

สัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาพลังงาน 60, 290, 404, 566 และ 662 keV ของ
ผลึกซินทิลเลชัน PbWO_4 และ CdWO_4

Attenuation Coefficient and Mean Free Path of 60, 290, 404, 566 and 662 keV γ -rays for
 PbWO_4 and CdWO_4 Scintillation Crystals

กฤติยา ศรีบุญเพ็ง^{1*}, นิมิตร กิมประพันธ์¹, ภาณุวัฒน์ ชิมะลาวงค์¹, กรวิทย์ ว่องวิทย์การ¹ และ
วีระพงศ์ จิวประดิษฐ์กุล²

Krittiya Sreebunpeng^{1*}, Nimit Kimpraphan¹, Parnuwat Chimalawong¹, Korravee Wongwigkarn¹ and
Weerapong Chewpraditkul²

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

² ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² Department of Physics, King Mongkut's University of Technology Thonburi

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาพลังงาน 60, 290, 404, 566 และ 662 keV ของผลึกซินทิลเลชัน PbWO_4 และ CdWO_4 โดยวิธีการทะลุผ่านของรังสีแกมมา รังสีแกมมา 60 และ 662 keV ได้มาจากแหล่งกำเนิด ^{241}Am และ ^{137}Cs ตามลำดับ ส่วนรังสีแกมมา 290, 404 และ 566 keV ได้มาจากการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV (แหล่งกำเนิด ^{137}Cs) ที่มุมการกระเจิง 90° , 60° และ 30° ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาที่วัดได้จากการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรม WinXCom สำหรับผลึกที่ศึกษา ในช่วงพลังงาน 1 – 1000 keV

คำสำคัญ: การกระเจิงแบบคอมป์ตัน สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล CdWO_4 PbWO_4

Abstract

In this work, the attenuation coefficient and mean free path of 60, 290, 404, 566 and 662 keV γ -rays for PbWO_4 and CdWO_4 scintillation crystals were measured using the transmission method. The 60 and 662 keV γ -rays were obtained from ^{241}Am and ^{137}Cs radioactive sources, respectively. The 290, 404 and 566 keV γ -rays were obtained from the Compton scattering of 662 keV γ -rays (^{137}Cs source) at scattering angle of 90° , 60° and 30° , respectively. For comparison, the attenuation coefficient and mean free path of gamma rays for the studied crystals were also calculated over energy range 1 – 1000 keV using the WinXCom program.

Keywords: Compton scattering, Attenuation coefficient, CdWO_4 , PbWO_4

* Corresponding author : krittiya_sree@hotmail.com

1. บทนำ

รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรและอุตสาหกรรม การตรวจสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงาน และด้านธรณีวิทยา เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุจะเสียพลังงานในการชนกับอะตอมธาตุต่างๆทำให้เกิดการกระตุ้นอะตอม อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุเกิดได้ 3 แบบที่สำคัญขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect), การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และการเกิดผลผลิตคู่ (Pair production) ปริมาณที่จะบ่งบอกว่าวัสดุดูดกลืนรังสีแกมมาเมื่อเกิดอันตรกิริยาดังกล่าวได้มากคือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient; μ_m) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient; μ) และ ระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path; λ) ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อประสิทธิภาพผลึกซินทิลเลชัน (Nikl, M., 2006, Van Eijk and C.W., 2002) กล่าวคือการลดทอนพลังงานรังสีแกมมาจะสัมพันธ์กับ ความหนา ความหนาแน่น และเลขอะตอมยังผลของวัสดุ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและเลขอะตอมยังผลจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญของวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุป้องกันรังสี (Chen, S., et.al., 2014)

ผลึกซินทิลเลชันเป็นวัสดุที่เปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี และนิยมนำไปใช้เป็นหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation detector) ผลึกซินทิลเลชันที่มีความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลสูงจะเป็นกลุ่มที่มีราคาแพงเป็นองค์ประกอบ เช่น PbWO_4 มีเลขอะตอมยังผลสูง 76 และความหนาแน่น 8.28 g/cm^3 นำไปใช้กับ Large Hadron Collider (LHC) ใน CERN (Lecoq, P., 1995, Liu, X., 2002) มียิลด์แสง (light yield) 300 photons/MeV (Nikl, M., 2006) CdWO_4 มีเลขอะตอมยังผลสูง 64 และความหนาแน่น 7.90 g/cm^3 ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้ใน PET Scan (Lecoq, P., 2016) มียิลด์แสง 15,000 photons/MeV (Nikl, M., 2006, Lecoq, P., 2016, Holl, I., 1988) ผลึกทั้งสองยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ (Melcher, C.L., 2005)

