

การปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีเทคนิคส่งผ่านรังสีแกมมาสอง
พลังงาน



นายจอมพล ชุนธิวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

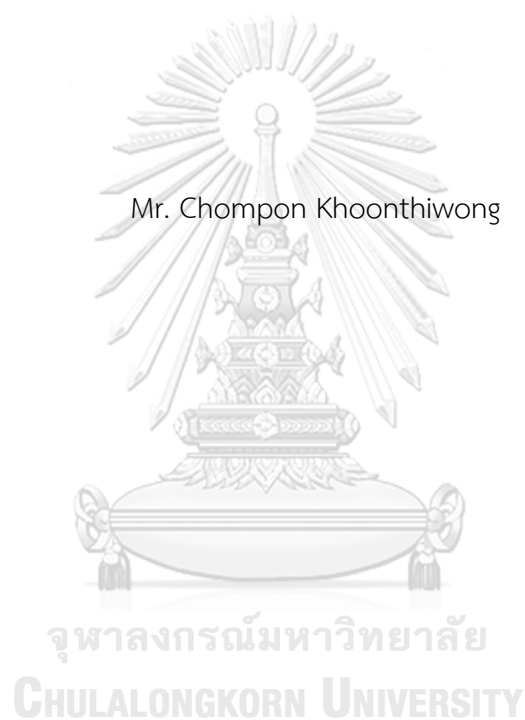
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF TECHNIQUE FOR ON-
BELT DETERMINATION OF COAL ASH USING DUAL-ENERGY GAMMA-RAY TRANSMISSION

Mr. Chompon Khoonthiwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณเถ้าในถ่านหินบน สายพานด้วยวิธีเทคนิคส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน
โดย	นายจอมพล ชุนธิวงศ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. พรรณี แสงแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. พรรณี แสงแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการ
(ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศรีนรัตน์ วงษ์ลี)

จอมพล ขุนอิวงค์ : การปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณเถ้าในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีเทคนิคส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน (IMPROVEMENT OF TECHNIQUE FOR ON-BELT DETERMINATION OF COAL ASH USING DUAL- ENERGY GAMMA- RAY TRANSMISSION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. พรรณี แสงแก้ว, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, 98 หน้า.

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานสำหรับการหาปริมาณเถ้าในถ่านหินบนสายพานลำเลียง ซึ่งโดยทั่วไปเทคนิคนี้มักใช้รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241 (^{241}Am) รังสีแกมมาพลังงาน 356 keV จากต้นกำเนิดรังสีแบเรียม-133 (^{133}Ba) และรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 (^{137}Cs) และใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดโซเดียมไอโอไดต์(ทลเลียม) ในการวัดรังสีแกมมาที่ส่งผ่านตัวอย่าง แต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการนำหัววัดรังสีชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) มาใช้แทนหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) เนื่องด้วยหัววัดรังสีชนิด BGO มีประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาพลังงานรังสีสูงได้ดีกว่า ซึ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพหัววัดรังสีแกมมาพลังงานรังสีสูงทั้งสองชนิด พบว่า หัววัดรังสีชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว มีค่าประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV และ 662 keV 36.11% และ 11.04% ตามลำดับ เมื่อออกแบบระบบวัดให้มีคอลิเมเตอร์สองชั้นของตะกั่วและทองแดงขนาดรู 3 มม. ครอบหัววัดรังสี ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการวัดรังสีนั้นเป็น 20.53% และ 10.49% ตามลำดับ หัววัดรังสีชนิด BGO มีข้อดีกว่าหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ในเรื่องของกรไม่ปรากฏ Iodine escape peak ในหัววัด ที่จะส่งผลกระทบต่อการวัดรังสีระดับพลังงาน 59.6 keV ได้ และเมื่อทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราส่วนฟังก์ชันลือกของการวัดรังสีที่ผ่านตัวอย่างถ่านหินของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อการวัดของรังสีแกมมาพลังงานสูง กับ ปริมาณเถ้าในถ่านหินที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานทางเคมี ได้สมการเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ที่มีค่าแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของการสอดคล้องกันดีของข้อมูล และโดยการแทนค่าในสมการเชิงเส้นของกราฟเปรียบเทียบนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหินอื่นๆ จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้จากการวัดรังสีแกมมาแบบส่งผ่านสองพลังงานที่พัฒนามานี้ และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางเคมีนั้น มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง -12.76 ถึง +9.99

ภาควิชา	วิศวกรรมนิวเคลียร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770133321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: COAL ASH , DUAL-ENERGY GAMMA-RAY TRANSMISSION / COAH ASH / การปรับปรุงเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน การหาปริมาณเถ้าในถ่านหินบนสายพานลำเลียง

CHOMPON KHOONTHIWONG: IMPROVEMENT OF TECHNIQUE FOR ON-BELT DETERMINATION OF COAL ASH USING DUAL- ENERGY GAMMA- RAY TRANSMISSION. ADVISOR: PHANNEE SAENGAEW, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, M.Eng, 98 pp.

The purpose of this research is to improve the gamma ray transmission technique used for determining of ash contents in coal on conveyor belt by replacing NaI(Tl) detector with BGO detector First of all, a 2" x 2" BGO detectors were tested for measurement of 60, 356 and 661.7 keV gamma-rays from ^{241}Am , ^{133}Ba and ^{137}Cs respectively in comparison to a 2" x 2" NaI(Tl) detector normally used in the system. The peak detection efficiencies at 59.6 and 661.7 keV without detector collimator were found to be 36.11 and 11.04 % respectively. With lead/copper collimator surrounded the detectors and 3 mm drilled hole through its center of the collimator, the peak detection efficiencies at 59.6 and 661.7 keV were found to be 20.53 and 10.49 % respectively. However, the detection efficiencies at 356 keV were not compared because the BGO detector could not resolved the 356 keV peak from its neighboring peaks. For the NaI(Tl) detector, it was also found that there was an iodine escaped peak at 30 keV close to the 60 keV peak which could increase uncertainty in measurement of the 60 keV peak area. The calibration curve was finally drawn between the logarithm ratios of intensity transmittance of low and that of high-energy gamma-rays using the known %ash contents of the coal standard samples obtained from the standard chemical technique. By using the calibration equation, the unknown % ash contents of 6 coal samples have been analyzed by the newly developed technique and the discrepancies of the results were found to be in the range of -12.76 to +9.99 in comparing with the results obtained from the standard chemical technique.

Department: Nuclear Engineering Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุน 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	12
สารบัญภาพ	14
บทที่ 1	17
บทนำ.....	17
1.1 ความเป็นมา.....	17
ความสำคัญของปัญหา.....	18
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	18
1.4. ขอบเขตการวิจัย	18
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	19
1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	19
1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 2	21
ถ่านหิน รังสีแกมมาและหัววัดรังสี	21
2.1 ถ่านหิน.....	21
2.1 ถ่านหิน[1].....	21
2.2 รังสีแกมมา	22
2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)	32
2.4 เทคนิคการหาปริมาณถ่านหินโดยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน.....	36

2.5 หัววัดรังสี	39
บทที่ 3	43
การปรับปรุงปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสี แกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมีทเจอร์มานิต (BGO).....	43
3.1 แนวคิดในการปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่าน รังสีแกมมาสองพลังงาน	43
3.2 วัสดุและอุปกรณ์วิจัย.....	43
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	45
1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด (BGO)กับหัววัดรังสี แกมมาชนิด NaI(Tl) ที่พลังงาน 59.6, 356 และ 662 keV โดยติดตั้งอุปกรณ์ ภาพ ที่ 18 โดยไม่มีตัวกำบังรังสีที่ต้นกำเนิดรังสีและคอลิเมเตอร์ นำต้นกำเนิดรังสีที่ ต้องการเปรียบเทียบการวัดประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่ระดับพลังงานต้องการมา วางไว้หน้าหัววัดรังสีทำการวัดรังสีระยะเวลา 600 วินาที จำนวน 3 ครั้ง และ บันทึกผล.....	45
2. เลือกหัวรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) จากการเปรียบเทียบ หัววัดรังสี เพื่อเปรียบเทียบการวัดรังสีด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน	45
3. เตรียมตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานและตัวอย่างถ่านหินอื่น ๆ โดยนำถ่านหินมาบด อย่างละเอียดแล้วคัดแยกถ่านหินบางส่วน เพื่อทำตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานที่ทราบ ค่าปริมาณแก้วภายในถ่านหินที่แน่นอน นำถ่านหินที่คัดแยกไว้ไปวิเคราะห์ปริมาณ แก้วในถ่านหินด้วยเทคนิคมาตรฐาน[7].....	46
4. นำตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณแก้วในถ่านหินวัดการทะลุผ่านของ รังสีด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด (BGO)	46

5. นำตัวอย่างถ่านหินจำนวน 6 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน แล้วนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แทนในสมการที่ได้จากการปรับเทียบด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน ในข้อ 4.2 เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคมาตรฐาน แสดงตารางที่ 14..... 46

บทที่ 4 47

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง 47

4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ที่พลังงาน 59.6, 356 และ 662 keV..... 47

4.1.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV..... 47

4.1.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้วกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ที่ขนาด 2 นิ้ว X 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV 49

4.1.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ที่ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba -133 ที่ระดับพลังงาน 356 keV 51

4.1.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 ที่ระดับพลังงาน 356 keV 53

4.1.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 662 keV..... 55

4.1.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 662 keV 57

4.1.7 ผลการทดลองการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV และ 662 keV ตามลำดับ โดยวัดรังสีแกมมาไม่ผ่านคอลลิเมเตอร์กับวัดรังสีแกมมาผ่านคอลลิเมเตอร์...	59
4.1 ผลทดสอบเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแก้วที่แน่นอน ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO.....	62
4.1.1 ผลการทดลองเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแก้ว 7.87 เปอร์เซ็นต์ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO..	62
4.1.2 ผลการทดลองเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแก้ว 37.1 เปอร์เซ็นต์ ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด บิสมัทเจอร์มาเนต (BGO).....	65
4.1.3 ผลการทดลองการทะลุผ่านของรังสีแกมมาผ่านตัวอย่างถ่านหินที่ทราบปริมาณแก้วในถ่านหินด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานผ่านคอลลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGOเพื่อนำมาใช้สร้างสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาสองพลังงานกับปริมาณแก้วในถ่านหิน.....	68
4.2 ผลทดลองวัดหาปริมาณแก้วในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน	70
บทที่ 5	71
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
รายการอ้างอิง	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	81
ภาคผนวก ค	85

ภาคผนวก ง..... 94

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 98



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด.....	23
ตารางที่ 3 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับชนิดหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL)ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว.....	49
ตารางที่ 4 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด บิสมีทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	51
ตารางที่ 5 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 356.01 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมา ชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว.....	53
ตารางที่ 6 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 356.01 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีแกมมา ชนิดบิสมีทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว.....	55
ตารางที่ 7 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 661.67 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีแกมมา ชนิดบิสมีทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว	57
ตารางที่ 8 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 661.67 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีแกมมา ชนิดบิสมีทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	59
ตารางที่ 9 ข้อมูลของสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 59.6 และ 661.7 keV พลังงานเมื่อวัดกับ หัววัดรังสี BGO เปรียบเทียบกับหัววัดรังสี NaI(TL) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เท่ากัน โดยวัดผ่านคอลลิเม เตอร์.....	62
ตารางที่ 10 ข้อมูลอัตราส่วนความเข้มของรังสีแกมมาสองพลังงานทะลุผ่านตัวอย่างถ่านหินที่มี ปริมาณถ่าน ร้อยละ 7.87.....	63

ตารางที่ 11 ข้อมูลอัตราส่วนความเข้มของรังสีแกมมาสองพลังงานทะลุผ่านตัวอย่างถ่านหินที่มี ปริมาณเถ้า 37.1 เปอร์เซ็นต์	66
ตารางที่ 12 ข้อมูลผลการทดลองของถ่านหินที่ทราบปริมาณเถ้าในถ่านหินที่แน่นอนวัดด้วย เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานโดยวัดรังสีผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO.....	69
ตารางที่ 13 ผลการทดลองวัดหาปริมาณเถ้าในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน.....	71



สารบัญภาพ

ภาพที่ 1 การแบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดตามคามยาวคลื่น[9].....	24
ภาพที่ 2 แผนผังการสลายตัว Cs-137[10]	25
ภาพที่ 3 แผนผังการสลายตัว Am-241[11]	25
ภาพที่ 4 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก[12].....	26
ภาพที่ 5 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ[8].....	27
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า n กับพลังงานของรังสีแกมมา[8].....	28
ภาพที่ 7 การเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์[13]	29
ภาพที่ 8 The Compton cross-section per electron as a function of gamma ray energy[14].....	31
ภาพที่ 9 การเกิดปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน[15].....	32
ภาพที่ 10 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่สัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง[8].....	33
ภาพที่ 11 สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตะกั่วกับพลังงานรังสีแกมมา[16].....	35
ภาพที่ 12 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของธาตุบางชนิด[17]	36
ภาพที่ 13 แผนภาพระบบวัดปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานโดยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน.....	38
ภาพที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาของเนื้อถ่านหินและแก้วถ่านหินในช่วงพลังงาน.....	38
ภาพที่ 15 โครงสร้างหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน[20].....	41
ภาพที่ 16 แสดงคุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดต่าง ๆ[8].....	41
ภาพที่ 17 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวัดของหัววัดรังสีชนิด BGO กับ NaI(Tl)[8]	43
ภาพที่ 18 แผนผังการจัดเรียงของระบบการตรวจวัดรังสีแกมมาแบบส่งผ่านตัวอย่าง	45

