

ชื่อโครงการ “การออกแบบ การผลิต และ ประเมินหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนทรวงอก ส่วน ท้องและช่องเชิงกราน สำหรับการถ่ายภาพรังสี”

อัญชนา ทวีทวากร¹⁾ อุมพร เป็งกาสิทธิ์¹⁾ ขวัญชัย รัตนเสถียร²⁾ และอุทุมมา มัชฌะเนมี*¹⁾

- 1) ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ *Email:asitmghn@chiangmai.ac.th
2) ภาควิชาเคมีคลินิก คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อเป็นอุปกรณ์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 80 ปี หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อที่ดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพงานด้านการป้องกันอันตรายจากรังสี และ ความสามารถในการปฏิบัติงานอย่างมืออาชีพทางด้านรังสีเทคนิค ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนทรวงอก ส่วนท้อง และ ช่องเชิงกราน สำหรับการถ่ายภาพรังสีโดยไม่ต้องทดลองกับผู้ป่วย ด้วยการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมพบว่าโพลีสไตรีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเปรียบเทียบความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อต่าง ๆ จากอันตรกิริยาทางฟิสิกส์รังสี และ ค่าความดำภาพรังสี เมื่อใช้เทคนิคที่เหมาะสม ได้ค่าความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อของ เนื้อเยื่อทั่วไป, หัวใจ, กระดูก, กระบังลม, ตับ, ไต และ กล้ามเนื้อไขว้ แอส โดยพิจารณาจากค่าความดำเท่ากับ 0, 3, 38, 40, 15, 0 และ 40 เปอร์เซนต์แคลเซียมคาร์บอเนต ข้อมูลนี้เมื่อนำไปผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อตามกายวิภาคของมนุษย์ การผลิตส่วนทรวงอกเพศชายหนา 20 ซม.โดยใช้โพลียูรีเทนโฟมผลิตส่วนปอด และ ผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนท้องและช่องเชิงกรานเพศหญิงหนา 18 ซม. แล้วทดสอบหลังการผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อพบว่า ค่าความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อจากภาพรังสีทรวงอกจากภาพรังสีของคน และ ค่าความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อจากภาพรังสีส่วนท้อง และ ช่องเชิงกรานของหุ่นจำลองร่างกายมนุษย์มาตรฐานกับหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อที่ผลิตขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนทรวงอก ส่วนท้องและช่องเชิงกรานที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อถ่ายภาพรังสีแทนผู้ป่วยจริงได้ ผลการเปรียบเทียบอันตรกิริยาทางฟิสิกส์รังสีของหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนทรวงอก ส่วนท้องและช่องเชิงกรานที่ผลิตขึ้น กับค่าอ้างอิงที่กำหนด โดยคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการกำหนดหน่วยและการวัดปริมาณทางรังสี มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 5 เปอร์เซนต์ ซึ่งจัดเป็นหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อในระดับเกรดเอ

คำสำคัญ การออกแบบ การผลิต หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ หุ่นจำลองร่างกายมนุษย์มาตรฐาน อันตรกิริยาทางฟิสิกส์ โพลีสไตรีน โพลียูรีเทน แคลเซียมคาร์บอเนต หุ่นจำลองส่วนทรวงอก หุ่นจำลองส่วนท้องและช่องเชิงกราน

บทนำ

มนุษย์ได้รับรังสีจากแหล่งธรรมชาติ ปริมาณมากพอสมควร ดังเช่นในประเทศสหรัฐอเมริกาบางพื้นที่ ประชาชนได้รับรังสีจาก เรดอนในธรรมชาติสูงประมาณ 1.98 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี และจากรังสีคอสมิก 0.3 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี (Statkiewicz-Sherer และคณะ ,1998) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณรังสีที่คณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการป้องกันอันตรายจากรังสี กำหนดไว้ว่าขีดจำกัดของปริมาณรังสีที่บุคคลทั่วไปพึงได้รับไม่เกิน 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี (ICRP Publication 60,1991) จึงเห็นได้ว่าหากได้รับรังสีจากแหล่งอื่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ได้รับรังสีมากกว่าขีดจำกัดเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการใช้รังสีกับผู้ป่วยในการตรวจวินิจฉัยและ/หรือการรักษา ผู้ปฏิบัติงานจะต้องให้ความสนใจ ระมัดระวังมากที่สุด โดยทั่วไปการใช้รังสีต้องมีการประเมินความเสี่ยง กับผลประโยชน์ที่ผู้ป่วยจะได้รับขณะเดียวกันผู้ปฏิบัติงานต้องยึดหลักการ ใช้รังสีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างเคร่งครัด กล่าวคือต้องไม่ทำให้ผู้ป่วยได้รับรังสีโดยไม่จำเป็น โดยต้องพยายามให้รังสีเหลือน้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้ และจะต้องไม่เกินระดับที่เสนอแนะ ในงานรังสีวินิจฉัยนั้น เทคนิควิธีการที่ใช้ถ่ายภาพ แต่ละส่วนและความหนาจะแตกต่างกันไป จึงต้องตั้งเทคนิคในการถ่ายภาพให้เหมาะสมที่สุด และ ต้องไม่ใช้วิธีการแบบลองผิดลองถูกกับผู้ป่วย เพราะจะทำให้ได้รับรังสีเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น วิธีการที่ดีและสะดวกกว่าที่ใช้กัน คือการใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับการทดสอบ เพื่อสร้างตารางเทคนิคสำหรับการถ่ายภาพรังสี โดยไม่ส่งผลกระทบต่อบุคคลทั่วไป หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อเป็นสินค้าราคาแพงมาก ทำให้ไม่มีการใช้หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้รังสีอย่างแพร่หลายนัก

