

การศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนของเอกซเรย์ที่ทะลุผ่านยางคอมพอสิตตามอัตราส่วนของ แบเรียมซัลเฟตด้วยแผ่นรับภาพทางรังสี

A study of attenuation coefficient of x-ray attenuated with the barium sulphate-filled rubber compounds recorded using an imaging plate

พนพน สวีโรจน์¹ และ พิทยา สีสด²

¹สาขาวิชารังสีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, E-Mail panapon8961@gmail.com

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, E-Mail s.phittaya@ru.ac.th

Panapon Savitrot¹ and Phittaya Sisot²

¹Department of Radiological technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University,
E-Mail panapon8961@gmail.com

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, E-Mail s.phittaya@ru.ac.th

วันที่รับบทความ 10 กุมภาพันธ์ 2566
วันแก้ไขบทความ 18 มิถุนายน 2566
วันตอบรับบทความ 20 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

ในยุคปัจจุบันได้มีการนำเอกซเรย์มาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์มากมาย ในการทำงานที่เกี่ยวข้องจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีอย่างเหมาะสม โดยปกตินิยมใช้อุปกรณ์ที่มีตะกั่วมาทำบังเนื่องจากมีคุณสมบัติในการลดทอนรังสี แต่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์ที่ทะลุผ่านยางคอมพอสิตตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตด้วยแผ่นรับภาพทางรังสี วัสดุอุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดเอกซเรย์, แผ่นรับภาพทางรังสี, เครื่องอ่านภาพทางรังสี และโปรแกรม ImageJ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ใช้คือ 60-80 kVp เมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มีค่าลดลง และอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต 0, 5, 10, 15 phr เมื่ออัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตมากขึ้น จะทำให้การดูดกลืนพลังงานของเอกซเรย์มากขึ้น เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยที่แผ่นยางคอมพอสิต 15 phr ที่พารามิเตอร์ 5 mAs 60 kVp มีการลดทอนปริมาณรังสีมากที่สุดในการทดลอง 19.2770% สรุปผลการวิจัยแผ่นยางพาราคอมพอสิตสามารถเป็นอุปกรณ์การป้องกันอันตรายจากรังสี และสามารถเป็นแนวทางการสร้างอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีที่มีเทคนิคแตกต่างกันได้

คำสำคัญ: ภาพถ่ายทางรังสี, แบเรียมซัลเฟต, ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงาน

ABSTRACT

Actual progress of applied radiation plays a highly important role in medical radiology. In practice, generated materials optimize the process by decreasing the level of X-ray absorption. Radiation protection equipment is manufactured using lead because its properties decrease radiation doses, but it has negative environmental effects. This research studies the radiographic image intensity attenuated with barium sulphate-filled rubber compounds recorded with an imaging plate. The equipment used in this study includes an X-ray generator, radiographic imaging plate, radiographic readers and *ImageJ* open-source software to process and analyse scientific images. The results indicate that the X-ray generator, in the terms of voltage values in the range of 60-80 kVp, was higher, which has a greater attenuation coefficient value than the decrease in voltage. When the ratio of barium sulphate was increased, the barium sulphate-filled rubber compounds 0, 5, 10 and 15 phr resulted in X-ray energy absorption. This trends to a greater level of X-ray absorption and an increase in the attenuation coefficient. The rubber-compounded barium sulphate 15 phr by the terms in 5 mAs and 60 kVp was higher and had a 19.2770% greater attenuation coefficient value in condition. It can therefore be concluded that the rubber-compounded barium sulphate could be used as a guide to create radiation protection equipment and to develop radiation protection for other research techniques.

