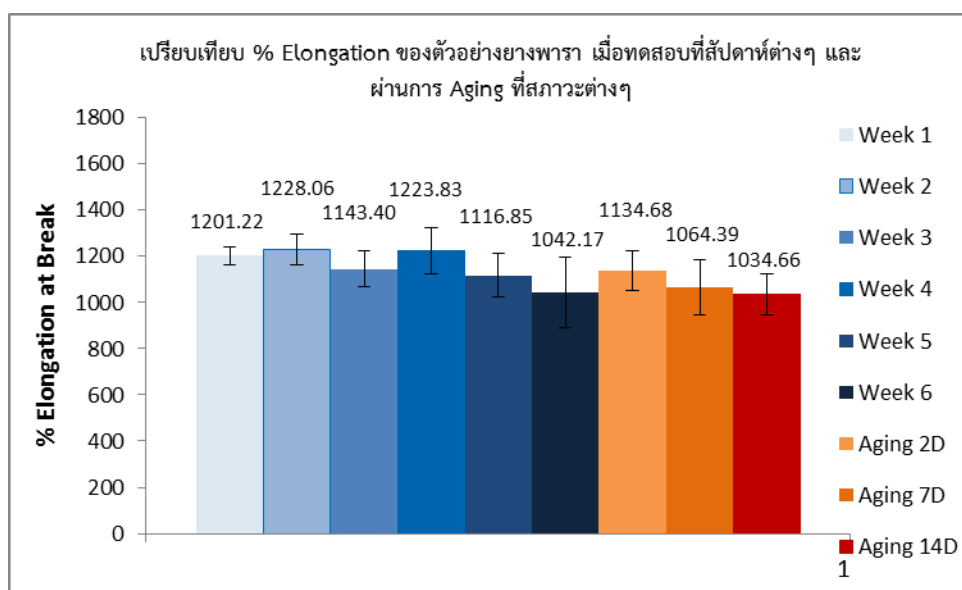
สำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing นั้นจะแสดงผลการทดสอบเป็น Stress – Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation แสดงดังภาพที่ 32, 33, 34 และ 35 ซึ่งพบว่าตัวอย่างยางที่เตรียมจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นนี้และทั้งชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่ผ่านการ aging มีค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและชิ้นงานที่ผ่านการ aging พบว่าค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ส่วนค่า Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging มีค่าสูงกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความแข็ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการ aging มีสมบัติความเป็นอีลาสติก (elastic property) ลดลงเล็กน้อย คาดว่าความร้อนจากการ aging ที่อุณหภูมิ 70 องศา เวลา 14 วันอาจทำให้ชิ้นงานยางที่ใช้ทดสอบมีการเชื่อมโยงโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลยางที่มีพันธะคู่เหลืออยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความแข็งและค่า Modulus at 100% Elongation ตามที่แสดงดังภาพที่ 30 และ 35 และสำหรับค่า Tear Strength ของชิ้นงานยางที่ผ่านการ aging ที่มีแนวโน้มที่ลดลง สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันเนื่องมาจากค่าความแข็งและสมบัติความเป็นอีลาสติกที่ลดลง จึงทำให้ความสามารถในการทนต่อแรงฉีกขาดลดลง



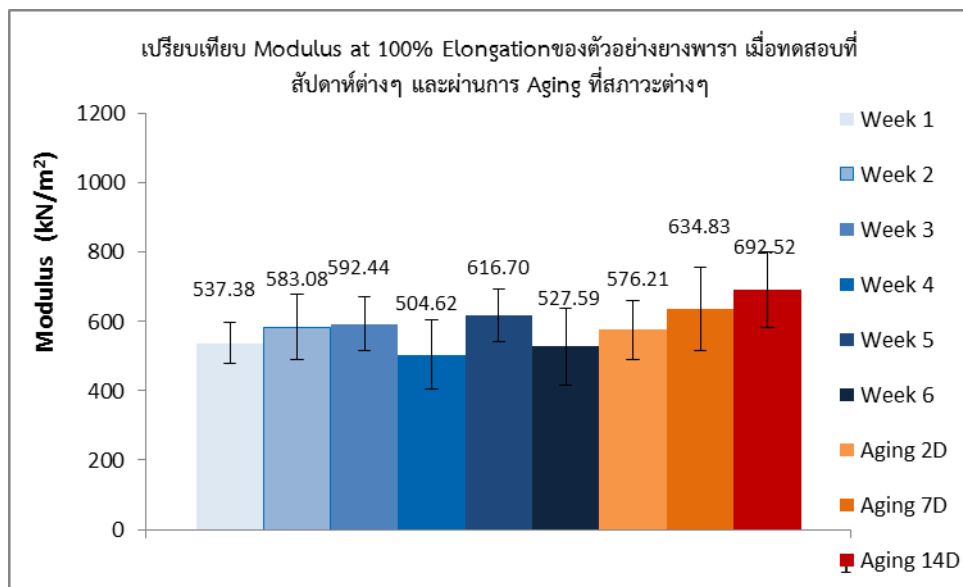
ภาพที่ 32 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สปีดาร์ตต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ



ภาพที่ 33 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ



ภาพที่ 34 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

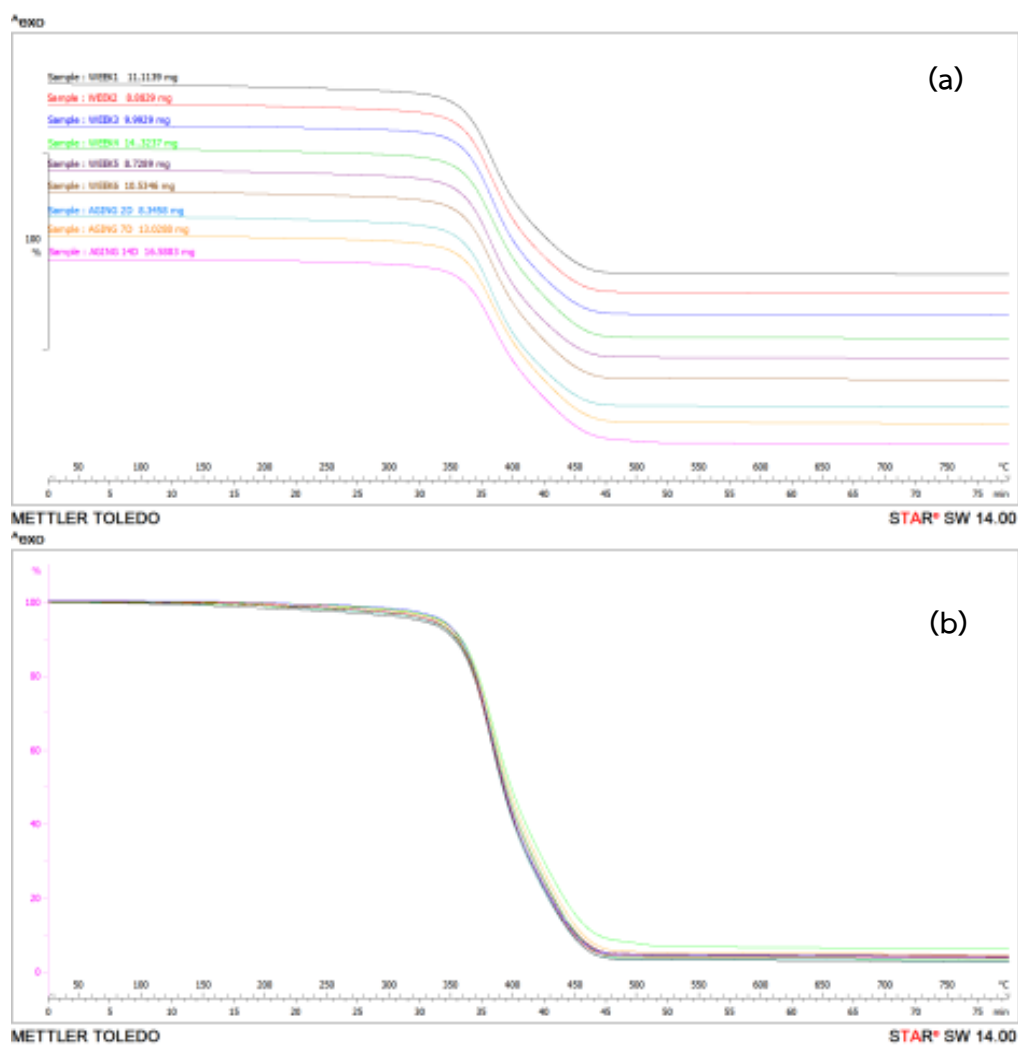


ภาพที่ 35 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ และที่ผ่านการ Aging ที่สภาวะต่างๆ

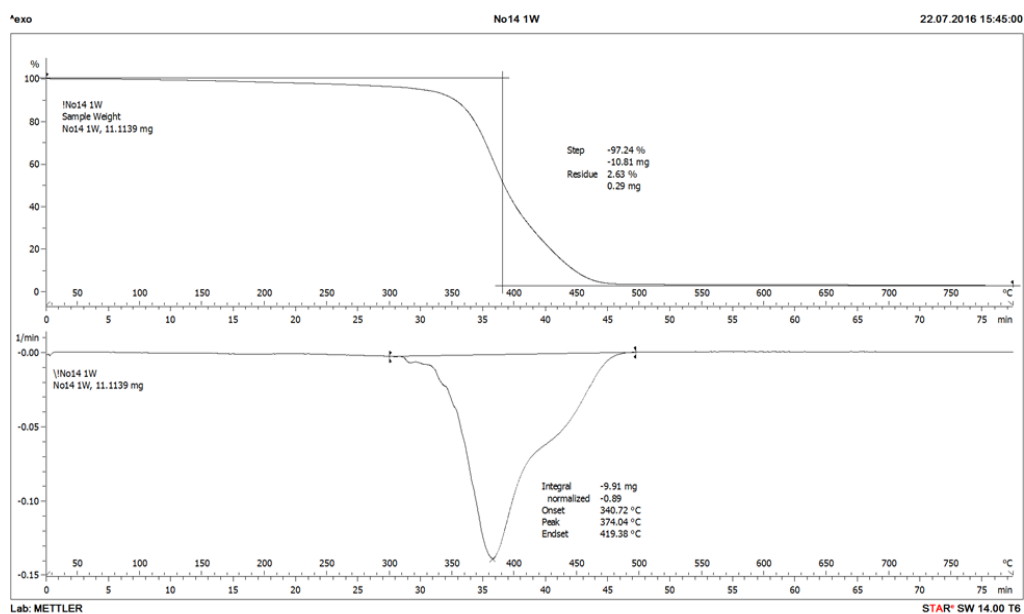
ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จากการวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ต่างๆ และชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging แสดงดังตารางที่ 13 และโครมาโตแกรม TGA แสดงดังภาพที่ 36-45 พบว่า $T_{d\ onset}$ มีค่าเท่ากับ $316.24 - 344.12\ ^\circ\text{C}$ และ $T_{d\ peak}$ มีค่าเท่ากับ $369.07 - 375.18\ ^\circ\text{C}$ ส่วนการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยาง พบว่ามี 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรก อุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ $93.99 - 97.24\ %$ และที่เหลือเป็น residue เท่ากับ $2.63 - 6.11\ %$ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง สัปดาห์ต่างๆ และผ่านการ Aging มีค่า $T_{d\ onset}$ และ $T_{d\ peak}$ ไม่แตกต่างกันมากนัก และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานยางตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเช่นกัน เมื่อพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและชิ้นงานยางที่ผ่านการ Aging จะเห็นว่ามิลักษณะพีคที่มีช่วงการสลายตัวที่กว้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการ Aging ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว(Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง
 ยางที่สัปดาห์ต่างๆและ aging

