

ประสิทธิภาพของ $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$
 ซิลทิลเลเตอร์ ต่อการกำบังรังสีเอกซ์ โปรตอน และแอลฟา

The Effective of $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 and $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$
 Scintillators for X-Ray Proton and Alpha Particles Shielding

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1,2*}, พันธุ์ศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร³, ภูริณัฐ ประจักษ์กะตา³, เมษิณี ปานสวย³,
 เรืองจิรา เกตุแก้ว³, สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์⁴ และจุมพล ขอบขำ⁵

Kittisak Sriwongsa^{1,2*}, Punsak Glumglomchit³, Purinut Pajakkata³, Maysinee Pansuay³,
 Ruenggira Ketkeaw³, Sunantasak Ravangvong⁴ and Chumphon Khobkham⁵

¹คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

¹Faculty of Education, Silpakorn University, Muang District, Nakhon Pathom, 73000

²โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

²The demonstration school of Silpakorn University, Muang District, Nakhon Pathom, 73000

³โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

³Huahin Vitthayalai School, Hua-Hin, Prachuapkhirikhan, 77110

⁴สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เพชรบุรี 76000

⁴Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology

Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, 76000

⁵สำนักวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยธนบุรี กรุงเทพฯ 10160

⁵Faculty of Engineering, Thonburi University, Bangkok, 10160

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (รังสีเอกซ์) และมีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา) ของซิลทิลเลเตอร์ ได้แก่ $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และเลขอะตอมยังผล ที่ช่วงพลังงาน 8.91×10^{-3} – 5.04×10^{-1} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้แก่ อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา จำนวนประมาณ 10^4 ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกซิลทิลเลเตอร์ทั้งสี่ที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ การกระจายตัวของไอออนและค่าไอออนกระเจิงกลับที่พลังงานจลน์ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และอำนาจดักยึดหยุดยั้งมวลที่ช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้พบว่าของผลึกซิลทิลเลเตอร์ $Cs_2AgBiBr_6$ มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและเลขอะตอมยังผลสูงสูดสูดนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนี้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่ดีที่สุด นอกจากนี้ผลึกซิลทิลเลเตอร์ $Cs_2AgBiBr_6$ ยังมีการดูดกลืนอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟาได้

* Corresponding author : sriwongsa_k@silpakorn.edu

ดีที่สุดทำให้ผลึกซิลทิลเลเตอร์ $Cs_2AgBiBr_6$ มีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้าดีที่สุด

คำสำคัญ: ซิลทิลเลเตอร์ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล รังสีไอออนไนซ์ที่มีประจุ

Abstract

This research has been studied uncharged (X-ray) and charged (proton and alpha particles) ionizing radiation shielding for $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 and $(C_{38}H_{34}P_2)MnBr_4$ scintillators. The parameters for uncharged ionizing radiation such as mass attenuation coefficient and effective atomic number were simulated at energy 8.91×10^{-3} – 5.04×10^{-1} MeV. While parameters for charged ionizing radiation: proton and alpha among number 10^4 ions which passed through all scintillators as $1 \mu m$ of thin, have been analyzed parameters such as ion distribution and back-scattered ions at kinetic energy 10 keV and mass stopping powers at kinetic energy 0.01–10 MeV. The results found that $Cs_2AgBiBr_6$ scintillator had the highest values of the mass attenuation coefficient and effective atomic number. These events indicated that $Cs_2AgBiBr_6$ scintillator was excellent radiation shielding. In addition, $Cs_2AgBiBr_6$ scintillator was the best proton and alpha particles absorption. These results indicated that $Cs_2AgBiBr_6$ scintillator was the most effective uncharged and charged ionizing radiation shielding.

Keywords: Scintillator, Mass attenuation coefficient, Charged ionizing radiation

1. บทนำ

ซิลทิลเลเตอร์ (scintillator) คือวัสดุที่มีความสามารถในการแปลงรังสีไอออนไนซ์เป็นโฟตอนในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นซึ่งได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถใช้เป็นเครื่องตรวจจับรังสีได้ การตรวจสอบการสัมผัสรังสี การตรวจสอบความปลอดภัยในพื้นที่และการสำรวจและการสร้างภาพถ่ายทางการแพทย์ (Zhuravleva, Friedrich & Melcher, 2012; Weber, 2002; Lecoq, 2016; Kramer, et al., 2006) เมื่อไม่นานมานี้มีการแสดงให้เห็นว่าผลึกซิลทิลเลเตอร์ $CsPbBr_3$ และ $MAPbBr_3$ ถูกนำมาใช้เกี่ยวกับถ่ายภาพเอกซเรย์โดยตรง เนื่องจากการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ดี และมีประสิทธิภาพในการการแปลงพาหะประจุ (Kim, et al., 2017; Yakunin, et al., 2015; Wei, et al., 2016; Wei, et al., 2017; Shrestha, 2017; Wei & Huang, 2019; Birowosuto, et al., 2016; Stoumpos, et al., 2013; Heiss & Brabec, 2016; Liu, et al., 2019; Pan, et al., 2019) ซิลทิลเลเตอร์รังสีเอกซ์ได้มีการถูกพัฒนาขึ้นมาโดยใช้โลหะเฮไลต์ผลึกนาโนเพชรอโรฟสไกต์ที่มีการเปล่งแสงที่สูง (Chen, et al., 2018; Heo, et al., 2018; Wang, et al., 2019; Mykhaylyk,

