



## สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub>

ทิวาวลัย อธิชาติกุล

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

นพวรรณ ชนัญพานิช\*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วิทิต ผึ่งกัน

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชลดา สุวรรณบุรณ

ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9205-9561 อีเมล: noppavan.c@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.001

รับเมื่อ 24 พฤศจิกายน 2558 ตอรับเมื่อ 1 มีนาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 22 กันยายน 2559

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายผลิตวัสดุลดทอนรังสีเอกซ์ทดแทนโลหะตะกั่ว และต้องการวัสดุที่มีความยืดหยุ่น จึงเลือกใช้พอลิยูรีเทน (PU) อีลาสโตเมอร์เกิดความแข็งแรงเท่ากับ 60 เพราะขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถผสม BaSO<sub>4</sub> ซึ่งดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี ความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ ความหนาของแผ่นคอมพอสิตและพลังงานของรังสีเอกซ์จากการทดลองพบว่า ณ พลังงานของรังสีเอกซ์ 60 กิโลโวลต์ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวลของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub> ที่มี BaSO<sub>4</sub> 50 กรัมต่อ PU 100 กรัม (phr) มีค่าเท่ากับ 3.289 ต่อเซนติเมตร (cm<sup>-1</sup>) และ 2.401 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (cm<sup>2</sup>/g) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล สามารถนำไปแทนค่าในสมการเบียร์และแลมเบิร์ตเพื่อหาน้ำหนักวัสดุคอมพอสิตเพื่อเตรียมแผ่นคอมพอสิตที่สามารถลดทอนรังสีเอกซ์ตามต้องการได้

**คำสำคัญ:** คอมพอสิต, การลดทอนรังสีเอกซ์, การกำบังรังสีเอกซ์, สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์



## X-ray Attenuation Coefficient of PU/BaSO<sub>4</sub> Composite Sheet

Tiwawn Atichatkul

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Noppavan Chanunpanich\*

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Sciences, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand  
Integrated Nanoscience Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Vithit Pungkun

Office of Atoms for Peace, Ministry of Science and Technology, Bangkok, Thailand

Chonlada Suwanboon

Integrated Nanoscience Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08-9205-9561, E-mail: noppavan.c@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.001

Received 24 November 2015; Accepted 1 March 2016; Published online: 22 September 2016

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This work is aimed at fabricating an unleaded X-ray attenuation composite sheet. To obtain an elastic sheet, thermosetting polyurethane (PU) with a Shore hardness of 60 is composited with BaSO<sub>4</sub> (PU/BaSO<sub>4</sub>). Percentage of attenuation depends on the amount of BaSO<sub>4</sub>, thickness of sample and X-ray energy. It is found that at an X-ray energy of 60 kilovolts (kV), the PU/BaSO<sub>4</sub> with BaSO<sub>4</sub> of 50 g/100g PU (phr) sheet exhibits the linear attenuation coefficient and mass attenuation coefficient of 3.289 cm<sup>-1</sup> and 2.401 cm<sup>2</sup>/g, respectively. The latter coefficient is used to determine the weight of composite materials for preparing the sheet with the desired attenuation levels.

**Keywords:** PU/BaSO<sub>4</sub>, X-ray Shielding, X-ray Attenuation, Attenuation Coefficient, PU/BaSO<sub>4</sub>

## 1. บทนำ

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง ไม่มีมวลและประจุ จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง จากสมบัตินี้ทางการแพทย์จึงนำมาใช้รักษาโรคหรือวินิจฉัยโรค เช่น กระดูกหัก สิ่งแปลกปลอมที่ติดอยู่ในทางเดินหายใจ หรือทางเดินอาหาร [1], [2] เป็นต้น ทางอุตสาหกรรมนิยมใช้รังสีเอกซ์ในการวัดความหนาของวัสดุ ฯลฯ อย่างไรก็ตามหากไม่ระมัดระวัง รังสีเอกซ์อาจก่อให้เกิดโทษ [3] ต่อเซลล์เนื้อเยื่อ เช่น ทำให้เซลล์กลายเป็นเซลล์มะเร็ง โดยเฉพาะบริเวณที่ไม่ต้องการรับรังสีเอกซ์ ด้วยเหตุนี้การทำงานบริเวณห้องรังสีเอกซ์ จึงต้องสวมใส่อุปกรณ์กำบังรังสีเอกซ์เพื่อลดทอนพลังงานของรังสีเอกซ์จนไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพหรืออวัยวะของร่างกาย