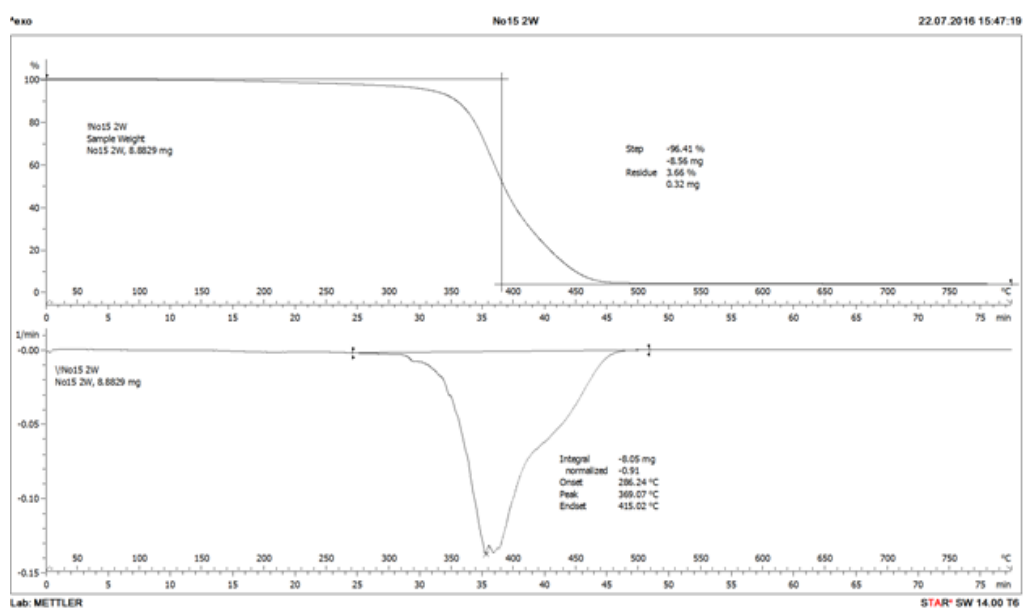
ตัวอย่าง	Decomposition Temperature, T_d ($^{\circ}\text{C}$) for 1 st composition		composition	
	$T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d \text{ peak}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	1 st composition	2 nd composition
			(%w/w)	(Residue) (%w/w)
WEEK 1	340.72	374.04	97.24%	2.63%
WEEK 2	344.28	369.07	96.41%	3.66%
WEEK 3	341.92	374.68	96.22%	3.94%
WEEK 4	344.86	375.18	96.51%	3.37%
WEEK 5	344.19	373.18	95.84%	4.20%
WEEK 6	344.12	373.57	95.83%	4.10%
AGING 2D	341.21	372.24	97.20%	2.81%
AGING 7D	342.63	373.50	95.63%	4.52%
AGING 14D	339.97	372.97	93.99%	6.11%



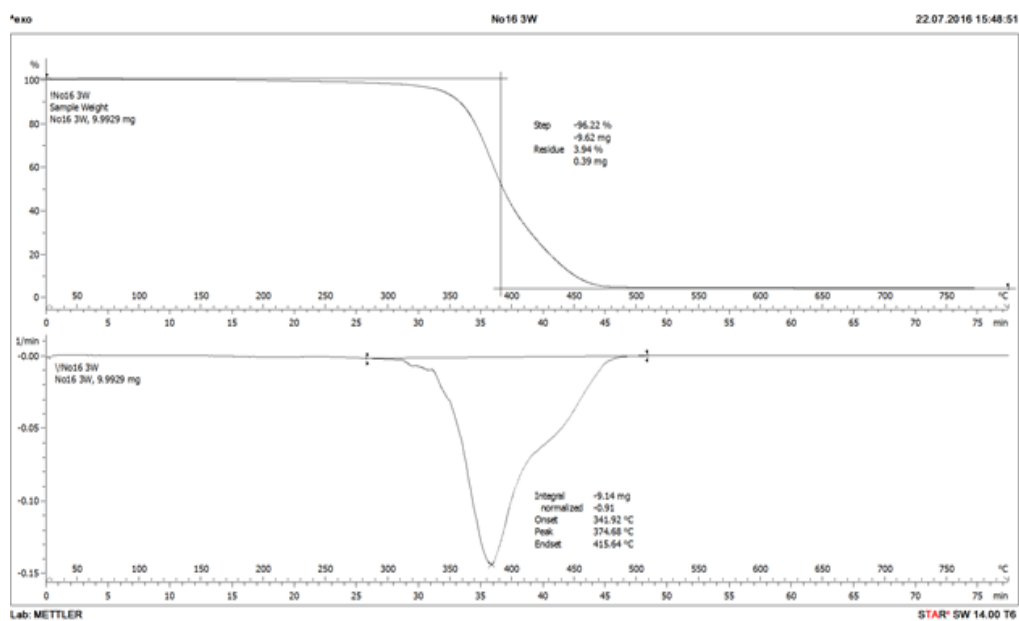
ภาพที่ 36 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่สัปดาห์ต่างๆและ aging (a) และกราฟที่ overlay (b)



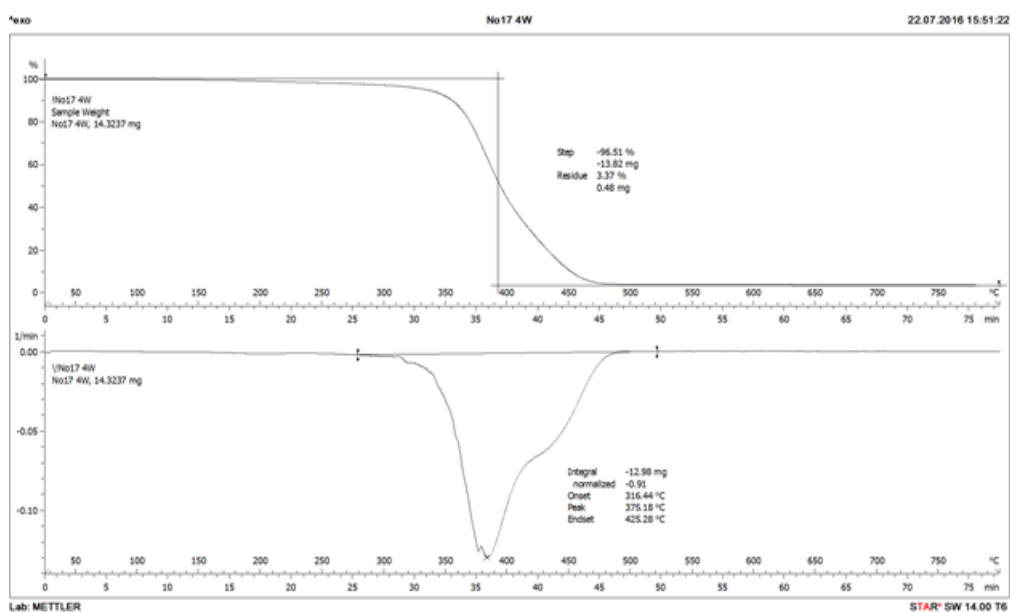
ภาพที่ 37 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 1



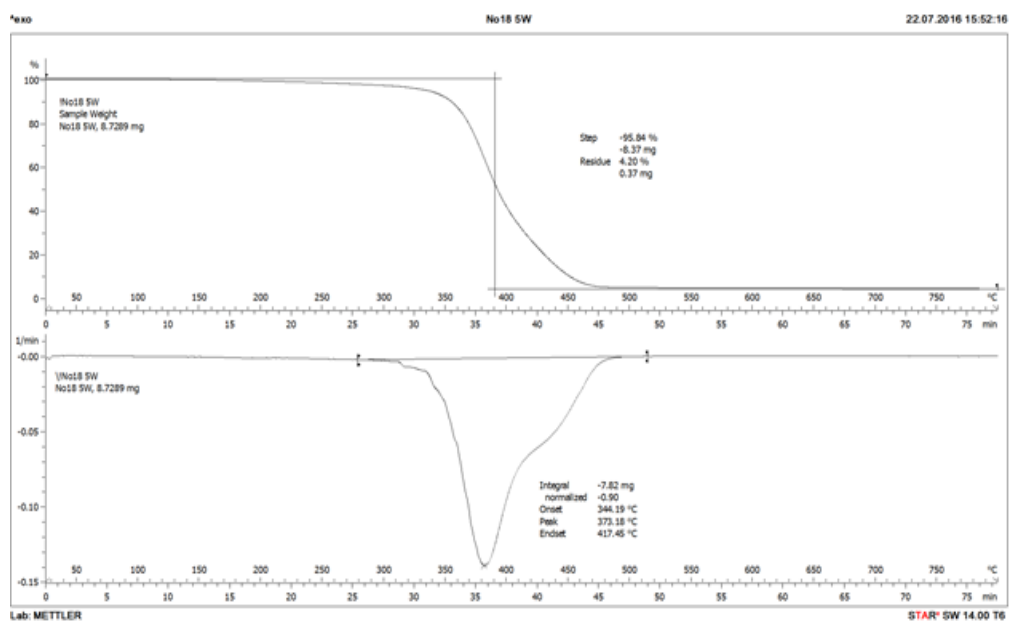
ภาพที่ 38 โครมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 2



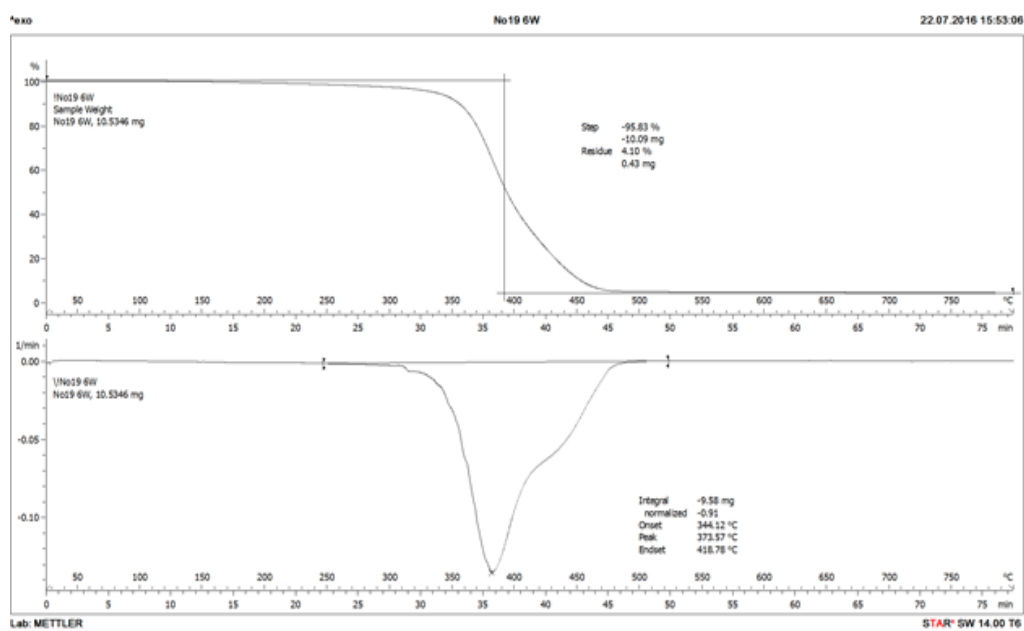
ภาพที่ 39 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 3



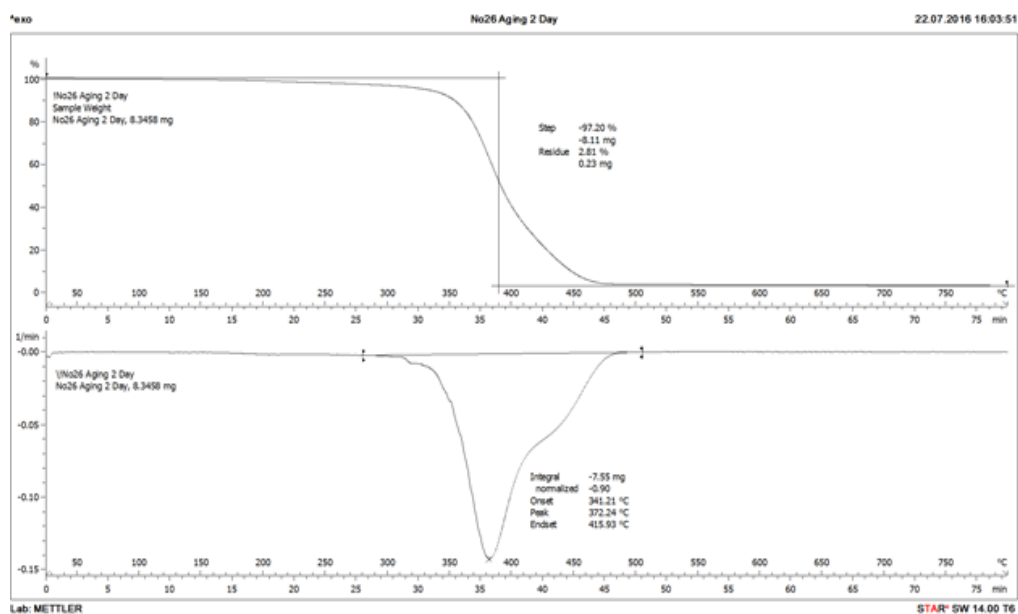
ภาพที่ 40 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 4