Kraus & Saliba, 2019; Cao, et al., 2019) อย่างไรก็ตามความเป็นพิษของตะกั่วในเฮไลต์เพอรอฟสไกต์ก็เป็นปัญหาหลักต่อความปลอดภัยของผู้คนที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับปัญหานี้ได้มีการพัฒนาโลหะเฮไลต์ที่ปราศจากตะกั่วเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทดแทนสำหรับเครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์ (Zhou, et al., 2019; Zhou, et al., 2018; Zhou, et al., 2017; Zhou, et al., 2018; Pan, et al., 2017; Morad, et al., 2019; Yang, et al., 2019) เช่น เครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์ที่มีความละเอียดสูงโดยใช้ผลึกเดี่ยว $Cs_2AgBiBr_6$ และ Rb_2CuX_3 ($X = Cl$ และ Br) (Pan, et al., 2017; Morad, et al., 2019; Yang, et al., 2019; Zhao, et al., 2020) นอกจากนี้ผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง คือ $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$ และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ผลึกนี้ยังมีต้นทุนที่ต่ำ และมีขั้นตอนในการปลูกผลึกที่ไม่ซับซ้อน ให้ผลผลิตแสงที่สูง ซึ่งทำให้ได้ภาพรังสีเอกซ์ที่มีความละเอียดสูง (Xu, et al., 2020)

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เช่น รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ผู้คนสามารถสัมผัสกับรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ จากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งพบว่ามีการใช้งานในอุตสาหกรรม ศูนย์วิจัยทางการแพทย์ สถานประกอบการวิจัยนิวเคลียร์ และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อป้องกันบุคลากร และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ละเอียดอ่อนจากรังสีไอออนดังกล่าวจำเป็นต้องมีการป้องกันการป้องกันรังสี คือ แนวปฏิบัติในการปกป้องผู้คนและสิ่งแวดล้อมจากผลกระทบที่เป็นอันตรายของรังสีไอออน การได้รับรังสีเป็นหนึ่งในข้อกังวลหลักในการวินิจฉัยด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพที่สำคัญในกลุ่มผู้ใช้รังสีเหล่านี้ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งวัสดุป้องกันหลายประเภทในที่ทำงานสถานที่ที่ใช้แหล่งกัมมันตภาพรังสีและเอ็กซ์เรย์เพื่อให้สถานที่ทำงานเป็นเขตปลอดภัยสำหรับมนุษย์ (Thomas & Symonds, 2016) แต่เมื่อนำวัสดุที่ใช้งานร่วมกับกลุ่มรังสีไอออนจริง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติในการกำบังรังสีของวัสดุนั้นให้ครบ ซึ่งรังสีไอออนแบ่งออกได้เป็น รังสีไอออนชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้นผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์ ได้แก่ $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$ จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาศึกษาคุณสมบัติด้านการกำบังรังสีเอกซ์ (รังสีไอออนชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า) และการกำบังอนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา (รังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้า) เนื่องจาก โปรตอน และแอลฟาเป็นอนุภาคที่เข้าไปสร้างความเสียหายระดับอะตอมของผลึกทั้งสิ้นได้

การวิจัยครั้งนี้พารามิเตอร์ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์ ได้แก่ $Cs_2AgBiBr_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(C_{38}H_{34}P_2) MnBr_4$ ที่นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์กำบังรังสีต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และเลขอะตอมยังผล ที่ช่วงพลังงาน 8.91×10^{-3} – 5.04×10^{-1} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยช่วงพลังงานนี้เป็นช่วงพลังงานจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ 29–Cu, 37–Rb, 42–Mo, 47–Ag, 56–Ba และ 65–Tb คำนวณโดยซอฟต์แวร์ Phy-x/PSD กรณีโปรแกรม SRIM ถูกนำมาจำลองสถานการณ์ที่อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา จำนวนประมาณ 10^4 ไอออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกซิลทิลเลเตอร์ทั้งสิ้นที่ความหนา 1 ไมโครเมตร พารามิเตอร์ที่จะนำมาวิเคราะห์ ได้แก่ การกระจายตัวของไอออน และอำนาจค้ำยเหตุยังมวล ที่ช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์
2. เพื่อหาคุณสมบัติในการกำบังรังสีเอกซ์ อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ ด้วยฟรีโปรแกรม WinXCom และ SRIM เวอร์ชัน 2013

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การกำบังรังสีไอออนในชั้นชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

การศึกษาอันตรกิริยาโฟตอนของของผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์ ได้แก่ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ ในช่วงพลังงาน 8.91×10^{-3} – 5.04×10^{-1} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งอยู่ในช่วงพลังงานของแหล่งกำเนิดดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยโปรแกรม WinXCom ซึ่งเป็นฟรีโปรแกรมและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient: μ_m) ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม ซึ่งเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์สมบัติการกำบังรังสีซึ่งถ้าพารามิเตอร์นี้มีค่าสูงนั้นแสดงถึงการมีสมบัติการกำบังรังสีที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกฎการผสม (mixture rule) ตามสมการ (1) (Kirdsiri, Kaewkhao, & Limsuwan, 2012; Limkitjaroenporna, et al., 2012)

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \quad (1)$$

เมื่อ w_i คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุหรือสารประกอบ และ $(\mu_m)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิด

ค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number: Z_{eff}) คือ ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมในสารที่เป็นสารประกอบหรือของผสม และนิยามได้จากสมการ (2) (Intom, et al., 2020; Issa & Mostafa, 2017; Kaur, Singh & Singh, 2018)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (2)$$

โดยที่ $\sigma_{t,a}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออะตอมซึ่งมีสมการ (3)

$$\sigma_{t,a} = \frac{\mu_m}{N_A \sum_i (w_i / A_i)} \quad (3)$$

และ $\sigma_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีสมการ (4)

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (4)$$

เมื่อ N_A คือ เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} อนุภาคต่อโมล

A_i คือ เลขมวลของธาตุแต่ละชนิดในสาร

Z_i คือ เลขอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสาร

f_i คือ อัตราส่วนของจำนวนอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสารต่อมวล 1 กรัม กับจำนวนอะตอมทั้งหมดของสารต่อมวล 1 กรัม

การกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า

ในการวิจัยคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า ในครั้งนี้จะใช้โปรแกรม SRIM เวอร์ชัน 2013 ซึ่งเป็นฟรีโปรแกรมที่ใช้มอนติคาร์โลเป็นฐาน และมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีอิทธิพลสูงมากเพื่อใช้ในการวัดผลของรังสี จำนวนการสูญเสียพลังงานและอัตราความเสียหายของอนุภาคจะถูกจำลองขึ้นมาด้วยโปรแกรมนี้ ผลของรังสีที่กระทำต่อวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของรังสี และจำนวนของพลังงาน ซึ่งสามารถจำลองได้จากเอกสารอ้างอิง (Dhal, et al., 2020; Agar, et al., 2019)

4. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างผลึกซิลทิลเลเตอร์ $Cs_2AgBiBr_6$ (Ex1), Rb_2CuCl_3 (Ex2), Rb_2CuBr_3 (Ex3) และ $(C_{38}H_{34}P_2)MnBr_4$ (Ex4) จะนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุและมีประจุไฟฟ้า ตามทฤษฎีจากการจำลองด้วยโปรแกรม WinXCom และ SRIM ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และเลขอะตอมยังผลของผลึกซิลทิลเลเตอร์ $Cs_2AgBiBr_6$ (Ex1), Rb_2CuCl_3 (Ex2), Rb_2CuBr_3 (Ex3) และ $(C_{38}H_{34}P_2)MnBr_4$ (Ex4) ที่ช่วงพลังงาน $8.91 \times 10^{-3} - 5.04 \times 10^{-1}$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

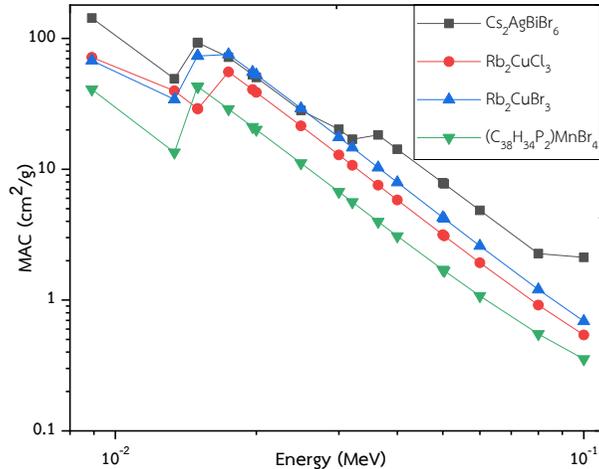
Energy (MeV)	Source	μ_m (cm ² /g)				Z_{eff} (electrons/atom)			
		Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4
8.91×10^{-3}	29-Cu	143.23	71.63	67.67	40.81	52.05	25.78	35.24	24.17
1.34×10^{-2}	37-Rb	49.17	39.75	34.22	13.45	52.52	27.18	32.79	23.95
1.50×10^{-2}	37-Rb	93.13	29.11	73.73	42.99	44.51	27.25	34.22	31.54
1.74×10^{-2}	42-Mo	71.88	55.46	75.52	28.86	47.37	32.98	35.14	31.38
1.96×10^{-2}	42-Mo	52.82	40.67	55.37	21.10	47.47	33.07	35.15	31.14
2.49×10^{-2}	47-Ag	28.13	21.45	29.25	11.14	47.66	33.20	35.17	30.25
3.21×10^{-2}	56-Ba	16.93	10.71	14.63	5.61	47.83	33.26	35.18	28.47
3.64×10^{-2}	56-Ba	18.28	7.56	10.30	3.97	50.16	33.25	35.19	27.14
5.04×10^{-2}	65-Tb	7.73	3.09	4.19	1.67	50.48	33.09	35.19	22.35

พารามิเตอร์ที่มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient: μ_m) ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ ช่วงพลังงาน $8.91 \times 10^{-3} - 5.04 \times 10^{-1}$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่า ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมาจากการเกิดอันตรกิริยาสามารถแบ่งออกได้ตามช่วงของพลังงานคือ ช่วงพลังงานน้อยกว่า 0.08 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะแปรผันกับพลังงานตามความสัมพันธ์ $\mu_m \propto E^{-3.5}$ และในช่วงพลังงาน 0.08–0.10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) เป็นอันตรกิริยาหลัก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะแปรผันกับพลังงานตามความสัมพันธ์ $\mu_m \propto E^{-1}$ และจากภาพกราฟมีความไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดจากในช่วงพลังงานนี้คือในช่วงขอบเขตการดูดกลืนในช่วง K-, L- และ M- ของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 และจากภาพจะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงสุดนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนี้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่ดีที่สุด (Dong, et al., 2017)