KEYWORDS: Radiographic image, Barium sulfate, Attenuation coefficient

1. บทนำ

หลายปีที่ผ่านมากระบวนการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์มีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัตถุ (Non-Destructive Testing, NDT) ซึ่งเป็นที่นิยมในกระบวนการอุตสาหกรรมและรังสีวิทยาทางการแพทย์ โดยอาศัยเอกซเรย์ทะลุผ่านวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ ความผิดปกติของวัตถุซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ในปัจจุบันมีการใช้แผ่นรับภาพทางรังสี (Imaging plate) เพิ่มความสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น ส่วนการป้องกันอันตรายจากรังสีเป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งต้องคำนึงถึง ควบคู่กับการทำงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีในด้านต่างๆ เนื่องจากพลังงานของเอกซเรย์มีอำนาจทะลุทะลวงสูง โดยเอกซเรย์จะถูกปล่อยออกมาจากเครื่องกำเนิดรังสีและกระทบกับวัตถุที่ต้องการ การทดสอบวัตถุเพื่อรับรังสีจะเกิดการดูดกลืนไว้บางส่วน และยอมให้รังสีบางส่วนทะลุผ่าน รังสีที่ทะลุผ่านจะถูกกรองรับด้วยแผ่นรับภาพ ภาพถ่ายทางรังสีจะประกอบไปด้วยหน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่าจุดภาพ (Pixel) ซึ่งจะเป็นพื้นที่เล็กๆจุดหนึ่งในภาพ โดยในแต่ละจุดนั้นจะมีเลขกำกับ ใช้อบกระดั้ความเข้มของแต่ละเฉดสี หากมีจุดหลายๆ จุดภาพมาต่อกันก็จะกลายเป็นภาพที่มีขนาดและความยาวเกิดขึ้น โดยภาพถ่ายทางรังสีเป็นภาพระดับสีเทา (Gray scale image) คือภาพที่มีสีอยู่ในโทนสีเทา จะมีจำนวนสีที่เป็นได้ทั้งหมด 256 สี ตั้งแต่สี ดำ (0) ถึงขาว (255) อีกทั้งในสถานพยาบาลในปัจจุบันนั้น ผู้ป่วยที่เข้ารับการบริการเอกซเรย์ในหอผู้ป่วยมีจำนวนมาก ทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับรังสีเพิ่มมากขึ้น จากการทดลองเพื่อการสร้างภาพทางรังสีนั้น ทำให้ได้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางของการสร้างอุปกรณ์การป้องกันอันตรายจากรังสีจากอุปกรณ์ที่มีอยู่หรือหาได้ง่าย

จากประเด็นสำคัญการสร้างสรรค์สิ่งประดิษฐ์และเทคโนโลยีใหม่ ใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่อยู่ในประเทศ ก่อให้เกิดงานวิจัยเรื่องนี้ขึ้นซึ่งเป็นการศึกษาทางคอมพิวเตอร์สืตลอกอนเอกซเรย์ที่ทะลุผ่านอย่างคอมพิวเตอร์ตามอัตราส่วนของแบบเรียบซัลเฟต

เพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคตในการนำไปใช้จริงได้ของสถานพยาบาล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดลงของความเข้มของรังสีจากการถ่ายภาพทางรังสีผ่านแผ่นยางคอมพอสิตที่มีแบเรียมซัลเฟตเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนแตกต่างกัน

นอกจากนี้ยังศึกษาค่าเฉลี่ยจากโปรแกรม Image J แล้วคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของแผ่นยางคอมพอสิตที่มีแบเรียมซัลเฟตเป็นองค์ประกอบในแต่ละอัตราส่วน เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันอันตรายจากเอกซเรย์ได้มากขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์จากการบันทึกภาพของแผ่นยางคอมพอสิต โดยประกอบด้วยอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่ต่างกัน

2.2 เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนของพลังงานของเอกซเรย์เมื่อผ่านวัตถุต่างชนิดกัน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว

สมการ Beer-Lambert Law ใช้อธิบายเอกซเรย์ที่มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (monochromatic X-ray beam) ตามสมการ The Beer-Lambert law

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

เมื่อ	x	คือ	ความหนาของแผ่นยางคอมพอสิต
	I_0	คือ	ความเข้มของเอกซเรย์ (ความเข้มของเดตีส) ก่อนทะลุผ่านตัวกลาง
	I	คือ	ความเข้มของเอกซเรย์ (ความเข้มของเดตีส) หลังทะลุผ่านตัวกลาง
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient)

3.2 รูปภาพและระบบสี

รูปภาพประกอบไปด้วยหน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่าเม็ดสีหรือจุดภาพ ซึ่งจะเป็พื้นที่ที่เล็ก ๆ จุดหนึ่งในภาพ โดยในแต่ละจุดนั้นจะมีเลขกำกับ ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะมาจากค่าของแม่สีสามสี สีแดง (R), สีเขียว (G) และสีฟ้า (B) ใช้บอกระดับความเข้มของแต่ละเดตีส หากมีจุดหลายๆจุดภาพมาต่อกันก็จะกลายเป็นภาพที่มีขนาดและความยาวเกิดขึ้น อย่างเช่น มีรูปภาพขนาด 320x240 นั้นหมายความว่าภาพนี้มีขนาดความกว้างของภาพคือ 320 พิกเซล และความยาวของภาพคือ 240 พิกเซล เป็นต้น