ในบทความนี้ได้นำเสนอการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน และระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาพลังงาน 60, 290, 404, 566 and 662 keV ของผลึกซินทิลเลชันที่มีความหนาแน่นสูง PbWO_4 และ CdWO_4 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV มาจากแหล่งกำเนิด ^{241}Am (100 mCi) ส่วนรังสีแกมมาที่เหลือได้จากการกระเจิงแบบคอมป์ตันที่มุมกระเจิงต่างๆ ของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs (12 mCi) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาของผลึกซินทิลเลชันที่วัดได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom ในช่วงพลังงาน 1 – 1000 keV (Biswas, R, 2016)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

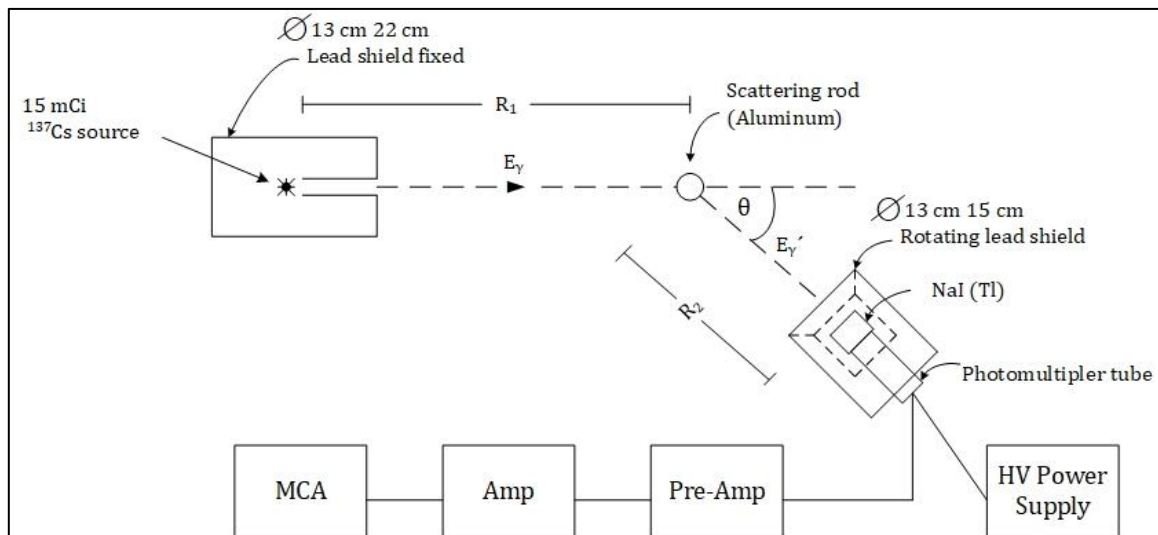
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน และระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาพลังงาน 60, 290, 404, 566 and 662 keV ของผลึกซินทิลเลชันที่มีความหนาแน่นสูง PbWO_4 และ CdWO_4 ที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom ในช่วงพลังงาน 1 – 1000 keV

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ผลึกซินทิลเลชันที่นำมาศึกษาคือผลึก PbWO_4 (ขนาด $8 \times 8 \times 1.5 \text{ mm}^3$) และ CdWO_4 (ขนาด $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$) ปลุกผลึกด้วยเทคนิคบริดแมน (Bridgman method) ที่มีความหนาแน่น 8.28 และ 7.90 g/cm^3 ตามลำดับ