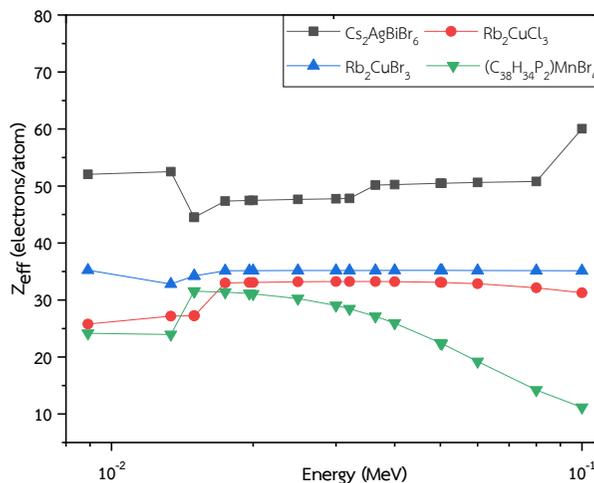
ตารางที่ 2 ค่าขอบเขตการดูดกลืนพลังงานของธาตุ ๆ (กิโลอิเล็กตรอนโวลต์)

ชั้นการดูดกลืน	ธาตุ								
	Cs	Ag	Bi	Br	Rb	Cu	Cl	P	Mn
K	35.98	25.51	90.53	1.35	15.20	8.98	2.822	2.15	6.54
L1	5.71	3.81	16.39	1.78	2.07	1.10			
L2	5.36	3.52	15.71	1.60	1.86				
L3	5.01	3.35	13.42	1.55	1.80				
M1	1.22		3.40						
M2	1.07		3.70						
M3			3.18						
M4			2.69						
M5			2.58						

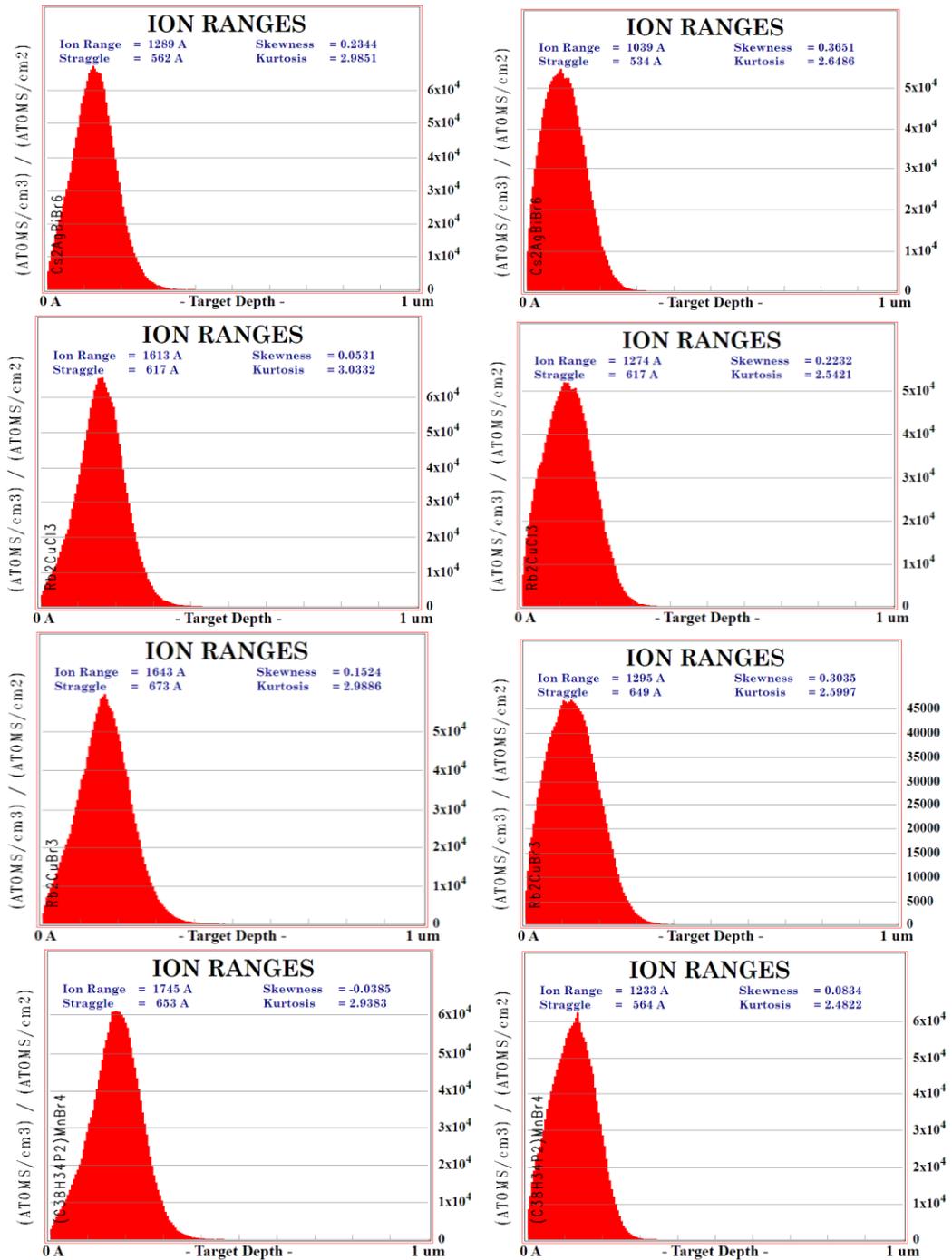


ภาพที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของผลึกซิลทิลเลเตอร์ในช่วงพลังงาน $8.91 \times 10^{-3} - 5.04 \times 10^{-1}$ เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์