- ภาพระดับสีเทา (Gray scale image) คือภาพที่มีสีอยู่ในระดับโทนสีเทา ถ้าเป็นภาพ 8 บิต จะมีจำนวนสีที่เป็นได้ทั้งหมด 256 สี ตั้งแต่สี ดำ (0) ถึงขาว (255)
- ภาพแท่งความถี่ (Histogram) คือ กราฟที่แสดงจำนวนจุดภาพทั้งหมดในภาพที่ความเข้มต่างของภาพ โดยที่แกนนอนจะแสดงระดับความเข้มที่แบ่งระดับเป็น 256 ระดับ ซึ่งมีค่าตั้งแต่สี 0 ถึง 255 ซึ่งระดับสีเทามีค่าต่ำ ก็หมายถึงความเข้มที่มีค่าสีน้อยจะมองเห็นเป็นสีดำ แต่ในทางกลับกันหากค่าระดับสีเทามาก หมายถึงมีความเข้มมากจะมองเห็นเป็นสีขาว และแกนตั้งของกราฟจะแสดงจำนวนจุดภาพที่มีค่าในแต่ละช่วงระดับความเข้ม

3.3 เทคโนโลยีการออกสูตรเคมียาง

การออกสูตรเคมียางให้เหมาะสมนั้นนับเป็นขั้นตอนแรก ที่มีความสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง การออกสูตรเคมียางที่ดีนั้นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางแต่

ละชนิดโดยละเอียด ต้องรู้หน้าที่กลไกการทำงานของสารเคมีต่างๆ ที่จะผสมลงไปเป็นอย่างดี รวมทั้งต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องจักรที่จะใช้ในการผสมและการแปรรูปด้วย

โดยทั่วไปส่วนประกอบต่างๆ ในสูตรเคมียาง ประกอบด้วย

1. ยาง เป็นยางธรรมชาติ (natural rubber), ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber), ยางผสม (blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer)
2. สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เป็นสารที่ช่วยให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงตาข่าย (cross linking)
3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ในแต่ละกลุ่ม อาจจะมีการใช้สารเคมีมากกว่าหนึ่งตัว เช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยา อาจจะใช้สองตัวร่วมกัน หรือสี่อาจใช้สามหรือสี่ชนิดรวมกัน เป็นต้น

3.4 สารประกอบแบเรียมซัลเฟต

แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ลักษณะทางกายภาพเป็นผลึกสีขาวหรือสีขาวไม่มีกลิ่น เป็นสารประกอบไอออนิกที่ประกอบด้วยธาตุแบเรียม, ซัลเฟอร์ และออกซิเจน โดยมีมวลโมเลกุล 233.4 g/mol ความหนาแน่น 4.5 g/cm³ มีจุดหลอมเหลวที่ 1,580°C และดัชนีหักเห 1.637 แบเรียมซัลเฟตมีความสามารถในการดูดซับเอกซเรย์ที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ กระจายในยางธรรมชาติซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้

สารประกอบแบเรียมซัลเฟตมีลักษณะเป็นผงสำหรับใช้เป็นสารเพิ่มความหนาแน่น อีกทั้งใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในอุตสาหกรรมยาง, พอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมการขุดเจาะปิโตรเคมี สำหรับในทางการแพทย์ใช้เป็นสารประกอบไอออนิกที่มีคุณสมบัติสารทึบรังสี (radiocontrast) สำหรับเอกซเรย์เพื่อการถ่ายภาพทางการแพทย์ สำหรับการวินิจฉัยโรคต่างๆ โดยเฉพาะโรคในช่องท้องและทางเดินอาหาร, การตรวจระบบทางเดินอาหารส่วนบนและส่วนล่าง, การตรวจดูของหลอดอาหาร, การตรวจกระเพาะอาหาร และการตรวจลำไส้

แบเรียมซัลเฟตจะอยู่ในรูปสารแขวนลอยของผงละเอียดที่กระจายตัวในสารละลายน้ำ ถึงแม้ว่าแบเรียมจะเป็นโลหะหนักที่สารประกอบของมัน เมื่อละลายน้ำถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วจะเป็นพิษสูง แต่เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตละลายน้ำได้น้อยมากคนไข้จึงไม่ได้รับอันตรายจากพิษของมัน

3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

V.P.Singh et al. (2558) ที่ศึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Monte Carlo ด้วยพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบต่างๆ เช่น H, C, N, O และ F พบว่าผลการวิจัยในการทดลองผ่านวัสดุที่มีองค์ประกอบของ Polypropylene, Perspex และน้ำ ด้วยพลังงานรังสีแกมมา เมื่อค่าพลังงานมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานมีค่าน้อยลงตามไปด้วย

