

การศึกษาเปรียบเทียบการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำและพลังงานสูงโดยแผ่นอะลูมิเนียม พอยล์ด้วยหัววัดรังสีแบบซินทิลเลชัน

กิตติพงษ์ เสี่ยงเสนาะ^{1,*}, ศุภรัตน์ ทศน์เจริญ¹, กชกร หรีห์ห้อง¹,
ธัญชนก สดใส¹, รัตนาวดี แซ่ไข่¹ และ วุฒิชัย ไชยภักษา²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²สาขาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*kittipongpat@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการลดทอนของรังสีแกมมาเมื่อผ่านวัสดุตัวดูดกลืนซินทิลเลียมพอยล์ที่มีความหนา โดยเปรียบเทียบระหว่างรังสีแกมมาพลังงานต่ำจากต้นกำเนิดรังสี Americium-241 (Am-241, 59.5 keV) และรังสีแกมมาพลังงานปานกลางจากต้นกำเนิดรังสี Cesium-137 (Cs-137, 662 keV) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดประกอบด้วยหัววัดรังสีแบบซินทิลเลชัน NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra (Model 802-2X2) เชื่อมต่อกับระบบประมวลผลผ่านโปรแกรม Genie 2000 Spectroscopy Software โดยกำหนดเวลาในการนับวัดคงที่ที่ 500 วินาที ผลการศึกษาจากการวิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคสุทธิ (Net Peak Area) พบว่าพฤติกรรมการลดทอนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับระดับพลังงานของรังสี โดยพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลักของ Am-241 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 78,753 ถึง 58,379 เคานต์ (counts) เมื่อความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 5 ชั้น (ความหนารวม 0.15 mm) ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกในรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ในขณะที่พื้นที่ใต้พีคพลังงานหลักของ Cs-137 มีค่าค่อนข้างคงที่ในทุกระดับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์ บ่งชี้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์ระดับความหนาไม่เกิน 0.15 mm จะไม่ส่งผลต่อการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง สรุปได้ว่าอะลูมิเนียมพอยล์มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ซึ่งข้อมูลนี้เป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาอิทธิพลของความหนาแผ่นอะลูมิเนียมพอยล์ของหน้าต่างหัววัด (Entrance Window) ต่อความแม่นยำในการวัดรังสีที่มีระดับพลังงานต่างกัน

คำสำคัญ: การลดทอนรังสีแกมมา อะลูมิเนียมพอยล์ Am-241, Cs-137

A Comparative Study of Gamma-Ray Attenuation for Low and High Gamma Energy Sources through Aluminum Foil using Scintillation Detector

K., Siengsanoh^{1,*}, S., Tuscharoen¹, K., Reerong¹, T., Sodsa¹, R., Saechai¹,
and W. Chaiphaksa²

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

²Medical Material and Equipment, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

*kittipongpat@webmail.npru.ac.th

Abstract

This research aims to investigate the attenuation behavior of gamma rays passing through aluminum foil absorbers of varying thicknesses. A comparative study was conducted between low-energy gamma rays from an Americium-241 (Am-241, 59.5 keV) source and medium-energy gamma rays from a Cesium-137 (Cs-137, 662 keV) source. The measurement system consisted of a Canberra NaI(Tl) scintillation detector (Model 802-2X2) connected to a processing system via Genie 2000 Spectroscopy Software, with a fixed counting time of 500 seconds. The results of the Net Peak Area analysis indicated that the attenuation behavior is significantly related to the energy level of the radiation. The main energy peak area of Am-241 showed a continuous downward trend, decreasing from 78,753 to 58,379 counts as the number of aluminum foil layers increased from 0 to 5 (total thickness of 0.15 mm). This reduction is attributed to the influence of the photoelectric effect in low-energy gamma radiation. Conversely, the main energy peak area of Cs-137 remained relatively constant across all thickness levels of the aluminum foil, indicating that aluminum foil with a thickness not exceeding 0.15 mm does not affect the attenuation of high-energy gamma rays. In conclusion, aluminum foil significantly affects the attenuation of low-energy gamma rays. These findings are beneficial for evaluating the influence of aluminum foil thickness in the detector's entrance window on the measurement accuracy of radiation across different energy levels.