เลขอะตอมยังผล (effective atomic number: Z_{eff}) ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ในช่วงพลังงาน $8.91 \times 10^{-3} - 5.04 \times 10^{-1}$ เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า จากภาพแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่าง $Cs_2AgBiBr_6$ มีค่าเลขอะตอมยังผลสูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง ตัวอย่าง $Cs_2AgBiBr_6$ นี้มีคุณสมบัติในการเกิดอันตรกิริยาได้ดีที่สุดส่งผลให้ตัวอย่างนี้กำบังรังสีได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของผลึกซิลทิลเลเตอร์ (Dong, et al., 2017)

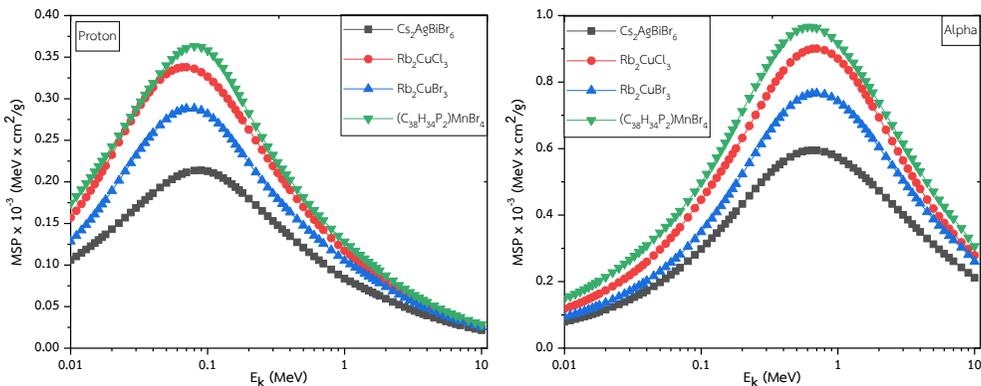


ภาพที่ 2 เลขอะตอมยังผลของผลึกซิลทิลเลเตอร์ในช่วงพลังงาน $8.91 \times 10^{-3} - 5.04 \times 10^{-1}$ เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 3 การกระจายตัวของไอออนแบบ 2 มิติ ในแนวแกน XY เมื่อไอออนโปรตอน และไอออนแอลฟาผ่านเข้าไปในตัวอย่างผลึกชินทิวเลเตอร์

ภาพที่ 3 แสดงการกระจายตัวของไอออนแบบ 2 มิติ ในแนวแกน XY เมื่อไอออนโปรตอน และไอออนแอลฟาผ่านเข้าไปในตัวอย่างผลึกซิลทิลเลเตอร์ทั้ง 4 ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าความหนาของผลึกทั้ง 4 เป็น 1 ไมโครเมตร ซึ่งที่ระดับความหนาที่ส่งผลทำให้เห็นเหตุการณ์จำลองของโอกาสการเกิดอันตรกิริยาได้ดีที่สุดระหว่างโปรเจกไทล์ไอออน (โปรตอนและแอลฟา) กับอะตอมของผลึก แกน Y แสดงถึงหน่วย AU คือ $(\text{Atoms}/\text{cm}^3)/(\text{Atoms}/\text{cm}^2)$ ในระหว่างกระบวนการฝังตัวความเข้มข้นของสิ่งที่เป็นไอออน (atoms/volume) เทียบกับความลึกของผลึกซิลทิลเลเตอร์ ซึ่งถ้าไอออนสามารถทะลุผ่านได้มากแสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีสมบัติการกระเจิงได้ดี และสามารถคำนวณได้จากผลคูณของความคล่องกับหน่วย AU ในแกน Y (Dhal, et al., 2020) ผลจากการทดลองพบว่า ช่วงของไอออนโปรตอนที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ เท่ากับ 0.1389, 0.1613, 0.1643 และ 0.1745 ไมโครเมตร ตามลำดับ และช่วงของไอออนแอลฟาที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ เท่ากับ 0.1039, 0.1274, 0.1295 และ 0.1233 ไมโครเมตร ตามลำดับ ค่าไอออนกระเจิงกลับ (back-scattered ions) ของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ เท่ากับ 5758, 3123, 4164 และ 3055 ไอออน ตามลำดับ และค่าไอออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ เท่ากับ 20024, 12457, 15956 และ 8690 ไอออน



ภาพที่ 4 ค่าอำนาจค้ำยหยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาที่ช่วงพลังงานจลน์ 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์

ภาพที่ 4 แสดงค่าอำนาจค้ำยหยุดยั้งมวล (mass stopping powers) ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ผลจากการศึกษา พบว่า ค่าอำนาจค้ำยหยุดยั้งมวลสูงสุดที่สุดของอนุภาคโปรตอนอยู่ที่ช่วงพลังงานจลน์ 0.07–0.11 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจค้ำยหยุดยั้งมวลรวมสูงสุดที่สุดของอนุภาคแอลฟาอยู่ที่ช่วงพลังงานจลน์ 0.14–0.17 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้ พบว่า ผลึกซิลทิลเลเตอร์ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2)\text{MnBr}_4$ มีค่าอำนาจค้ำย