เสาวภาคย์ และคณะ (2562) ศึกษาแผ่นป้องกันรังสีที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติและบิสมันท์ปริมาณสูงทดแทนการใช้ตะกั่วเป็นส่วนผสม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีของแผ่นป้องกันรังสีที่มีส่วนผสมของยางแท่งและบิสมันท์ปริมาณต่างๆ กับอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่มีสมมูลตะกั่ว 0.5 mm โดยทำการทดลองด้วยแผ่นยางที่เตรียมจากสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมันท์ ทั้ง 6 สูตร คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 phr โดยที่ตัวอย่างแผ่นยางมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 5 mm ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนปริมาณรังสี โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 50 ถึง 120 kVp และค่ากระแสหลอด 20 mAs ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของบิสมันท์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่มีสมมูลตะกั่ว 0.5 mm กับแผ่นป้องกันรังสีที่ประดิษฐ์ขึ้นพบว่าแผ่นยางสูตรที่ผสมตะกั่ว 300 phr มีความหนา 3 mm มีค่าร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี 97.33 ที่ 100 kVp ซึ่งใกล้เคียงกับอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่มีความหนาสมมูลบิสมันท์ 0.5 mm และเมื่อเพิ่มปริมาณบิสมันท์เป็น 400 และ 500 phr ประสิทธิภาพการลดทอนปริมาณรังสีได้ดีกว่าอุปกรณ์เปรียบเทียบที่มีความหนา 3 mm

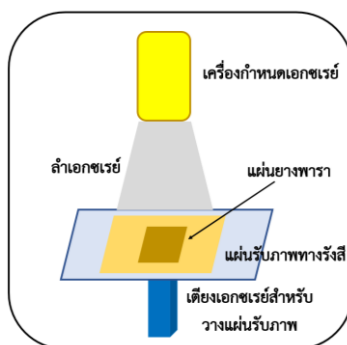
ภาคภูมิ อรชร (2560) ศึกษาการใช้เอกซเรย์พลังงานต่ำในช่วง 13.6-43.5 keV ที่ได้จากต้นกำเนิดรังสี ^{238}Pu โดยใช้การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวชนิดต่างๆที่มีค่าขึ้นกับพลังงาน ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า สามารถคัดแยกของเหลวชนิดต่างๆ เช่น น้ำ น้ำมัน แอลกอฮอล์ ออกจากกันได้แม้อยู่ในขวดแก้วแบบปิดและภาชนะที่มีขนาดต่างๆกัน

ทิวาวัลย์ และคณะ (2560) ศึกษาการผลิตวัสดุลดทอนเอกซเรย์ทดแทนโลหะตะกั่ว โดยผลการวิจัยพบว่า การดูดกลืนเอกซเรย์ของแผ่นพอลิยูรีเทน (PU) ที่มีความหนา 2 mm ด้วยพลังงานของเอกซเรย์เท่ากับ 60 kV พบว่าเอกซเรย์ที่ผ่านแผ่น PU มีค่าใกล้เคียงกับเอกซเรย์ที่ผ่านอากาศแสดงให้ว่า ความสามารถในการลดทอนเอกซเรย์ของแผ่น PU มีค่าน้อยมาก อีกนัยหนึ่งคืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบใน PU แต่เมื่อนำ PU ไปคอมพอสิตกับสารแบเรียมซัลเฟต พบว่าแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO₄ ดูดกลืนเอกซเรย์ได้ดี และเมื่อผสมแบเรียมซัลเฟตมากขึ้นทำให้การดูดกลืนเอกซเรย์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การออกแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์

ระบบการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์ที่พัฒนาขึ้นแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดเอกซเรย์, เติงเอกซเรย์สำหรับวางแผ่นรับภาพ, แผ่นรับภาพ และเครื่องรับภาพรับทางรังสี ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์

4.2 การออกแบบวัสดุตัวอย่างของการวิจัย

การออกแบบวัสดุตัวอย่าง โดยจะออกแบบวัตถุเป็นแผ่นยางคอมพอสิต โดยมีองค์ประกอบของแบเรียมซัลเฟตที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบสูตรผสมเคมีของวัสดุตัวอย่าง

สูตรผสมเคมี	ปริมาณสาร (phr*)			
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100
Stearic acid	1	1	1	1
ZnO	3	3	3	3
Zinc dibutyl dithiocarbamate (ZDBC)	1	1	1	1
Sulfur	2	2	2	2
BaSO ₄	0	5	10	15

*phr ย่อมาจาก parts per hundred of rubber หมายถึง หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)

4.3 ขั้นตอนการผสมสารในการผลิตแผ่นยาง

โดยการผสมสารแต่ละสูตรในเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ได้แผ่นยางคอมพอสิตที่ผสมตามสูตรตามด้วยขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นยางคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดในแม่แบบ (compression moulding) และหลังเสร็จสิ้นการหลอมขึ้นรูปแผ่นยางคอมพอสิต ใช้อุณหภูมิ 170°C เวลา, preheat 2 นาที, heat 3 นาที, pressure 10 psi และ cooling 3 min to 50°C ได้ขนาดของแผ่นยางคอมพอสิตตามที่ต้องการที่มีความหนา 3 mm ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผ่นยางคอมพอสิตสำเร็จรูป