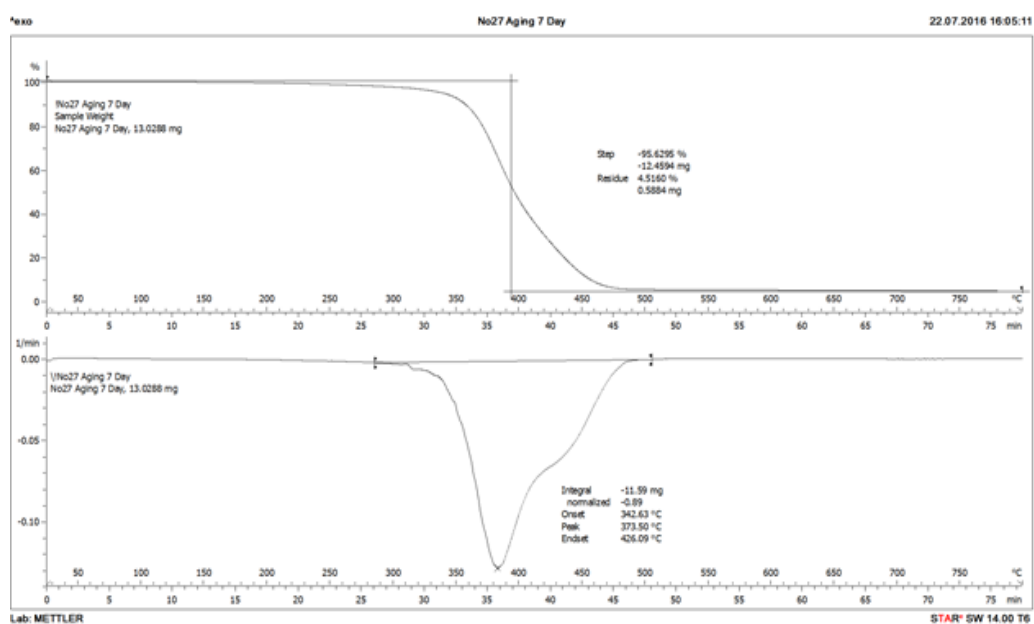
ภาพที่ 41 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 5



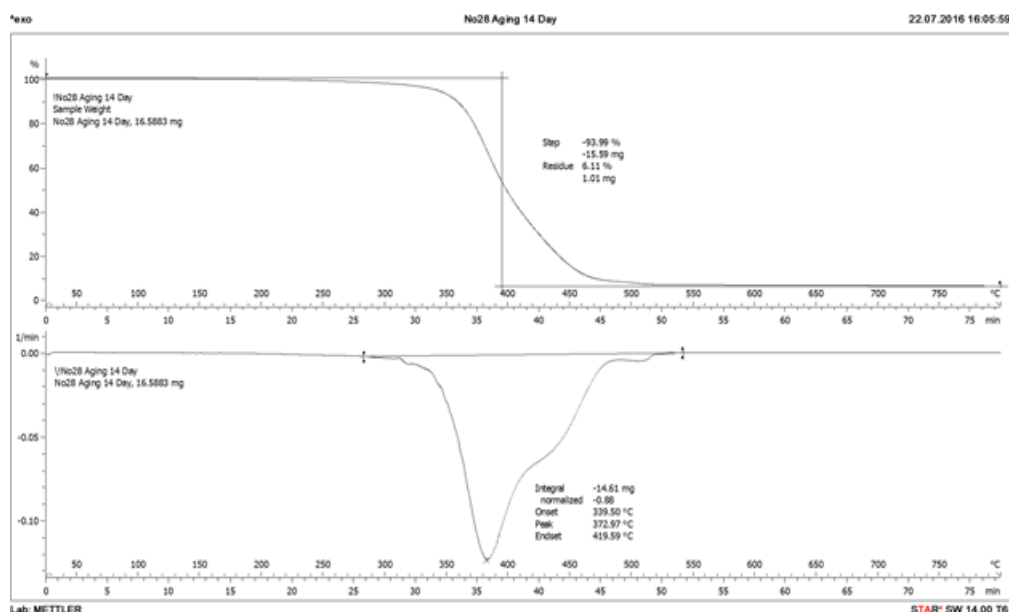
ภาพที่ 42 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง WEEK 6



ภาพที่ 43 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 2D



ภาพที่ 44 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 7D



ภาพที่ 45 โครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง AGING 14D

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพารา

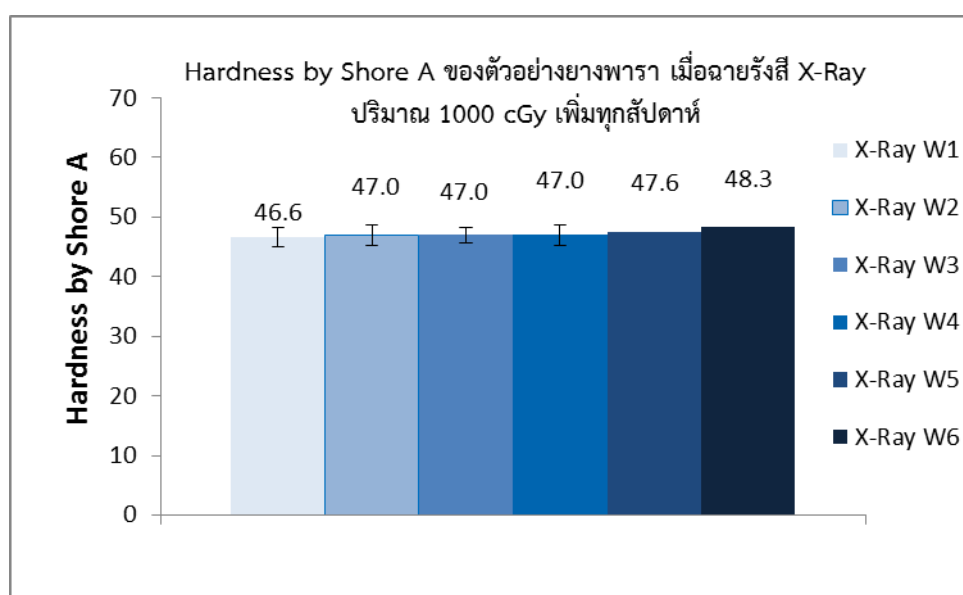
การทดสอบการทนต่อรังสีของหุ่นยางพาราที่สร้างขึ้นใช้วิธีการนำชิ้นงานตัวอย่างยางที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 มาทดสอบสมบัติของยางพาราเมื่อได้รับปริมาณรังสีระดับต่างๆ โดยฉายรังสีชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) พลังงาน 6 MV ด้วยอัตราปลดปล่อยรังสี 300 cGy/MU และปริมาณรังสีเท่ากับ 1,000 2,000 3,000 4,000 5,000 และ 6,000 cGy ดังภาพที่ 46 และแสดงผลการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการฉายรังสีดังตารางที่ 14 โดยทำการฉายรังสีห่างกันสัปดาห์ละครั้งเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 1.5 เดือน จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการสังเกต ทดสอบการรักษารูปทรงของชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ตารางที่ 14 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อฉายรังสี X-Ray ปริมาณ 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางยังมีสีเหลืองน้ำตาล โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งเกิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดจากการฉายรังสีมีค่าเพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ยังมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และตารางที่ 15 แสดงผลการทดสอบการวัดค่า color parameter ; L^* , a^* , b^* ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อผ่านฉายรังสี X-Ray เมื่อฉายรังสี X-Ray ปริมาณ 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ จะเห็นว่า L^* , a^* และ b^* มีค่าไม่แตกต่างกันเลย แสดงว่าปริมาณรังสี X-Ray ที่เพิ่มขึ้นจนถึง 6,000 cGy ไม่มีผลต่อสีของชิ้นงานยางที่ใช้ทดสอบ แต่ค่า a^* ของชิ้นงานยางที่ผ่านการฉายรังสี X-Ray มีค่าเป็นบวกเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานยางที่ผ่านการฉายรังสี X-Ray มีแดงเพิ่มขึ้นหรือเป็นสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากสีของชิ้นงานยางทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ส่วนค่า b^* ของชิ้นงานยางทั้งสองสภาวะไม่มีค่าที่แตกต่างกัน สำหรับค่าการ

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบ color parameter (L^* , a^* , b^*) ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อฉายรังสี X-Ray ปริมาณ 1000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์

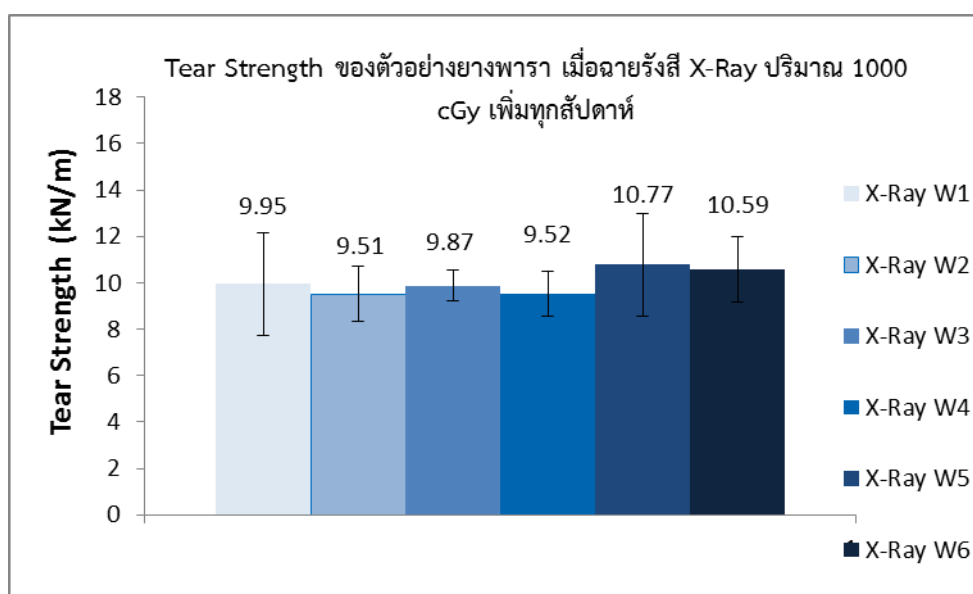
ตัวอย่าง	X-Ray W1	X-Ray W2	X-Ray W3	X-Ray W4	X-Ray W5	X-Ray W6
L^*	46.21	48.10	45.88	48.12	48.84	47.97
a^*	0.17	0.34	0.03	0.50	0.43	0.13
b^*	11.72	11.56	11.72	11.79	11.43	11.58

จากภาพที่ 47 ค่าความแข็ง Shore A ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมขึ้นจากสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตรียมหุ่นจำลองเมื่อนำมาฉายรังสีปริมาณ 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่ามีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วง 46.60-48.30 ซึ่งแสดงว่าปริมาณรังสีฉายเพิ่มขึ้นทุกสัปดาห์ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างยางพาราที่ทดสอบ