หยุดยั้งมวลมากที่สุด และผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ มีค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวลน้อยที่สุด โดยค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวลของอนุภาคแอลฟาสูงกว่าของอนุภาคโปรตอน ผลที่เกิดขึ้นนี้เป็นเพราะอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าที่มากกว่าและมีความเร็วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคโปรตอน อำนาจศักระหยุดยั้งมวลจะแปรผันตามจำนวนประจุไอออนและแปรผกผันกับกำลังสองของความเร็วที่พลังงานจลน์เท่ากันอนุภาคแอลฟามีความเร็วน้อยกว่าโปรตอนควบคู่ไปกับประจุที่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจศักระหยุดยั้งมวลมากกว่าของอนุภาคโปรตอน ดังนั้นสำหรับพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งสองค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวลจึงมีแนวโน้มตามลำดับ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2) \text{MnBr}_4 > \text{Rb}_2\text{CuCl}_3 > \text{Rb}_2\text{CuBr}_3 > \text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าในช่วงแรกทั้งของโปรตอนและแอลฟามีค่าสูงขึ้นเมื่อพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นซึ่งค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวลจะแปรผันตรงกับความเร็วดังกล่าวแต่เมื่อถึงจุดสูงสุดค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวลจะมีค่าลดลง ซึ่งค่านี้จะแปรผกผันกับความเร็วยกกำลังสอง (Kilicoglu, et al., 2019; Olarinoye, et al., 2020; Rammah, et al., 2021) และผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ มีการดูดกลืนอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟาได้ดีที่สุดในช่วงพลังงานนี้ ทำให้ผลึกซิลทิลเลเตอร์ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ มีประสิทธิภาพในการป้องกันอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟาได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับผลึกซิลทิลเลเตอร์ตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับค่าการกระจายตัวของไอออนจากภาพที่ 3

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้าของซิลทิลเลเตอร์ ได้แก่ $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$, Rb_2CuCl_3 , Rb_2CuBr_3 และ $(\text{C}_{38}\text{H}_{34}\text{P}_2) \text{MnBr}_4$ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (uncharged ionizing radiation) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) และเลขอะตอมยังผล (effective atomic number) ที่ช่วงพลังงาน 8.91×10^{-3} – 5.04×10^{-1} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า (charged ionizing radiation) ได้แก่ อนุภาคโปรตอน และแอลฟา ได้วิเคราะห์พารามิเตอร์การกระจายตัวของไอออน ค่าไอออนกระเจิงกลับที่พลังงานจลน์ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจศักระหยุดยั้งมวล (mass stopping powers) ช่วงพลังงานจลน์ 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ ซิลทิลเลเตอร์ มีสมบัติในการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้าที่ดีที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีสำหรับความร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Agar, O., Kavaz, E., Altunsoy, E. E., Kilicoglu, O., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Erguzel, T. T., & Tarhan, N. (2019). Er₂O₃ effects on photon and neutron shielding properties of TeO₂-Li₂O-ZnO-Nb₂O₅ glass system. *Results in Physics*, *13*, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102277>
- Birowosuto, M.D., Cortecchia, D., Drozdowski, W., Brylew, K., Lachmanski, W., Bruno, A., & Soci, C. (2016). X-ray scintillation in lead halide perovskite crystals. *Scientific Reports*, *6*, 37254. <https://doi.org/10.1038/srep37254>
- Cao, F., Yu, D., Ma, W., Xu, X., Cai, B., Yang, Y.M., Liu, S., He, L., Ke, Y., Lan, S., Choy, K.L., & Zeng, H. (2019). Shining emitter in stable host: design halide perovskite scintillators for X-ray imaging from commercial concept. *ACS Nano*, *14*, 5183-5193. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06114>
- Chen, Q., Wu, J., Ou, X., Huang, B., Almutlaq, J., Zhumekenov, A.A., Guan, X., Han, S., Liang, L., Yi, Z., Juan Li, Xie, X., Wang, Y., Li, Y., Fan, D., Teh, D.B.L., All, A.H., Mohammed, O.F., Bakr, O.M., Wu, T., Bettinelli, M., Yang, H., Huang, W., & Liu, X. (2018). All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators. *Nature*, *561*, 88-93. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0451-1>
- Dhal, S., Patro, A., Swain, M., Supraja, K., & Rath, P. K. (2020). Simulation of very-low energy alkali ion (≤ 10 KeV) induced effects on Al₂O₃ micro flakes. *Indian Journal of Science and Technology*, *13*(21), 2111-2118. <https://doi.org/10.17485/IJST/v13i21.97>
- Dong, M. G., Sayyed, M. I., Lakshminarayana, G., Ersundu, M. Ç., Ersundu, A. E., Nayar, P., & Mahdi, M. A. (2017). Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *468*, 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.018>
- Heiss, W., & Brabec, C. (2016). X-ray imaging: perovskites target X-ray detection. *Nature Photonics*, *10*, 288-289. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.54>
- Heo, J. H., Shin, D. H., Park, J. K., Kim, D. H., Lee, S. J., & Im, S. H. (2018). High-performance next-generation perovskite nanocrystal scintillator for nondestructive X-ray imaging. *Advanced Materials*, *30*(40), 1801743. <https://doi.org/10.1002/adma.201801743>
- Intom, S., Kalkornsurapranee, E., Johns, J., Kaewjaeng, S., Kothan, S., Hongtong, W., Chaiphaksa, W., & Kaewkhao, J. (2020). Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi₂O₃ composites. *Radiation Physics and Chemistry*, *172*, 108772. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108772>