จากแผนภาพสเปกโตรมิเตอร์คอมป์ตัน (Compton spectrometer) ดังแสดงในภาพที่ 1 นำผลึกตัวอย่างติดตั้งไว้ที่หน้าถ้ำตะกั่วทรงกระบอกที่มีรูคอลลิเมเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ยาว 50 mm เปิดถึงหน้าหัววัดรังสี NaI(Tl) แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้คือ ^{137}Cs ให้รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV และ ^{241}Am ให้รังสีแกมมาพลังงาน 60 keV จะถูกบรรจุในถ้ำตะกั่วทรงกระบอกที่มีรูคอลลิเมเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ยาว 50 mm ระยะห่าง $R_1 = 0.38 \text{ m}$ และ $R_2 = 0.34 \text{ m}$ แท่งอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 mm ทำหน้าที่กระเจิงรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs สัญญาณจากหัววัดรังสี NaI(Tl) ถูกส่งไปยังวงจรขยายส่วนหน้า (Preamplifier) วงจรขยาย (Amplifier) และเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี UCS-20 (Universal

Computer Spectrometer) วัดค่าความเข้มของรังสีขณะไม่มีผลึกตัวอย่าง I_0 และขณะมีแผ่นผลึกตัวอย่างขวางกั้นลำรังสี I รวมทั้งการวัดค่าความเข้มรังสี I_0 และ I จากรังสีแกมมาที่กระเจิงมาจากแท่งอะลูมิเนียมเข้าสู่หัววัดรังสี NaI(Tl) ที่มีมุมกระเจิงต่างๆ (ประมาณ 30, 60 และ 90 องศา) และที่มีมุม 0 องศาหัววัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs และพลังงาน 60 keV มาจากแหล่งกำเนิด ^{241}Am โดยตรง หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาพลังงาน 60, 290, 404, 566 และ 662 keV ของผลึกซินทิลเลชัน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom (Gerward, L., et.al., 2004)



ภาพที่ 1 แผนภาพสเปกโตรมิเตอร์คอมพิวเตอร์

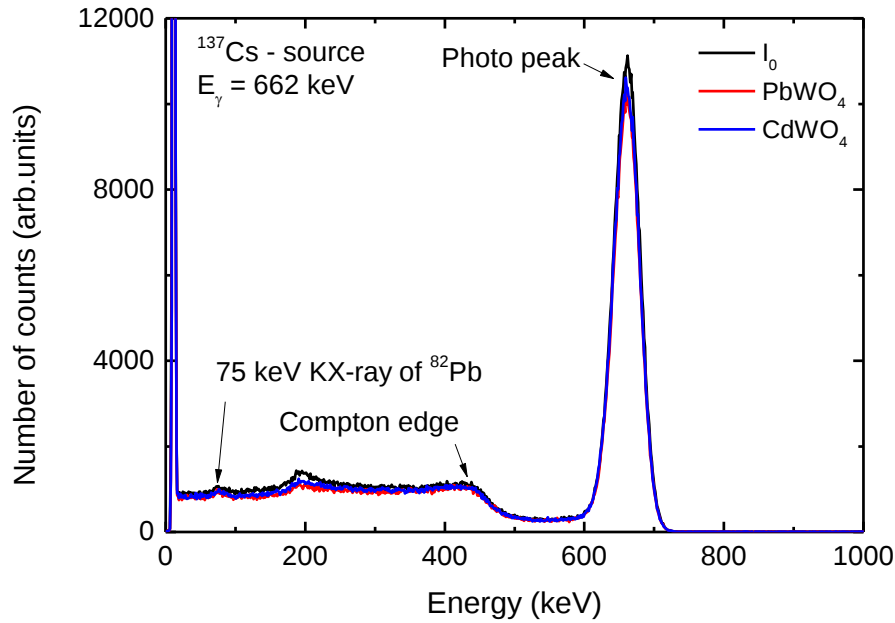
4. ผลการวิจัย

4.1 รังสีแกมมาจากการกระเจิงแบบคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 2 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs วัดด้วยหัววัดรังสี NaI (Tl) ทั้งที่ไม่ผ่าน (I_0) และทะลุผ่าน (I) แผ่นผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 นอกเหนือจากโฟโตพีค (Photo peak) ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption) ของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ในหัววัดรังสีแล้ว ยังมีแถบการกระเจิงคอมพิวเตอร์ (Compton continuum) ในช่วงพลังงาน 0 - 478 keV โดย ที่พลังงาน 478 keV เรียกว่า ขอบคอมพิวเตอร์ (Compton edge) คำนวณได้จากสมการ

$$E_{\text{edge}} = E - \frac{E}{1 + \frac{2E}{mc^2}} \quad (1)$$

ที่พลังงาน 75 keV เป็น KX-rays ของธาตุตะกั่วจากถั่วตะกั่ว เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ผ่านผลึก PbWO_4 ที่มีความหนาแน่นมากจะดูดกลืนรังสีแกมมาไว้มากจึงทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านผลึกมีความเข้มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านผลึก CdWO_4