ภาพที่ 19 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว	48
ภาพที่ 20 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	50
ภาพที่ 21 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว	52
ภาพที่ 22 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	54
ภาพที่ 23 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว	56
ภาพที่ 24 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	58
ภาพที่ 25 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV และ 661.7 keV ตามลำดับ เมื่อวัดรังสีแกมมาสองพลังงานไม่ผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว โดยวัดรังสีแกมมาไม่ผ่านคอลิเมเตอร์	60
ภาพที่ 26 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 เมื่อวัดด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน โดยผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว	61
ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าของถ่านหิน ร้อยละ 7.87	64
ภาพที่ 28 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูง ต่อ ความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 7.87	65

ภาพที่ 29 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่อความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าของถ่านหิน ร้อยละ 37.1.....	67
ภาพที่ 30 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูง ต่อ ความหนาของถ่านหินเชิงมวล ของถ่านหินมีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 37.1	68
ภาพที่ 31 ฟังก์ชันลือกของรังสีทะลุที่ผ่านถ่านหินของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูงกับปริมาณเถ้าในถ่านหิน.....	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ถ่านหิน[1] จัดเป็นหินตะกอนประเภทหนึ่งเกิดมาจากซากพืช มีลักษณะแข็ง แต่เปราะ มีสีน้ำตาลถึงดำ มีทั้งผิวดำ และผิวด้าน ธาตุองค์ประกอบหลักของถ่านหิน ได้แก่ ธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และกำมะถัน และอาจมีธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ เช่น พรอท สารหนู ซีลีเนียม โครเมียม นิกเกิล ทองแดง และแคดเมียม ถ่านหินสามารถแบ่งตามอายุ การเกิดหรือปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบจากน้อยไปมาก ได้แก่ พีต ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ ข้อดีของถ่านหินในด้านเชื้อเพลิง คือ ราคาถูก มีเสถียรภาพ การขนส่งปลอดภัยและมีปริมาณสำรองมาก เมื่อเทียบกับ ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันโดยสามารถพบแหล่งถ่านหินในทุกทวีป กระจายอยู่กว่า 70 ประเทศทั่วโลก ดังนั้นถ้ามีวิธีการนำมาใช้ที่เหมาะสมก็สามารถใช้ได้ยาวนานไม่น้อยกว่า 200 ปี เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะหมดไปในระยะเวลา 40-60 ปี ประเทศที่มีปริมาณสำรองถ่านหิน มากที่สุด 5 อันดับแรก ของโลก (สถิติปี 2558) ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา รัสเซีย จีน ออสเตรเลีย และอินเดีย จากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสำรองมากกว่าเชื้อเพลิงอื่นและกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วโลก จึงทำให้มีราคา ที่ค่อนข้างต่ำและมีเสถียรภาพ แม้ว่าถ่านหินจะมีความสะอาดน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นจึงทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีความก้าวหน้า โดยสามารถวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินให้มีความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพเพื่อลดมลพิษจากการเผาไหม้ ดังนั้นประเทศต่าง ๆ ในโลก จึงนิยมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ จากการคาดการณ์ขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency : IEA) ประมาณการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงต่าง ๆ ในสัดส่วนที่สูงขึ้นก็ตาม และถ่านหินยังคงเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้า โดยคาดการณ์ว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินเพิ่มเป็น 1,760 ล้านเมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2563 สำหรับในประเทศไทยใช้ถ่านหินผลิตไฟฟ้ารองจากการใช้ก๊าซธรรมชาติ คิดเป็นร้อยละ 19.10 จากการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในประเทศของทั้งหมดในปี 2558

การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษา สํารวจและพัฒนา เพื่อนำไปสู่การตัดสินใจ นำมาใช้เหมาะสมและคุ้มค่า โดยถ่านหินที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ จะมีคุณสมบัติและคุณภาพต่างกัน ทั้งทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และด้านการเผาไหม้ การวิเคราะห์ถ่านหินในทางเคมีนั้นต้องอาศัยเวลาในการวิเคราะห์ มากขึ้นตอน สารเคมีหลายชนิด และตัวอย่างไม่สามารถกลับมาวิเคราะห์ซ้ำได้ จึงมีการพัฒนานำเทคนิคทางนิวเคลียร์มาใช้วิเคราะห์ถ่านหิน สามารถย่นระยะเวลาในการวิเคราะห์ ขั้นตอนวิธีการน้อยลง สามารถนำตัวอย่างเดิมกลับมาวิเคราะห์หลาย ๆ ครั้งได้ เทคนิคที่ใช้ก็คือ เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา 2 พลังงานส่งผ่านถ่านหิน ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านออกมา มีความเข้มลดลง ตามปริมาณและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจากส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ในถ่านหิน

ความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์ถ่านหินโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงรังสีสูง เพื่อให้สามารถทะลุผ่านถ่านหินไปได้ ซึ่งส่งผลต่อการป้องกัน ควบคุม และความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อความปลอดภัยในการทำงานควรมีระยะเวลาในการทำงานกับต้นกำเนิดรังสีให้น้อยลง จึงได้เลือกได้เลือกใช้หัววัดรังสีบิสมัทเจอร์มานิต (BGO) ในการวิเคราะห์ถ่านหิน แทนที่หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (NaI) ที่นิยมนำมาใช้ และด้วยหัววัดรังสีบิสมัทเจอร์มานิต (BGO) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (NaI) ในระดับพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่พลังงานไม่เกิน 1 MeV จึงสามารถใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีความแรงน้อยลง เวลาที่ใช้ในการทำงานลดลง ป้องกันอันตรายง่ายขึ้น และมีความเสี่ยงกับการทำงานด้านรังสีลดลงไปด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มานิต (BGO)

1.4. ขอบเขตการวิจัย

1.เปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มานิต (BGO) กับหัววัดรังสีแกมมาชนิดโซเดียมไอโอไดต์ (ทลเลียม) ที่พลังงาน 60, 356 และ 662 keV พร้อมทั้งข้อดี ข้อเสียในด้านอื่น ได้แก่ การรบกวนของ escape peak และการรบกวนของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวจากตะกั่วที่ใช้กำบังรังสีเป็นต้น

2.ทดสอบเทคนิคการหาปริมาณถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณถ่านหินที่แน่นอน ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มานิต (BGO)

3. ทดลองวัดหาปริมาณเถ้าในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพห้ววัดรังสีบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO)กับห้ววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (Nal) ด้วยต้นกำเนิดรังสี Am-241, Ba-133 และ Cs-137
2. จากตอนที่ 1 เลือกขนาดห้ววัดที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของห้ววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO)กับห้ววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม) จากการเปรียบเทียบขนาดห้ววัดรังสี
3. นำถ่านหินมาบด และคัดแยกถ่านหินบางส่วนที่บดแล้วมาทดสอบหาปริมาณเถ้าถ่านหินด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 3174
4. นำตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานกับถ่านหินที่บดแล้วนำมาวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ด้วยห้ววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO)กับห้ววัดรังสีแกมมาชนิดโซเดียมไอโอไดด์(Nal)
5. บันทึกผล สร้างสมการเทียบเคียงและสรุป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้ข้อมูลทางเทคนิคที่ใช้สำหรับการหาปริมาณเถ้าของถ่านหินด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน ที่ใช้ห้ววัดรังสีชนิดบิสมัทเจอร์มาเนตดีกว่าห้ววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม)ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เมื่อปี 1989 กิตติ จันทรตรี[2] ได้ทำการศึกษาหาปริมาณเถ้าในถ่านหินลิกไนต์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานจากต้นกำเนิดรังสี Am-241 กับ ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ซึ่งใช้ห้ววัดรังสีแกมมาชนิดโซเดียมไอโอไดด์ จำนวน 54 ตัวอย่าง พบว่าเถ้าในถ่านหินลิกไนต์ที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณของเถ้าอยู่ระหว่าง 10 – 70 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้เทคนิคนี้มาวิเคราะห์พบว่ารวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง ถ่านหินที่นำมาวิเคราะห์สามารถกลับมาใช้วิเคราะห์ใหม่ได้ แต่ในการใช้งานต้องมีการป้องกันกัมตภาพรังสีที่ปลอดภัย
2. ในปี 1999R. A. M. Rizk, A. H. El-kateb และA. M. Abdul-kader[3] ได้พัฒนาการวิเคราะห์เถ้าของถ่านหินบนสายพานด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังเดียวและสองพลังงาน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีหลากหลายพลังงาน พบว่าเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

สองพลังงานมีความผิดพลาดน้อยกว่าเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานเดียว ซึ่งเทียบจากการวิเคราะห์ทางเทคนิคเคมี

3. ในปี 2003 M. Yazdia และ S.A. Esmailnia[4] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์ โดยใช้เทคนิคทางรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา 2 พลังงาน จากต้นกำเนิดรังสี Am-241 กับ ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดโซเดียมไอโอไดด์ ผลที่ได้พบว่าเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานสำหรับการวัดปริมาณของเถาในถ่านหิน นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีในการวิเคราะห์ และมีรวดเร็ว
4. ในปี 1990 B.D. Sowerby และ J.S. Watt [5] ได้พัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์ในการวิเคราะห์ถ่านหินแบบออนไลน์ เทคนิคเหล่านี้รวมถึงการกำหนดเถาถ่านหินบนสายพาน โดยใช้ส่งผ่านรังสีเพื่อวิเคราะห์ถ่านหินบนสายพาน และการวิเคราะห์คาร์บอนที่ในถ่านหินไม่ผ่านการเผาไหม้ การใช้เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้นและมีผลประโยชน์อย่างมาก
5. ในปี 1985 J S Watt และ E J Steffner[6] ใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานมาประยุกต์ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ถ่านหินและอุตสาหกรรมสินแร่ พบว่าเทคนิคนี้มีศักยภาพมากสำหรับการวิเคราะห์แร่และถ่านหินในอุตสาหกรรม จากคำนวณได้แสดงให้เห็นประโยชน์ของเทคนิคการส่งผ่านสองพลังงานในการจำแนกคุณภาพของแร่และถ่านหินที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งเทคนิคนี้มีความสำคัญต่อในอนาคต

บทที่ 2

ถ่านหิน รังสีแกมมาและหัววัดรังสี

2.1 ถ่านหิน

2.1 ถ่านหิน[1]

ถ่านหิน เป็นแหล่งพลังงานที่นิยมใช้กันมานานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการสำรวจ การผลิต การพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศไทยใหญ่ๆ ทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศในยุโรป การกำหนดราคาในการซื้อขายถ่านหินนั้นคือคุณภาพของถ่านหินนั่นเอง สมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา[7] (ASTM) ได้จำแนกถ่านหินเป็น 4 ลำดับชั้น โดยเรียงจากลำดับจากถ่านหินที่มีคาร์บอนมากไปหาถ่านหินที่มีคาร์บอนน้อย ได้แก่

1. ถ่านหินแอนทราไซต์

เป็นถ่านหินจัดเป็นที่มีคุณภาพมากที่สุด มีลักษณะสีดำเป็นเงามัน มีความวาว มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป ปริมาณความชื้นในถ่านหินต่ำและมีค่าความร้อนสูง

2. ถ่านหินบิทูมินัส

ถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินจัดเป็นที่มีคุณภาพรองจากถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ มีลักษณะแข็ง เนื้อแน่น และประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 80-90

3. ถ่านหินซับบิทูมินัส

ถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อถ่านหินมีความอ่อนตัว ไม่แข็ง มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 70 -80

4. ถ่านหินลิกไนต์

ถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เป็นถ่านหินที่อาจมีซากพืชเหลือปรากฏให้เห็นอยู่เล็กน้อย มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ มีปริมาณความชื้นสูงและมีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างน้อย ถึงร้อยละ 30-70 จัดเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด

ถ่านหิน	ปริมาณความร้อน	ปริมาณความชื้น	ปริมาณซัลเฟอร์	ปริมาณกำมะถัน
1. แอนทราไซต์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
2. บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
3. ซับบิทูมินัส	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
4. ลิกไนต์	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ-สูง

การใช้ประโยชน์จากถ่านหิน

ถ่านหินที่นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมการใช้ภายในประเทศไทยมี 2 ภาค ได้แก่ การผลิต คือ ภาคการผลิตไฟฟ้า (Power Sector) และภาคอุตสาหกรรม (Non-power Sector or Industrial Sector) เชื้อเพลิงถ่านหินจะถูกนำไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อนำความร้อนไปผลิตไฟฟ้า หรือผลิตไอน้ำ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โรงบ่มยาสูบ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เคมีภัณฑ์ ฯลฯ ส่วนเถ้าของถ่านหินนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาเข็ม ท่อ พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตอัด (Rolling Compact Concrete, RCC)[8]