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านวัสดุ วัสดุจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ไว้บางส่วน รังสีเอกซ์ที่เหลือจะส่งผ่านออกสู่ภายนอก (I) หากวัสดุดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้มาก จะเรียกว่า วัสดุลดทอนรังสีเอกซ์ (X-ray Attenuator or Absorber) ความสามารถลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุขึ้นอยู่กับความหนา (x) และสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ดังสมการที่ (1)

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

เมื่อ  $I$  คือปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาจากวัสดุ

$I_0$  คือปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านอากาศ

$\mu$  คือสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุ

$x$  คือความหนาของวัสดุ

ด้วยเหตุนี้ วัสดุที่ใช้ในห้องฉายรังสีเอกซ์ เช่น ฉนวนคอนกรีต กระฉกใส มักมีส่วนผสมของโลหะตะกั่ว (Pb) เพื่อลดทอนรังสีเอกซ์มิให้ออกหรือแพร่กระจายออกจากห้องรังสีเอกซ์ ตะกั่วสามารถลดทอนรังสีเอกซ์ได้ดีเนื่องจากมีเลขอะตอมสูงและความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ ตะกั่วมีราคาถูกและขึ้นรูปเป็นแผ่นง่าย เพื่อลดทอนรังสีเอกซ์ที่ใช้ป้องกันส่วนของร่างกายทำจากแผ่นตะกั่วเช่นเดียวกัน แต่หุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสัมผัสกับตะกั่วโดยตรง

แต่ด้วยตะกั่วเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสูงมากถึง 11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้วัสดุลดทอนรังสีเอกซ์นี้มีน้ำหนักมาก ประกอบกับตะกั่วมีความเป็นพิษค่อนข้างสูง องค์การนานาชาติด้านการป้องกันอันตรายจากรังสีเอกซ์ (International Commission on Radiological Protection, ICRP) จึงรณรงค์ให้ใช้วัสดุอื่นทดแทนตะกั่ว จึงมีงานวิจัยหลากหลายที่ผลิตวัสดุคอมพอสิตลดทอนรังสีเอกซ์โดยนำวัสดุพื้น (Matrix) ที่สนใจผสมกับสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ เช่น โลหะทังสเตน อนุภาคบิสฟีนอล A ออกไซด์ และอนุภาคแบเรียมซัลเฟตหรือแบเรียมออกไซด์ ซึ่งสารดูดกลืนรังสีเอกซ์เหล่านี้ มีอะตอมของโลหะทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์เป็นหลัก ความหนาแน่นของทังสเตนมีค่าสูงถึง 19.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนแบเรียมซัลเฟตซึ่งทางการแพทย์รู้จักในนาม “แบงแบโรท์” และบิสฟีนอล A ออกไซด์ มีความหนาแน่นเพียง 4.5 และ 8.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ในแผ่นคอมพอสิต โดยเฉพาะความต้องการคอมพอสิตที่มีน้ำหนักเบาขึ้น ตัวอย่างวัสดุคอมพอสิตลดทอนรังสีเอกซ์ที่มีประวัติวิจัยและพัฒนา ได้แก่ คอนกรีตคอมพอสิต [4]–[6] อะลูมิเนียมคอมโพสิต [7]–[8] กระฉกคอมโพสิต [9]–[10] และพอลิเมอร์คอมโพสิต [11]–[14] งานวิจัยที่ใช้วัสดุพื้นเป็นคอนกรีตและกระฉก จะเน้นไปที่การลดทอนรังสีเอกซ์พลังงานงานสูงหรือรังสีแกมมา (พลังงานของรังสีอยู่ในช่วงเมกะโวลต์ (MV)) จึงผลิตชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า 1 เซนติเมตร ส่วนที่พลังงานต่ำกว่าจะใช้พอลิเมอร์คอมพอสิตอีพอกซี (Epoxy) กับแบเรียมซัลเฟต [11] หรือทังสเตน [14] แต่พอลิเมอร์อีพอกซีเป็นพอลิเมอร์แข็ง เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ทำแผ่นลดทอนรังสีเอกซ์สำหรับส่วนของร่างกายซึ่งควรมีลักษณะยืดหยุ่น โค้งงอได้ตามสัดส่วนของร่างกาย

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิตลดทอนรังสีเอกซ์ชนิดอีลาสโตเมอร์ โดยใช้พอลิเมอร์พื้น (Polymer Matrix) เป็นพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) เกรดความแข็งชอร์ 60 (Shore 60) เพราะมีความแข็งแต่ยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่น