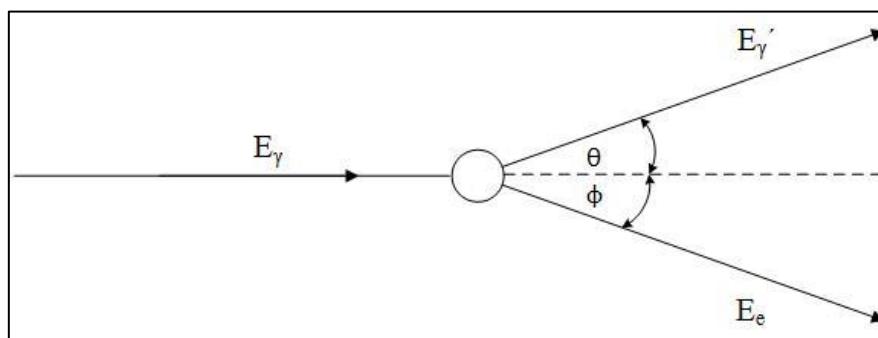
ภาพที่ 2 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จาก ^{137}Cs วัดด้วยหัววัดรังสี NaI(Tl) ทั้งที่ไม่ผ่าน (I_0) และทะลุผ่านแผ่นผลึก PbWO_4 และ CdWO_4

ปรากฏการณ์คอมป์ตันแสดงดังภาพที่ 3 เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมวัสดุแล้วมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม (Compton electron; E'_e) กระเจิงไปเป็นมุม θ และโฟตอนกระเจิงไปเป็นมุม θ (Scattered photon; E'_γ) การชนระหว่างโฟตอน (E_γ) กับอิเล็กตรอน (E_e) เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน ดังนั้นพลังงานของโฟตอนกระเจิง E'_γ จะเปลี่ยนตามมุมกระเจิงและพลังงานของโฟตอนตกกระทบ E_γ โดยพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงแบบคอมป์ตันหาได้จากสมการที่ (3)

$$E_\gamma = E'_\gamma + E_e \quad (2)$$

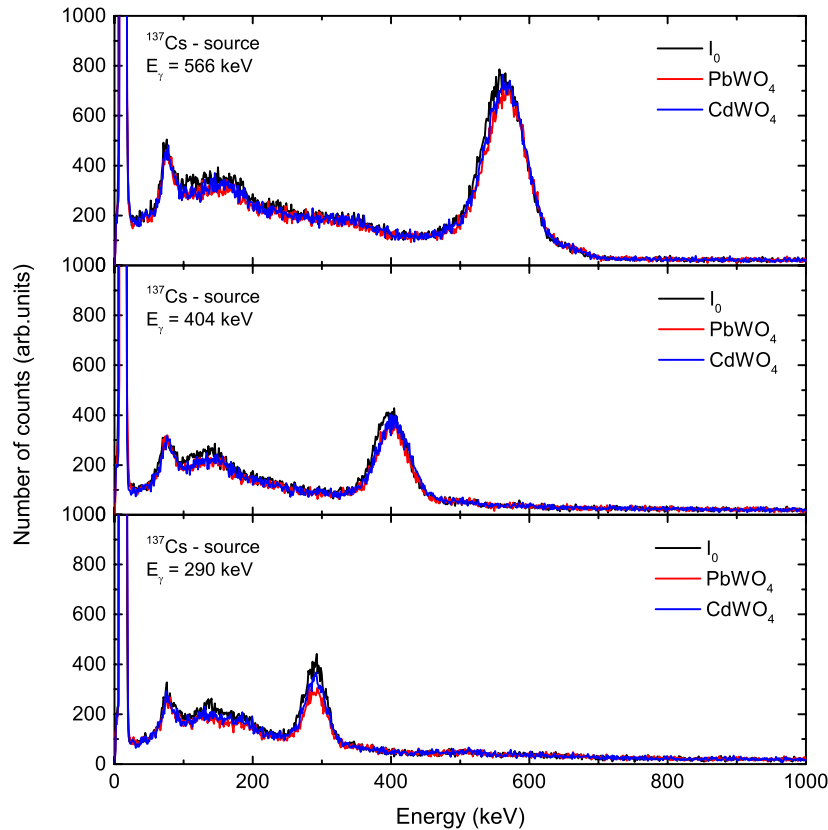
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