2.2 รังสีแกมมา

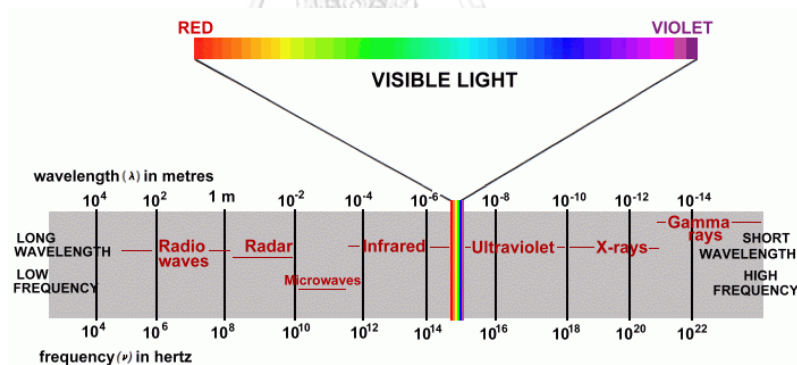
การใช้ประโยชน์จากต้นกำเนิดรังสีต้องมีความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติของรังสีที่นำมาใช้ และความเข้มของรังสีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางที่ผ่าน รวมทั้งผลที่เกิดจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในตัวกลางนั้น ๆ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการใช้รังสีแกมมาที่ต่างกัน 2 พลังงาน โดยรังสีแกมมา[9]จัดเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง เท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที โดยไม่มีมวล ไม่มีประจุไฟฟ้า สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่น ได้ดังนี้

$$E = \square \square \quad (2.1)$$

$$E = \square \frac{\square}{\lambda} \quad (2.2)$$

- เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)
- คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 4.136×10^{-15} eV.s)
- คือ ความถี่ของคลื่น (Hz)
- c คือ ความเร็วแสง (2.9979×10^8 m/s)
- λ คือ ความยาวคลื่น (m)

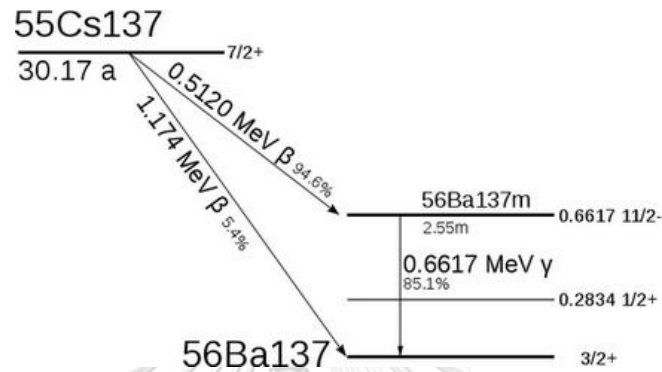
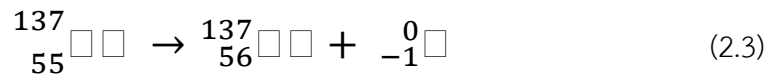
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกโดยใช้ความยาวคลื่นเป็นตัวกำหนดตามความยาวคลื่น จากความยาวคลื่นน้อยไปหาความยาวคลื่นมาก ได้ดังนี้ รังสีแกมมา (γ -ray) รังสีเอกซ์ (X-ray) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) แสง (Visible light) แสงอินฟราเรด(Infrared) ไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นวิทยุ (Radio wave) ดังรูป 2.1



ภาพที่ 1 การแบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดตามความยาวคลื่น[10]

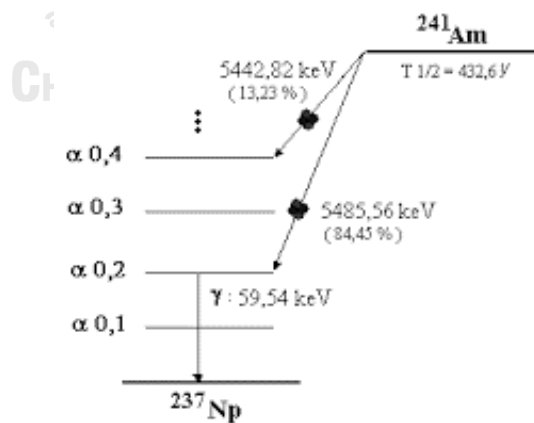
รังสีแกมมากำเนิดจากภายในนิวเคลียสของอะตอมหรืออยู่ในสถานะที่ไม่คงที่จึงทำให้ปลดปล่อยพลังงานออกมาที่อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นที่ปล่อยออกมา คือ รังสีแกมมา ในงานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา 2 ชนิดที่ให้พลังงานต่างกัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 กับ Am-241 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ได้จากการแยกตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่ได้จากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้งานไปแล้ว โดยมีค่า yield อยู่ที่ 6.2 % ใน Pu-239 Cs-137 มีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี โดยสลายตัวให้รังสีบีต้า แล้วกลายเป็นธาตุ Ba-137m ที่มีค่าครึ่งชีวิต 2.6 วินาที (m=metastable state) ต่อจากนั้น

Ba-137m จะสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV กลายเป็นธาตุ Ba-137 ที่สภาวะปกติ โดยมีค่า Exposure rate เท่ากับ 0.33 R/hr-Ci ในอากาศที่ระยะ 1 เมตร จากต้นกำเนิดรังสี



ภาพที่ 2 แผนผังการสลายตัว Cs-137[11]

ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 มีค่าครึ่งชีวิต 458 ปี โดยสลายตัวให้รังสีแอลฟาที่มีพลังงาน 5.388 MeV (1%) 5.443 MeV (13%) 5.486 MeV (85%) ให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 59.54 keV (36%) ที่มีค่า yield อยู่ที่ 36 % และรังสี x-rays (จาก Ba-137m) 18 keV (18%) และ 14 keV (13%) กลายเป็นธาตุ Np-237



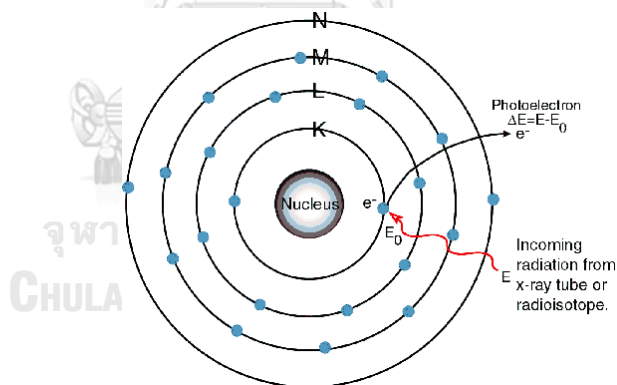
ภาพที่ 3 แผนผังการสลายตัว Am-241[12]

อันตรกิริยารังสีแกมมามีหลายแบบโดยที่สำคัญมีอยู่ 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton effect) และแพร์โปรดักชัน (Pair production)

2.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากรังสีแกมมาทำอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางแล้ว รังสีแกมมาหายไป เนื่องจากถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนหลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) โดยมีพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (E_k) มีค่าเท่ากับ พลังงานของรังสีแกมมา (E_γ) ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน (Binding energy) พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนก็คือ พลังงานไอออไนเซชัน (ionization) ของอิเล็กตรอนนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$E_k = E_\gamma - E_b \quad (2.4)$$



ภาพที่ 4 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก[13]

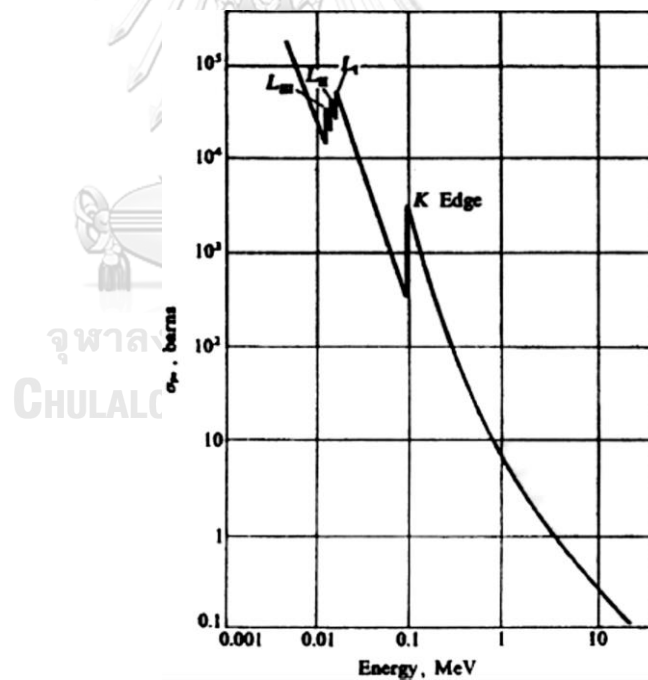
ถ้าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนเกิดกับอิเล็กตรอนวงใน ๆ เมื่ออิเล็กตรอนวงในหลุดจากอะตอม อิเล็กตรอนจากวงโคจรนอกเข้าไปแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของ”รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)” ซึ่งมีพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละธาตุ

ถ้าให้ σ_{pe} เป็นภาคตัดขวางของการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมา มีความเข้ม I ตกกระทบเป้าที่มีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ต่อปริมาณเป้าจะคำนวณได้จากสมการ

$$F_e = IN\sigma_{pe} \quad (2.5)$$

F_e	คือ	อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ต่อปริมาตร ($\text{cm}^{-3} - \text{sec}^{-1}$)
I	คือ	ความเข้มของรังสีแกมมา (γ -photons/ cm^2 -sec)
N	คือ	จำนวนอะตอมต่อปริมาตร (atoms/ cm^3)

ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา โดยที่ค่าของ σ_{pe} จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นและค่า σ_{pe} จะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง



ภาพที่ 5 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ [9]

รูปที่ 8 แสดงค่า σ_{pe} ของตะกั่วที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า σ_{pe} ของตะกั่วจะมีค่าสูงและสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง นั่นก็หมายความว่ารังสีแกมมา

พลังงานต่ำจะทะลุทะกั่วได้ยาก ค่า K_{edge}, L_I, L_{II} และ L_{III} โดยมีความหมายดังต่อไปนี้ คือ K_{edge} เป็นพลังงานค่าพลังงานที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่า ionization energy ของ K - electron พอดี อะตอมจะมีค่า σ_{pe} สูงขึ้นกว่าในพลังงานที่ใกล้เคียงกัน ในกรณีที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่า K_{edge} ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ กับ K - electron ส่วน L_I, L_{II} และ L_{III} ก็ทำนองเดียวกัน คือ เป็นจุดที่เหมือนกับ ionization energy ของ L - electron ในวงโคจรย่อย (sub shell) ที่ 1,2,3 ตามลำดับ

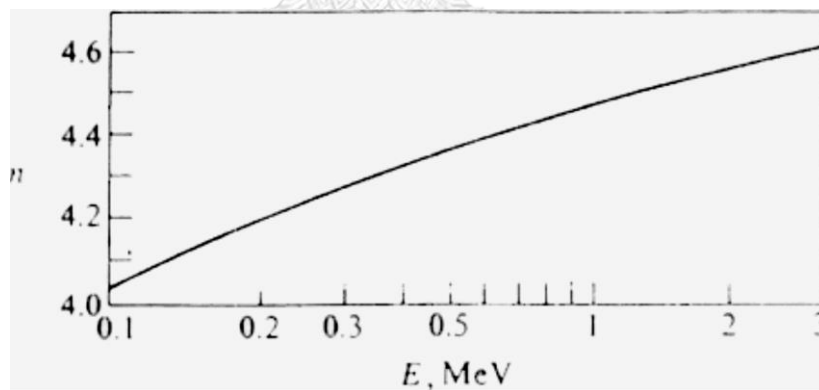
ส่วนช่วงที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่า K_{edge} ขึ้นไป ค่า σ_{pe} จะลดลงตามค่าพลังงาน ดังสมการ

$$\sigma_{pe} \approx E^{-3} \quad (2.6)$$

นอกจากนี้ค่า σ_{pe} ยังขึ้นอยู่กับค่า เลขอะตอม (Z) ของตัวกลางอย่างมาก ดังสมการ

$$\sigma_{pe} \approx Z^n \quad (2.7)$$

ค่า n จะแปรผันตามสมการพลังงานของรังสีแกมมา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9

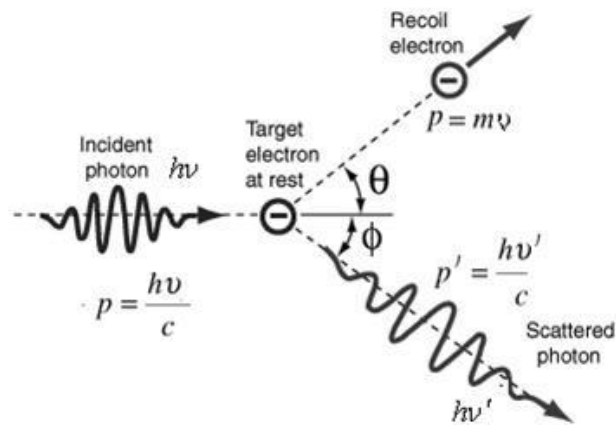


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า n กับพลังงานของรังสีแกมมา[9]