ได้ที่อุณหภูมิห้อง และใช้สารดูดซับรังสีเอกซ์เป็นแบบเรียบมัลติเฟตซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันรังสีเอกซ์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [5], [12]-[15] ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดทอนรังสีเอกซ์ได้แก่ปริมาณแบบเรียบมัลติเฟต ความหนาของแผ่นคอมพอสิตและพลังงานของรังสีเอกซ์ จะนำเสนอในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิตซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุ พลังงานรังสีเอกซ์ที่สนใจศึกษาคือ พลังงานช่วงการวินิจฉัยโรค (40-120 กิโลโวลต์)

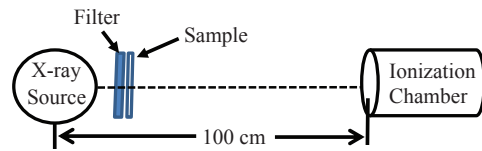
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 สารเคมี

พอลิยูรีเทน (PU) ชื่อทางการค้า Vytaflex60 จากบริษัท Batex International ประกอบด้วยของผสม 2 ส่วนคือ พรีพอลิเมอร์ (Vytaflex A) ซึ่งมีลักษณะเหนียวหนืดและตัวเชื่อมโยง (Hardener, Vytaflex B) แบบเรียบมัลติเฟต ( $BaSO_4$ ) จากบริษัท Thai Polychemicals

### 2.2 การเตรียมแผ่นพอลิยูรีเทน (PU) และแผ่นคอมพอสิต PU/ $BaSO_4$

กวน Vytaflex A ด้วยเครื่องกวนแบบแกนหมุน (Overhead Stirrer) ด้วยอัตราเร็ว 800 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม  $BaSO_4$  ตามปริมาณที่ต้องการ [20-50 กรัมต่อ 100 กรัม PU (phr)] และกวนให้อนุภาคของ  $BaSO_4$  กระจายตัวเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติม Vytaflex B กวนให้ของผสมเข้ากัน และนำส่วนผสมเทลงแม่พิมพ์ขนาด  $20 \times 20 \times 0.2$  เซนติเมตร และนำเข้าเครื่อง Vacuum เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากชิ้นงาน จากนั้นอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ  $60^\circ C$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลอกแผ่นคอมพอสิตออกจากแม่พิมพ์และตัดให้มีขนาด  $10 \times 10$  เซนติเมตร ในการศึกษาผลของความหนาต่อการลดทอนรังสีเอกซ์ จะเตรียมตัวอย่างชิ้นงานลักษณะเดียวกัน จำนวน 7 แผ่น วัดความหนาของแผ่นคอมพอสิตแผ่นละ 10 ค่าและนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ความหนาเฉลี่ยของแผ่นคอมพอสิตแต่ละแผ่น การทดสอบจะนำแผ่นคอมพอสิตมาซ้อนกัน ซึ่งความหนาได้



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต

จากผลบวกของค่าความหนาเฉลี่ยของแผ่นคอมพอสิต

### 2.3 การทดสอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต PU/ $BaSO_4$

การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิตทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Generators (Model: MGC41, YXLON) โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ให้แก่หลอดรังสีเอกซ์ (Source) พลังงาน 40-150 กิโลโวลต์ (แต่ละพลังงานจะมีแผ่นกรอง (Filter) เพื่อกรองพลังงานให้อยู่ในช่วงแคบ) กระแสไฟฟ้าที่เข้าหลอดรังสีเอกซ์ 2 มิลลิแอมแปร์ ชิ้นงานที่มีความหนาต่างๆ วางอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และหัววัดรังสีเอกซ์ (Ionization Chamber Detector) เป็นระยะทาง 10 และ 90 เซนติเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 1) อุณหภูมิ ความชื้นและเวลาการฉายรังสีเอกซ์จะผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรม MAX COM ได้ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านแผ่นคอมพอสิตในหน่วยเกรย์ต่อวินาที (Gy/s)

### 2.4 การหาความหนาแน่นของแผ่นคอมพอสิต PU/ $BaSO_4$

ตัดแผ่นคอมพอสิตเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานในอากาศและในน้ำและคำนวณหาความหนาแน่นของแผ่นคอมพอสิตตามสมการที่ (2)

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_w} \times \rho_w \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นของแผ่นคอมพอสิต (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

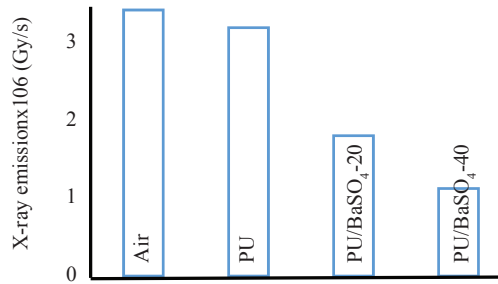
$W_a$  คือน้ำหนักของแผ่นคอมพอสิตที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