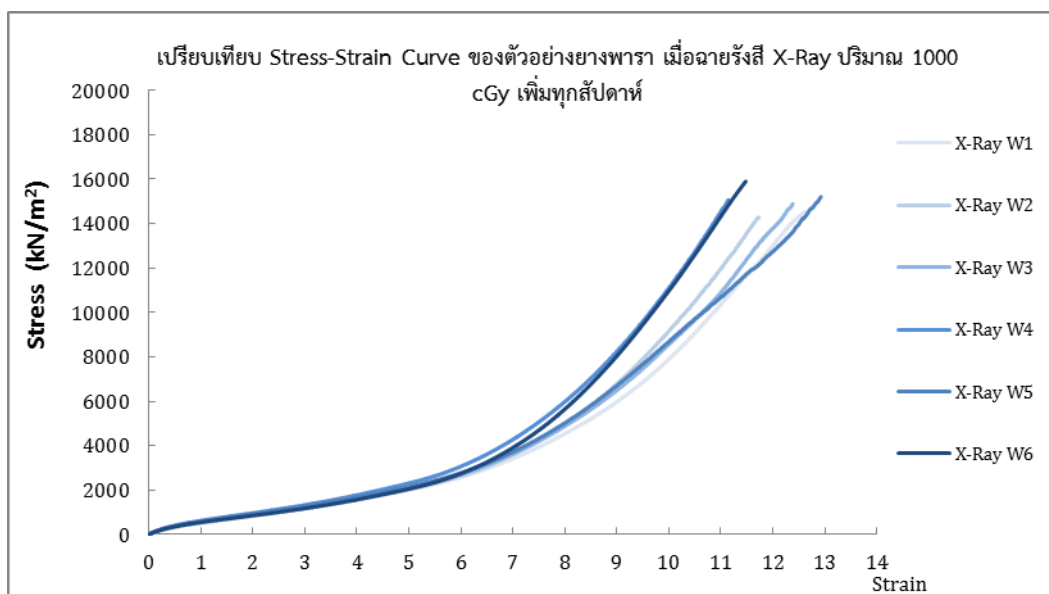
ภาพที่ 47 Hardness by Shore A ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์

จากภาพที่ 48 แสดง Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่เตรียมจากสูตรยางหุ่นจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า Tear Strength ของชิ้นงานตัวอย่างยางพาราที่ผ่านการฉายรังสี 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ มีค่าใกล้เคียงกัน (9.52 – 10.77 kN/m) ซึ่งแสดงว่าปริมาณรังสีฉายเพิ่มขึ้นทุกสัปดาห์ ไม่มีผลต่อค่า Tear Strength ของตัวอย่างยางพาราที่ทดสอบ

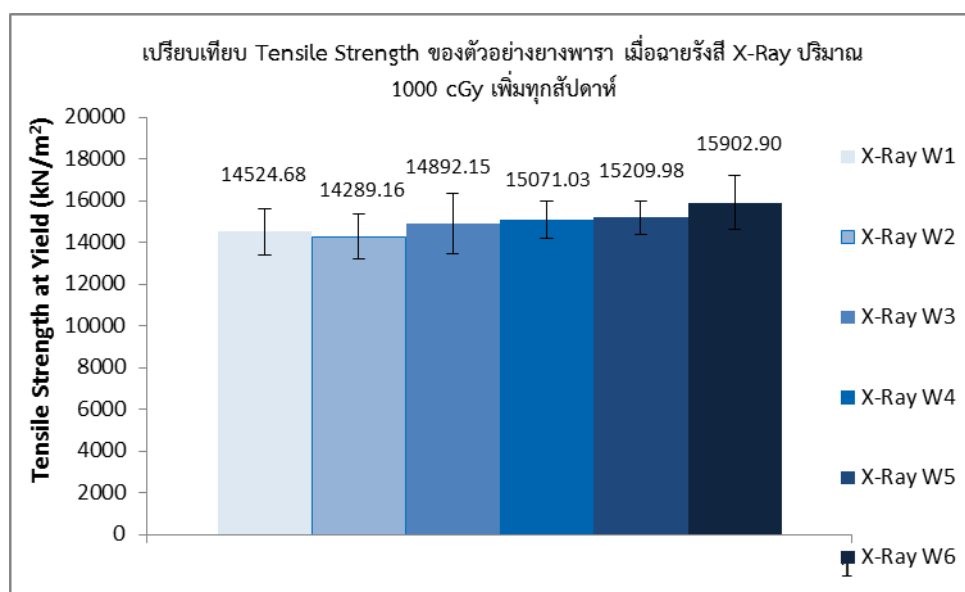


ภาพที่ 48 TearStrength ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์

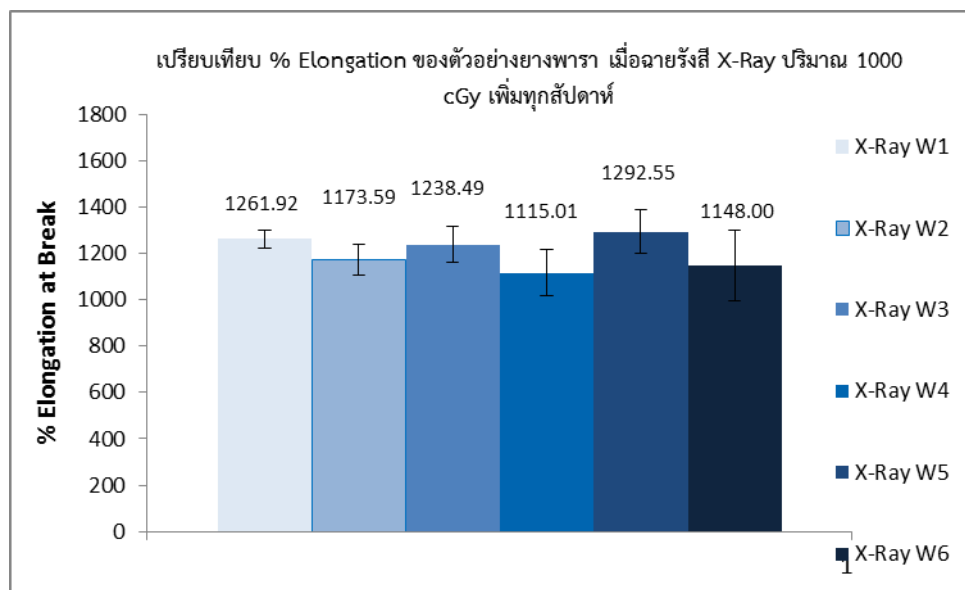
สำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย Tensile Testing นั้นจะแสดงผลการทดสอบเป็น Stress – Strain Curve, Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation แสดงดังภาพที่ 49, 50, 51 และ 52 ซึ่งพบว่าชิ้นงานตัวอย่างยางพาราเมื่อฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ มีค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ สำหรับค่า Tensile Strength at Yield มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ แต่ค่า % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันเลย และเมื่อเปรียบเทียบค่า Tensile Strength at Yield, % Elongation at Break และ Modulus at 100% Elongation ของชิ้นงานยางเมื่อฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ (ภาพที่ 49, 50, 51 และ 52) กับชิ้นงานยางที่ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องนั้นเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ (ภาพที่ 32, 33, 34 และ 35) พบว่าค่าทั้งสามนั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลชิ้นงานตัวอย่างยางที่ใช้ทดสอบ



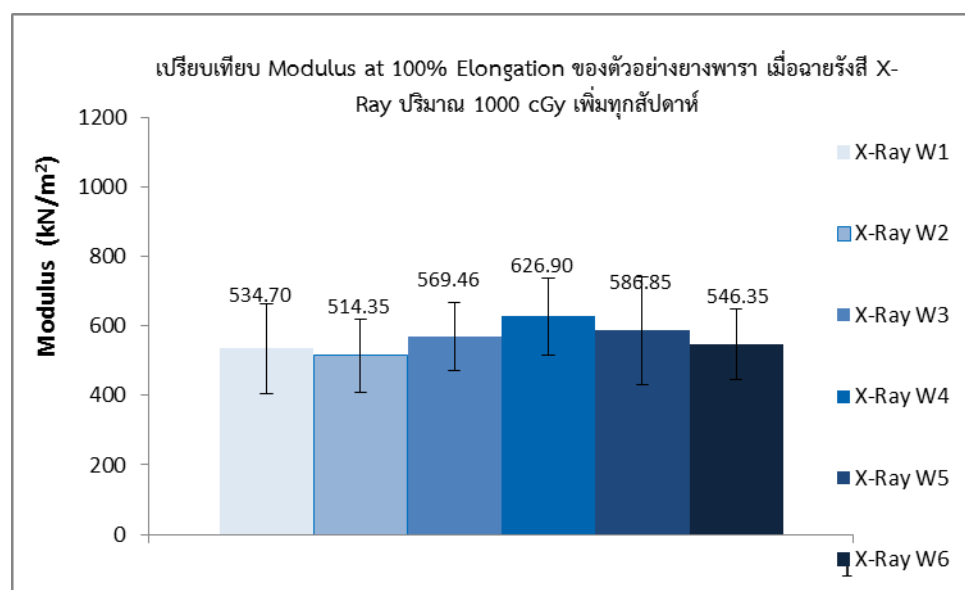
ภาพที่ 49 Stress – Strain Curve ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์



ภาพที่ 50 Tensile Strength at Yield ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์



ภาพที่ 51 % Elongation at Break ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์

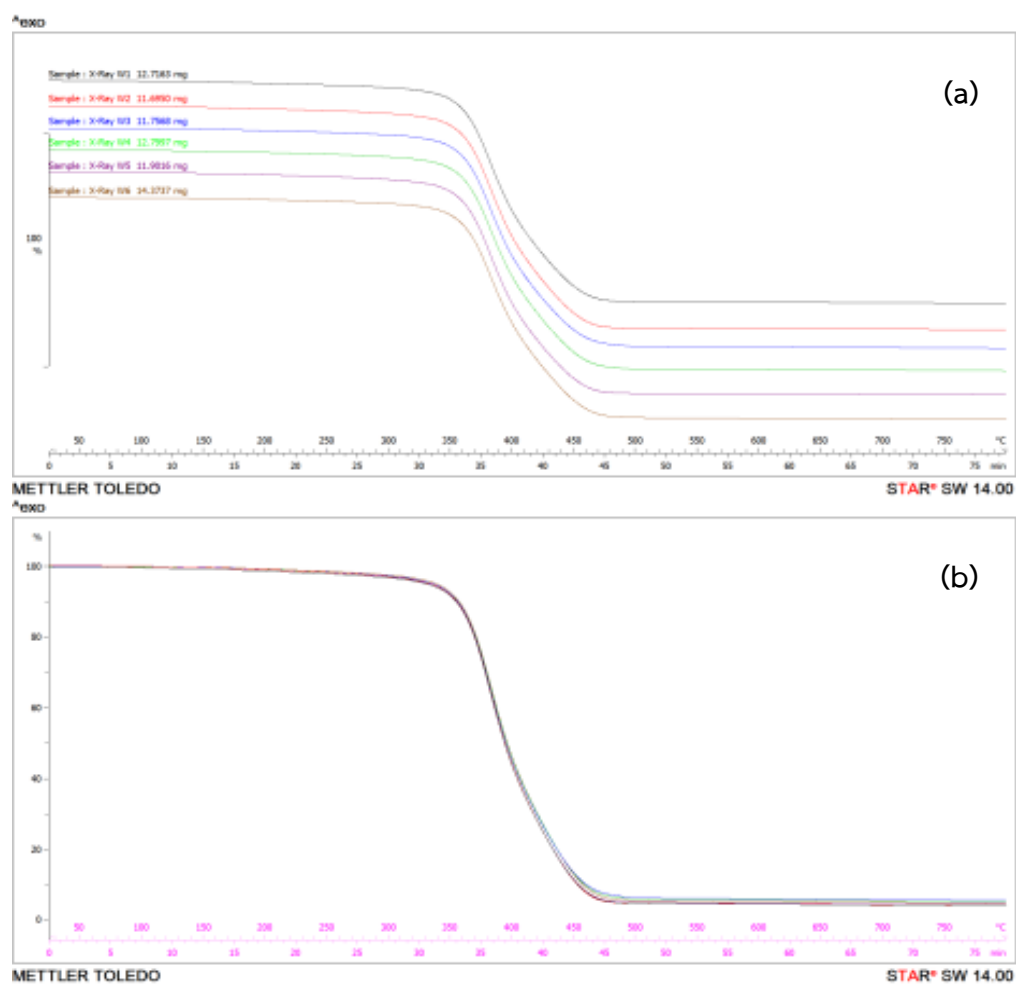


ภาพที่ 52 Modulus at 100% Elongation ของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์