การที่ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวกลางอย่างมาก ดังนั้นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง จึงใช้กำบังรังสีแกมมาได้ดี รูปที่ 10 แสดงให้เห็นได้ว่า อะลูมิเนียม เหล็ก ดีบุก และตะกั่ว เมื่อนำมากำบังรังสีแกมมาได้ดีแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับเลขอะตอมเป็นสำคัญ การเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ เป็นอันตรกิริยาที่พึงประสงค์ในการกำบังรังสีแกมมาและการวัดรังสี ทั้งนี้เพราะว่ารังสีแกมมาจะหายไปเป็นอิเล็กตรอน

2.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton Effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

เป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาชนแบบยืดหยุ่นกับอิเล็กตรอนของอะตอม โดยที่พลังงานและโมเมนตัมก่อนชนและหลังชนเท่ากัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 11 ถ้า E เป็นพลังงานโฟตอนและ λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีแกมมา E' เป็นพลังงานโฟตอนที่กระเจิงออกไป และทำมุม θ เป็นมุมที่โฟตอนกระเจิงออกไปจากแนวเดิม พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงออกสามารถคำนวณได้จากกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม ดังนี้



ภาพที่ 7 การเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์[14]

$$E = \frac{EE_e}{E(1 - \cos\theta) + E_e} \quad (2.8)$$

แทน $E_e = m_e c^2$ โดยมีค่าเท่ากับ 0.511 MeV

$$\Delta\lambda = \lambda'$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{\square} (1 - \cos\theta) \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\lambda_c = \frac{\square}{m_e c}$$

$$\lambda_c = 2.426 \times 10^{-10} \text{ เซนติเมตร}$$

ซึ่งเราเรียกว่า “Compton Wavelength”

จากสมการที่ 2.8 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E' = \frac{E}{\frac{E(1-\cos\theta)+1}{m_0c^2}} \quad (2.10)$$

สำหรับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเป็น E_k

$$E_{\square} = E - \gamma \quad (2.11)$$

$$= \square \frac{\left(\frac{E}{m_0c^2}\right)(1-\cos\theta)}{\left(\frac{E}{m_0c^2}\right)1-\cos\theta+1} \quad (2.12)$$

อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์สูงสุด เมื่อ $\cos\theta = -1$ หรือ $\theta = 180$ องศา ซึ่งหมายถึง การที่โฟตอนกระเจิงกลับ ในกรณีนี้อิเล็กตรอนมีพลังงาน

$$E_{k \max} = \frac{E}{\frac{E}{m_0c^2}+1} \quad (2.13)$$

ถ้าเมื่อ $\theta = 0$ อิเล็กตรอนจะมีความเร็วเป็นศูนย์ โฟตอนจึงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยพลังงานและความถี่เดิม ซึ่งที่พิจารณามานี้เป็นกรณีการกระเจิงเดี่ยว และใช้กลศาสตร์นิวตันวิเคราะห์การเคลื่อนที่ โดยที่จะค้ำประกันว่าปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ มีส่วนในการดูดกลืนของรังสีแกมมาในสสารโดยรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนของอะตอมโดยตรง จึงสามารถที่จะคิดว่าภาคตัดขวาง(cross section)ของการกระเจิงแบบคอมป์ตันเป็นภาคตัดขวางต่ออิเล็กตรอนโดยที่

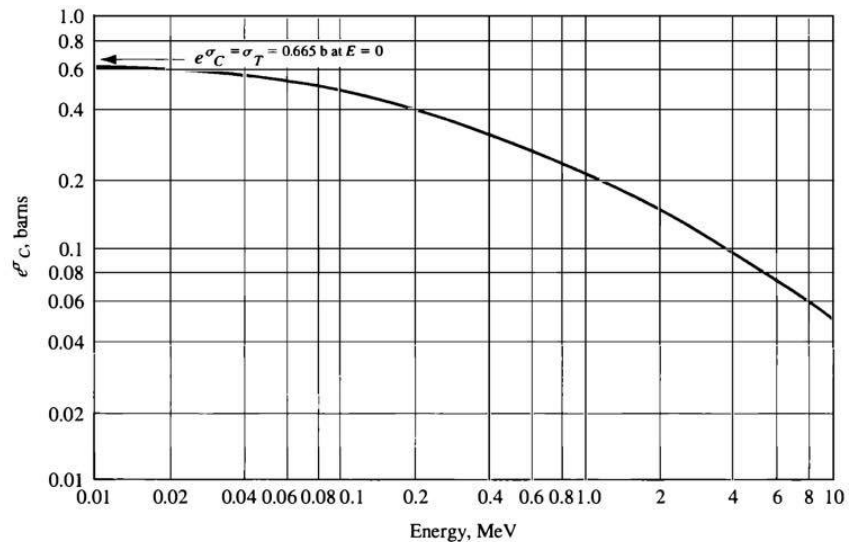
$$\sigma_c = Z_{\square} (\sigma_{\square}) \quad (2.14)$$

โดยที่

σ_c คือ ภาคตัดขวางของอันตรกิริยาคอมป์ตันต่ออะตอม

Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะตอม

${}_e\sigma_C$ คือ ภาคตัดขวางของอันตรกิริยาคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน
ค่าของ ${}_e\sigma_C$ จะขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมาดังแสดงในรูปที่ 12



ภาพที่ 8 The Compton cross-section per electron as a function of gamma ray energy[15]

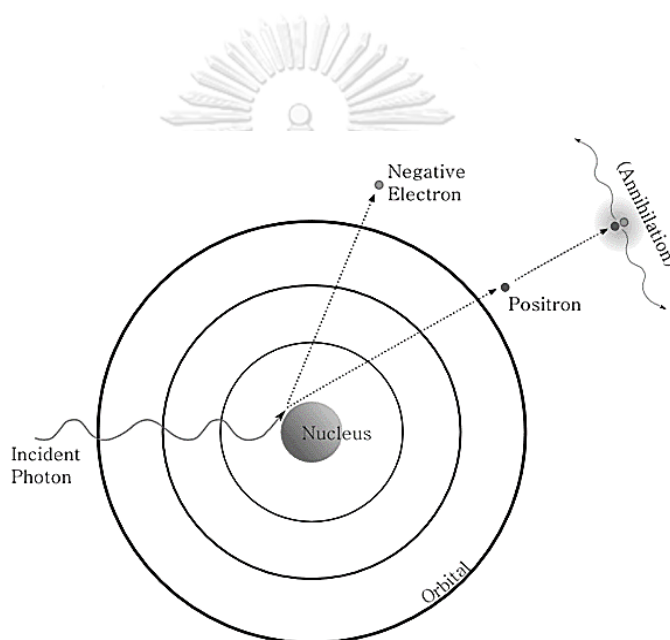
เมื่อ ค่าของ ${}_e\sigma_C$ มีค่าสูงสุดที่ 0.665 barn ที่พลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งค่าที่ของ ${}_e\sigma_C$ ที่พลังงานเท่ากับศูนย์นี้ เรียกว่า “Thomson cross section (σ_T)” เมื่อรังสีแกมมา มีพลังงานสูงขึ้นจน $E \gg {}_e\sigma_C$ จะแปรผันตามค่า E^{-1}
จากการเกิดการกระเจิงคอมป์ตันนี้เอง ทำให้เกิดความยุ่งยากในการกำบังรังสีแกมมาละกระวัดรังสี เพราะรังสีแกมมาไม่ได้หายไปหลังเกิดอันตรกิริยา

2.2.3 ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair production)

รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV สามารถเกิดอันตรกิริยาแบบอ้อนคูหรือปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน โดยที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของอะตอมตัวกลางแล้วรังสีแกมมาหายไป กลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอนวิ่งในทิศทางตรงกันข้าม โดยที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าเท่ากัน คือ เท่ากับครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีแกมมากับพลังงานจากมวลที่หายไป (rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนรวมกัน 1.02 MeV ดังสมการ

$$E_k = \frac{1}{2} (\square_\gamma - 1.02 \text{ MeV}) \quad (2.15)$$

เมื่อ E_k และ E_γ เป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและพลังงานของรังสีแกมมาตามลำดับ
 อันตรกิริยาของการเกิดปรากฏการณ์แพร่โปรดักชันนี้เป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลง
 พลังงานไปเป็นมวล ซึ่งจะตรงข้ามกับปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (annihilation) ของอิเล็กตรอนและ
 โพสิตรอน ซึ่งปรากฏดังรูปที่ 13 การเกิดปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชันเกิดขึ้นได้โดยโพสิตรอนจับกับ
 อิเล็กตรอนแล้วเกิดรังสีแกมมา พลังงาน 0.511 MeV 2 ตัว วิ่งออกไปในทิศทางตรงกันข้าม



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 9 การเกิดปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน[16]

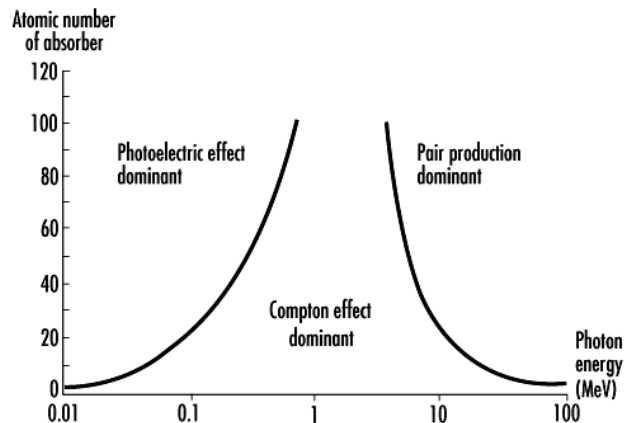
โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์แพร่โปรดักชันของรังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV จะมี
 ค่าสูงขึ้น เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น ถ้า σ_{pp} เป็นภาคตัดขวาง (cross section) ในการเกิด
 ปรากฏการณ์แพร่โปรดักชัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นกับพลังงานที่เพิ่มขึ้น จะเกิดขึ้นได้มากเมื่ออะตอมของ
 ตัวกลางมีค่าสูงขึ้น

$$\sigma_{pp} \cong Z^2 \quad (2.16)$$

ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาแบบแพร่โปรดักชันจะประมาณได้ว่า

$$\sigma_{pp} \cong Z^2(E-1.02) \quad (2.17)$$

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมาและตัวกลางที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยาดังรูป



ภาพที่ 10 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่สัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง[9]

2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

การลดความเข้มรังสีแกมมา เมื่อ σ เป็นภาคตัดขวางรวม (total cross section) ต่ออะตอมตัวกลาง ซึ่งประกอบด้วยผลรวมของภาคตัดขวางจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมา คือ การกระเจิงคอมป์ตัน โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c$$

(2.19)

เมื่อ σ คือ ผลรวมภาคตัดขวางของอันตรกิริยา (total cross section)

σ_c คือ ภาคตัดขวางอันตรกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน

σ_{pe} คือ ภาคตัดขวางอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์

σ_{pp} คือ ภาคตัดขวางอันตรกิริยาแพร์โปรดักชัน

เมื่อคูณด้วยค่าความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง (n) เข้าไปในสมการ

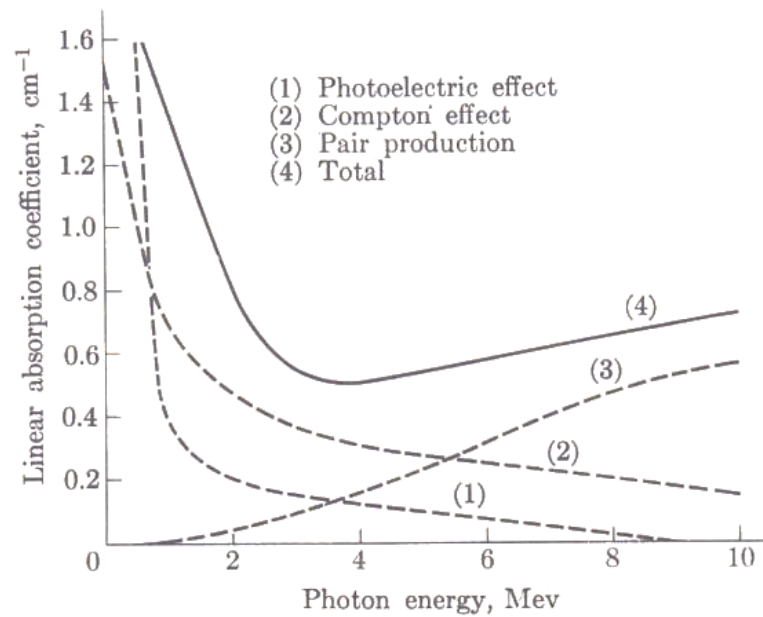
$$N\sigma = N(\sigma_{\square\square} + \sigma_{\square\square} + \sigma_c) \quad (2.20)$$

ผลคูณระหว่าง $N\sigma$ นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอน” (Attenuation Coefficient) เมื่อแทนด้วย สัญลักษณ์ μ ดังนี้

$$\mu = \mu_{\square\square} + \mu_{\square\square} + \mu_{\square} \quad (2.21)$$