- Issa, S. A. M., & Mostafa, A. M. A. (2017). Effect of Bi_2O_3 in borate-tellurite-silicate glass system for development of gamma-rays shielding materials. *Journal of Alloys and Compounds*, *695*, 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.207>
- Kaur, P., Singh, D., & Singh, T. (2018). Gamma rays shielding and sensing application of some rare earth doped lead-alumino-phosphate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, *144*, 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.018>
- Kilicoglu, O., Altunsoy, E. E., Agar, O., Kamislioglu, M., Sayyed, M. I., Tekin, H. O., & Tarhan, N. (2019). Synergistic effect of La_2O_3 on mass stopping power (MSP)/projected range (PR) and nuclear radiation shielding abilities of silicate glasses. *Results in Physics*, *14*, 102424. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102424>
- Kim, Y. C., Kim, K. H., Son, D. Y., Jeong, D. N., Seo, J. Y., Choi, Y. S., Han, I. T., Lee, S. Y., & Nam-Gyu Park, N. P. (2017). Printable organometallic perovskite enables large-area, low dose X-ray imaging. *Nature*, *550*, 87-91. <https://doi.org/10.1038/nature24032>
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., & Limsuwan, P. (2012). Photon interaction in borate glass doped with Bi_2O_3 at different energies. *Procedia Engineering*, *32*, 727-733. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.004>
- Kramer, K. W., Dorenbos, P., Gudel, H. U., & Eijk Van, C.W.E. (2006). Development and characterization of highly efficient new cerium doped rare earth halide scintillator materials. *Journal of Materials Chemistry*, *16*, 2773-2780. <https://doi.org/10.1039/B602762H>
- Lecoq, P. (2016). Development of new scintillators for medical applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *809*, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.041>
- Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., Chewpraditkul, W., & Limsuwan, P. (2012). Mass attenuation coefficient and effective atomic number of Ag/Cu/Zn alloy at different photon energy by Compton scattering technique. *Procedia Engineering*, *32*, 847-854. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.022>
- Liu, J., Shabbir, B., Wang, C., Wan, T., Ou, Q., Yu, P., Tadich, A., Jiao, X., Chu, D., Qi, D., Li, D., Kan, R., Huang, Y., Dong, Y., Jasieniak, J., Zhang, Y., & Bao, Q. (2019). Flexible, printable soft-X-ray detectors based on all-inorganic perovskite quantum dots. *Advanced Materials*, *31*(30), 1901644. <https://doi.org/10.1002/adma.201901644>

- Morad, V., Shynkarenko, Y., Yakunin, S., Brumberg, A., Schaller, R. D., & Kovalenko, M.V. (2019). Disphenoidal zero-dimensional lead, tin, and germanium halides: Highly emissive singlet and triplet self-trapped excitons and X-ray scintillation. *Journal of American Chemical Society*, *141*, 9764-9768. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b02365>
- Mykhaylyk, V. B., Kraus, H., & Saliba, M. (2019). Bright and fast scintillation of organolead perovskite MAPbBr₃ at low temperatures. *Materials Horizons*, *6*(8), 1740-1747. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/mh/c9mh00281b>
- Olarinoye, I. O., El-Agawany, F. I., El-Adawy, A., Yousef, E. A., & Rammah, Y. S. (2020). Mechanical features, alpha particles, photon, proton, and neutron interaction parameters of TeO₂-V₂O₃-MoO₃ semiconductor glasses. *Ceramics International*, *46*(14), 23134-23144. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.093>
- Pan, W., Wu, H., Luo, J., Deng, Z., Ge, C., Chen, C., Jiang, X., Yin, W. J., Niu, G., Zhu, L., Yin, L., Zhou, Y., Xie, Q., Ke, X., Sui, M., & Tang, J. (2017). Cs₂AgBiBr₆ single-crystal X-ray detectors with a low detection limit. *Nature Photonics*, *11*, 726-732. <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0012-4>
- Pan, W., Yang, B., Niu, G., Xue, K. H., Du, X., Yin, L., Zhang, M., Wu, H., Miao, X. S., & Tang, J. (2019). Hot-pressed CsPbBr₃ quasi-monocrystalline film for sensitive direct X-ray detection. *Advanced Materials*, *31*(44), 1904405. <https://doi.org/10.1002/adma.201904405>
- Rammah, Y. S., El-Agawany, F. I., Gamal, A., Olarinoye, I. O., Ahmed, E. M., & Abouhaswa, A. S. (2021). Responsibility of Bi₂O₃ content in photon, alpha, proton, fast and thermal neutron shielding capacity and elastic moduli of ZnO/B₂O₃/Bi₂O₃ glasses. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *31*(8), 3505-3524. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01976-5>
- Shrestha, S., Fischer, R., Matt, G. J., Feldner, P., Michel, T., Osvet, A., Levchuk, I., Merle, B., Golkar, S., Chen, H., Tedde, S. F., Schmidt, O., Hock, R., Rühlig, M., Göken, M., Heiss, W., Anton, G., & Brabec, C.J. (2017). High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers. *Nature Photonics*, *11*, 436-440. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2017.94>
- Stoumpos, C. C., Malliakas, c. D., Peters, J. A., Liu, Z., Sebastian, M., Im, J., Wibowo, T. C., Chung, D. Y., Freeman, A. J., Wessels, B. W., & Kanatzidis, M. G. (2013). Crystal growth of the perovskite semiconductor CsPbBr₃: A new material for high-energy radiation detection. *Crystal Growth & Design*, *13*(7), 2722-2727. <https://doi.org/10.1021/cg400645t>