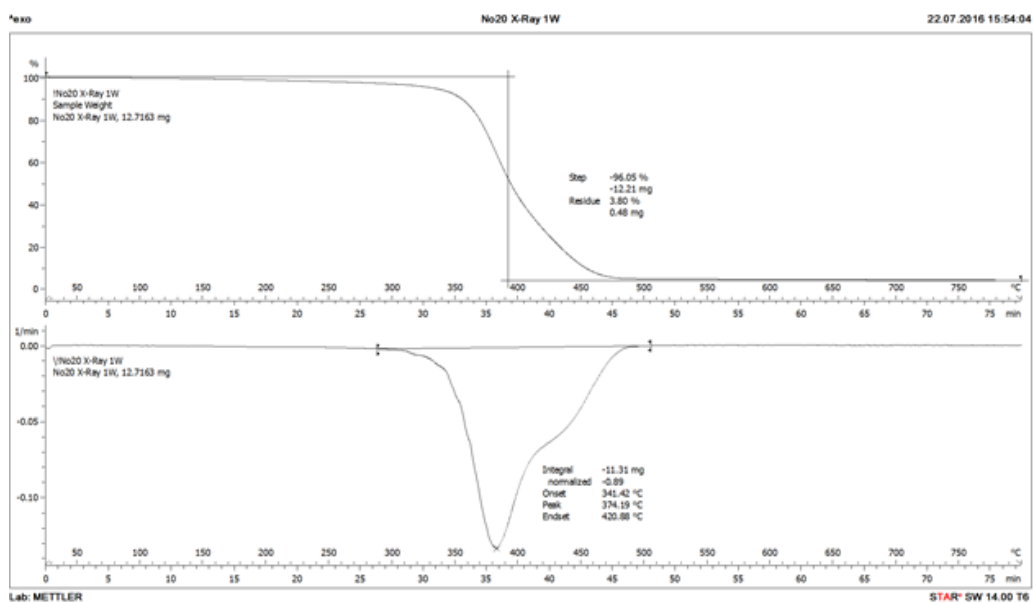
ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วย TGA จากการวิเคราะห์หาค่า T_d ของชิ้นงานยางเมื่อฉายรังสี X-Ray ขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ แสดงดังตารางที่ 16 และโครมาโตแกรม TGA แสดงดังภาพที่ 53-59 พบว่า $T_{d\text{ onset}}$ มีค่าเท่ากับ 339.88 – 342.18 °C และ $T_{d\text{ peak}}$ มีค่าเท่ากับ 373.20 – 374.26 °C ส่วนการวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบชิ้นงานยาง พบว่ามี 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรก อุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นมีสัดส่วนอยู่ในช่วงประมาณ 94.77 – 96.30% และที่เหลือเป็น residue เท่ากับ 3.80-5.31% ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานยางเมื่อฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ มีค่า $T_{d\text{ onset}}$, $T_{d\text{ peak}}$ และสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานยางตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ มีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจาก the first derivative of the TGA curve, DTG ของชิ้นงานยาง จะเห็นว่ามีลักษณะพีคที่มีช่วงการสลายตัวที่กว้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากฉายรังสีขนาด 1,000 cGy เพิ่มทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ให้แก่ชิ้นงานยางตัวอย่างนั้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยาง

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิสลายตัว(Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่างยางหลังฉายรังสี

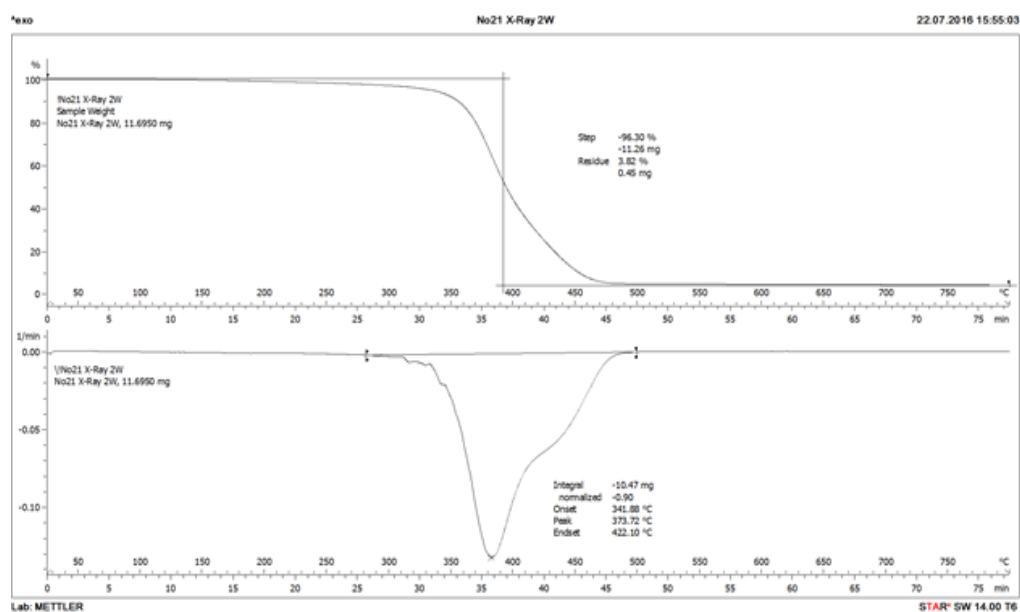
ตัวอย่าง	Decomposition Temperature, T_d (°C) for 1 st composition		Composition	
			1 st composition	2 nd composition
	$T_{d\text{ onset}}$ (°C)	$T_{d\text{ peak}}$ (°C)	(%w/w)	(Residue) (%w/w)
X-Ray W1	341.42	374.19	96.05%	3.80%
X-Ray W2	341.88	373.72	96.30%	3.82%
X-Ray W3	340.59	373.20	94.77%	5.31%
X-Ray W4	340.93	373.83	94.99%	5.04%
X-Ray W5	339.88	373.75	95.82%	4.24%
X-Ray W6	342.18	374.26	95.42%	4.58%



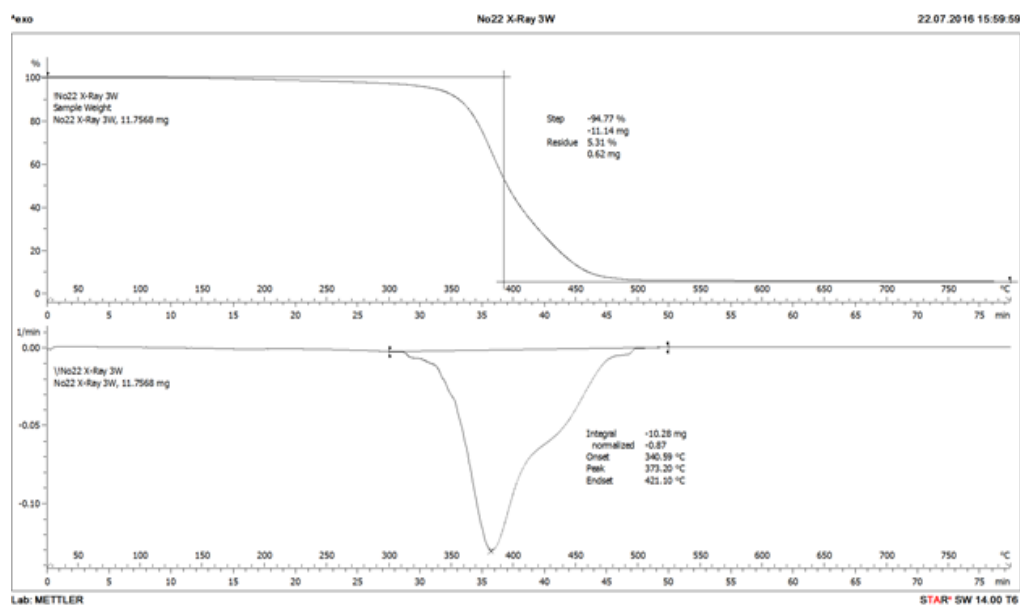
ภาพที่ 53 เปรียบเทียบโครมาโตแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยางที่สัปดาห์ต่างๆและ aging (a) และกราฟที่ overlay (b)



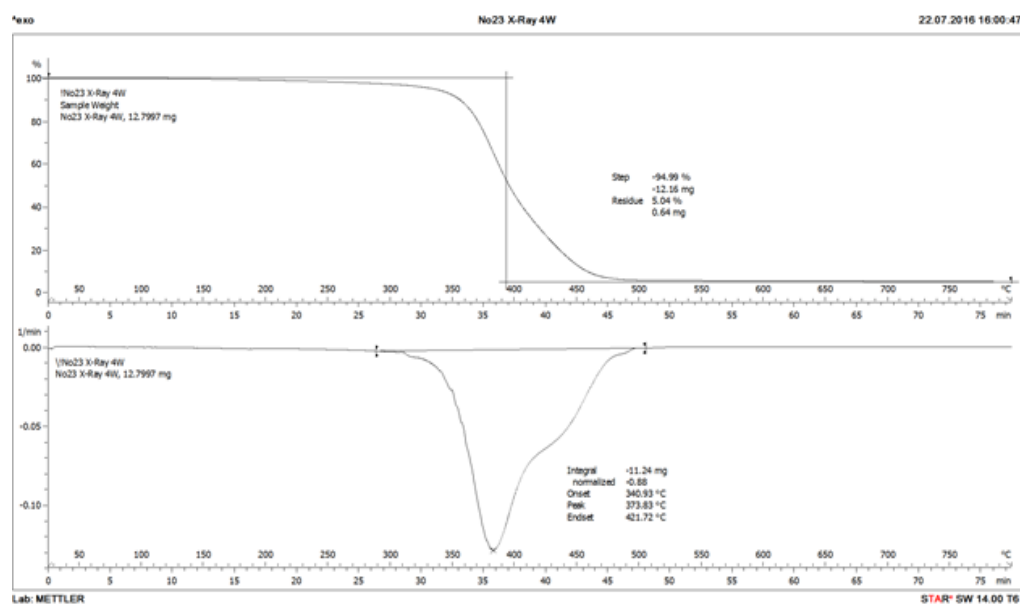
ภาพที่ 54 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W1



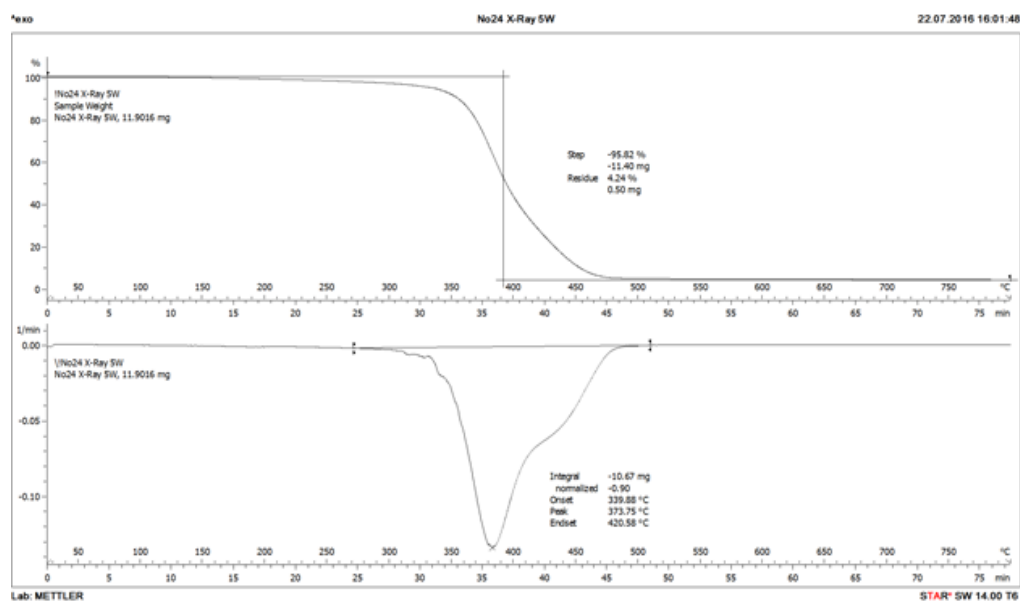
ภาพที่ 55 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W2