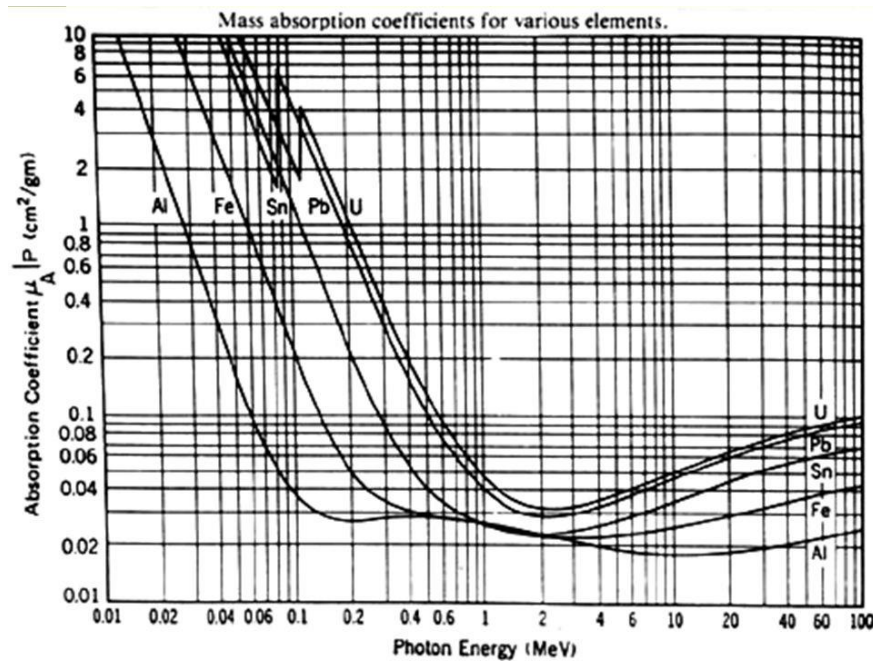
เมื่อ μ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม (total attenuation coefficient) โดย μ_c , μ_{pe} และ μ_{pp} แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนของอันตรกิริยาแบบการกระเจิงคอมป์ตัน โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ และแพร์โพรงตักชัน ตามลำดับ ค่า μ มีหน่วย cm^{-1} เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเชิงเส้น” (linear attenuation coefficient) ในการคำนวณเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนั้นมักพบค่า μ ในรูปของ $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ เมื่อ ρ คือค่าความหนาแน่นของตัวกลาง (physical density) ของตัวกลาง ค่า $\frac{\mu}{\rho}$ นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงมวล” (mass attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น cm^2/g จากสมการที่ 2.21 จะได้

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \left(\frac{\mu_{\square\square}}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{\square\square}}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{\square}}{\rho}\right) \quad (2.22)$$



ภาพที่ 11 สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตะกั่วกับพลังงานรังสีแกมมา[17]

รูปที่ 12 แสดงถึงค่า $\frac{\mu}{\rho}$ ของตัวแก้วกับพลังงานของรังสีแกมมา จะพบว่าค่าของ $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ เส้นกราฟหมายเลข 1 และค่า $\frac{\mu}{\rho}$ จะมีค่าลดลง เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมีพลังงานสูงขึ้น แต่ค่าของ $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ เส้นกราฟหมายเลข 3 จะเริ่มที่ 1.02 MeV แล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามพลังงานของรังสีแกมมาที่มีค่าสูงขึ้น ส่วนค่า $\frac{\mu}{\rho}$ รวม เส้นกราฟหมายเลข 4 จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึงระดับพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับ 3.5 MeV ค่าของ $\frac{\mu}{\rho}$ รวมจะมีค่าที่ต่ำสุด หลังจากนั้นค่า $\frac{\mu}{\rho}$ รวม ก็จะมีค่าเริ่มสูงขึ้นอีก สำหรับในช่วงพลังงาน 0.5 MeV ถึง 4.5 MeV ค่าของ $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ เส้นกราฟหมายเลข 2 ของตะกั่วจะมีค่าสูงกว่า $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ และ $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ ซึ่งเนื่องจากช่วงพลังงานดังกล่าวนี้เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบการกระเจิงคอมป์ตัน สำหรับช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า 0.5 MeV นั้นเป็นการดูดกลืนรังสีแกมมา ส่วนใหญ่จะเป็นแบบโฟโตอิเล็กทริก แล้วค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วขณะที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น สำหรับกรณีรังสีแกมมามีพลังงานน้อยกว่า 1.02 MeV จะไม่เกิดอันตรกิริยาแบบแพร์โปรดักชัน ค่า $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ จะเท่ากับศูนย์ และ ค่า $\frac{\mu_{\text{แก้ว}}}{\rho}$ จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV และในช่วง 4.5 MeV ขึ้นไป อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบอันตรกิริยาแพร์โปรดักชันหรือการเกิดอออนคู่



ภาพที่ 12 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของธาตุบางชนิด[18]

จากรูปที่ 13 แสดงถึง $\frac{\mu}{\rho}$ ของธาตุบางชนิด ในช่วงรังสีแกมมาที่มีพลังงานที่ต่างๆ โดยค่า $\frac{\mu}{\rho}$ นั้นขึ้นอยู่กับเลขอะตอมตัวกลาง คือ เลขอะตอมของตัวกลางมากค่าของ $\frac{\mu}{\rho}$ ก็จะมากไปด้วย แต่สำหรับช่วงที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานราว 1-2 MeV ค่า $\frac{\mu}{\rho}$ ของธาตุที่มีเลขอะตอมต่างกัน จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงมากกว่า 2 MeV แล้วค่า $\frac{\mu}{\rho}$ ก็จะแตกต่างกันไปตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นตัวกลางซึ่งธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า $\frac{\mu}{\rho}$ ก็จะมากกว่าที่มีเลขอะตอมต่ำกว่าในช่วงนั้น

ค่าของ μ ของของผสม ก็สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_{\text{ผสม}} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots \quad (2.23)$$

เมื่อ $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงเส้นของธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{ผสม}} = 0.01 \left[W_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + W_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + W_3 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_3 + \dots \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ W_1, W_2, W_3, \dots คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุที่ 1,2,3,ตามลำดับ

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1, \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2, \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_3, \dots$ คือ สัมประสิทธิ์ทะลุผ่านเชิงมวลของธาตุที่ 1,2,3,

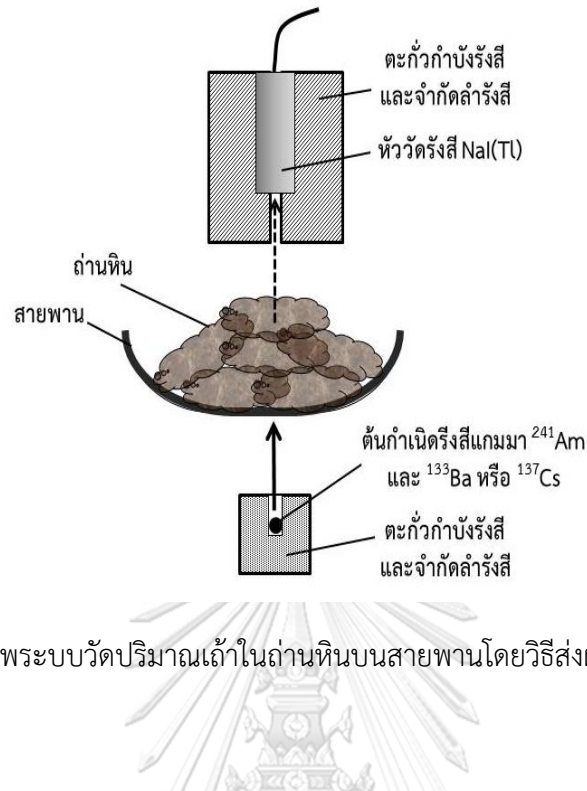
ตามลำดับ

Mean free path (λ) หมายถึง ระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ ค่า mean free path ของรังสีแกมมาในตัวกลางนั้นจะมีค่าเท่ากับ ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงเส้น ดังสมการ

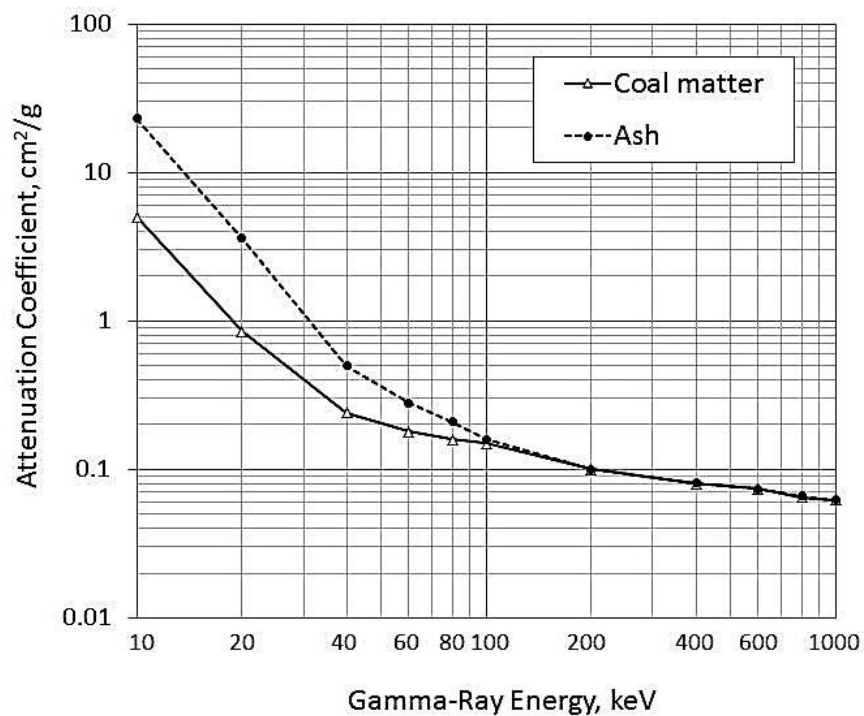
$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (2.25)$$

2.4 เทคนิคการหาปริมาณถ่านหินโดยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

หลักการของเทคนิคการหาปริมาณถ่านหินโดยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน [2-6, 19, 20] มีการใช้งานกันมานาน โดยอาศัยความแตกต่างในการดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงานต่ำของเนื้อถ่านหิน (coal matter) และถ่านหิน (coal ash) เนื้อถ่านหินมีองค์ประกอบเป็นธาตุเบาที่สามารถสันดาปให้ความร้อนออกมาได้ ที่สำคัญคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยมีเลขอะตอมเฉลี่ยประมาณ 6 ส่วนถ่านหินเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าซึ่งเจือปนอยู่ตามธรรมชาติ เช่น อะลูมิเนียม ซิลิกอน กำมะถัน เหล็ก แคลเซียม และธาตุอื่น ๆ โดยมีเลขอะตอมเฉลี่ยประมาณ 12 จากความแตกต่างของเลขอะตอมนี้ทำให้สามารถใช้เทคนิคนิวเคลียร์หลายเทคนิคในการหาปริมาณถ่านหินโดยวิธีไม่ทำลายตัวอย่างเนื่องจากอันตรกิริยาของรังสีขึ้นอยู่ กับเลขอะตอมของสสาร เช่น การกระเจิงกลับของรังสีบีตา (beta backscattering) การกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์ (x-ray backscattering) การเกิดแพร์โปรดักชัน (pair production) และการส่งผ่านรังสีแกมมา (gamma-ray transmission)



ภาพที่ 13 แผนภาพระบบวัดปริมาณเถ้าในถ่านหินบนสายพานโดยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน



ภาพที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาของเนื้อถ่านหินและเถ้าถ่านหินในช่วงพลังงาน 10 keV ถึง 1 MeV (คำนวณจากองค์ประกอบของเนื้อถ่านหินและเถ้าถ่านหิน)