คณะกรรมการ ระหว่างประเทศด้านการกำหนดหน่วยและการวัดทางรังสี (ICRU 44,1988) ให้คำอธิบายว่าหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อหมายถึง วัสดุที่มีคุณสมบัติที่เลียนแบบเนื้อเยื่อตั้งแต่หนึ่งอย่างหรือมากกว่า และสามารถใช้ในการทดสอบ อันตรกิริยาทางรังสีแทนเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ตัวอย่างเช่น หุ่นจำลองร่างกายมนุษย์

หมายถึงหุ่นจำลองที่มีรูปร่างเหมือนมนุษย์ หรือ ส่วนหนึ่ง ส่วนใดของร่างกาย (Supertech:2003) รูปที่ 1แสดงลักษณะของหุ่นจำลองที่มีองค์ประกอบต่างๆ เลียนแบบเนื้อเยื่อ ได้แก่ รูปร่าง, ขนาด, ตำแหน่ง, ความหนาแน่น และ อันตรกิริยาทางรังสี การถ่ายภาพรังสีทรวงอกผู้ป่วยจะได้รับปริมาณรังสีประมาณ 0.08 มิลลิซีเวิร์ตต่อภาพ (Cameron ,2001) และบริเวณส่วนท้องและช่องเชิงกรานเมื่อวัยวะสืบพันธุ์ ซึ่งไวต่อรังสีสูงผู้ป่วยจึงมีแนวคิดที่จะผลิต หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนทรวงอก ท้องและช่องเชิงกรานขึ้น เพื่อประโยชน์ในงานการถ่ายภาพรังสี



รูปที่ 1 1) หุ่นจำลองร่างกายมนุษย์แบบทึบแสง 2) หุ่นจำลองร่างกายมนุษย์แบบโปร่งใสมองเห็นโครงสร้างภายใน

ICRU ได้กำหนดหลักการคัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาผลิตเป็นหุ่นจำลอง (ICRU 44,1988) โดยให้พิจารณาจากความเหมือนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเนื้อเยื่อ (National Institute of Standards and Technology, 2003) คุณสมบัติทางกายภาพ ความง่ายในการนำมาใช้ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้โดยตรง ประกอบกับคุณสมบัติในการดูดกลืนและการกระเจิงของโฟตอนและ อิเล็กตรอน ซึ่งสามารถพิจารณาจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ต่างๆ ได้แก่ Mass attenuation coefficient (μ/ρ) (สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล) Mass energy absorption coefficient (μ_{en}/ρ) (สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล) Electron mass stopping power (S/ρ) Electron mass angular scattering power

(θ^2/ρ) Mass density (ρ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางด้านการดูดกลืน และการกระเจิงของโฟตอน และ อิเล็กตรอน เมื่อวัสดุใดมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังกล่าว และมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก และความหนาแน่นเหมือนเนื้อเยื่อมนุษย์ จะสามารถกล่าวได้ว่าวัสดุนั้น มีความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อเหมือนเนื้อเยื่อมนุษย์ได้

วัสดุ อุปกรณ์ และ วิธีการทดลอง

วัสดุที่จะนำมาใช้งานได้จากการคัดเลือก วัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงเนื้อเยื่อที่ต้องการผลิตมากที่สุด ประกอบด้วย วัสดุสำหรับการผลิตโพลีไทรีนโพลีเมอร์ โพลียูริเทน วัสดุสำหรับการผลิตซิลิโคนรับเบอร์ โย แก้ว แผ่นกระจกเรียบ และอุปกรณ์ช่างสำหรับการทำงาน เรซิน แผ่นโพลีเอคริลิก เครื่องมือวัดความดำ เครื่องเอกซเรย์ และ เครื่องมือวัดปริมาณรังสี

จากการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของค่า Mass attenuation coefficient และ Mass energy absorption coefficient ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนและการกระเจิงของโฟตอน ในสารตัวกลางที่โฟตอนเคลื่อนที่ผ่านโดยใช้โปรแกรมคำนวณค่า Mass attenuation coefficient และ Mass energy absorption coefficient (National Institute of Standards and Technology: 2003) ของเนื้อเยื่อมนุษย์และวัสดุตัวกลาง ได้แก่ โพลีไทรีน, ซี้ผึ้ง , โพลีเอคริลิก และ โพลีเอทีลีน ที่ระดับพลังงานโฟตอน (photon energy) 20 – 150 keV นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mass attenuation coefficient, Mass energy absorption coefficient, ของตัวกลางต่างๆ ได้แก่ โพลีไทรีน, ซี้ผึ้ง , โพลีเอคริลิก และ โพลีเอทีลีน ที่ระดับพลังงานโฟตอน (photon energy) 20 – 150 keV ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 เมื่อได้วัสดุที่ต้องการแล้วนำทดสอบความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อ โดยการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อของวัสดุตัวกลางที่จะใช้ผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ ทำโดยผลิตแผ่นโพลีไทรีน ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น

0,1,3,5,10,15,20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยใช้แม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 15 x 15 x 1 ซม. และ 30 x 30 x 1 ซม. ตามขนาดที่ต้องการศึกษา ด้วยวิธีการที่ใช้มาก่อนแล้ว โดย อุทัยทิพย์, 2544 และ วิชชุดา, 2544 แล้วนำแผ่นโพลีเมโรลิสต์เรซินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นต่างๆ ไปทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดำฟิล์มกับความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ความหนาที่ต้องการใช้งาน และใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีที่เหมือนกันสำหรับแต่ละส่วนที่ต้องการศึกษา ทั้งในส่วนของทรวงอก และ ส่วนท้องและช่องเชิงกราน โดยในส่วนทรวงอกหนา 20 ซม.เป็นการสอบเทียบวัสดุแบบมีโพรงอากาศ ซึ่งได้จากการวางแผนโพลีเมโรลิสต์เรซิน 3 ซม. สำหรับเนื้อหน้าอก เว้นช่องปอด 15 ซม. และ เนื้อแผ่นหลัง 2 ซม. ถ่ายภาพรังสีด้วยเทคนิค 80 kVp 3 mAs ระยะทาง 180 ซม. โดยเปลี่ยนแผ่นโพลีเมโรลิสต์เรซินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองสำหรับสอบเทียบสมมูลของวัสดุที่ไม่มีโพรงอากาศ เช่น กระดูก และ อวัยวะต่าง ๆ หรือ ส่วนท้อง และ ช่องเชิงกราน ใช้แผ่นโพลีเมโรลิสต์เรซินความหนาเทียบเท่ากับกระดูกจริง หรือ อวัยวะที่ต้องการทดสอบ และ ใช้เทคนิคการถ่ายภาพตามความหนาของหุ่นจำลองที่ต้องการผลิต ทั้งในส่วนของทรวงอก ส่วนท้อง และ ช่องเชิงกรานตามต้องการ นำข้อมูลที่ได้ไปผลิตหุ่นจำลองโดยขึ้นแบบด้วยโฟม แล้วทำพิมพ์ด้วยไฟเบอร์กลาสเพื่อการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังรูปตัวอย่างขั้นตอนการผลิตในรูปที่ 2 การประเมินความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อ ใช้การเปรียบเทียบความดำฟิล์มของภาพรังสีผู้ป่วย และ ภาพรังสีหุ่นจำลองที่บริเวณเดียวกัน และ วิเคราะห์ทางสถิติด้วย unpaired t-test ซึ่งให้ผลการทดสอบที่แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

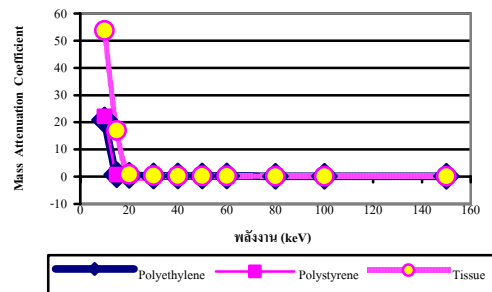
ผลการทดลอง

ผลการศึกษาค่าอันตรกิริยาทางฟิสิกส์ของวัสดุที่ต้องการทดสอบความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อ แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 สำหรับความสัมพันธ์ของความดำฟิล์มจากเนื้อเยื่อมีโพรงอากาศ กับไม่มีโพรงอากาศแสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 7 ส่วนกระดูกและกล้ามเนื้อไขเอส