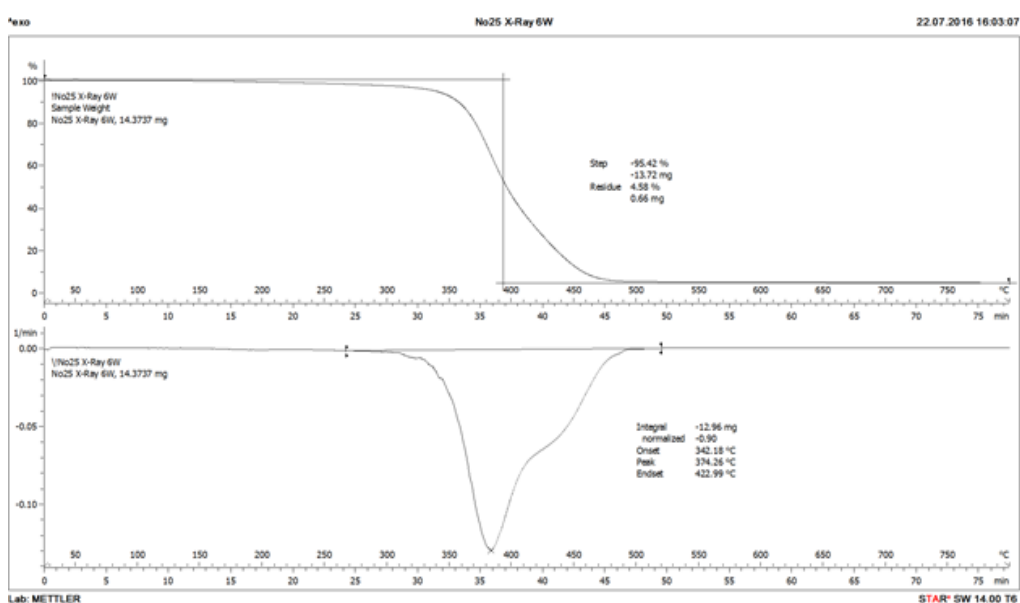
ภาพที่ 56 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W3



ภาพที่ 57 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W4



ภาพที่ 58 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W5



ภาพที่ 59 โคโรมาโตรแกรม TGA ของชิ้นงานตัวอย่างยาง X-Ray W6

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์

ผลการสร้างหุ่นจำลองยางพาราจากสูตรยางพาราที่ได้จากขั้นตอนการพัฒนาสูตรในขั้นตอนที่ 2 และเทคนิคการทำยางคงรูปสำหรับการทำหุ่นจำลองจากยางพารา โดยทำการเทน้ำยางพาราที่ผสมสารเคมีตามสูตรลงในหุ่นจำลองทรงกระบอกที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติทั้งหุ่นจำลองชิ้นแรกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชิ้นที่สองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร จากนั้นปิดฝาว่างช่องใส่หัววัดรังสีในหุ่นจำลอง และทำการอบให้แห้งตามขั้นตอนที่ 2.1 ได้หุ่นจำลองสีระชะและลำคอตามที่ได้ออกแบบไว้ดังภาพที่ 60



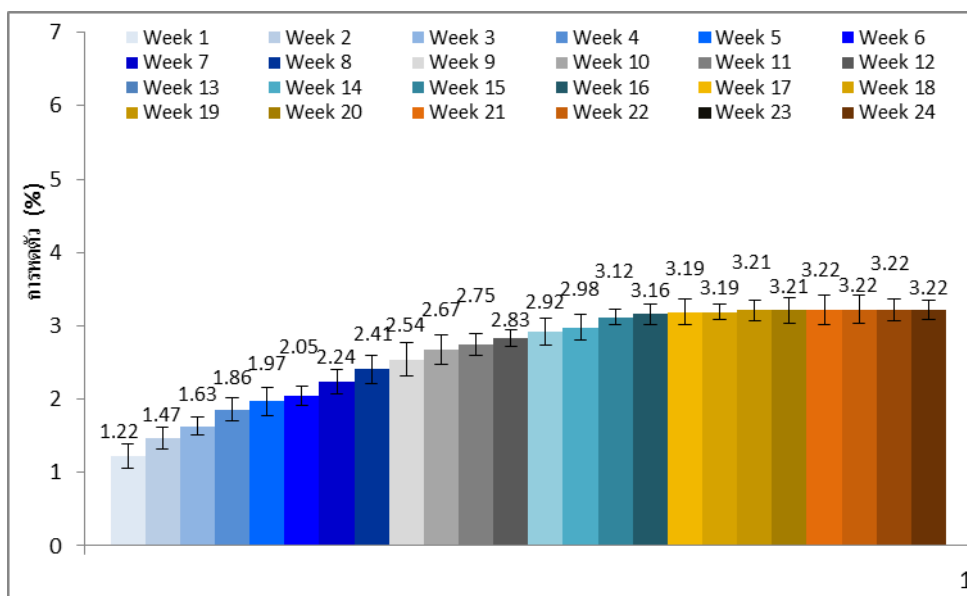
ภาพ 60 หุ่นจำลองสีระชะและลำคอรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร ภายในบรรจุยางพารา

ขั้นตอนที่ 5 การศึกษาการหดตัวของชิ้นงาน

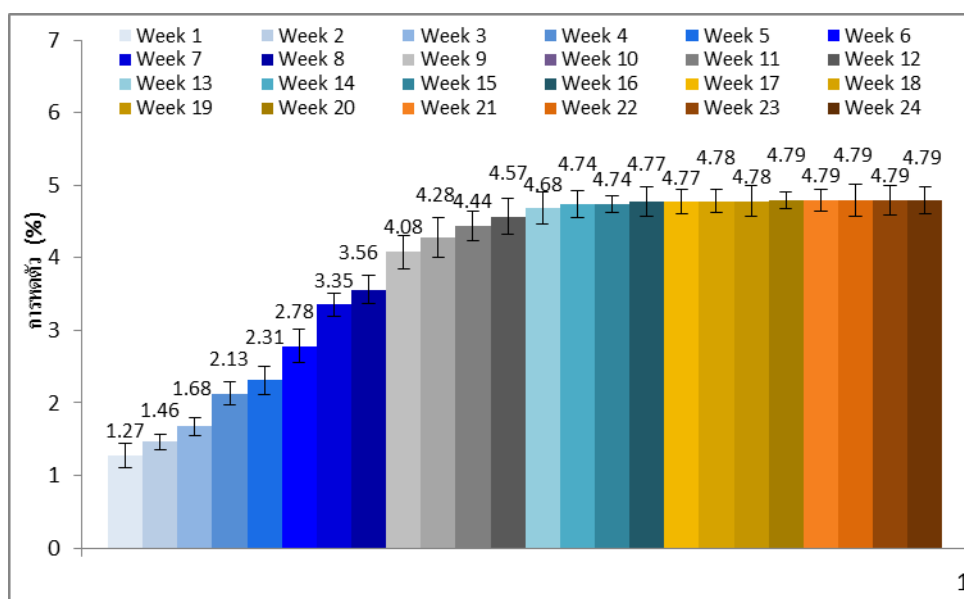
ผลการศึกษาการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างยางพารา จำนวน 5 ชิ้น โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งเป็นการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอน ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอนนำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 61 และ 62 พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวทั้งแนวนอนและแนวตั้งของชิ้นงานตัวอย่างยางพารามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นที่วางทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งการทดสอบการหดตัวนี้ทำการประเมินอย่างต่อเนื่อง จนถึงสัปดาห์ที่ 20 จะเห็นว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเริ่มคงที่ ซึ่งการทดสอบกระทั่งไปจนถึงสัปดาห์ที่ 24 พบว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบการหดตัวที่ได้จากการประเมินจะถูกใช้เป็นแนวทางช่วยในการกำหนดขนาดของหุ่นจำลองที่จะสร้างนำไปใช้งานจริงได้ สำหรับชิ้นงานยางพาราที่ใช้ทดสอบการหดตัวจะถูกวางไว้ในตู้ที่ไม่มีแสงแดดส่องถึงได้ โดยมีเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งการวัด %ความชื้นและอุณหภูมิ จะรายงานเป็นช่วงค่า %ความชื้นและอุณหภูมิของแต่ละสัปดาห์ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่า %ความชื้นและอุณหภูมิของชิ้นงานยางพาราในแต่ละสัปดาห์

สัปดาห์ที่	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)
WEEK 1	47 - 50	30 - 34
WEEK 2	47 - 50	30 - 33
WEEK 3	50 - 53	29 - 32
WEEK 4	51 - 54	29 - 32
WEEK 5	52 - 56	29 - 31
WEEK 6	55 - 58	28 - 31
WEEK 7	56 - 58	28 - 31
WEEK 8	56 - 59	28 - 31
WEEK 9	56 - 59	28 - 31
WEEK 10	56-59	28 - 31
WEEK 11	56-59	28 - 31
WEEK 12	56-59	28 - 31
WEEK 13	58-60	26-31
WEEK 14	58-60	26-31
WEEK 15	58-60	26-31
WEEK 16	58-60	26-31
WEEK 17	58-61	26-31
WEEK 18	58-61	26-31
WEEK 19	58-61	26-31
WEEK 20	58-61	26-31
WEEK 21	56-60	26-32
WEEK 22	56-60	26-32
WEEK 23	56-60	26-32
WEEK 24	56-60	26-32



ภาพที่ 61 เปอร์เซนต์การหดตัวในแนวนอนของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ



ภาพที่ 62 เปอร์เซนต์การหดตัวในแนวตั้งของตัวอย่างชิ้นงานยางพารา เมื่อทดสอบที่สัปดาห์ต่างๆ

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ

6.1. การประเมินค่า CT number

ผลการทดสอบเพื่อประเมินค่า CT number ของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอ โดยการสร้างภาพตัดขวางหุ่นจำลองกำหนดค่าพารามิเตอร์เท่ากับที่ใช้ร่วมกับผู้ป่วยจริงจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จำลองการรักษา ประกอบด้วยค่า Voltage เท่ากับ 120 kV, Scan time เท่ากับ 19.34 sec, slice thickness เท่ากับ 3 mm โดยทำการประเมินค่า CT number ด้วยการวัดค่าเฉลี่ย CT number ในบริเวณวงกลมที่สนใจ (ROI) จำนวน 4 ตำแหน่ง ภายในระนาบตัดขวางเดียวกันทั่วทั้งพื้นที่หุ่นจำลอง ผลการทดสอบพบว่ามีค่า CT number อยู่ในช่วง -4.4 ถึง 4.7 และค่าเฉลี่ย CT number เท่ากับ -0.25 ดังแสดงในตาราง 18 โดยค่า CT number มาตรฐานของเนื้อเยื่อมนุษย์มีค่าเท่ากับ 0 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นทราบว่าค่า CT number ของหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ทำให้เกิดอันตรกิริยาทางรังสีของหุ่นจำลองเหมือนกับเนื้อเยื่อมนุษย์ส่งผลให้เกิดปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ที่เท่ากันและสามารถใช้งานแทนกันได้

ตาราง 18 ผลการทดสอบค่า CT number ของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอในตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่ง ROI	ค่าเลข CT (HU)
1	2.4
2	-4.4
3	-3.7
4	4.7
ค่าเฉลี่ยเลข CT	-0.25

6.2 การทดสอบค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity)

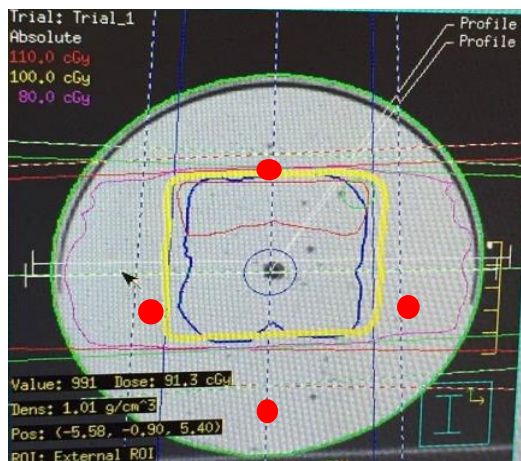
ผลจากการประเมินค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CT number จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่สร้างขึ้น โดยทำการวัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในตำแหน่งต่างๆ บนภาพตัดขวางหุ่นจำลองศีรษะและลำคอ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละตำแหน่งอยู่ในช่วง 5.0-7.9 ดังแสดงในตาราง 19 ผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่สร้างขึ้นมีค่า CT number ที่มีความสม่ำเสมอเนื่องจากไม่แตกต่างกันเกิน 10 HU

ตาราง 19 ผลการประเมินค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หุ่นจำลองศีรษะและลำคอในตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่ง ROI	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
1	7.0
2	5.4
3	5.0
4	7.9
ค่าเฉลี่ย	6.325

6.3 การทดสอบค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron density)

ผลการหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพ 63 ได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแต่ละตำแหน่งอยู่ในช่วง 1.00-1.01 g/cm^3 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.002 g/cm^3 ดังแสดงในตาราง 20



ภาพ 63 การประเมินค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

ตาราง 20 ผลการประเมินค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาในตำแหน่งต่างๆ

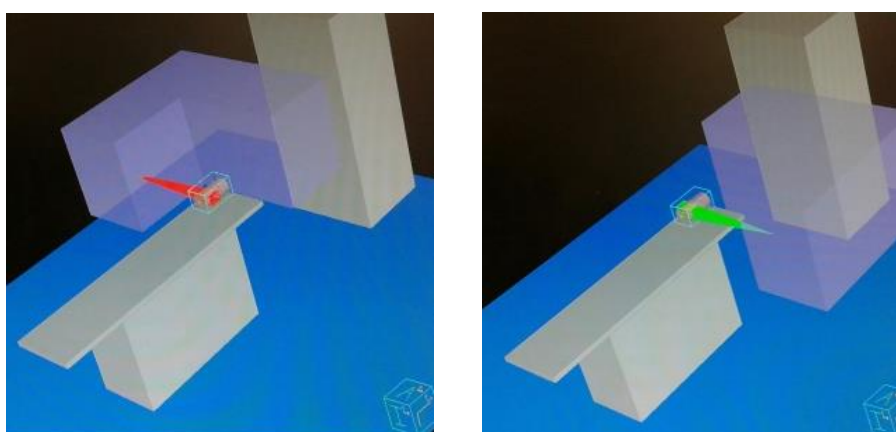
ตำแหน่ง ROI	ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (g/cm^3)
1	1.01
2	1.00
3	1.00
4	1.00
5	1.00
ค่าเฉลี่ย	1.002

ขั้นตอนที่ 7 การวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา

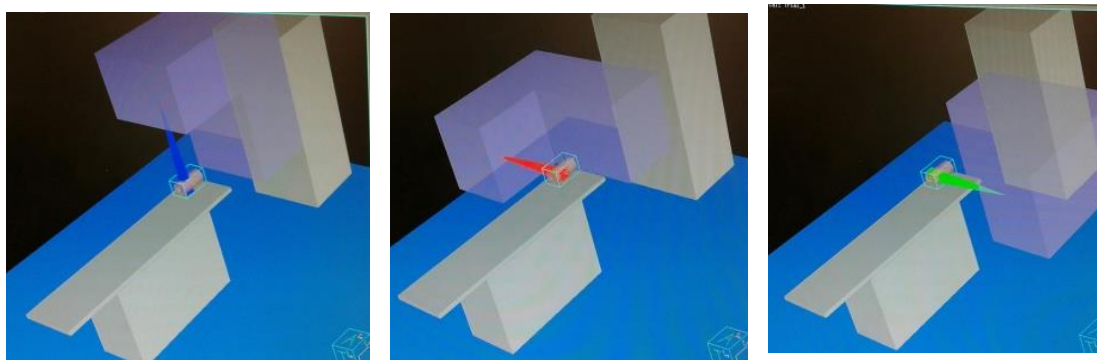
ผลการวางแผนการรักษาหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาโดยใช้เทคนิคการรักษาสำหรับผู้ป่วยมะเร็งศีรษะและลำคอทั้งการรักษาสองมิติและการรักษาสามมิติ การวางแผนการรักษากำหนดให้ใช้วิธีการฉายรังสีบนหุ่นจำลองศีรษะและลำคอตามแผนการรักษาด้วยเครื่องเร่งอนุภาคบริษัท Varian รุ่น 2100CD พลังงาน 6 MV กำหนดให้ตำแหน่ง isocenter ซึ่งเป็นบริเวณหัววัดรังสีเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดค่าปริมาณรังสี ผลการวางแผนการรักษาทำให้ได้พารามิเตอร์ที่ได้จากการวางแผนการรักษาประกอบด้วย ค่าตำแหน่งการหมุนของเตียงผู้ป่วย (couch) เท่ากับ 0 องศา ลำรังสีมีความกว้างครอบคลุมก้อนมะเร็งด้วยพื้นที่ 10×10 ตารางเซนติเมตร และใช้เทคนิคการรักษา SAD technique เท่ากับ 100 เซนติเมตร

7.1 ผลการวางแผนการรักษา 2 มิติ ได้แผนการรักษาที่มีความลึกก้อนมะเร็งที่ระยะจากผิวหุ่นจำลองเท่ากับ 8.20 เซนติเมตร ระยะ SSD เท่ากับ 91.8 เซนติเมตร ลำรังสีมีทิศทาง Right lateral และ Left lateral ดังภาพที่ 39 โดยค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษามีค่าเท่ากับ 50.1 cGy ทั้ง 2 ด้านรวมปริมาณรังสีทั้งหมด 100.2 cGy

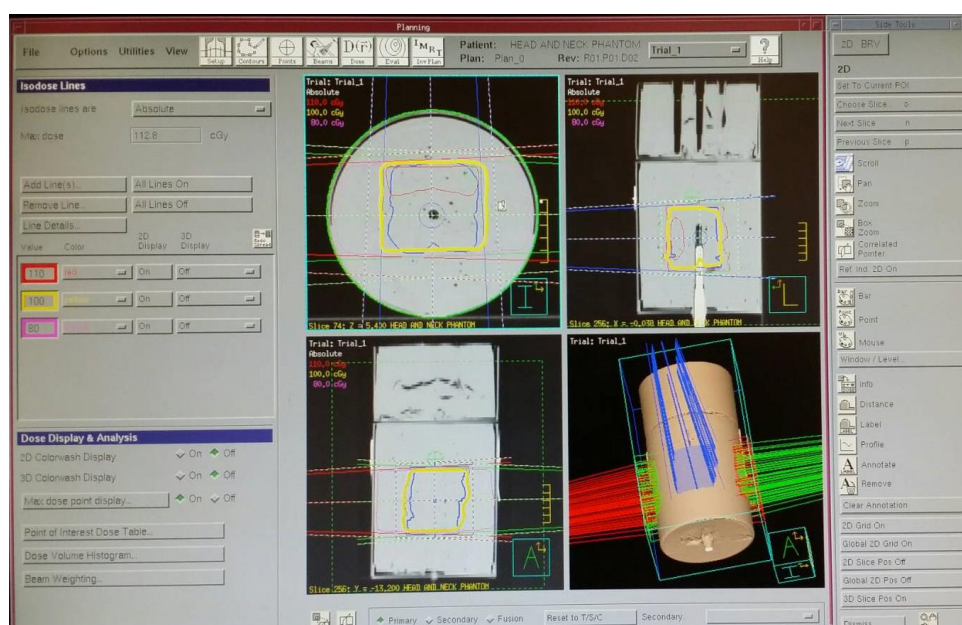
7.2 ผลการวางแผนการรักษา 3 มิติ ได้แผนการรักษาที่มีความลึกก้อนมะเร็งที่ระยะจากผิวหุ่นจำลองเท่ากับ 8.20 เซนติเมตร ระยะ SSD เท่ากับ 91.8 เซนติเมตร โดยทั้งความลึกของก้อนมะเร็งและระยะ SSD มีค่าเท่ากับการฉายรังสี 2 มิติ เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี ทำการฉายรังสีเข้าทาง Anteroposterior ด้วยค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 19.4 cGy ทิศทางลำรังสี Right lateral และ Left lateral ด้วยค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้านละ 43.6 cGy รวมปริมาณรังสีทั้งหมด 106.7 cGy ดังภาพที่ 64-65 โดยแผนการรักษาที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาจะถูกตรวจสอบและประเมินโดยนักฟิสิกส์การแพทย์ จากนั้นส่งต่อแผนการรักษาไปยังห้องฉายรังสีเพื่อทำการฉายรังสี และวัดค่าปริมาณรังสี



ภาพ 64 ทิศทางการเข้าของลำรังสีจากการวางแผนการรักษาแบบสามมิติ



ภาพ 65 ทิศทางการเข้าของลำรังสีจากการวางแผนการรักษาแบบสามมิติ



ภาพ 66 ผลการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์การรักษา

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบหุ่นจำลองยางพาราสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสี

การตรวจสอบความถูกต้องปริมาณรังสีใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณค่าปริมาณรังสีของคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษากับการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสี โดยทำการฉายรังสีลงบนหุ่นจำลองศีรษะและลำคอตามแผนการรักษาที่กำหนดไว้ กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับจัดตำแหน่งการฉายรังสีประกอบด้วยค่าตำแหน่งเตียง การหมุนของหัวเครื่องการหมุนคอลิเมเตอร์ และพื้นที่ฉายรังสีตามค่าที่ได้จากการวางแผนการรักษา สำหรับการฉายรังสีแบบ 2 มิติ กำหนดลำรังสีเข้าทาง Right lateral และ Left

lateral และการฉายรังสีแบบ 3 มิติ กำหนดลำรังสีเข้าทาง Anteroposterior, Right lateral และ Left lateral จากนั้นทำการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber ขนาด 0.6 cc เข้าไปในรูสำหรับใส่หัววัดซึ่งอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางหุ่นจำลองศีรษะและลำคอดังภาพที่ 67

ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากยางพาราที่สร้างขึ้นด้วยหัววัดรังสีชนิด Ionization chamber เปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษารุ่น Pinnacle ทั้งแผนการรักษาแบบ 2 มิติและการรักษา 3 มิติ แสดงดังตารางที่ 7



ภาพ 67 การจัดตำแหน่งการฉายรังสีหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจำนวน 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่วัดได้ทั้งเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เมื่อนำค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา พบว่ามีความแตกต่างปริมาณรังสีของแผนการรักษาแบบ 2 มิติ และการรักษาแบบ 3 มิติ เท่ากับ 0.98% และ 1.06% ตามลำดับ ดังตารางที่ 21 และ 22 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างปริมาณรังสีระหว่างการคำนวณและวัดจริงมีค่าน้อยกว่า 3% ทำให้ทราบว่าหุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการปลดปล่อยปริมาณรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาคและการคำนวณค่าปริมาณรังสีของระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาได้ซึ่งส่งผลให้การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากหากกำหนดปริมาณรังสีให้ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องส่งผลให้สามารถควบคุมการเติบโตของก้อนมะเร็งได้ดีและเนื้อเยื่อปกติได้รับปริมาณรังสีน้อยทำให้ลดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีได้ดี

ตาราง 21 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 2 มิติ

Dimention	Computerized Treatment Planning (cGy)	Measurement (cGy)	% difference
Right lateral	50.1	50.686	1.17
Left lateral	50.1	50.499	0.80
Total	100.2	101.185	0.98

ตาราง 22 แสดงปริมาณรังสีที่ได้จากการวัด การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณรังสีด้วยเทคนิคการรักษาแบบ 3 มิติ

Dimention	Computerized Treatment Planning (cGy)	Measurement (cGy)	% difference
Right lateral	43.6	44.195	1.36
Left lateral	43.6	43.987	0.89
Anteroposterior	19.4	19.646	1.27
Total	106.7	107.828	1.06

บทที่ 5

สรุปผล

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้สร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอจากยางพาราสำหรับตรวจสอบปริมาณรังสีจากแผนการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งที่เข้ารับการรักษาดูแลด้วยการฉายรังสีแบบสองมิติและสามมิติ โดยทำการวางแผนการรักษาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษา และการฉายรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงาน 6 MV ผลการออกแบบหุ่นจำลองศีรษะและลำคอประกอบด้วยพลาสติกทรงกระบอกภายในบรรจุยางพาราที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ การประเมินความหนาแน่นของหุ่นจำลองศีรษะและลำคอด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองด้วยหัววัดรังสี พบว่าสามารถใช้หุ่นจำลองศีรษะและลำคอสำหรับประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสีและการวัดปริมาณรังสีจากการฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอนุภาคได้