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาซึ่งสามารถหาปริมาณ
 ถ้ำในถ้ำหินได้บนสายพานลำเลียง ซึ่งระบบที่ใช้กันทั่วไปมีลักษณะดังแสดงในแผนภาพในภาพที่ 13
 จากกราฟในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าในช่วงพลังงานต่ำกว่า 100 keV ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของ
 เนื้อถ้ำหินและถ้ำมีความแตกต่างกัน และมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นในช่วงพลังงานต่ำกว่า แต่
 เนื่องจากถ้ำหินบนสายพานมีความหนาประมาณ 20 – 30 ซม. ทำให้จำเป็นต้องใช้รังสีแกมมา
 ในช่วงประมาณ 50 -70 keV ซึ่งสามารถทะลุผ่านถ้ำหินที่มีความหนาขนาดนี้ได้ ดังนั้นระบบที่ใช้
 กันทั่วไปจึงเลือกต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241 (^{241}Am) ที่สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV
 ส่วนในช่วงพลังงานสูงกว่า 100 keV จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของเนื้อถ้ำหินและถ้ำ
 ถ้ำหินมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงใช้รังสีแกมมาที่มีพลังงานในช่วงนี้ในการวัดความหนาของถ้ำ
 หินที่อยู่สายพานในตำแหน่งเดียวกันกับที่รังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ผ่าน เนื่องจากการทะลุของรังสี
 แกมมาพลังงานสูงขึ้นอยู่กับความหนาของถ้ำหินเท่านั้น ในขณะที่การทะลุผ่านของรังสีแกมมา
 พลังงานต่ำคือ 60 keV ขึ้นอยู่กับความหนาและสัดส่วนของถ้ำในถ้ำหิน เครื่องวัดปริมาณถ้ำในถ้ำ
 หินบนสายพานที่ใช้กันอยู่จึงเลือกใช้รังสีแกมมาพลังงาน 356 keV จากต้นกำเนิดรังสีแบเรียม-133
 (^{133}Ba) หรือรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 (^{137}Cs) ส่วนหัววัดรังสี
 แกมมาทุกระบบคือหัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) หรือ NaI(Tl) การวิจัยนี้ต้องการ
 ปรับปรุงเครื่องวัดปริมาณถ้ำในถ้ำหินบนสายพานโดยใช้หัววัดรังสีบิสมัทเจอร์มาเนต (bismuth
 germinate, BGO) แทนหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาพลังงานสูง
 และเพื่อตัดปัญหาเรื่องการเกิดเอสเคปพีค (escaped peak) ของไอโอดีน (iodine, I) เมื่อใช้หัววัด
 รังสี NaI(Tl)

จากสมการของ Lambert's law จะได้ว่า

$$\text{ที่พลังงาน } 60 \text{ keV, ความเข้มของรังสีแกมมาทะลุผ่าน } I_{xL} = I_{0L} \exp(-m_L x) \quad (2.26)$$

$$\text{ที่พลังงาน } 356 \text{ หรือ } 662 \text{ keV, ความเข้มของรังสีแกมมาทะลุผ่าน } I_{xH} = I_{0H} \exp(-m_H x) \quad (2.27)$$

เมื่อ I_L คือ ความเข้มของรังสีแกมมาทะลุผ่านที่พลังงาน 60 keV

I_{xH} คือ ความเข้มของรังสีแกมมาทะลุผ่านที่พลังงาน 356 หรือ 662 keV

I_{0L} คือ ความเข้มของรังสีแกมมาที่พลังงาน 60 keV เมื่อไม่มีถ้ำหินบนสายพาน

I_{0H} คือ ความเข้มของรังสีแกมมาที่พลังงาน 356 หรือ 662 keV เมื่อไม่มีถ้ำหินบนสายพาน

m_L คือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ้ำหินที่รังสีแกมมาพลังงาน 60 keV

m_H คือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ่านหินที่รังสีแกมมาพลังงาน 356 หรือ 662 keV

และ x คือ ความหนาของถ่านหินบนสายพานตรงตำแหน่งที่ลำรังสีผ่าน

จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้

$$\frac{m_H}{m_L} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\ln\left(\frac{I_0}{I_0 - m_H x}\right)} \quad (2.28)$$

ค่า m_L ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของถ่านหินในถ่านหิน กล่าวคือจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีถ่านหินมากขึ้น ส่วนค่า m_H มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2.28) จึงสามารถใช้ในการหาสัดส่วนของถ่านหินในถ่านหินได้โดยไม่ต้องขึ้นกับความหนาของถ่านหินบนสายพาน



2.5 หัววัดรังสี

การตรวจวัดรังสี[9] (Radiation detection) สามารถทำได้โดยอาศัยการทำอันตรกิริยาของรังสีกับตัวกลาง และบันทึกผลของการเกิดอันตรกิริยาบนตัวกลางนั้น ๆ ได้แก่ การใช้แผ่นฟิล์มเคลือบสารไวแสงสำหรับถ่ายภาพ

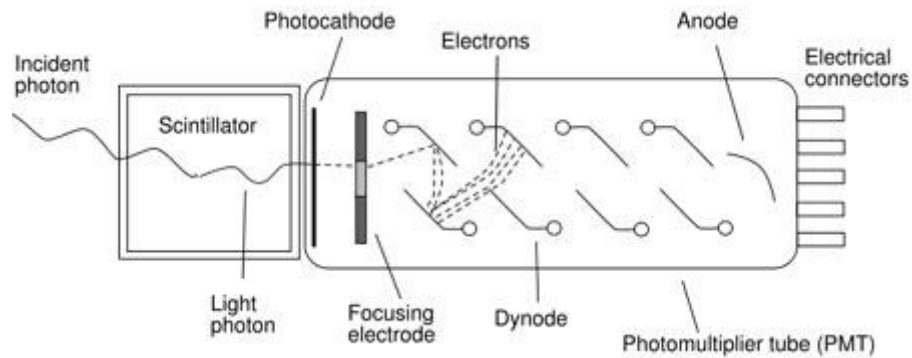
กระบวนการตรวจวัดรังสีของหัววัดรังสี[9] อาศัยโครงสร้างของหัววัดรังสีซึ่งประกอบด้วยตัวกลางรับอันตรกิริยาจากรังสีและส่วนสร้างสัญญาณพัลส์ การแบ่งชนิดของหัววัดรังสีจะแบ่งตามประเภทของตัวกลาง (detection media) ที่ใช้กับหัววัดรังสีได้ 3 แบบคือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector)
2. หัววัดรังสีชนิดทิลเลชัน (Scintillation detector)
3. หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

เป็นหัววัดรังสีที่มีกระบวนการวัดรังสีทางอ้อม มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่รับอันตรกิริยาและเกิดประกายแสง(Scintillation) ต่อเชื่อมกับส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และทวีปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ (Photomultiplier tube, PMT) ซึ่งห่อหุ้มด้วยแผ่นกั้นสนามแม่เหล็ก(mu-metal) เพื่อป้องกันการรบกวนสนามแม่เหล็กซึ่งจะทำให้กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์เบี่ยงเบนจากบริเวณไดโนด (dynode) โดยแสดงในรูปที่ 15



ภาพที่ 15 โครงสร้างหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน[21]



	Specific Gravity	Wavelength of Max. Emission	Refractive Index	Decay Time (μ s)	Abs. Light Yield in Photons/MeV	Relative Pulse Height Using Biak. PM tube	References
Alkali Halides							
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38 000	1.00	
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%), 3.34 (36%)	65 000	0.49	78, 90, 91
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.46, 4.18	39 000	1.10	92
Li(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11 000	0.23	
Other Slow Inorganics							
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200	0.13	
CdWO ₄	7.90	470	2.3	1.1 (40%), 14.5 (60%)	15 000	0.4	98-100
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2		1.3*	
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.47	0.9	24 000	0.5	
Unactivated Fast Inorganics							
BaF ₂ (fast component)	4.89	220		0.0006	1400	na	107-109
BaF ₂ (slow component)	4.89	310	1.56	0.63	9500	0.2	107-109
CsI (fast component)	4.51	305		0.002 (35%), 0.02 (65%)	2000	0.05	113-115
CsI (slow component)	4.51	450	1.80	multiple, up to several μ s	varies	varies	114, 115
CeF ₃	6.16	310, 340	1.68	0.005, 0.027	4400	0.04 to 0.05	76, 116, 117
Cerium-Activated Fast Inorganics							
GSO	6.71	440	1.85	0.056 (90%), 0.4 (10%)	9000	0.2	119-121
YAP	5.37	370	1.95	0.027	18 000	0.45	78, 125
YAG	4.56	550	1.82	0.088 (72%), 0.302 (28%)	17 000	0.5	78, 127
LSO	7.4	420	1.82	0.047	25 000	0.75	130, 131
LuAP	8.4	365	1.94	0.017	17 000	0.3	134, 136, 138
Glass Scintillators							
Ce activated Li glass ^b	2.64	400	1.59	0.05 to 0.1	3500	0.09	77, 145
Tb activated glass ^b	3.03	550	1.5	~3000 to 5000	~50 000	na	145
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:							
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	10 000	0.25	

ภาพที่ 16 แสดงคุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดต่าง ๆ[9]

หัวรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติของหัววัดแตกต่างกัน แสดงในภาพที่ 16 งานวิจัยเลือกหัววัดรังสี 2 ชนิด ทำการเปรียบเทียบการวัดรังสีแกมมาระหว่างหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม)กับหัววัดรังสีบิสมัทเจอร์ไมเนต

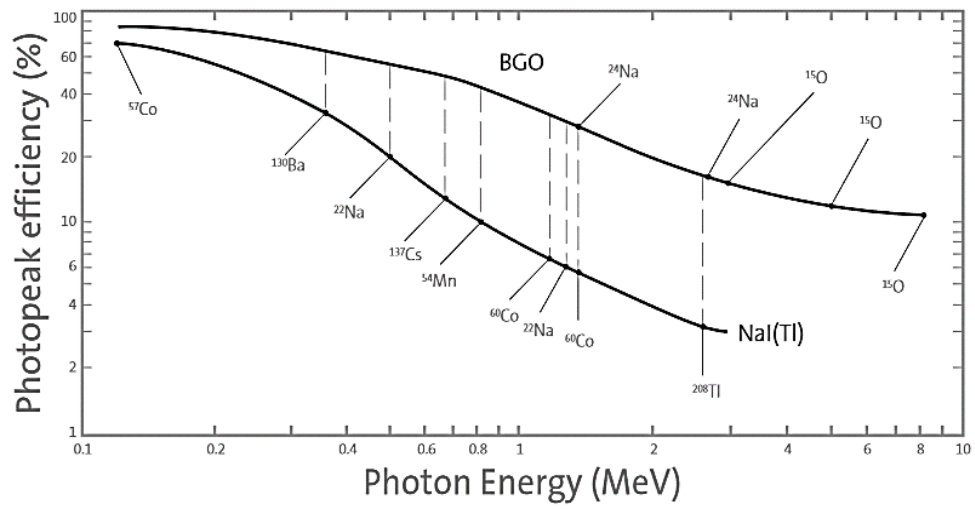
1. หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม)

เป็นหัววัดรังสีแกมมาที่เป็นผลึกวัดที่เติมทลเลียมในหัววัดซึ่งมีความไวต่อความชื้นสูง (Hygroscopic) ผลึกจึงต้องผลึกสนิทในภาชนะบรรจุ (air-tight container) มีประสิทธิภาพในการให้ประกายแสงสูงมีเวลาสลายแสง (decay time) ของพัลส์ประมาณ 230 ns ตัวผลึกแตกง่ายเมื่อได้รับการกระทบหรือการเปลี่ยนอุณหภูมิเร็ว ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของ Cs-137 ในช่วง 7-9 %

2. หัววัดรังสีบิสมัทเจอร์ไมเนต(BGO)

หัววัดรังสีแกมมาชนิดนี้มีการผสมสาร $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ มีความหนาแน่นสูง 7.31 g/cm^3 มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาสูงกว่าหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม) แต่มีประสิทธิภาพในการให้ประกายแสงน้อยกว่า ของพัลส์ประมาณ 300 ns ปกติจะนำไปใช้กับการวัดรังสีแกมมาที่ต้องการหัววัดรังสีขนาดเล็ก

หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม)กับหัววัดรังสีบิสมัทเจอร์ไมเนตมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้การวัดรังสีแกมมาในระดับพลังงานต่าง ๆ มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวัดของหัววัดรังสีชนิด BGO กับ NaI(Tl)[9]



บทที่ 3

การปรับปรุงปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสเมทเจอร์มาเนต (BGO)

3.1 แนวคิดในการปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณแก้วถ่านหินด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานโดยใช้หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) จะพบปัญหาการมีพิคพลังงานรบกวนต่อการวัดในช่วงของรังสีแกมมาระดับพลังงานต่ำ ทำให้มีผลต่อการวิเคราะห์ที่แม่นยำในเทคนิคนี้

เพื่อลดปัญหาการกระเจิงของรังสีแกมมา และลดการรบกวนของรังสีแกมมาที่มีผลต่อวัดรังสีแกมมา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแก้วในถ่านหินบนด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ได้ทำการออกแบบคอลลิเมเตอร์ที่ช่วยในการกำบังรังสีที่กระเจิงเข้าสู่หัววัด

3.2 วัสดุและอุปกรณ์วิจัย

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการศึกษาในเรื่องการปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสีชนิด BGO ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ระบบวัดรังสีแกมมาและตัวอย่างถ่านหิน