4.4 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลวิจัยเพื่อหาค่าความเข้มของเฉดสี

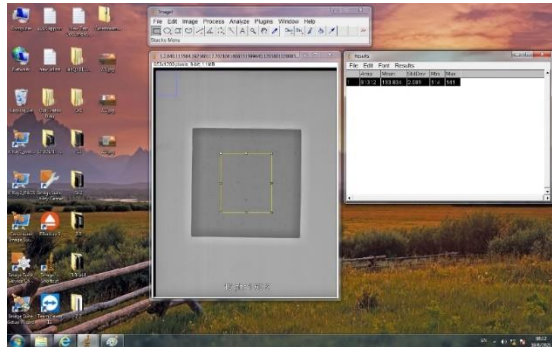
1. วางแผนเก็บภาพทางรังสีบนแท่นวางวัตถุ
2. ทำการเก็บภาพทางรังสีโดยการเก็บภาพรังสีโดยเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า คือ 60 kVp, 65 kVp, 70 kVp, 75 kVp และ 80 kVp ตามลำดับ
3. เปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสหลอด-เวลา (mAs) ของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์เป็น 5 mAs, 6.3 mAs, 8 mAs, 10 mAs และ 12 mAs
4. ทำการเก็บภาพทางรังสีเหมือนกับ 3 แต่เปลี่ยนสูตรยางชนิดอื่น ซึ่งมีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต 5, 10, 15 phr ตามความหนาของสูตรยางแต่ละรอบ
5. บันทึกผลการทดลอง

4.5 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรม ImageJ เพื่อต้องการหาเฉดสีขาว-ดำ ตามหลักการของ Gray scale

1. นำภาพทางรังสีต่างๆ มาอ่านภาพในเครื่องอ่านภาพทางรังสี โดยเครื่องอ่านภาพรังสียี่ห้อ Carestream CR system ด้วยคำสั่ง Invert gray scale
2. เมื่อนำภาพทางรังสีที่ได้มาแล้ว มาวิเคราะห์ผลกับโปรแกรม Image J และอ่านค่าความเข้มของภาพด้วยโปรแกรม ImageJ โดยใช้ขอบเขตของช่วงพิกเซลที่ต้องการอ่านค่า เรียกว่า Rest of interest (ROI) ตำแหน่งกลางของภาพทางรังสีโดยเป็นผลค่าเฉลี่ยความเข้มของภาพทางรังสีภายใน Rest of interest เพื่อดูค่าของเฉดสีระบบ RGB ตามความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของเครื่องเอกซเรย์ในรูปแบบต่างๆ
3. จากขั้นตอนที่ 2 ทำให้ได้ค่าของข้อมูลเฉดสีตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่เป็นองค์ประกอบ ค่าความเข้มของเฉดสีจะมีความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และความหนาแน่นของแบเรียมซัลเฟตที่เป็นองค์ประกอบ
4. ค่าเฉดสีของภาพรังสีที่ได้นำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนของพลังงานเอกซเรย์หลังจากผ่านวัตถุได้ ตามสมการ (1)

5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของภาพกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตามตัวแปรของการทดลอง ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า, ขนาดความหนาของแผ่นยางคอมพอสิตตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่เติมลงในแผ่นยางคอมพอสิต



รูปที่ 3 การวิเคราะห์กับโปรแกรม Image J

4.6 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์

จากสมการ (1) ;

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

เมื่อ	x	คือ	ความหนาของแผ่นยางคอมพอสิต
	I_0	คือ	ความเข้มของเอกซเรย์ (ความเข้มของเดดลี) ก่อนทะลุผ่านตัวกลาง
	I	คือ	ความเข้มของเอกซเรย์ (ความเข้มของเดดลี) หลังทะลุผ่านตัวกลาง
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient)

เมื่อได้ค่า μ จะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ในแผ่นยางพาราแบเรียมซัลเฟตในแต่ละอัตราส่วน

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบหาค่าความเข้มของเดดลีของแผ่นยางคอมพอสิตที่ความหนา 3 mm