Keywords: Gamma-ray attenuation, Aluminum foil, Am-241, Cs-137

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์และรังสีมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งทั้งในด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม และการวิจัยพื้นฐาน โดยเฉพาะรังสีแกมมาที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง รังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียสภายในอะตอม ซึ่งรังสีแกมมาแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงาน (Energy levels) ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เป็นต้นกำเนิด เช่น Americium-241 (Am-241) ให้รังสีแกมมาพลังงาน 59.5 keV Cs-137 พลังงาน 662 keV Co-60 พลังงาน 1,170 keV ความแตกต่างของระดับพลังงานนี้ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดอันตรกิริยากับสสาร โดยรังสีพลังงานต่ำจาก Am-241 จะถูก

ลดทอนได้ง่ายผ่านปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก [1-3] เช่น การทดลองวัดการลดทอนรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นดูดกลืนที่มีความหนาแตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีกับความหนาของวัสดุตามกฎการลดทอนแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล การทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองของหัววัดรังสีต่อรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ผลของพลังงานรังสีต่อประสิทธิภาพการตรวจวัด และการทดลองศึกษาผลของวัสดุหน้าหัววัดต่อการตรวจวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำ [3-6] โดยจำลองชั้นหน้าต่างหัววัดด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

ปัญหาสำคัญในการวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำคือความไวของหัววัดรังสี (Detector Sensitivity) ต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะการมีอยู่ของอะลูมิเนียมที่หน้าหัววัด (Entrance Window) ในกรณีที่เป็นหัววัดสำเร็จรูป เช่น หัววัดชนิด Scintillation detector หรือ Geiger-Muller tube จะมีชั้นอะลูมิเนียมปิดอยู่บริเวณหน้าหัววัด (Entrance Window) ซึ่งจะช่วยป้องกันโครงสร้างของหัววัด แต่ก็อาจทำให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำถูกดูดกลืนก่อนเข้าสู่ส่วนตรวจวัด ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน้าต่างป้องกันเชิงกลแต่ในขณะเดียวกันก็กลายเป็นตัวดูดกลืนรังสี (Filter) ก่อนที่รังสีจะเข้าสู่ส่วนตรวจวัด ความหนาของชั้นอะลูมิเนียมนี้หากไม่เหมาะสมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดลดลงอย่างมาก

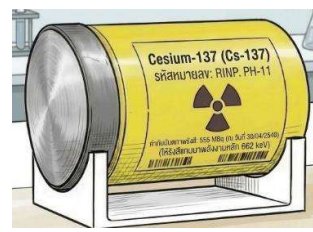
การวิจัยนี้จึงเลือกใช้ อะลูมิเนียมฟอยล์ เป็นวัสดุในการทดลองเนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับหัววัดสำเร็จรูป NaI(Tl) จากนั้นทำการศึกษาผลของความหนาอะลูมิเนียมฟอยล์ต่อการลดทอนรังสีแกมมา โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มของรังสีแกมมาที่มีพลังงานแตกต่างกันได้แก่ Am-241 และ Cs-137 เมื่อผ่านแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมากับพฤติกรรมการลดทอนในอะลูมิเนียมฟอยล์

2. วิธีการทดลอง

ในการศึกษาการลดทอนของรังสีแกมมาผ่านแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ได้กำหนดขั้นตอนการทดลองและรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์เพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและเป็นไปตามหลักการทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ดังนี้ ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน (Radioactive Sources) อะเมริเซียม-241 (Am-241) รหัสหมายเลข RINP. PH-51 ค่ากัมมันตภาพรังสี 9.624 mCi (ให้รังสีแกมมาพลังงานหลัก 59.5 keV) และ ซีเซียม-137 (Cs-137) รหัสหมายเลข RINP. PH-11 ค่ากัมมันตภาพรังสี 15 mCi (ให้รังสีแกมมาพลังงานหลัก 662 keV)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.1 ก) Americium-241 (Am-241) รหัสหมายเลข RINP. PH-51 ค่ากัมมันตภาพรังสี 9.624 mCi

ข) Cesium-137 (Cs-137) รหัสหมายเลข RINP. PH-11 ค่ากัมมันตภาพรังสี 15 mCi

ระบบตรวจวัดรังสี (Detection System) จะใช้หัววัดรังสีแบบซินเทิลเลชัน NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra (Model 802-2X2) ในระบบประมวลผลสัญญาณเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Genie 2000 Spectroscopy Software สำหรับการนับวัดและวิเคราะห์สเปกตรัม ในส่วนของวัสดุลดทอนรังสีแกมมาจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ยี่ห้อ DIAMOND รุ่น Extra Fuerte (หนาพิเศษกว่าปกติ 30%) โดยมีความหนาคงที่แผ่นละ 0.03 มิลลิเมตร โดยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์รุ่นนี้ถูกเลือกใช้เนื่องจากมีความหนาที่สม่ำเสมอ มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถจัดหาได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลของความหนาของ

อะลูมิเนียมที่มีต่อการตอบสนองของหัววัด อย่างไรก็ตาม วัสดุดังกล่าวไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แทนหน้าต่างของหัววัดรังสีเชิงพาณิชย์

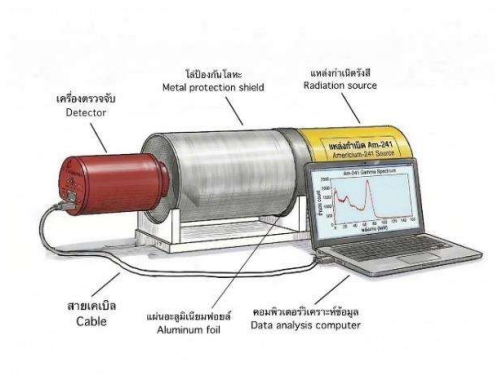


ภาพที่ 2.2 หัววัดรังสีแบบซินเทิลเลชัน NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra (Model 802-2X2) ที่ใช้ในการทดลองวัสดุลดทอน (Absorbers)

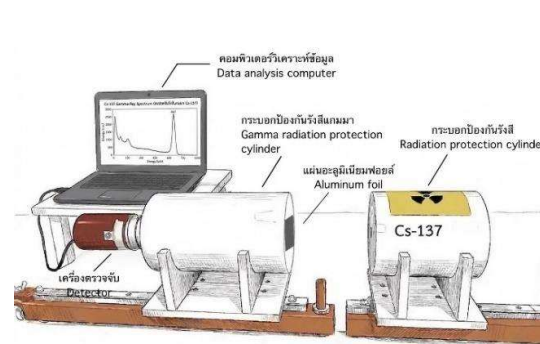


ภาพที่ 2.3 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ยี่ห้อ DIAMOND รุ่น Extra Fuerte (หนาพิเศษกว่าปกติ 30%)

การเตรียมการทดลองและขั้นตอนการดำเนินการทดลองจะจัดระบบเป็น 2 ระบบ เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีทั้งสองชนิดมีลักษณะทางกายภาพของภาชนะบรรจุที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการตรวจวัดสูงสุด จึงได้กำหนดเงื่อนไขการจัดวางตำแหน่งเพื่อความเสถียรของการทดลองดังนี้ ตำแหน่งของ Am-241 จัดวางต้นกำเนิดรังสีในลักษณะชิดติดหน้าหัววัดรังสีแกมมา เนื่องจากเป็นรังสีพลังงานต่ำ มีระยะการแผ่รังสีที่ไม่ไกลดังภาพที่ 2.4 (ก) ในส่วนของตำแหน่ง Cs-137 จะถูกจัดวางต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดห่างกันเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 2.4 (ข) หลังจากนั้นทำการ Calibrate โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีที่ทราบพลังงานแน่ชัด ได้แก่ Ba-133 และ Cs-137 ระบบผ่านโปรแกรม Genie 2000 Spectroscopy Software ก่อนเริ่มการวัด



(ก)



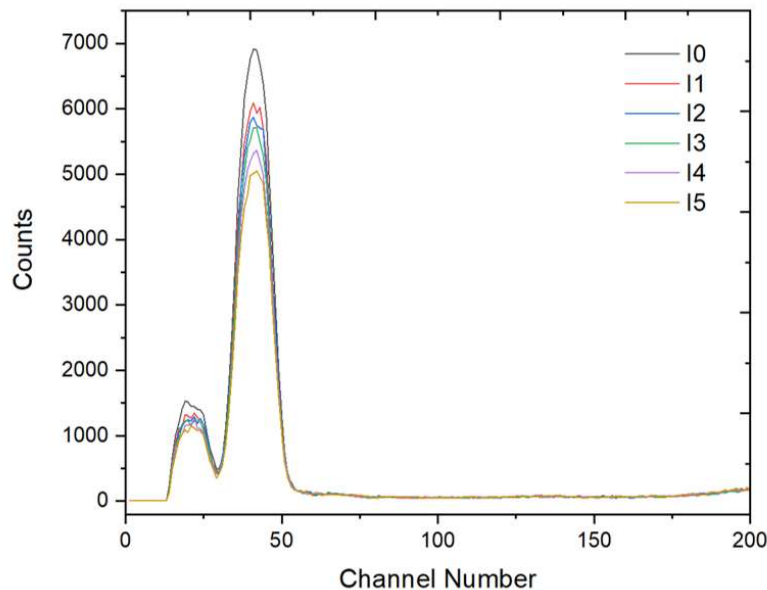
(ข)