ก. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา

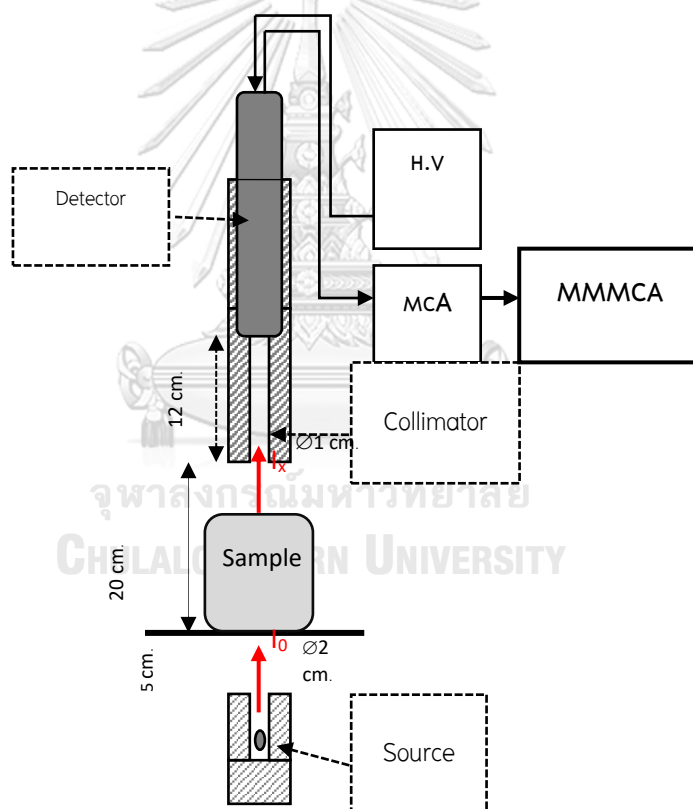
ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้งานวิจัยประกอบด้วย

1. ต้นกำเนิดรังสีที่เลือกใช้ในการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO คือ อเมริเซียม-241 (Am-241) เนื่องจากปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV
2. ต้นกำเนิดรังสีเรียม-133 (Ba-133) ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 81, 303 และ 356 keV
3. ต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 (Cs-137) ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV

ข. ระบบวัดรังสีแกมมา

ระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแร่ในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานประกอบด้วย ส่วนสำคัญ คือ

1. หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว และขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว
2. หัววัดรังสีชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว และขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว
3. ตะกั่วกำบังรังสี
4. คอลิเมเตอร์
5. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักย์สูง OTEC
6. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ CANBERRA รุ่น 2022
7. โปรแกรม MMMCA



ภาพที่ 18 แผนผังการจัดเรียงของระบบการตรวจวัดรังสีแกมมาแบบส่งผ่านตัวอย่าง

ค. ตัวอย่างถ่านหิน

ถ่านหินที่นำมาใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยถ่านหินทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ที่ผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยวิธีมาตรฐาน[7]มาใช้เป็นตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานที่ทราบค่าปริมาณเถ้าในถ่านหิน จำนวน 3 เพื่อใช้เป็นตัวอย่างมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟเปรียบเทียบ (Calibration curve) และตัวอย่างที่เหลือใช้เป็นตัวอย่างทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการหาปริมาณเถ้าในถ่านหินวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมา จากการอ่านกราฟเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ทางเคมีตามมาตรฐาน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณเถ้าในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน มีขั้นตอนการวิจัยอยู่ 5 ขั้นตอน คือ

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด (BGO)กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่พลังงาน 59.6, 356 และ 662 keV โดยติดตั้งอุปกรณ์ ภาพที่ 18 โดยไม่มีตัวกำบังรังสีที่ต้นกำเนิดรังสีและคอลลิเมเตอร์ นำต้นกำเนิดรังสีที่ต้องการเปรียบเทียบการวัดประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่ระดับพลังงานต้องการมาวางไว้หน้าหัววัด รังสีทำการวัดรังสีระยะเวลา 600 วินาที จำนวน 3 ครั้ง และบันทึกผล
2. เลือกหัวรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) จากการเปรียบเทียบหัววัดรังสี เพื่อเปรียบเทียบการวัดรังสีด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน
 - 1) เปรียบเทียบการวัดรังสีแกมมาของหัววัดรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงานโดยไม่มีคอลลิเมเตอร์ โดยเลือกขนาดหัววัดของแต่ละชนิดหัววัดรังสีเพื่อทำการวัดเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 18 โดยไม่มีคอลลิเมเตอร์ ทำการวัดรังสีระยะเวลา 300 วินาที และบันทึกผล
 - 2) เปรียบเทียบการวัดรังสีแกมมาของหัววัดรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงานโดยคอลลิเมเตอร์ เลือกขนาดหัววัดของแต่ละชนิดหัววัดรังสีเพื่อทำการวัดเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 18 ทำการวัดรังสีระยะเวลา 300 วินาที และบันทึกผล

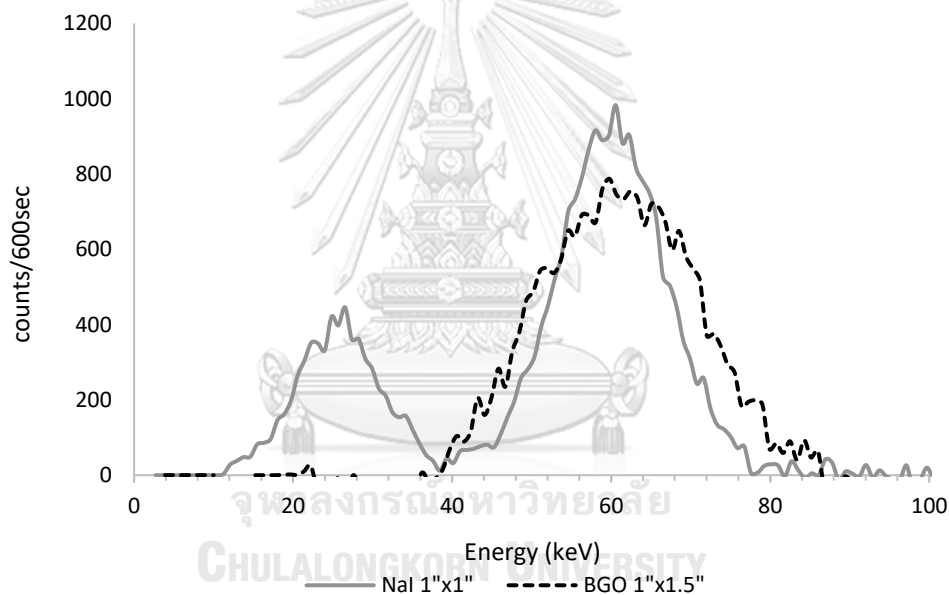
3. เตรียมตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานและตัวอย่างถ่านหินอื่น ๆ โดยนำถ่านหินมาบดอย่างละเอียดแล้วคัดแยกถ่านหินบางส่วน เพื่อทำตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานที่ทราบค่าปริมาณเถ้าภายในถ่านหินที่แน่นอน นำถ่านหินที่คัดแยกไว้ไปวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยเทคนิคมาตรฐาน[7]
4. นำตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในถ่านหินวัดการทะลุผ่านของรังสีด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด (BGO)
 - 1) ติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพที่ 18 จากนั้นนำถ่านหินที่ทราบปริมาณเถ้าในถ่านหิน จำนวน 2 ตัวอย่าง วัดการทะลุผ่านของรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 และ Cs-137 ถ่านหินที่นำมาวัดการทะลุผ่านของรังสีมีความหนาแน่นเชิงมวลอยู่ที่ 2.91 ถึง 14.53 g/cm² เวลาในการวัด 300 วินาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงผลในตารางที่ 11,12 และภาพที่ 29,30
 - 2) สร้างสมการการปรับเทียบในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในถ่านหินที่ได้จากค่าอัตราส่วนฟังก์ชันล็อกของอัตราการทะลุผ่านของรังสีสองพลังงาน โดยนำถ่านหินที่ทราบปริมาณเถ้าในถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง มาทำการผสมให้ได้ตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 2.72 ถึง 42.1 จำนวน 7 ตัวอย่าง โดยมีความหนาแน่นเชิงมวล อยู่ที่ 2.91 ถึง 14.53 g/cm² มาวัดการทะลุผ่านรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 และ Cs-137 เวลาในการวัด 300 วินาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงผลในตารางที่ 13 และภาพที่ 31
5. นำตัวอย่างถ่านหินจำนวน 6 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน แล้วนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แทนในสมการที่ได้จากการปรับเทียบด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน ในข้อ 4.2 เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคมาตรฐาน แสดงตารางที่ 14

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่พลังงาน 59.6, 356 และ 662 keV

4.1.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV



ภาพที่ 19 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

จากกราฟเปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Am-241 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่ากราฟพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) ผลการวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO พบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 59.6 keV.

- 2) ผลการวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 26.34 keV และ 59.6 keV ตามลำดับ

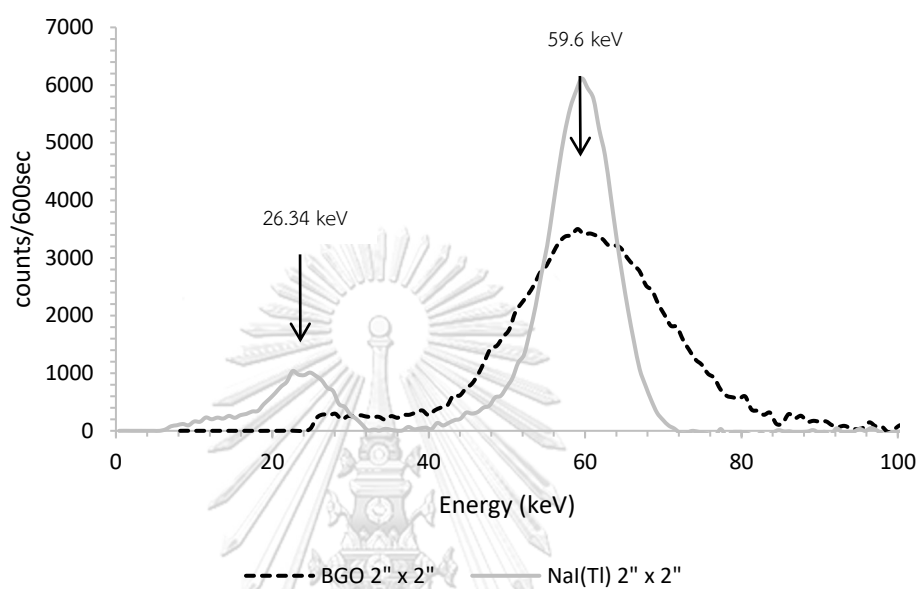
ตารางที่ 2 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับชนิดหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM(keV)
BGO	26454	16.93	25.96
NaI(Tl)	16063	10.28	14.57

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่าการตรวจวัด ซึ่งมากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ 1.65 เท่าจากการวัดรังสี ค่า E_{ff} ของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 1.65 เท่า และค่า FWHM หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 1.78 เท่า สเปกตรัมระดับพลังงาน 26.34 keV พบในหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) เท่านั้นโดยพบใกล้กับสเปกตรัมระดับพลังงาน 59.6 keV ดังนั้นประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) และหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีมากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ในการวัดรังสีระดับพลังงาน 59.6 keV

- 4.1.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่ขนาด 2 นิ้ว X 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV



ภาพที่ 20 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

จากสเปกตรัมเปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Am-241 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO พบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 59.6 keV.
- 2) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงาน 26.34 และ 59.6 keV

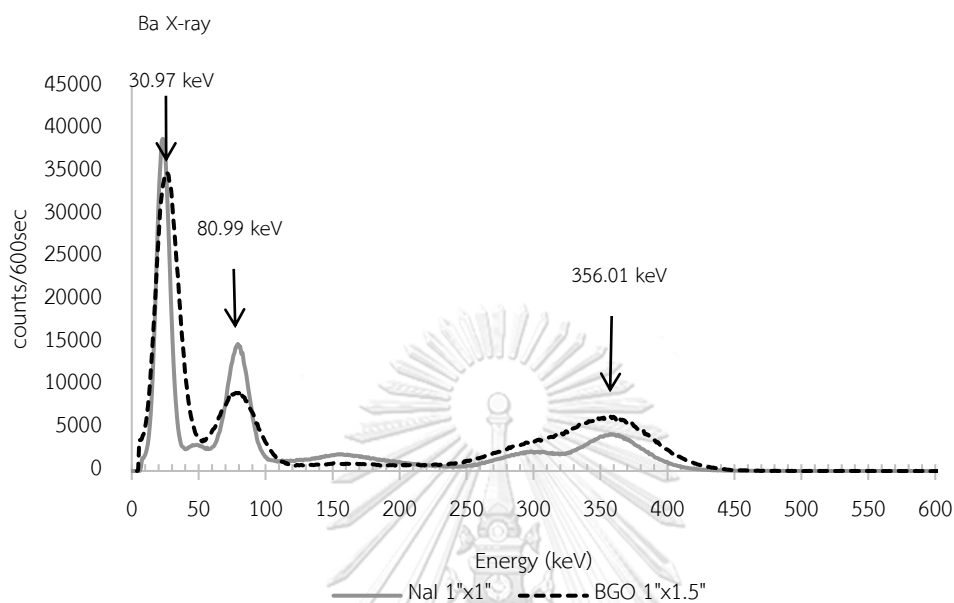
ตารางที่ 3 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด บิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM(keV)
BGO	99824	18.88	21.52
NaI(Tl)	88547	16.75	9.49

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่าการตรวจวัด ซึ่งมากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ 1.13 เท่าจากการวัดรังสี ค่า E_{ff} ของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 1.13 เท่า และค่า FWHM หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 2.27 เท่า สเปกตรัมระดับพลังงาน 26.34 keV พบในหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) เท่านั้นโดยพบใกล้กับสเปกตรัมระดับพลังงาน 59.6 keV ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว มีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) และหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีความสามารถในการแยกพลังงานได้น้อยกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ในการวัดรังสีระดับพลังงาน 59.6 keV