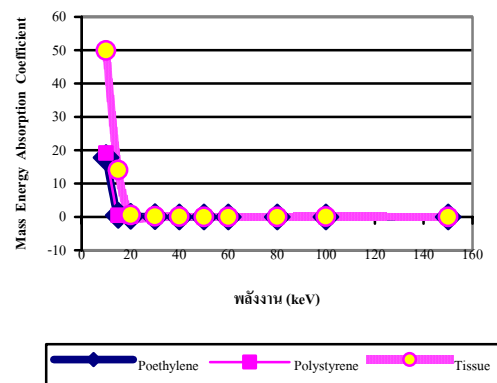
สามารถสอบเทียบได้จากรูปที่ 6 และสามารถสรุปค่าความเป็นสมมูลของส่วนต่างๆกับเปอร์เซ็นต์



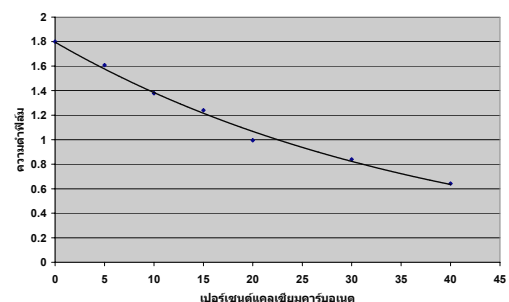
รูปที่ 2 ขั้นตอนการผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ 1. ขึ้นแบบด้วยโฟม 2. หุ้มด้วยแถบพลาสติกสีน้ำตาล 3. เคลือบด้วยใยแก้ว 4. และ 5. วางส่วนประกอบต่างๆในพิมพ์ 6. ตัวอย่างการผลิตแม่พิมพ์ซิลิโคน 7. กระดูกซี่โครงและ กระดูกตัวอย่างจากการถอดพิมพ์ 8. การขึ้นรูปปอด และ หัวใจเพื่อทำพิมพ์ด้วยโพลียูรีเทนสำหรับการผลิตปอดจากโพลียูรีเทนและหัวใจจาก 3 % แคลเซียมคาร์บอเนตในโพลีสไตรีน



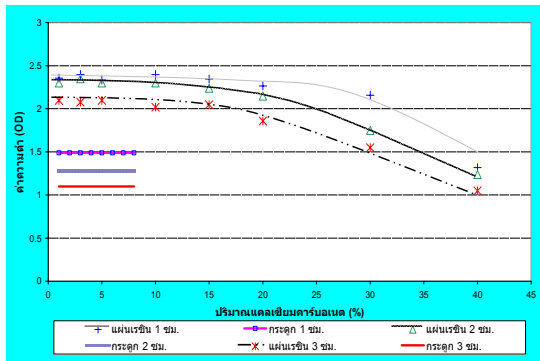
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mass attenuation coefficient ของวัสดุตัวกลางที่ค่าพลังงานโฟตอนต่างๆ



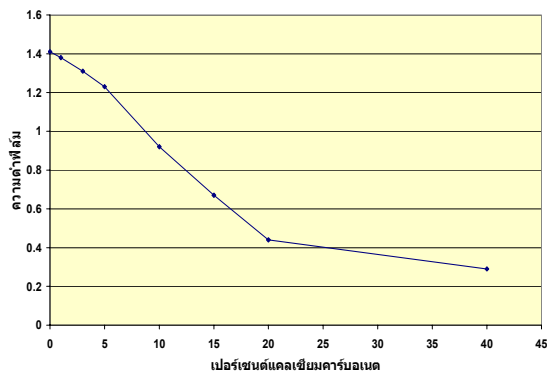
รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mass energy absorption coefficient ของวัสดุตัวกลางที่ค่าพลังงานโฟตอนต่างๆ



รูปที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความดำฟิล์มเนื้อเยื่อที่มีพร่องอากาศ



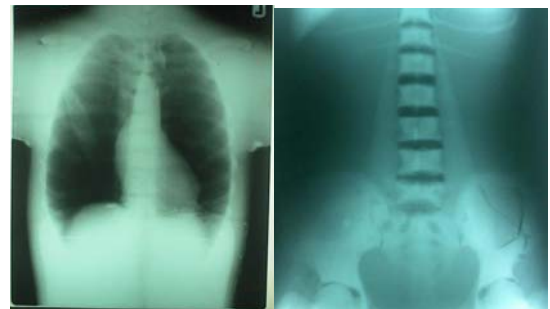
รูปที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความดำฟิล์มสำหรับกระดูกและกล้ามเนื้อไขเอส