จากการทดลองถ่ายภาพเอกซเรย์ด้วยแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 60-80 kVp ลงแผ่นรับภาพทางรังสี โดยมีแผ่นยางคอมพอสิตที่มีความหนา 3 mm และอ่านค่าความเข้มของภาพด้วยโปรแกรม ImageJ โดยใช้ขอบเขตของช่วงพิกเซลที่ต้องการอ่านค่า เรียกว่า Rest of interest (ROI) ตำแหน่งกลางของภาพทางรังสีโดยเป็นผลค่าเฉลี่ยความเข้มของภาพทางรังสีภายใน Rest of interest เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของรังสีที่ทะลุผ่านแผ่นยางคอมพอสิตตามอัตราส่วน ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 5, 6.3, 8, 10, 12 mAs และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 5 mAs

แรงดันไฟฟ้า (kVp)	แผ่นยางพาราอัตราส่วนของ BaSO ₄ (phr)			
	0	5	10	15
60	0.0262	0.0262	0.0550	0.0714
65	0.0169	0.0138	0.0365	0.0639
70	0.0285	0.0252	0.0379	0.0516
75	0.0193	0.0077	0.0241	0.0304
80	0.0273	0.0242	0.0348	0.0351

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 6.3 mAs

แรงดันไฟฟ้า (kVp)	แผ่นยางพาราอัตราส่วนของ BaSO ₄ (phr)			
	0	5	10	15
60	0.0090	0.0169	0.0407	0.0711
65	0.0043	0.0129	0.0270	0.0505
70	0.0159	0.0160	0.0254	0.0510
75	0.0088	0.0251	0.0240	0.0238
80	0.0084	0.0148	0.0211	0.0214

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 8 mAs

แรงดันไฟฟ้า (kVp)	แผ่นยางพาราอัตราส่วนของ BaSO ₄ (phr)			
	0	5	10	15
60	0.0179	0.0285	0.043	0.0623
65	0.0183	0.0175	0.0297	0.0533
70	0.0011	0.0079	0.0188	0.0392
75	0.0085	0.0261	0.0245	0.0247
80	0.0072	0.0237	0.0211	0.0214

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 10 mAs

แรงดันไฟฟ้า (kVp)	แผ่นยางพาราอัตราส่วนของ BaSO ₄ (phr)			
	0	5	10	15
60	0.0112	0.0193	0.0333	0.0572
65	0.0003	0.0175	0.0326	0.0419
70	0.0073	0.0257	0.0261	0.0437
75	0.0175	0.0300	0.0221	0.0224
80	0.0174	0.0130	0.0211	0.0212

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่ 12 mAs

แรงดันไฟฟ้า (kVp)	แผ่นยางพาราอัตราส่วนของ BaSO ₄ (phr)			
	0	5	10	15
60	0.0096	0.0273	0.0399	0.0664
65	0.0110	0.0264	0.0272	0.0456
70	0.0092	0.0166	0.0170	0.0440
75	0.0196	0.0148	0.0357	0.0359
80	0.0106	0.0067	0.0146	0.0147

จากตารางที่ 2-6 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ทะลุผ่านแผ่นยางคอมพอสิต ทำให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มีค่าลดลงตามแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น กล่าวคือที่อัตราส่วนเดียวกัน มีความสามารถในการลดทอนของเอกซเรย์ได้ลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของพลังงานที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน แผ่นยางคอม

พอลิตที่มีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตมากกว่า จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มากกว่าอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่น้อยกว่า กล่าวคือ แผ่นยางคอมพอลิตที่มีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต 0 phr มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์น้อยที่สุด และแผ่นยางคอมพอลิตที่มีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต 15 phr มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มากที่สุด แต่มีบางค่าที่ไม่เป็นตามแนวโน้มคือ แผ่นยางคอมพอลิตที่มีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต 0 phr อาจเป็นผลของค่าความเข้มของภาพที่น้อยมาก จนเกินขอบเขตของแผ่นรับภาพทางรังสีที่จะรับได้

จากการทดลองทดสอบการดูดกลืนพลังงานของเอกซเรย์ของแผ่นยางคอมพอลิตที่มีความหนา 3 mm ด้วยแรงดันไฟฟ้า 60, 65, 70, 75 และ 80 kVp โดยองค์ประกอบภายในยางคอมพอลิต ได้แก่ C, O, H และ S (เลขมวลเท่ากับ 12, 16, 1 และ 32 g ตามลำดับ) จึงลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ได้น้อย แต่เมื่อนำแผ่นยางคอมพอลิตเติมสารแบเรียมซัลเฟตพบว่าสามารถดูดกลืนเอกซเรย์ได้ดี และเมื่อผสมแบเรียมซัลเฟตมากขึ้น ทำให้เกิดการลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสมบัติการลดทอนของเอกซเรย์ของแผ่นยางคอมพอลิตซึ่งมีการเติมแบเรียมซัลเฟต ขึ้นกับความหนาแน่นของสารดูดกลืนเอกซเรย์ กล่าวคือ ขึ้นกับปริมาณของสารดูดกลืนเอกซเรย์กับความหนาของแผ่นคอมพอลิตตามสมการ Lambert's law สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานขึ้นอยู่กับพลังงานของเอกซเรย์ และชนิดของตัวกลางที่ทะลุผ่าน