ภาพที่ 2.4 ก) การจัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง Am-241 (พลังงานต่ำ 59.5 keV) วางชิดติดหัววัด ข) การจัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง Cs-137 (พลังงานสูง 662 keV) วางชิดที่สื่อบนแท่นวาง

3 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

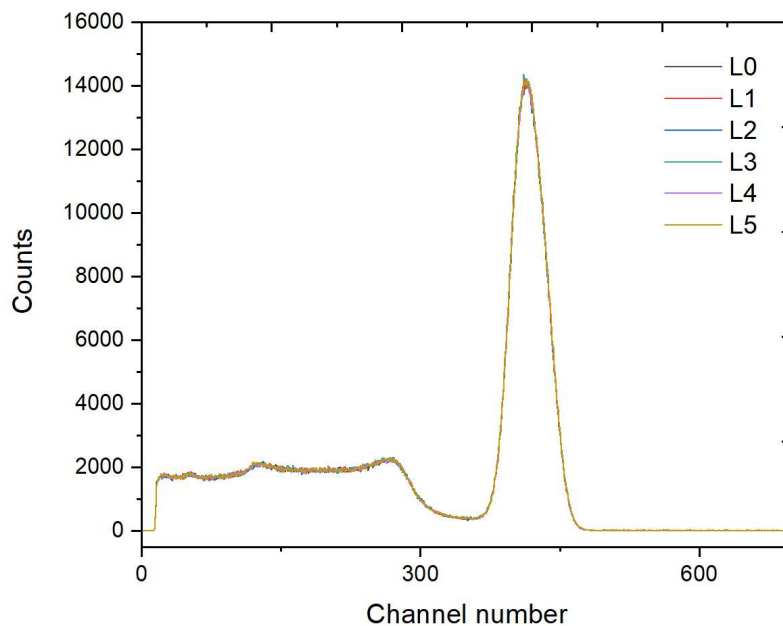
3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา

จากการทดลองวัดการลดทอนรังสีด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์หนาชั้นละ 0.03 mm จำนวน 0-5 ชั้น ได้ผลการตรวจวัดในรูปแบบสเปกตรัมความสูงพัลส์ (Pulse Height Spectrum) มีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับ (Counts) และเลขช่องสัญญาณ (Channel Number) ของรังสีแกมมาพลังงานต่ำจาก Am-241 ที่พลังงาน 59.5 keV ดังภาพที่ 3.1 โดยจะมีโฟโตพีคขึ้นที่เลขช่องสัญญาณ เมื่อผ่านตัวดูดกลืนอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ความหนาแตกต่างกัน 5 ระดับ (I0 - I5) โดยใช้เวลาในการนับวัด 500 วินาที ผลปรากฏว่าพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลัก ที่บริเวณช่องสัญญาณประมาณ 40 มีความสูงลดลงอย่างชัดเจนในลักษณะที่เป็นลำดับขั้นตามจำนวนชั้นของฟอยล์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการลดทอนรังสีที่มีประสิทธิภาพของวัสดุอะลูมิเนียมต่อรังสีแกมมาในช่วงพลังงานต่ำ



ภาพที่ 3.1 กราฟแสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของ Am-241 (59.5 keV) เมื่อผ่านแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ความหนา 0 ถึง 5 ชั้น (I0 - I5)