เมื่อ $m_0 c^2$ คือพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (511 keV) และ θ คือมุมกระเจิงของรังสีแกมมา



ภาพที่ 3 การกระเจิงแบบคอมป์ตันของรังสีแกมมา

ภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการกระเจิงแบบคอมป์ตันของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ที่มีมุมกระเจิง 30° , 60° และ 90° ทั้งที่ไม่ผ่าน (I_0) และทะลุผ่านแผ่นผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ปรากฏว่านอกจากพลังงานรังสีแกมมาลดลงตามมุมกระเจิงแล้วยังส่งผลให้ความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงคอมป์ตันลดลงด้วย ข้อดีของการใช้รังสีแกมมาจากการกระเจิงแบบคอมป์ตันอยู่ที่เราสามารถเลือกพลังงานรังสีแกมมาที่ต้องการ ได้ในระดับหนึ่ง



ภาพที่ 4 สเปกตรัมรังสีแกมมา Cs-137 (662 keV) ที่มีมุมกระเจิง 30° (566 keV), 60° (404 keV) และ 90° (290 keV) วัดด้วยหัววัดรังสี NaI(Tl) ทั้งที่ไม่ผ่าน (I_0) และทะลุผ่านแผ่นผลึก PbWO_4 และ CdWO_4

4.2 การลดทอนรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาพลังงานเดียวที่เป็นลำขนานและมีความเข้ม I_0 ผ่านวัสดุดูดกลืนที่เป็นเนื้อเดียว ค่าความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัสดุดูดกลืน (I) จะลดลงตามความหนาของผลึก (x) ดังสมการที่ (4)

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (4)$$

เนื่องจากผลึกเป็นสารประกอบ (Compound) ดังนั้น

$$\mu_m = (\mu/\rho)_{\text{compound}} = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (5)$$