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ BaSO_4 ในแผ่นยางคอมพอลิตที่มีอัตราส่วนของ BaSO_4 น้อยกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานน้อยกว่า อัตราส่วนของ BaSO_4 มากกว่า เนื่องจากจะมีอะตอมของแบเรียมซัลเฟตซึ่งดูดกลืนเอกซเรย์ได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าต่างกันพบว่า ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานมากกว่า ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า เนื่องจากมาจากพลังงานของเอกซเรย์มีอำนาจทะลุทะลวงวัตถุ เมื่อพลังงานสูงขึ้นเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานมีค่าน้อยลง และแผ่นยางคอมพอลิตที่ผสมอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตมากขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์จะมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีมวลโมเลกุล 233.4 g/mol และ ความหนาแน่น 4.5 g/cm^3 มีความสามารถในการดูดซับเอกซเรย์ที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ ซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ โดยที่แผ่นยางคอมพอลิต 15 phr 5 mAs 60 kVp มีค่าร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี 19.2770% โดยมีค่าร้อยละการลดทอนปริมาณรังสีมากที่สุดในการทดลอง

จากการผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า แผ่นยางคอมพอลิตที่มีอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต ถ้ามีอะตอมของแบเรียมซัลเฟตมากขึ้น จะทำให้ดูดกลืนพลังงานของเอกซเรย์มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์ เนื่องจากมีอำนาจทะลุทะลวงต่อวัตถุ เมื่อพลังงานสูงแสดงว่าอำนาจทะลุทะลวงสูง เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มีค่าน้อยลงตามไปด้วย จากกราฟข้างต้นทำให้พบว่า เมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตในแผ่นคอมพอลิตมากขึ้น เช่น อัตราส่วนแบเรียมซัลเฟตในแผ่นคอมพอลิต 5 phr มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ 0.016 mm^{-1} ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ที่แรงดันไฟฟ้า 70 kVp 6.3 mAs 3 mm น้อยกว่าอัตราส่วนแบเรียมซัลเฟตในแผ่นคอมพอลิต 15 phr มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ 0.051 mm^{-1} และอัตราส่วนแบเรียมซัลเฟตในแผ่นคอมพอลิต 5 phr 70 kVp 6.3 mAs 3 mm มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ 0.0160 mm^{-1} ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มากกว่าอัตราส่วนแบเรียมซัลเฟตในแผ่นคอมพอลิต 5 phr 80 kVp 6.3 mAs 3 mm มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ 0.0148 mm^{-1}

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 การศึกษาความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์จากการบันทึกภาพของแผ่นยางคอมพอลิต โดยประกอบด้วยอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่ต่างกัน

การพัฒนาารูปแบบการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของรังสีควมู่ไปกับการทดลองการวิจัยข้างต้น เพื่อออกแบบวิธีการทดลองและศึกษาการวิเคราะห์ความเข้มของภาพทางรังสี ให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์การประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคตต่อไปได้

โปรแกรม ImageJ เป็นโปรแกรมที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในโลกปัจจุบัน ที่มีการประยุกต์ใช้ในทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ด้วยการเรียนรู้และเข้าใจง่าย โดยนำมาประยุกต์การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์อาศัยพื้นฐานฟิสิกส์รังสีและฟิสิกส์อะตอมเป็นสำคัญ หลักการทั่วไปเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้คือการศึกษาค่าความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์จากการบันทึกภาพของแผ่นยางคอมพอสิต โดยประกอบด้วยอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่ต่างกัน ซึ่งความเข้มของภาพดิจิทัลที่ได้จากการถ่ายภาพทางรังสีแปรผันตรงกับค่าความเข้มของรังสีที่ตกกระทบกับแผ่นรับภาพ ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มของภาพเหล่านี้เป็นตัวแทนของความเข้มของรังสีที่ตกกระทบแผ่นได้ โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์บนแผ่นรับภาพจะมากมีค่ามากขึ้น, กระแสหลอด-เวลา (mAs) มากขึ้นความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์บนแผ่นรับภาพจะมากมีค่ามากขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตมากขึ้นความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์บนแผ่นรับภาพจะน้อยลง เนื่องจากการลดทอนจากอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตที่มากขึ้น