$W_w$  คือน้ำหนักของแผ่นคอมพอสิตที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

$\rho_w$  คือความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดสอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นพอลิยูรีเทน (PU) ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ด้วยพลังงานของรังสีเอกซ์เท่ากับ 60 กิโลโวลต์ ดังรูปที่ 2 พบว่ารังสีเอกซ์ที่ผ่านแผ่น PU มีค่าใกล้เคียงกับรังสีเอกซ์ที่ผ่านอากาศ แสดงให้เห็นว่า ความสามารถลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นพอลิยูรีเทนมีค่าน้อยมาก อีกนัยหนึ่งคืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบใน PU ได้แก่ C, O, H เป็นธาตุเบา (เลขอะตอมเท่ากับ 12, 16 และ 1 ตามลำดับ) จึงลดทอนรังสีเอกซ์ได้น้อย แต่เมื่อนำ PU ไปคอมพอสิตกับสารดูดกลืนรังสีเอกซ์  $BaSO_4$  พบว่าแผ่นคอมพอสิต PU/ $BaSO_4$  ดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดีและเมื่อผสม  $BaSO_4$  มากขึ้นทำให้การดูดกลืนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นั่นหมายถึงสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิตขึ้นกับความหนาแน่นของสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ ซึ่งหมายถึง ขึ้นกับปริมาณของสารดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอมพอสิตตามสมการของเบียร์และแลมเบิร์ตนั่นเอง ในทางปฏิบัติ นิยมหาความสามารถลดทอนรังสีเอกซ์ในรูปของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ ซึ่งมี 2 แบบคือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นและสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล ด้วยมีเทคโนโลยีใหม่ๆ เกิดขึ้น ทำให้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์รวมอยู่ในซอฟต์แวร์พื้นฐานและสามารถใช้งานได้ดีในงานวิจัยนี้ จึงได้เปรียบเทียบการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น 3 วิธี โดยใช้เทคนิคเทรนด์ไลน์ (Trend Line) ในซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์ (Microsoft Excel) ซึ่งสามารถสร้างกราฟและปรับแก้ฟังก์ชันจนได้เส้นกราฟที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการทดลองได้ดังนี้



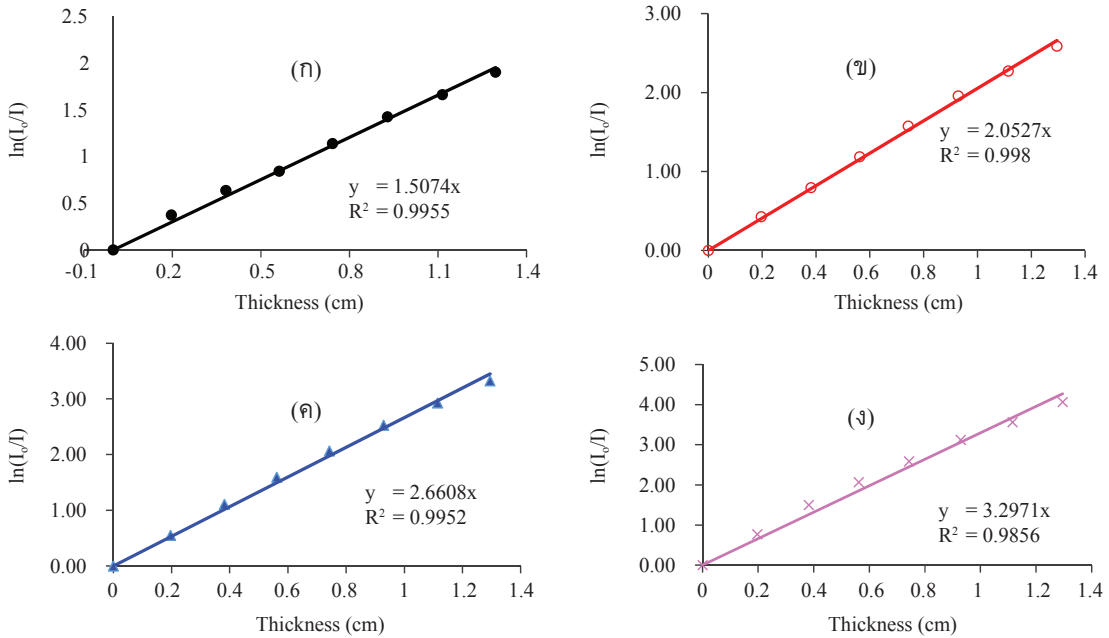
**รูปที่ 2** ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านอากาศ และแผ่น PU และแผ่นคอมพอสิต PU/ $BaSO_4$  ที่ความเข้มข้นของ  $BaSO_4$  20 กรัมต่อ 100 กรัม PU (PU/ $BaSO_4$ -20) และที่ 40 กรัมต่อ 100 กรัม PU (PU/ $BaSO_4$ -40) ที่ความหนาของแผ่นตัวอย่าง 2 มิลลิเมตร ณ พลังงานรังสีเอกซ์ 60 กิโลโวลต์