และ

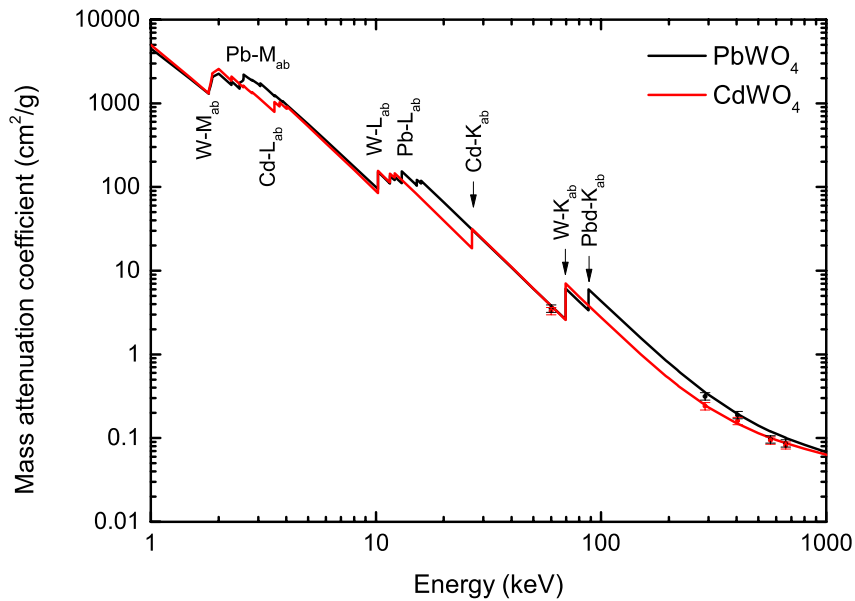
$$w_i = \frac{n_i A_i}{\sum_i n_i A_i} \quad (6)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น หน่วย cm^{-1} , ρ คือ ความหนาแน่นของผลึก หน่วย g/cm^3 , μ_m คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล หน่วย cm^2/g , x คือความหนาของผลึก หน่วย cm w_i คือสัดส่วนโดยน้ำหนัก A_i คือน้ำหนักอะตอม (Atomic weight) n_i คือ จำนวนอะตอม (number of formula units) และ $\sum_i w_i = 1$ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและเชิงเส้นของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 หาได้จากสมการที่ (4) แสดงในตารางที่ 1 โดยค่าความเข้มรังสีแกมมา I_0 และ I หาได้จากการอินทิเกรตพื้นที่โฟโตพีคสเปกตรัมรังสีแกมมา (ภาพที่ 2 และ 4) เส้นทึบในภาพที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ในช่วงพลังงานรังสีแกมมา 1 – 1000 keV ที่ได้จากโปรแกรม WinXCom ส่วนจุดเป็นค่าที่วัดได้ สัมประสิทธิ์การลดทอนจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามากขึ้น ซึ่งในช่วงพลังงานไม่เกิน 200 keV ส่วนใหญ่เกิดจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แต่เมื่อพลังงานมากกว่านี้จนถึง 1,000 keV ก็จะมีการกระเจิงแบบคอมป์ตันมาเสริมด้วย สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่พลังงาน 2.48, 2.59, 3.07, 3.55 และ 3.85 keV ของผลึก PbWO_4 แสดงถึงขอบการดูดกลืนพลังงาน (absorption edge) ของอิเล็กตรอนในชั้น M ของธาตุตะกั่ว (Pb-M_{ab}) ที่พลังงาน 1.87, 2.28, 2.58 และ 2.82 keV ของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 เป็นขอบการดูดกลืน W-M_{ab} ของธาตุทังสเตน ที่พลังงาน 13.04, 15.20 และ 15.86 keV ของผลึก PbWO_4 เป็นขอบการดูดกลืน Pb-L_{ab} ของธาตุตะกั่ว ที่ 16.21, 11.54 และ 12.10 keV ของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 เป็นขอบการดูดกลืน W-L_{ab} ของธาตุทังสเตน ที่พลังงาน 3.54, 3.73 และ 4.02 keV ของผลึก CdWO_4 เป็นขอบการดูดกลืน Cd-L_{ab} ของธาตุแคดเมียม ที่พลังงาน 88, 69 และ 26.71 เป็นขอบการดูดกลืน Pb, W, Cd-K_{ab} ของธาตุตะกั่ว, ทังสเตน และ แคดเมียม ตามลำดับ

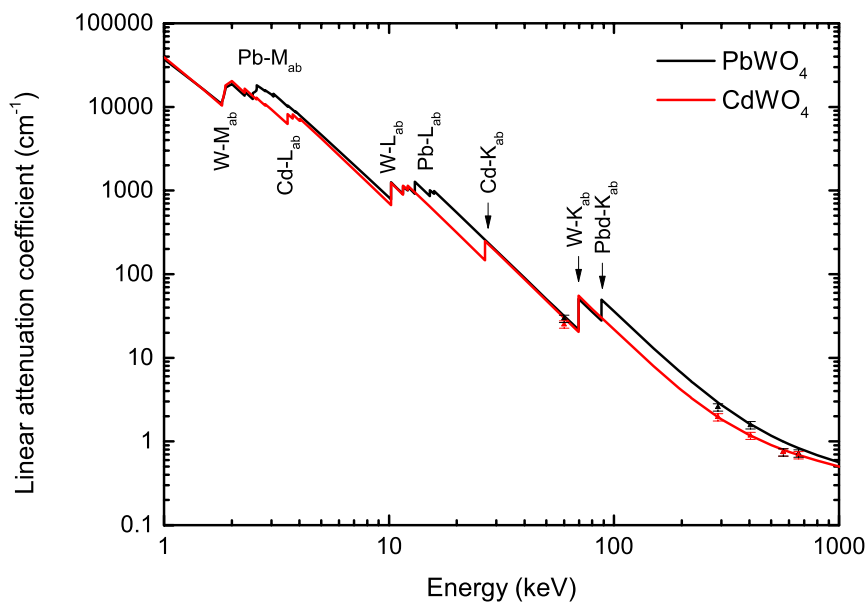
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและระยะทางอิสระเฉลี่ยรังสีแกมมาสำหรับผลึก PbWO_4 และ CdWO_4