- Thomas, G. A., & Symonds, P. (2016). Radiation exposure and health effects-Is it time to reassess the real consequences?. *Clinical Oncology*, *28*(4), 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2016.01.007>
- Wang, L., Fu, K., Sun, R., Lian, H., Hu, X., & Zhang, Y. (2019). Ultra-stable CsPbBr₃ perovskite nanosheets for X-ray imaging screen. *Nano-Micro Letters*, *11*(1), 52. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0283-z>
- Weber, M.J. (2002). Inorganic scintillators: today and tomorrow. *Journal of Luminescence*, *100*, 35-45. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(02\)00423-4](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(02)00423-4)
- Wei, H., Fang, Y., Mulligan, P., Chuirazzi, W., Fang, H.H., Wang, C., Ecker, B.r., Gao, Y., Loi, M.A., Cao, L., & Huang, J. (2016). Sensitive X-ray detectors made of methylammonium lead tribromide perovskite single crystals. *Nature Photonics*, *10*, 333-339. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.41>
- Wei, H., & Huang, J. (2019). Halide lead perovskites for ionizing radiation detection. *Nature Communication*, *10*, 1066. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08981-w>
- Wei, W., Zhang, Y., Xu, Q., Wei, H., Fang, Y., Wang, Q., Deng, Y., Li, Y., Gruverman, A., Cao, L., & Huang, J. (2017). Monolithic integration of hybrid perovskite single crystals with heterogenous substrate for highly sensitive X-ray imaging. *Nature Photonics*, *11*, 315-321. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.43>
- Xu, L.J., Lin, X., He, Q., Worku, M., & Ma, B. (2020). Highly efficient eco-friendly X-ray scintillators based on an organic manganese halide. *Nature Communications*, *11*, 4329. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18119-y>
- Yakunin, S., Sytnyk, M., Kriegner, D., Shrestha, S., Richter, M., Matt, G. J., Azimi, H., Brabec, C. J., Stangl, J., Kovalenko, M. V., & Heiss, W. (2015). Detection of X-ray photons by solution-processed lead halide perovskites. *Nature Photonics*, *9*, 444-449. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.82>
- Yang, B., Yin, L., Niu, G., Yuan, J. H., Xue, K. H., Tan, Z., Miao, X. S., Niu, M., Du, X., Song, H., Lifshitz, E., & Tang, J. (2019). Lead-free halide Rb₂CuBr₃ as sensitive X-ray scintillator. *Advanced Materials*, *31*, 1904711. <https://doi.org/10.1002/adma.201904711>
- Zhao, X., Niu, G., Zhu, J., Yang, B., Yuan, J. H., Li, S., Gao, W., Hu, Q., Yin, L., Xue, K. H., Lifshitz, E., Miao, X., & Tang, J. (2020). All-inorganic copper halide as a stable and self-absorption-free X-ray scintillator. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, *11*, 1873-1880. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c00161>

- Zhou, C., Lin, H., He, Q., Xu, L., Worku, M., Chaaban, M., Lee, S., Shi, X., Du, M. H., & Ma, B. (2019). Low dimensional metal halide perovskites and hybrids. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 137, 38-65. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2018.12.001>
- Zhou, C., Lin, H., Tian, Y., Yuan, Z., Clark, R., Chen, B., Van De Burgt, L. J., Wang, J. C., Zhou, Y., Hanson, K., Meisner, Q. J., Neu, J., Besara, T., Siegrist, T., Lambers, E., Djurovich, P., & Ma, B. (2018). Luminescent zero-dimensional organic metal halide hybrids with near-unity quantum efficiency. *Chemical Science*, 9, 586-593. <https://doi.org/10.1039/C7SC04539E>
- Zhou, C., Tian, Y., Wang, M., Rose, A., Besara, T., Doyle, N. K., Yuan, Z., Wang, J. C., Clark, R., Hu, Y., Siegrist, T., Lin, S., & Biwu Ma. B. (2017). Low-dimensional organic tin bromide perovskites and their photoinduced structural transformation. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(31), 9018-9022. <https://doi.org/10.1002/anie.201702825>
- Zhou, C., Worku, M., Neu, J., Lin, H., tian, Y., Sujin Lee, Zhou, Y., Han, D., Chen, S., Hao, A., Djurovich, P. I., Siegrist, T., Du, M. H., & Ma, B. (2018). Facile preparation of light emitting organic metal halide crystals with near-unity quantum efficiency. *Chemistry of Materials*, 30, 2374-2378. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00129>
- Zhuravleva, M., Friedrich, S., & Melcher, C. L. (2012). Praseodymium valence determination in Lu₂SiO₅, Y₂SiO₅, and Lu₃Al₅O₁₂ scintillators by x-ray absorption spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 101, 101902. <https://doi.org/10.1063/1.4748168>