#### 3.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น ( $\mu$ ) จากสมการเส้นตรง

สมการเอกซ์โพเนน (Exponent) ของเบียร์และแลมเบิร์ต [สมการที่ (1)] ในทางคณิตศาสตร์สามารถเปลี่ยนไปเป็นสมการเส้นตรงได้ โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของลอการิทึม (Logarithm) ดังสมการที่ (3) ทำให้ได้รูปแบบสมการเส้นตรง ( $y = mx$ ) ดังนั้น การจตุกราฟระหว่าง  $\ln I_0/I$  กับความหนา ( $x$ ) ของแผ่นคอมพอสิต จะได้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากความชันของกราฟดังรูปที่ 3

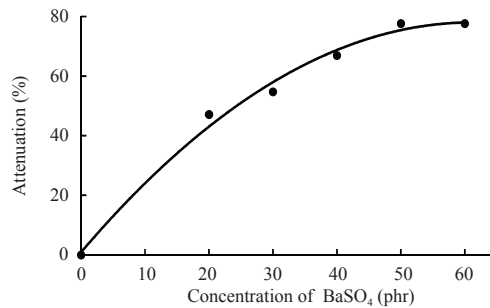
$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu x \quad (3)$$

จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อปริมาณ  $BaSO_4$  ในแผ่นคอมพอสิตมากขึ้น (จากความเข้มข้น 20 phr เป็น 50 phr) สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $0.1507 \text{ cm}^{-1}$  เป็น  $3.297 \text{ cm}^{-1}$  ทั้งนี้ในแผ่นคอมพอสิตมีปริมาณแบเรียมซึ่งเป็นอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดีเพิ่มขึ้นนั่นเอง เมื่อพิจารณาสมการเส้นตรงในทศความเข้มข้นของสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ พบว่าผลการทดลองและสมการเส้นตรงจากฟังก์ชันมีค่าใกล้เคียงกันและข้อมูลส่วนใหญ่อยู่บนเส้น



**รูปที่ 3** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I_0/I$  กับความหนาของแผ่นคอมโพสิต PU/BaSO<sub>4</sub> ที่พลังงานรังสีเอกซ์เท่ากับ 60 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> (ก) 20 กรัมต่อ 100 กรัม PU (20 phr), (ข) 30 phr, (ค) 40 phr, (ง) 50 phr

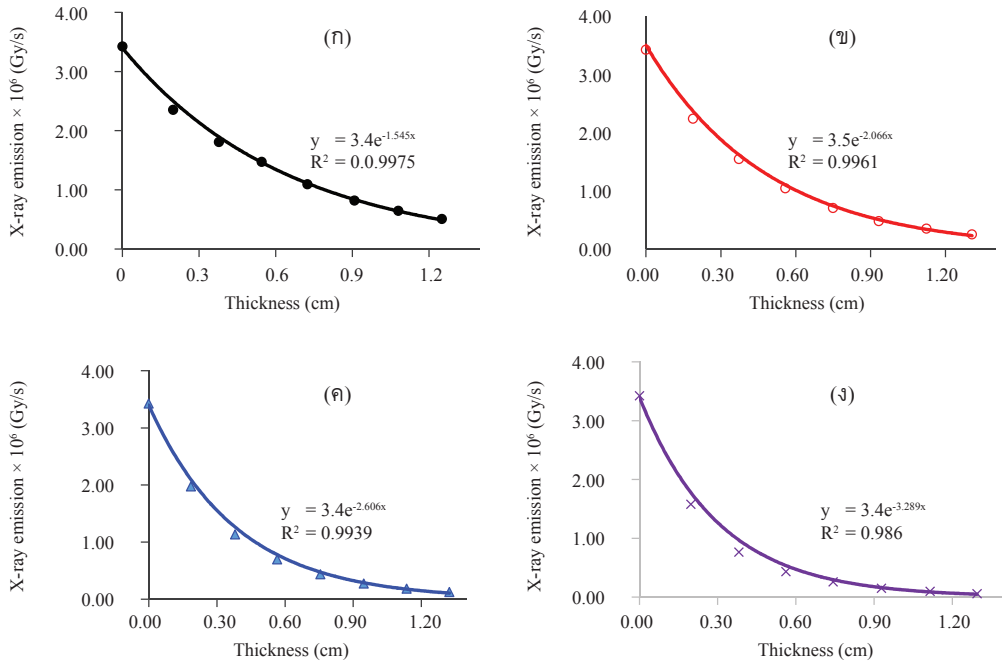
กราฟ ( $R^2=0.99$ ) ยกเว้นแผ่นคอมโพสิตที่ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> เท่ากับ 50 phr (PU/BaSO<sub>4</sub>-50) ที่เส้นกราฟจากฟังก์ชันกับค่าจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนกัน เหตุผลนี้เห็นได้ชัดเมื่อจุดกราฟระหว่างร้อยละการลดทอนรังสีเอกซ์ ( $(I_0-I) \cdot 100/I_0$ ) กับความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> ดังรูปที่ 4 พบว่า ร้อยละการลดทอนรังสีเอกซ์ มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยที่ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> ในแผ่นคอมโพสิตมากกว่า 40 phr ข้อสังเกตนี้ สามารถอธิบายได้ว่า รังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับวัสดุได้ 2 แบบหลักคือ โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Interaction) และการกระเจิงแบบคอมพตัน (Compton Scattering) ค่าที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้เป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเท่านั้น ดังนั้น เมื่อปริมาณ BaSO<sub>4</sub> ในแผ่นคอมโพสิตมากขึ้น ทำให้รังสีเอกซ์เกิดการกระเจิงมากขึ้น การตรวจวัดเฉพาะอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกจึงมีค่าคงที่ (Level Off)