ผลการสร้างหุ่นจำลองศีรษะและลำคอประกอบด้วยหุ่นจำลองทรงกระบอกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร เท่ากัน แตกต่างกันในด้านความสูง หุ่นจำลองชั้นแรกมีความสูง 10 เซนติเมตร และหุ่นจำลองชั้นที่สองมีความสูง 20 เซนติเมตร สามารถนำมาประกบกันเพื่อวัดปริมาณรังสีด้วยฟิล์มวัดรังสี โดยหุ่นจำลองที่มีความสูง 20 เซนติเมตร มีช่องสำหรับใส่หัววัดรังสีขนาด 0.6 cc อยู่บริเวณกึ่งกลางของหุ่นจำลองซึ่งใช้เป็นตำแหน่งจุดหมุน (isocenter) ในการฉายรังสีภายในหุ่นจำลองประกอบด้วยยางพาราซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อมนุษย์ มีค่า CT number เฉลี่ยเท่ากับ -0.25 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนเฉลี่ยภายในหุ่นจำลองมีค่าเท่ากับ 1.002 g/cm^3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ และมีความสม่ำเสมอของหุ่นจำลองเมื่อประเมินจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 10%

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองศีรษะและลำคอกับการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาทั้งเทคนิคการรักษาแบบสองมิติและสามมิติเพื่อประเมินความถูกต้องของการคำนวณปริมาณรังสี พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าเท่ากับ 0.98% และ 1.06% ตามลำดับ โดยผลการประเมินด้วยเทคนิคการรักษาทั้งสองแบบมีความแตกต่างไม่เกิน 3% แสดงให้เห็นว่าหุ่นจำลองศีรษะและลำคอสามารถใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณรังสีจากแผนการรักษาการฉายแบบสองมิติและสามมิติได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเทียบเคียงกับมนุษย์ทั้งค่า CT number ความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังสามารถนำหุ่นจำลองที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบค่าปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูงและใช้ในทางคลินิกได้ต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมยางพาราของประเทศไทยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

ข้อเสนอแนะ

1. ขั้นตอนการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการพิมพ์หุ่นจำลองทรงกระบอกด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ จะต้องตั้งค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรง ป้องกันน้ำรั่ว และมีผิวเรียบ โดยการตั้งค่า ความหนาแน่นการพิมพ์ (Fill density) ที่มีค่ามากจะทำให้ได้ชิ้นงานหุ่นจำลองที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้ชิ้นงานเมื่อเทน้ำยางพาราแล้วน้ำไม่รั่วซึม และยังทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง ในงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ค่า ความหนาแน่นการพิมพ์ที่ 100

2. การตั้งค่าพารามิเตอร์ ร้อยละอัตราการไหลของเส้นพาสติก (%Flow) ในการพิมพ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ หากมีร้อยละอัตราการไหลของเส้นพาสติกที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่อชิ้นงาน เกิดความไม่ต่อเนื่องผิวชิ้นงานไม่เรียบ จากงานวิจัยนี้พบว่าหากใช้ความหนาของชิ้นงานน้อยลงในการเพิ่มความละเอียดของชิ้นงานจะต้องลดอัตราการไหลของเส้นพาสติกลง เพื่อให้มีความสัมพันธ์กันหากอัตราการไหลของเส้นพาสติกมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาการอุดตันของเส้นพาสติก

3. การตั้งค่าพารามิเตอร์ ความเร็วในการพิมพ์ การพิมพ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ความเร็วในการพิมพ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องตั้งอย่างเหมาะสม หากความเร็วในการพิมพ์มากเกินไป จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายผิวชิ้นงานไม่เรียบจากความไม่ต่อเนื่องของการพิมพ์

4. การตั้งค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิหัวฉีดเส้นพาสติก และอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการพิมพ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ อุณหภูมิหัวฉีดหากตั้งค่าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะไม่สามารถหลอมเส้นพาสติกให้ออกมาพิมพ์ชิ้นงานได้ แต่หากตั้งค่าสูงเกินไป จะหลอมเส้นพาสติกมากเกินไปทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของหัวฉีดได้ ส่วนอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ใช้พลาสติกชนิด ABS ในการพิมพ์หุ่นจำลอง ซึ่งมีคุณสมบัติอย่างหนึ่งในการพิมพ์ที่ต้องควบคุมให้คงที่ คือจะต้องรักษาอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อมที่มีความสม่ำเสมอ และไม่ทำการลดอุณหภูมิของหัวฉีด หากรักษาอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและหัวฉีดมีความสม่ำเสมอจะได้ชิ้นงานหุ่นจำลองที่มีคุณภาพดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากยังมีพลาสติกอีกหลายชนิด เช่น Polylactic acid (PLA), PET, Nylon, Wood (พลาสติกผสมไม้) หรือ Bronze (พลาสติกผสมทองเหลือง) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างหุ่นจำลองที่มีคุณสมบัติแตกต่างออกไปได้ เช่น ความทนทาน ความสวยงาม หรือน้ำหนักเบา ซึ่งต้องการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

5. หุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบปริมาณรังสีในเทคนิคการรักษาขั้นสูง เช่น IMRT หรือ VMAT ได้ ด้วยการปรับปรุงช่องให้หัววัดรังสีให้มีขนาดที่เหมาะสมกับหัววัดรังสีที่ใช้กับเทคนิคการรักษาดังกล่าว

6. เทคนิคและวิธีการขึ้นรูปหุ่นจำลองศีรษะและลำคอที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหุ่นจำลองรูปแบบอื่นได้ เช่น หุ่นจำลองทรวงอก หุ่นจำลองช่องท้อง หรือหุ่นจำลองอวัยวะอื่น เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. Jacob V D. The Modern Technology of Radiation Oncology: A Compendium for Medical Physicists and Radiation Oncologists. 2, editor. USA: Medical Physics; 2005.
2. Hendee R W, Ibbott S G, Hendee G E. Radiation Therapy Physics. 3, editor. USA: John Wiley & Sons; 2005.
3. Gunilla C, Bentel R N. Radiation Therapy Planning. 2, editor. USA: McGraw-Hill; 1996.
4. Podgorsak E.B. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. 2005; Available from: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf.
5. ICRU International Commission Radiation Units and Measurements. The quality factor in radiation protection. ICRU Report 40. 1986.
6. สถาบันมะเร็งแห่งชาติ กรมการแพทย์. แผนการป้องกันและควบคุมโรคมะเร็งแห่งชาติ (พ.ศ. 2556 - 2560). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด; 2556.
7. ICD International Cancer Control. [cited 2014 20 September]; Available from: <http://www.cdc.gov/cancer/dcpc/resources/features/WorldCancerDay/>.
8. Seymour H, Khan M, Roger A. Levitt and Taplay's technological basis of radiation therapy : practiceal clinical application. 1992(2):1-36,232-47.
9. Ervin PaB. Radiation oncology physics : a handbook for teachers and students: Vienna International Atomic Energy Agency; 2005.
10. เรื่องวิทย นนทะภา. สื่อวัสดุสามมิติ. กรุงเทพมหานคร: เอกสารการสอนวิชาสื่อและเทคโนโลยีการสอน; 2556 [cited 2558 30 มีนาคม]; Available from: <http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355201/p32-3.html>.
11. ลุนอุบล เตชา, ผาจำ จิรภรณ์, สัมพโว ปรางทิพย์, เสาสีมา ศิริสุข. สื่อการเรียนการสอนสมัยใหม่. [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: <https://sites.google.com/site/suxkarreinykarsxnsmayhim/khna-phu-cad-tha>.
12. วาหวัฒน์ศักดิ์ อัจฉรา. สื่อกับการจัดการเรียนการสอน. 2548 [cited 2556 11 มีนาคม]; Available from: <http://www.school.net.th/library/create-web/10000/generality/10000-13295.html>.
13. วิลาทอง สุภัฏญา. นวัตกรรมทางการศึกษา. 2553 [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: http://pomsukanya.blogspot.com/2010/08/blog-post_11.html.
14. Curtis B Caldwell, Martin J. Yaffe Development of an anthropomorphic breast phantom. Medical Physics. 1989 17(2).

15. Center Children's National Medical. Solid Water Phantom materials. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: http://www.cnmcco.com/dosimetry/PDFdocs/slabPhantoms/CNMC_solidwater.pdf.
16. Phantoms Radiation Therapy Quality Control. [cited 2556 11 เมษายน]; Available from: <http://www.supertechx-ray.com/QualityControlPhantoms/RadiationTherapyQC.html>.
17. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2537.
18. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน Natural Rubber : Production and Application. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนวิจัย (สกว.); 2549
19. กรมวิชาการเกษตร คณะทำงานวิเคราะห์สถานการณ์ยาง สถาบันวิจัยยาง. ยางพารา. Para rubber electronic bulletin [รายงาน]. 2556;1.
20. ภัทรไพบูลย์ชัย อรสา. การวิจัยเพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติ. 2554 [cited 2556 12 เมษายน]; Available from: <http://www.mtec.or.th/nnrc2011/images/pdf/24june/08.pdf>.
21. จิตต์ลัดดา ศักดาภิพานิชย์. เทคโนโลยียางพารา Natural Rubber Technology. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคโนโลยีคอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด 2553.
22. สุขประเสริฐ อภินันท์. การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์หุ่นจำลองยางพาราอิเล็กทรอนิกส์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. [รายงานการวิจัย]. 2548:1-24.
23. ตันตพันธ์ กานดา. หุ่นจำลองยางพาราฝึกการใส่สายยางให้อาหารผู้ป่วย. 2554 [cited 2556 16 มีนาคม]; Available from: <http://library.dip.go.th/multim5/News/2554/N05975.pdf>.
24. ดวงรัตน์ บังอร, ยันตรปกรณ์ อรุณี, จิรสินธิปก ธีรุตี, สยอวรรณ วินัย, รตนวิบูลย์สุข นลินภัทร์, สาลีเพ็ง นวลปราง. การพัฒนาหุ่นจำลองแขนฝึกทักษะเย็บแผลชนิดยางพารา. วารสารสาธารณสุขและการพัฒนา. 2552;7(1).
25. ประดับวงษ์ สุธีรา, โกวิท วัฒนลง, สิมมะลี กฤษฏา, เชาวนชื่น บวรศิลป์. การพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์หุ่นใบหน้าจำลองปากแหว่งเพดานโหว่. ศรีนครินทร์เวชสาร. 2554;26(4).
26. อุทุมมา มั่นะเนมี, ขวัญชัย รัตนเสถียร. การออกแบบ การผลิต และ การใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพงานรังสีวินิจฉัย. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่. 2549;39: 54-63.
27. Howlett S. J., Kron T. Monitor unit calculation for tangential breast treatments: verification in an anthropomorphic phantom. J Appl Clin Med Phys. 2002 Summer;3(3):235-40.
28. Ashlie Davis Corinne, Lynn Mittura Katherine, Elizabeth Copeland Grace, Martina Hawkins Erica. Feasibility of a touch sensitive breast phantom for use in the training of physicians in clinical breast examination [University of Tennessee Honors Thesis Projects.]: University of Tennessee Honors Thesis Projects.; 2011.

29. วิจิตชลชัย ณพรัตน์. “เอกสารประกอบบทปฏิบัติการ หลักสูตร การผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง”. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตรกรรม 2550.

ภาคผนวก

ตารางแสดงระยะเวลาทำการวิจัย กิจกรรม และผลที่คาดว่าจะได้

ระยะเวลา	กิจกรรม	ผลที่คาดว่าจะได้
6 เดือนที่ 1	- สร้างแบบหุ่นจำลองมาตรฐานจากเครื่องพิมพ์สามมิติ - พัฒนาสูตรยางพาราและทดสอบชิ้นงานยางพารา - สร้างหุ่นจำลองศีรษะจากยางพาราขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ยาว 30 เซนติเมตร ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์	- แบบหุ่นจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ - สูตรยางพาราและผลทดสอบชิ้นงานยางพารา - หุ่นจำลองขนาดตามที่ต้องการ และคุณสมบัติใกล้เคียงมนุษย์ - รายงานความก้าวหน้ารอบ 6 เดือน
6 เดือนที่ 2	- วางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษา 2 มิติและ 3 มิติ - เก็บข้อมูลและประเมินผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองมาตรฐาน - วิเคราะห์และสรุปผล	- ผลการวางแผนการรักษาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วางแผนการรักษาด้วยเทคนิคการรักษา 2 มิติและ 3 มิติ - ผลข้อมูลและผลประเมินผลการวัดค่าปริมาณรังสีในหุ่นจำลองมาตรฐาน - ผลการวิเคราะห์และสรุปผล และรายงานฉบับสมบูรณ์