ผลึก	E_γ (keV)	μ_m (cm^2/g)		ความ แตกต่าง (%)	μ (cm^{-1})		ความ แตกต่าง (%)	λ (cm)		ความ แตกต่าง (%)
		ทฤษฎี	ทดลอง		ทฤษฎี	ทดลอง		ทฤษฎี	ทดลอง	
PbWO_4	60	3.812	3.543	7.06	31.563	29.340	7.06	0.032	0.034	6.25
	290	0.352	0.316	10.23	2.917	2.573	10.23	0.343	0.389	13.41
	404	0.193	0.189	2.07	1.605	1.568	2.07	0.623	0.638	2.41
	566	0.121	0.097	20.19	0.998	0.744	25.45	1.002	1.251	24.82
	662	0.101	0.087	13.42	0.832	0.720	13.46	1.202	1.388	15.48
CdWO_4	60	3.794	3.298	13.07	29.973	25.056	13.07	0.033	0.038	15.15
	290	0.247	0.241	2.43	1.954	1.901	2.43	0.512	0.526	2.73
	404	0.149	0.161	8.05	1.173	1.270	8.05	0.852	0.788	7.51
	566	0.101	0.094	6.97	0.796	0.744	6.53	1.256	1.344	7.04
	662	0.087	0.082	5.75	0.688	0.647	5.75	1.453	1.545	6.33

ภาพที่ 6 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของผลึกดังกล่าวในช่วงพลังงานรังสีแกมมา 1 – 1000 keV ที่ได้จากโปรแกรม WinXCom ซึ่งให้ผลสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับภาพที่ 5 ปรากฏว่าผลึก PbWO_4 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่สูงในช่วงพลังงานมากตั้งแต่ 90 keV ขึ้นไป เนื่องจากมีธาตุตะกั่วซึ่งมีความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลมากเป็นองค์ประกอบนั่นเอง ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและการกระเจิงแบบคอมป์ตันในผลึกได้มาก



ภาพที่ 5 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ที่ช่วงพลังงาน 1-1000 keV



ภาพที่ 6 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ที่ช่วงพลังงาน 1-1000 keV

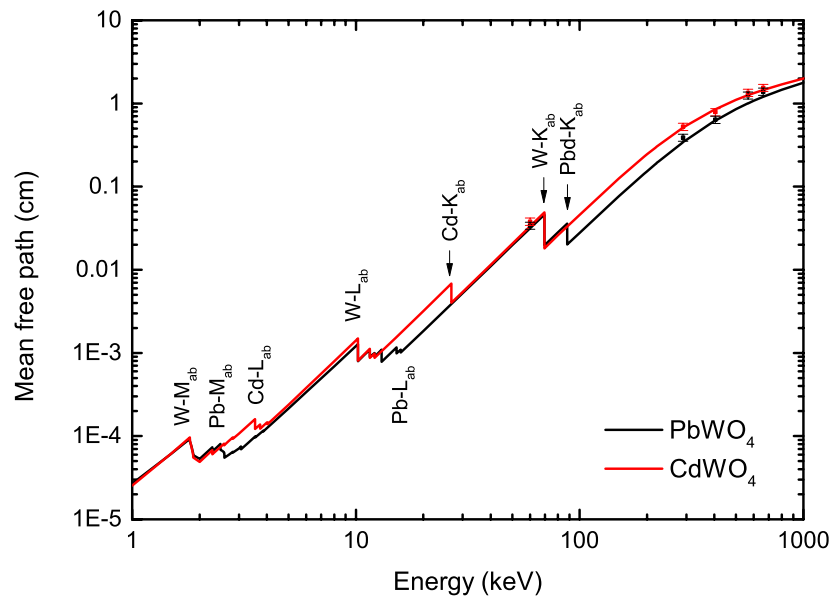
4.3 ระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมา

โอกาสเกิดอันตรกิริยาในเชิงระยะทางของรังสีแกมมากับอะตอมในวัสดุตัวกลาง เรียกว่าความยาวการลดทอนรังสี (attenuation length) หรือระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมา (mean free path; λ) สามารถหาได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty x \exp(-\mu x) dx}{\int_0^\infty \exp(-\mu x) dx} = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น หน่วย cm^{-1} และ x คือความหนาของผลึก หน่วย cm