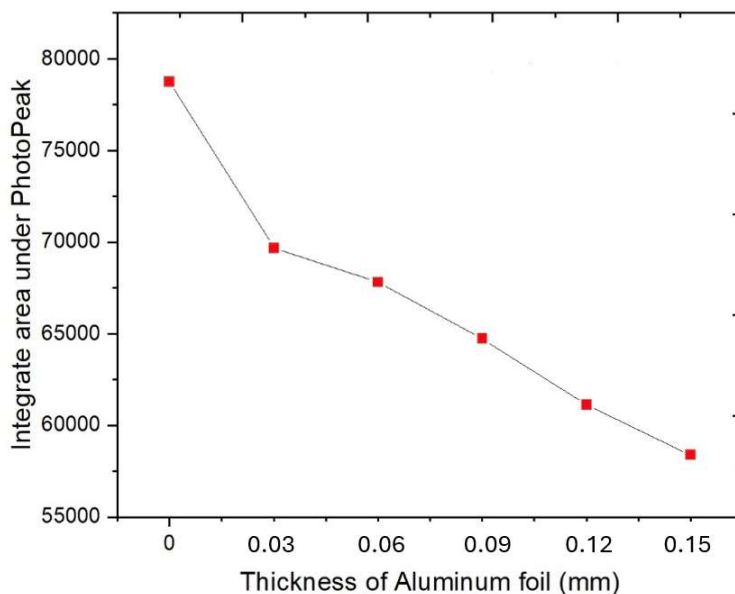
สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานสูงจาก Cs-137 ที่พลังงาน 662 keV ดังภาพที่ 3.2 โดยจะมีโฟโตพีคขึ้นที่เลขช่องสัญญาณ 430 เมื่อผ่านแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ความหนาตั้งแต่ 0 ถึง 0.15 มิลลิเมตร (L0 - L5) โดยใช้เวลาในการนับวัด 500 วินาที จากกราฟพบว่าพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลัก ที่บริเวณช่องสัญญาณประมาณ 420 ในทุกระดับความหนาของอะลูมิเนียมฟอยล์ตัวดูดกลืนมีลักษณะซ้อนทับกัน บ่งชี้ว่าความเข้มของรังสีที่ตรวจวัดได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3.2 กราฟแสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของ Cs-137 (662 keV) เมื่อผ่านแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ความหนา 0 ถึง 5 ชั้น(L0 - L5)

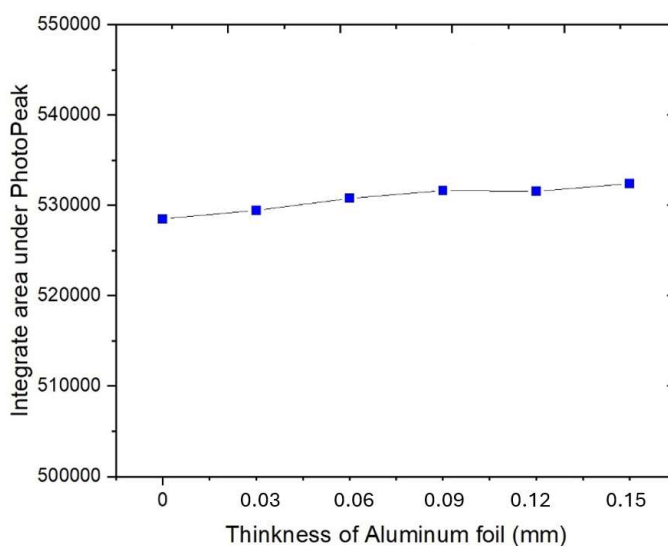
3.2 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลัก

จากการศึกษาพฤติกรรมการลดทอนของรังสีแกมมาผ่านวัสดุตัวดูดกลืนอะลูมิเนียมที่มีความหนาในระดับไมโครเมตร โดยวิเคราะห์จากกราฟพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลักของสเปกตรัมพลังงานรังสี สามารถสรุปผลได้ดังนี้ การลดทอนของรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (Am-241, 59.5 keV) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กราฟพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลัก Am-241 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 5 ชั้น โดยค่าพื้นที่ลดลงจากประมาณ 78,000 counts ลงมาอยู่ที่ประมาณ 58,000 counts ดังแสดงภาพที่ 3.3 พฤติกรรมนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของอะลูมิเนียมระดับไมโครเมตรในการดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงานต่ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ที่มีโอกาสเกิดสูงในรังสีช่วงพลังงานนี้ ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าอะลูมิเนียมฟอยล์สามารถใช้เป็นวัสดุกรองรังสีแกมมาพลังงานต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคสุทธิของ Am-241 (59.5 keV) กับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