**รูปที่ 4** ร้อยละการลดทอนรังสีเอกซ์ ที่พลังงานรังสีเอกซ์เท่ากับ 60 กิโลโวลต์

### 3.2 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น ( $\mu$ ) จากสมการ Exponent

จากการจุดกราฟรังสีเอกซ์ผ่านตัวอย่างที่มีความหนาต่าง ๆ ในรูปที่ 5 เห็นได้ชัดว่า ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านแผ่นคอมโพสิต เป็น Exponent ตามทฤษฎีของเบียร์ และแลมเบิร์ต งานวิจัยหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยมักใช้



**รูปที่ 5** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับความหนาที่พลังงาน 60 กิโลโวลต์ ของแผ่นคอมโพสิต PU/BaSO<sub>4</sub> ที่ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> เท่ากับ (ก) 20 phr, (ข) 30 phr, (ค) 40 phr, (ง) 50 phr

ซอฟต์แวร์เฉพาะซึ่งมีราคาแพง เพื่อหาสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลอง มิฉะนั้นต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์เพื่อเขียนโปรแกรมและสร้างสมการให้สอดคล้องกับผลการทดลอง ทำให้ผลงานวิจัยแต่ละผลงานมีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบ การพัฒนาซอฟต์แวร์ด้านคณิตศาสตร์ในไมโครซอฟท์ ทำให้ใช้เทคนิคเทรนด์ไลน์ (Trend Line) สร้างเส้นกราฟ Exponent ที่สอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี และพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เทคนิคสมการเส้นตรงในทุกความเข้มข้น และเป็นเทคนิคที่หาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ได้ง่ายและเร็วกว่าการใช้สมการเส้นตรง

### 3.3 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น ( $\mu$ ) จากความหนาครึ่งค่า (HVL)

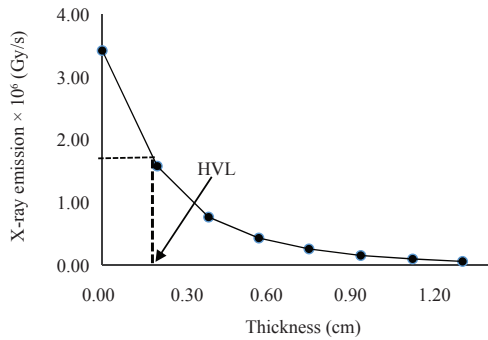
ความหนาครึ่งค่า (Half-Value Layer, HVL) หมายถึงความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง

กึ่งหนึ่ง (50%) เป็นค่าที่นักวิชาการรังสีนิยมใช้ทำนายหรือหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น จากสมการของเบียร์และแลมเบิร์ต จะได้ว่าสภาวะที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านชั้นงานเหลือเพียง 50% เป็นไปตามสมการที่ (4) และได้สมการการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น ตามสมการที่ (5)

$$\frac{I_o}{2} = I_o e^{-\mu(HVL)} \quad (4)$$

$$\text{หรือ } \mu = \frac{\ln 2}{HVL} \quad (5)$$

จากกราฟการทดสอบการผ่านรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 60 กิโลโวลต์ ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> 50 phr ดังรูปที่ 6 พบว่าค่า HVL จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.145 เซนติเมตร และแทนค่าในสมการที่ (5) ได้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นเท่ากับ 5.212 cm<sup>-1</sup>