การประยุกต์ใช้เทคนิคที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถนำหลักการเดียวกันนี้กับชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพและเครื่องเอกซเรย์ชนิดอื่นในอนาคตที่เหมาะสมและจัดหาได้ และผลการวัดด้วยเทคนิคเดียวกับอุปกรณ์อื่นๆ ก็จะเป็นการประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดเอกซเรย์กับเฉพาะเครื่องนั้นๆ ไม่สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์มาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยนี้ แต่ทุกระบบและกระบวนการสามารถคัดกรองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของเอกซเรย์ได้

6.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานตามอัตราส่วนของแผ่นยางคอมพอสิต

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มของภาพถ่ายเอกซเรย์ที่ทะลุผ่านวัสดุตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตด้วยแผ่นรับภาพทางรังสี ซึ่งสามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีในการประยุกต์ใช้ข้างต้น มีต้นทุนการผลิตไม่สูงมากขึ้นประกอบการผลิตของยางวัลคาไนซ์ที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟตมีต้นทุนการผลิตน้อย และลดการหักงอของวัสดุ เนื่องจากยางพารามีความยืดหยุ่นและมีค่าความแข็งแรงสูง

ขณะที่ตะกั่วโดยคุณสมบัติทั่วไปมีความเป็นพิษสูงต่อร่างกาย ดังนั้นถ้าหากนำโลหะออกไซด์ที่สามารถนำมาเป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีคุณสมบัติที่เทียบเท่าตะกั่ว แบเรียมซัลเฟตจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนตะกั่วซึ่งคอมพอสิตของยางพารา ที่มี การเติมแบเรียมซัลเฟตให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถลดทอนปริมาณหรือกำบังรังสีได้เทียบเท่ากับคอมพอสิตของยางพาราที่มีการเติม PbO

การศึกษาค่าเตรียมสูตรยางพาราผสมแบเรียมซัลเฟต โดยมีการเติมปริมาณของแบเรียมซัลเฟต ผลการศึกษาการเตรียมคอมพอสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตที่มีปริมาณ 15 phr พบว่าส่งผลให้สมบัติในการลดทอนของเอกซเรย์มากที่สุด เนื่องจากจะมีอะตอมของแบเรียมซัลเฟตซึ่งดูดกลืนเอกซเรย์ได้มากขึ้น จากผลการวิจัยข้างต้น ทำให้เป็นประโยชน์ในแนวทางการสร้างอุปกรณ์การป้องกันอันตรายจากรังสีได้จากวัสดุและอุปกรณ์ข้างต้น ฉะนั้นแล้วแผ่นยางคอมพอสิตที่มีการเติมตามอัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟต และสามารถกำบังเอกซเรย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยแผ่นยางคอมพอสิตที่จัดทำขึ้นสามารถกำบังรังสีได้ในอัตราต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าในเชิงพาณิชย์ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่เอื้อเฟื้อเงินทุนวิจัยในการสนับสนุนเป็นปัจจัยในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ทำให้สามารถพัฒนารูปแบบการวิจัยเรื่องนี้ตลอดเวลาที่ทำการทดลองและการทำวิจัยในด้านต่างๆ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้มหาวิทยาลัยรามคำแหง ประถมมหาวิทยาลัย โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา งบประมาณประจำปี 2564

8. เอกสารอ้างอิง

- เสาวภาคย์ ภูศิริ และคณะ. (2562). การประดิษฐ์อุปกรณ์ป้องกันรังสีจากยางธรรมชาติผสมบิสฟีนอล A ปริมาณสูงสำหรับงานรังสีวินิจฉัย: วารสารรังสีเทคนิค, 44(1), 8-14.
- ภาคภูมิ อรชร, นเรศร์ จันทน์ขาว, สมยศ ศรีสถิตย์. (2560). การพัฒนาเทคนิคสำหรับการตรวจวัดของเหลวในขวดแก้วโดยใช้การทะลุ ผ่านของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ: วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 16, 20-16.
- นพรัตน์ แก้วใหม่. (2560). การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่บันทึกภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลสำหรับการคัดกรองของเหลว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริลักษณ์ อินต้อม. (2562). การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบของออกไซด์ (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล และคณะ. (2560). สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO₄: วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 27, 159-168.
- ธัญรัตน์ ชูศิลป์ และคณะ. (2561). ตัวบ่งชี้ปริมาณรังสีในระบบการถ่ายภาพรังสีแบบดิจิทัล: วารสารรังสีเทคนิค, 43(1), 21-28.
- ศุภวิภู สุขเพ็ง. (2559). การวัดปริมาณรังสีเอกซ์จากการตรวจวินิจฉัย และแนวทางการใช้รังสีอย่างเหมาะสม (พิมพ์ครั้งที่ 1). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- V.P.Singh et al. (2015). Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using Monte Carlo simulation: Vacuum journal, 119, 284-288.