การลดทอนของรังสีแกมมาพลังงานปานกลาง (Cs-137, 662 keV) ในทางตรงกันข้าม แสดงให้เห็นพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยกราฟพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลักของ Cs-137 มีลักษณะค่อนข้างคงที่ในทุกระดับความหนา (แกว่งตัวอยู่ในช่วงแคบ ๆ ระหว่าง 528,500 ถึง 532,500 counts) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 1% ซึ่งถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนทางสถิติของการนับวัด (Statistical Fluctuation) มากกว่าผลจากการลดทอนจริง ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าวัสดุอะลูมิเนียมฟอยล์ไม่มีผลต่อการลดทอนรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงอย่าง Cs-137 อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 3.4 และตาราง 3.1 แสดงค่าพื้นที่ใต้พีคของ Am-241 (59.5 keV) และ Cs-137 (662 keV) กับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์



ภาพที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคสุทธิของ Cs-137 (662 keV) กับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

ตารางที่ 3.1 ค่าพื้นที่ใต้พีคของ Am-241 (59.5 keV) และ Cs-137 (662 keV) กับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (mm)	พื้นที่ใต้พีคพลังงานหลัก	
	Am-241 (59.5 keV)	Cs-137 (662 keV)
0.00	78,500	532,500
0.03	69,000	531,900
0.06	67,500	531,500
0.09	64,000	530,000
0.12	62,000	528,500
0.15	58,500	527,500

4. บทสรุป

การศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลดทอนของรังสีแกมมาที่มีระดับพลังงานแตกต่างกันผ่านวัสดุตัวดูดกลืนอะลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาในระดับไมโครเมตร จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีด้วยโปรแกรม Genie 2000 สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า ระดับพลังงานของรังสีแกมมามีผลโดยตรงและมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมของการลดทอนเมื่อผ่านวัสดุตัวดูดกลืนที่มีความบางมาก ในส่วนของรังสีแกมมาพลังงานต่ำจากต้นกำเนิดรังสี Americium-241 (59.5 keV) พบว่าพื้นที่ใต้พีคสุทธิมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและชัดเจน โดยมีค่าลดลงจาก 78,753 เคาน์ ที่ความหนาเริ่มต้น ลงมาอยู่ที่ 58,379 เคาน์ เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์จนครบ 5 ชั้น หรือคิดเป็นความหนารวม 0.15 มิลลิเมตร พฤติกรรมของการลดทอนดังกล่าวเป็นผลมาจากอิทธิพลของอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีกับรังสีที่มีพลังงานต่ำและวัสดุที่มีความหนาในระดับนี้ในทางตรงกันข้าม ผลการทดลองของรังสีแกมมาพลังงานปานกลางจากต้นกำเนิดรังสี Cesium-137 (662 keV) กลับแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยพื้นที่ใต้พีคพลังงานหลักมีค่าค่อนข้างคงที่ในทุกระดับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่ปรากฏเป็นเพียงความคลาดเคลื่อนทางสถิติของการนับวัดที่น้อยมาก บ่งชี้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาไม่เกิน 0.15 มิลลิเมตร ไม่ส่งผลต่อการลดทอนรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงและอำนาจทะลุทะลวงสูงได้ โดยสรุป ข้อมูลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมฟอยล์มีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งองค์ความรู้นี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพิจารณาอิทธิพลของความหนาแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นหน้าต่างหัววัด (Entrance Window) ของหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ต่อค่าความถูกต้องและแม่นยำในการวัดรังสีที่มีระดับพลังงานแตกต่างกัน

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Abouhaswa, A. S., & Kavaz, E. (2020). Synthesis and radiation shielding characterization of boro-tellurite glasses: A comparative study with different commercial concretes and glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 152-164.
- [2] International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. Vienna, Austria: IAEA.
- [3] Kaewkhao, J., & Chanthima, N. (2016). Gamma-ray shielding properties of silicate glasses. *Journal of Physics: Conference Series*, 679(1), 012-023.
- [4] Maghrabi, A. H. (2019). Study of the gamma-ray attenuation properties of some common materials. *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 1121-1127.



- [5] Sayyed, M. I., & Lacomme, A. (2018). Comparison of radiation shielding parameters for different materials using WinXCom. *Nuclear Engineering and Technology*, 50(6), 1215-1222.
- [6] Tekin, H. O., & Singh, V. P. (2017). A comprehensive study on gamma-ray shielding properties of various aluminum alloys. *International Journal of Modern Physics*, 28(15), 175-189.