**รูปที่ 6** การหา HVL จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับความหนาที่พลังงานรังสีเอกซ์ 60 กิโลโวลต์ของแผ่นคอมพอสิตเมื่อเติม BaSO<sub>4</sub> 50 phr

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นทั้งสามวิธี ดังตารางที่ 1 พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากสมการเส้นตรง มีค่าใกล้เคียงกับที่หาจากเทคนิค Exponent แต่สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากเทคนิค HVL จะมีค่าต่างจาก 2 เทคนิคแรกค่อนข้างมาก และความแตกต่างนี้มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อสารดูดกลืนรังสีเอกซ์มีปริมาณมากขึ้น สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ที่หาด้วยเทคนิค HVL มีความคลาดเคลื่อนสูง เกิดจากเหตุผล 2 ประการคือ 1) ช่วง HVL ในรูปที่ 6 เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีเอกซ์เชิงเส้นและยิ่งปริมาณสารดูดกลืนรังสีเอกซ์มาก ความชันของกราฟยิ่งมากขึ้น จึงทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เกิดความคลาดเคลื่อนสูง 2) ค่า HVL ที่ได้เป็นค่าที่อยู่ระหว่างความหนาจากการทดลองเพียง 2 จุด

เท่านั้น ดังนั้นในทางปฏิบัติ หากต้องการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นด้วยเทคนิคนี้ นิยมเตรียมวัสดุที่มีความหนาใกล้เคียงค่า HVL จะได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงค่าจริง

**ตารางที่ 1** สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นที่พลังงาน 60 กิโลโวลต์

PU/BaSO <sub>4</sub> ที่ความเข้มข้น (phr)	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ (cm <sup>-1</sup> )		
	จากสมการเส้นตรง	จากสมการ Exponent	จากสมการ HVL
20	1.507	1.545	1.605
30	2.053	2.066	2.153
40	2.661	2.606	2.925
50	3.297	3.289	5.212

### 3.4 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล (μ<sub>m</sub>)

จากการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น ขึ้นกับ 1) ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> มากขึ้น จะมีอะตอมของแบเรียมซึ่งดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดีมากขึ้น 2) ความหนาของแผ่นคอมพอสิต เพราะสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นมีหน่วยเป็นต่อหน่วยความหนา เมื่อความหนามากขึ้น สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น จะมีค่ามากขึ้นด้วย และ 3) ขึ้นกับพลังงานของรังสีเอกซ์ด้วย เนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์หมายถึงอำนาจทะลุทะลวงต่อวัสดุ เมื่อพลังงานสูง แสดงว่าอำนาจทะลุทะลวงสูง ผลทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นมีค่าน้อยลง สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub> ที่พลังงานและปริมาณ BaSO<sub>4</sub> ค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub> ที่พลังงานและปริมาณ BaSO<sub>4</sub> ค่าต่างๆ

BaSO <sub>4</sub> (phr)	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น (cm <sup>-1</sup> )					สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล (cm <sup>2</sup> /g)				
	พลังงาน (กิโลโวลต์)					พลังงาน (กิโลโวลต์)				
	60	80	100	120	150	60	80	100	120	150
20	1.545	0.844	0.510	0.358	0.289	1.299	0.709	0.429	0.301	0.243
30	2.066	1.118	0.645	0.446	0.342	1.658	0.897	0.518	0.358	0.274
40	2.606	1.435	0.822	0.555	0.424	1.986	1.094	0.627	0.423	0.323
50	3.289	1.661	0.941	0.623	0.459	2.401	1.212	0.687	0.455	0.335



เพื่อให้ตัวแปรในการผลิตแผ่นลดทอนรังสีเอกซ์มีจำนวนน้อยลง จึงนิยมนำสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นมาหารด้วยค่าเฉพาะที่บ่งบอกปริมาณของสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ ซึ่งก็คือความหนาแน่นนั่นเอง [สมการที่ (6)] ทำให้ได้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ชนิดใหม่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อกรัม ส่วนค่า  $x$  ในสมการเบียร์และแลมเบิร์ต จึงมีหน่วยเป็นกรัมต่อพื้นที่ ซึ่งหมายถึง น้ำหนักวัสดุคอมพอสิตที่ใช้เตรียมแผ่นคอมพอสิตต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho} \quad (6)$$