รูปที่ 7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความดำฟิล์มเนื้อเยื่อไม่มีโพรงอากาศ

ตารางที่ 1 สรุปผลการสอบเทียบวัสดุสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับการผลิตส่วนต่างๆของหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ

บริเวณที่วัดความดำ	ความเข้มข้นของแคลเซียม %
เนื้อเยื่อทั่วไป	0-2
ไต	0-2
หัวใจ	3-5
เนื้อเยื่อบริเวณปอด	0-2
ตับ	15
กระดูก	38-40
กล้ามเนื้อไขเอส	40
กระดูกสันหลัง	40



รูปที่ 8 ภาพหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อสำหรับการถ่ายภาพรังสีทรวงอก ส่วนท้อง และ ช่องเชิงกราน

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

การผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ ในการศึกษาครั้งนี้เราผลิตหุ่นจำลองทรวงอกหนา 20 ซม. ภายในประกอบด้วยเนื้อเยื่อ กระดูก หัวใจ ปอด กระบังลม และหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนท้อง และ ช่องเชิงกรานที่มีความหนา 18 ซม. ภายในหุ่นประกอบด้วยเนื้อเยื่อกระดูก ตับ ไต กล้ามเนื้อไขเอส การทดสอบหลังการผลิตหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อ พบว่าค่าความเป็นสมมูลเนื้อเยื่อที่ผลิตขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาพรังสีของผู้ป่วย ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อที่ผลิตขึ้น สามารถนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อสร้างตารางเทคนิคสำหรับการถ่ายภาพรังสีทรวงอกส่วนท้อง และ ช่องเชิงกรานได้ ส่วนผลการเปรียบเทียบอันตรกิริยาทางฟิสิกส์รังสี ของหุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อส่วนท้องและช่องเชิงกรานที่ผลิตขึ้น กับค่าอ้างอิงที่กำหนด โดยคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการกำหนดหน่วย และ การวัดปริมาณทางรังสี(ICRU 44, 1988 และ ICRP No.23,1984) และ

มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดเป็น
หุ่นจำลองสมมูลเนื้อเยื่อเกรดเอ (Orton,1982)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจาก
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม
โครงการ “โครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษา
ปริญญาตรี ประจำปี 2546”

เอกสารอ้างอิง

วิชุลดา ไชยปัญญา. การผลิตวัตถุสมมูล
เนื้อเยื่อบริเวณช่องท้อง จากวัสดุโพลีเมโรสไตรเรซิน
ผสมสารเคมี. ภาคนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสี
เทคนิค) คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2544.

อุทัยทิพย์ วรพาณิชย์. การผลิตวัตถุสมมูล
เนื้อเยื่อบริเวณทรวงอก จากวัสดุโพลีเมโรสไตรเรซิน
ผสมสารเคมี. ภาคนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสี
เทคนิค) คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2544.

Bradshaw A L, Twiss D H,
Williams P C. Phantom Materials for
Photons and Electrons. The Hospital
Physicists Association. Reedprint Ltd.:
Windsor ,1977 ; p3.

Carlton RR, Adler AM. Principles
of Radiographic Imaging: An Art and a
Science. 2nd ed. Washington: Delmar
Publishing, 1996.

Cameron JR. “Are X-rays Safe?”
(ระบบออนไลน์)

แหล่งที่มา

<http://www.anglefire.com/mo/radioadaptive/jcameron1.html> (15 October 2003).

1984 International Commission
on Radiological Protection No.23. Report
of the Task Group on Reference Man.
Pergamon Press: Oxford, 1984.

1990 Recommendations of the
International Commission on Radiological
Protection. Radiation protection ICRP
Publication 60 .Dose Limits in Public
Exposure. Pergamon Press: Oxford, 1991.

International Commission on
Radiation Units and Measurements. ICRU
Report Number 44. Tissue Substitutes in
Radiation dosimetry and measurements.
Maryland ,1988.

National Institute of Standards and
Technology.”Composition of Tissue, soft
(ICRP)” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=261> (15 Jan 2003)

National Institute of Standards and
Technology.” X-Ray Mass Attenuation
Coefficient ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html> (27 May
2003).

Orton CG. Progress in Medical
Radiation Physics. Plenum Press ; New
York, 1982. p.166.

Supertech[®] Radiographic
Technique Products. ” PIXY Full Body
Phantoms ”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.supertechx-ray.com/a245a.htm>
(15 Nov 2003).