ภาพที่ 7 แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมาในผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ในช่วงพลังงาน 1-1000 keV ที่คำนวณจากสมการที่ (7) ระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมาบอกระยะทางเฉลี่ยของรังสีในการเกิดอันตรกิริยาในผลึก ค่าระยะทางอิสระของรังสีน้อยแสดงว่าผลึกสามารถดูดกลืนรังสีได้มากหรือสามารถหยุดยั้งการทะลุทะลวงของรังสีได้ดี เหมาะกับการนำไปใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี จากภาพที่ 7 ที่พลังงานต่ำระยะทางอิสระของรังสีแกมมาของผลึกทั้ง 3 ชนิดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่พลังงานมากกว่า 90 keV ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของผลึก PbWO_4 มีค่าน้อยกว่าของ CdWO_4 สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่มากกว่าเนื่องจากมีธาตุหนักอย่างตะกั่วเป็นองค์ประกอบนั่นเอง



ภาพที่ 7 ระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมาในผลึก PbWO_4 และ CdWO_4 ที่ช่วงพลังงาน 1-1000 keV

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีและระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมาของผลึกซินทิลเลเตอร์ PbWO_4 และ CdWO_4 ในช่วงพลังงาน 60 - 662 keV และเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom ในช่วงพลังงาน 1 - 1000 keV พบว่าผลึก PbWO_4 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่สูงในช่วงพลังงานตั้งแต่ 90 keV ขึ้นไปเนื่องจากมีธาตุตะกั่วซึ่งมีความหนาแน่นและเลขอะตอมสูงเป็นองค์ประกอบนั่นเอง แม้ว่าผลึก PbWO_4 จะมีสีด่างที่ต่ำ แต่การมีระยะทางอิสระเฉลี่ยของรังสีแกมมาที่สั้นจึงสามารถดูดกลืนและหยุดยั้งรังสีแกมมาได้ดีและต้นทุนการผลิตต่ำ ทำให้ผลึก PbWO_4 เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้วัดรังสีแกมมาและอนุภาคพลังงานสูงในห้องปฏิบัติการที่ต้องใช้ปริมาณผลึกจำนวนมาก การกระเจิงแบบคอมป์ตันสามารถผลิตรังสีแกมมาที่มีพลังงานหลากหลายและต่อเนื่องเอื้อประโยชน์ในการนำไปใช้ศึกษาวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์ และให้คำปรึกษา และดร.ณัฐดา ยะไวยักษ์ ที่ให้การช่วยเหลือในการวัดผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- Biswas, R., Sahadath, H., Mollah, A.S. and Huq, F. (2016). Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material: Polyboron. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.08.005>
- Chen, S., Bonurham, M. and Rabiei A. (2014). Novel light-weight materials for shielding gamma ray. *Radiation Physics and Chemistry*, 96, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.08.001>
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Leving, H., (2004). WinXCom-a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry*, 71, 653–654. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040>
- Holl, I., Lorenz, E. and Mageras, G. (1988). A Measurement of the Light Yield of Common Inorganic Scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 35, 105-109. <https://doi.org/10.1109/23.12684>
- Lecoq, P. (2016). Development of new scintillators for medical applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 809, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.041>
- Lecoq, P., Dafinei, I., Auffray, E., Schneegans, M., Korzhik, M.V. Mishevitch, O.V, Pavlenko, V.B., Fedorov, A.A., Annenkov, A.N., Kostylev, V.L. and Ligun, V.D. (1995). Lead tungstate (PbWO₄) scintillators for LHC EM calorimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 365, 291-298. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00589-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00589-7)
- Liu, X., Hu, G., Feng, X.M., Huang, Y. and Zhang Y. (2002). Influence of PbF₂ Doping on Scintillation Properties of PbWO₄ Single Crystals. *Physics status Solidi (a)*, 190, R1-R3. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200203\)190:1<R1::AID-PSSA99991>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200203)190:1<R1::AID-PSSA99991>3.0.CO;2-G)
- Melcher, C.L. (2005). Perspective in the future development of new scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 537, 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.222>
- Nikl, M. (2006). Scintillation detectors for x-rays. *Measurement Science and Technology*, 17(4), R37-R54. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/4/R01>
- Van Eijk C.W. (2002). Inorganic scintillators in medical imaging. *Physics in Medicine & Biology*, 47(8), R85-106. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/8/201>