#### 4. สรุป

แผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub> เตรียมได้ง่ายจากเทอร์โมเซต (Thermosetting) พอลิยูรีเทน ซึ่งงานสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง จึงถือว่าประหยัดพลังงานในการขึ้นรูป นอกจากนี้ ซึ่งงานสามารถบดงอได้ จึงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ลดทอนรังสีเอกซ์ตามส่วนต่างๆ ของร่างกายได้จากการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแผ่นคอมพอสิตโดยใช้ซอฟต์แวร์ลักษณะกราฟเส้นตรงและกราฟ Exponent ในไมโครซอฟท์ช่วยพบว่า ทั้งสองเทคนิคได้สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นใกล้เคียงกันมาก แต่การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นด้วยเทคนิคการหาค่า HVL ได้ค่าที่ห่างจากสองเทคนิคนั้น เพราะความหนาของแผ่นคอมพอสิตแต่ละชั้นมีค่าห่างกันมากเกินไป ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง จึงสรุปว่า รังสีเอกซ์ที่พลังงาน 60 กิโลโวลต์ ความเข้มข้นของ BaSO<sub>4</sub> ในคอมพอสิต 50 กรัมใน 100 กรัม PU (phr) แผ่นคอมพอสิต PU/BaSO<sub>4</sub> มีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นเท่ากับ 3.289 ต่อเซนติเมตร และสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวลมีค่าเท่ากับ 2.401 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวลมีประโยชน์ในการเตรียมชิ้นงาน โดยสามารถคำนวณปริมาณวัสดุคอมพอสิตในหน่วยกรัม ก็สามารถเตรียมแผ่นคอมพอสิต

ที่มีร้อยละการลดทอนรังสีเอกซ์ตามต้องการได้

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนทุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] P. E. Hill, "Radiation protection in medical imagine," *Journal of Radiography*, vol. 12, pp.153–160, 2006.
- [2] P. Poosuwan, "X-ray for diagnostic and detection," *Nuclear Society of Thailand, Office of Atoms for Peace*, pp. 3–13, 2006 (in Thai).
- [3] J. Thongpasuk and S. Jongkum, "Harmful from radiation," *Nuclear Society of Thailand, Office of Atoms for Peace*, pp. 4–14, 2001 (in Thai).
- [4] R. P. Rossi, R. Ritenour, and E. Chistodoulou, "Broad beam transmission properties of some common shielding materials for use in diagnostic radiology," *Health Phys*, vol. 61, pp. 606–608, 1991.
- [5] I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, and B. Mavi, "The shielding of  $\gamma$ -rays by concretes produced with barite," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 46, pp. 1–11, 2005.
- [6] I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, and C. basyigit, "Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 52, pp. 620–623, 2010.
- [7] G. H. Fan, L. Geng, G. S. Wang, and Z. Z. Zheng, "A novel radiation protection material: BaPbO<sub>3</sub>/Al composite," *Materials and Design*, vol. 30, pp. 862–866, 2009.



- [8] P. Singh and N. M. Badiger, "Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 64, pp. 301–310, 2014.
- [9] J. Kaewkhao, A. Pokaipisit, and P. Limsuwan "Study on borate glass containing with  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  and BaO for gamma-ray shielding mat comparison with PbO," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 399, pp. 38–40, 2010.
- [10] K. Kirdsiri, J. Kaewshao, N. Chanthima, and P. Limsuwan, "Comparative study of silicate glasses containing  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , PbO and BaO: Radiation shielding and optical properties," *Journal of Nuclear Energy*, vol. 38, pp. 1438–1441, 2011.
- [11] J. Unsworth, B. A. Lunn, and P. C. Innis, "X-ray attenuation properties of electrically insulating barytes/epoxy composites," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 12, pp. 132–134, 1993.
- [12] S. C. Kim, K. R. Dong, and W. K. Chung, "Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 47, pp. 1–5, 2012.
- [13] N. Z. Noor Azman, S. A. Siddiqui, R. Hart, and I. M. Low, "Effect of particle size, filler loadings and x-ray tube voltage on the transmitted x-ray transmission in tungsten oxide-epoxy composites," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 71, pp. 62–67, 2013.
- [14] N. Z. Noor Azman, S. A. Siddiqui, M. Ionescu, and I. M. Low, "Synthesis and characterization of ion-implanted epoxy composites for X-ray shielding," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 287, pp. 120–123, 2012.
- [15] I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, and C. Basyigit, "Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 37, pp. 910–914, 2010.