4.1.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba -133 ที่ระดับพลังงาน 356 keV



ภาพที่ 21 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

จากสเปกตรัมเปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Ba-133 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGOพบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 30 keV,80 keV,302.85 keVและ 356 keV. ตามลำดับ
- 2) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงาน 30 keV,80 keV, และ356 keV ตามลำดับโดยหัววัดรังสีไม่สามารถแยกพลังงานแกมมาที่ระดับพลังงาน 302.85 กับ 356 keV ออกจากกันได้จึงเห็นเป็นสเปกตรัมพลังงานเดียวกัน

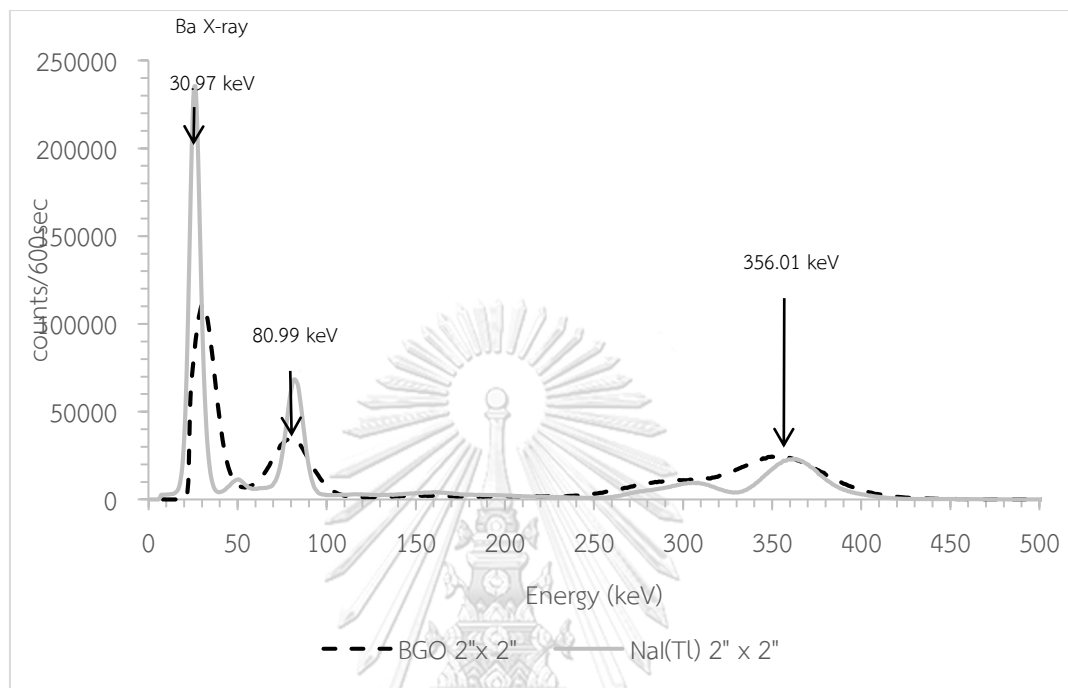
ตารางที่ 4 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 356.01 keV เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM(keV)
(BGO)	ไม่สามารถแยกพลังงานได้	-	-
NaI(TL)	139993	5.60	51.87

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ไม่สามารถแยกพลังงาน 356 keV จึงไม่สามารถวิเคราะห์การตรวจนับรังสีและค่า E_{ff} ส่วนหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) สามารถตรวจพบสเปกตรัมพลังงาน 356 keV และจำแนกสเปกตรัมพลังงานได้ ดังนั้น หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(TL) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ที่รังสีแกมมาระดับพลังงาน 356 keV

- 4.1.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 ที่ระดับพลังงาน 356 keV



ภาพที่ 22 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ba-133 เมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

จากสเปกตรัมเปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Ba-133 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO พบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 30 keV, 80 keV, 302.85 keV และ 356 keV. ตามลำดับ
- 2) จากการวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงาน 30 keV, 80 keV, และ 356 keV ตามลำดับ โดยหัววัดรังสีแกมมาสามารถแยกพลังงานแกมมาที่ระดับพลังงาน 302.85 กับ 356 keV ออกจากกันได้จึงเห็นเป็นสเปกตรัมพลังงานเดียวกัน

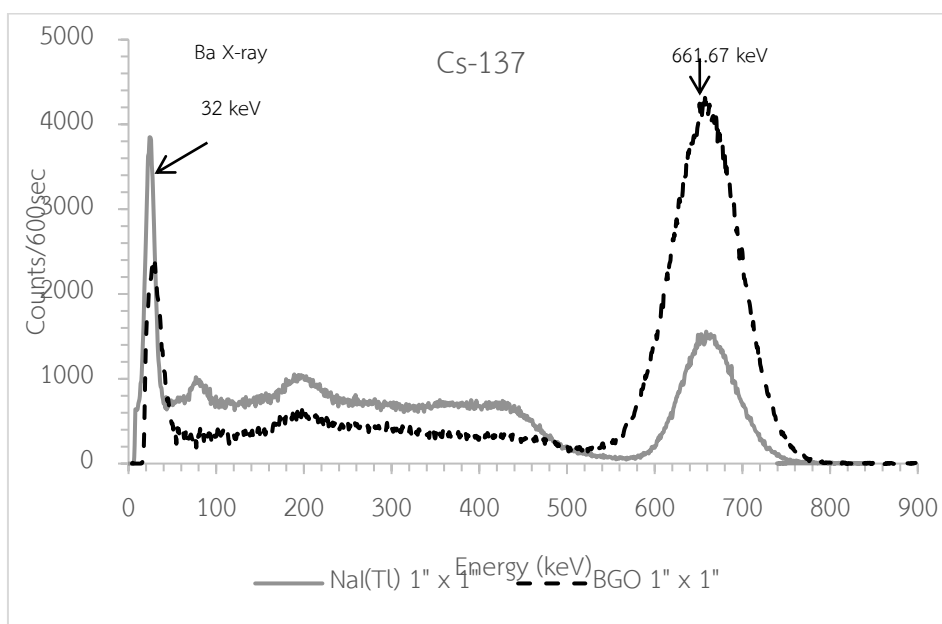
ตารางที่ 5 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 356.01 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM(keV)
BGO	ไม่สามารถแยกพลังงานได้	-	-
NaI(Tl)	88547	10.73	32.81

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ไม่สามารถแยกพลังงาน 356 keV จึงไม่สามารถวิเคราะห์การตรวจนับรังสีและค่า E_{ff} ส่วนหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) สามารถตรวจพบสเปกตรัมพลังงาน 356 keV และจำแนกสเปกตรัมพลังงานได้ ดังนั้น หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ที่รังสีแกมมาระดับพลังงาน 356 keV

- 4.1.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 662 keV



ภาพที่ 23 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

จากรูปที่ 21 เปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Cs-137 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

1. วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGOพบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 32 keV และ 662 keV ตามลำดับ
2. วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงาน 32 keV และ 662 keV ตามลำดับ

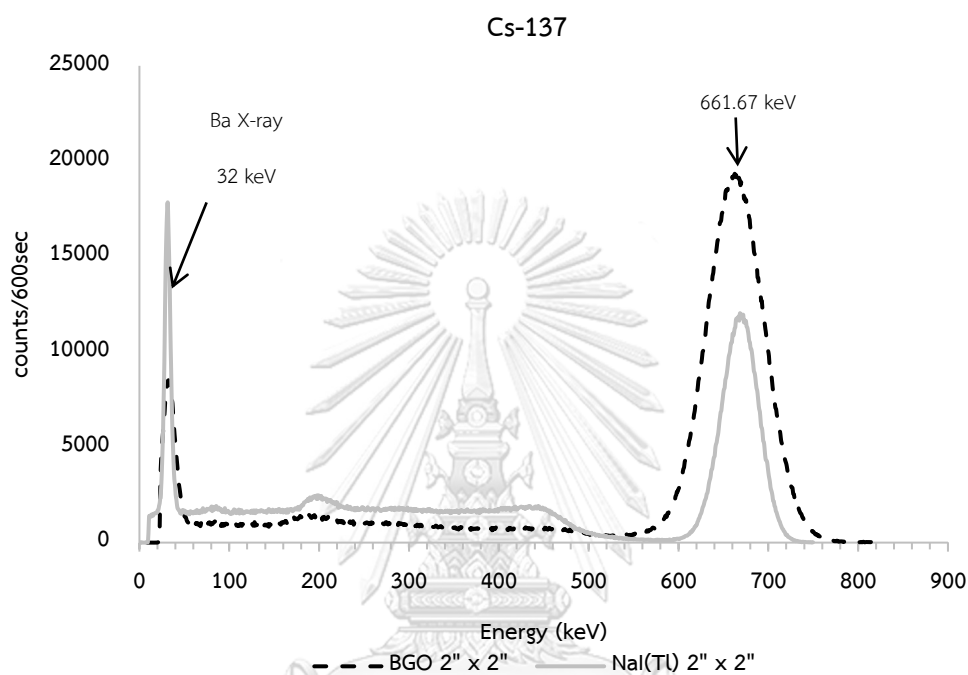
ตารางที่ 6 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 661.67 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM(keV)
BGO	453729	11.67	85.89
NaI(Tl)	137941	3.00	66.32

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่าการตรวจวัดรังสี มากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ 3.29 เท่าจากการวัดรังสี ค่า E_{ff} ของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 3.89 เท่า และค่า FWHM หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 1.30 เท่า สเปกตรัมระดับพลังงาน 32 keV พบในหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) เท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว การแยกระดับพลังงานของรังสีแกมมาของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่ระดับพลังงาน 661.67 keV

- 4.1.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 662 keV



ภาพที่ 24 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 24 เปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ได้ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Cs-137 เป็นระยะเวลา 600 วินาที พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO พบสเปกตรัมพลังงานที่ระดับพลังงาน 32 keV และ 662 keV ตามลำดับ
- 2) วัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พบสเปกตรัมพลังงาน 32 keV และ 662 keV ตามลำดับ

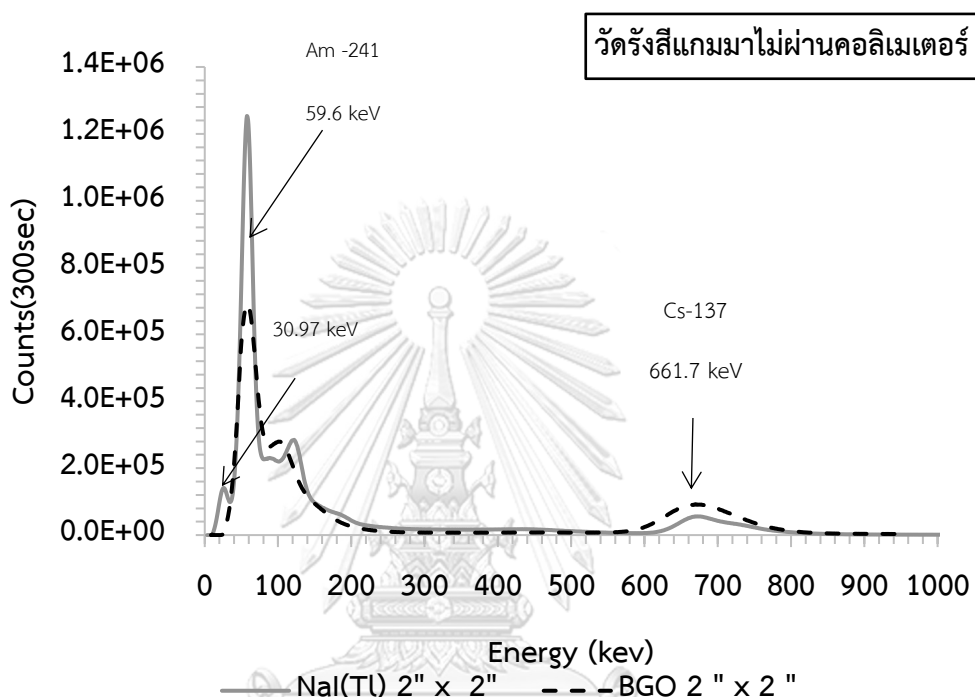
ตารางที่ 7 ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 661.67 keV เมื่อวัดกับหัววัดรังสีรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

ชนิดหัววัดรังสี	Counts/600sec	E_{ff} (%)	FWHM (keV)
BGO	1824777	13.76	73.07
NaI(Tl)	821129	6.19	46.97

E_{ff} คือ Intensity Efficiency Detector

จากผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่าการตรวจวัด ซึ่งมากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ 2.22 เท่าจากการวัดรังสี ค่า E_{ff} ของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 2.22 เท่า และค่า FWHM หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO มีค่ามากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) อยู่ที่ 1.56 เท่า ดังนั้นประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว การแยกระดับพลังงานของรังสีแกมมาของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO น้อยกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ที่ระดับพลังงาน 661.67 keV

4.1.7 ผลการทดลองการวัดรังสีของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV และ 662 keV ตามลำดับ โดยวัดรังสีแกมมาไม่ผ่านคอลลิเมเตอร์กับวัดรังสีแกมมาผ่านคอลลิเมเตอร์

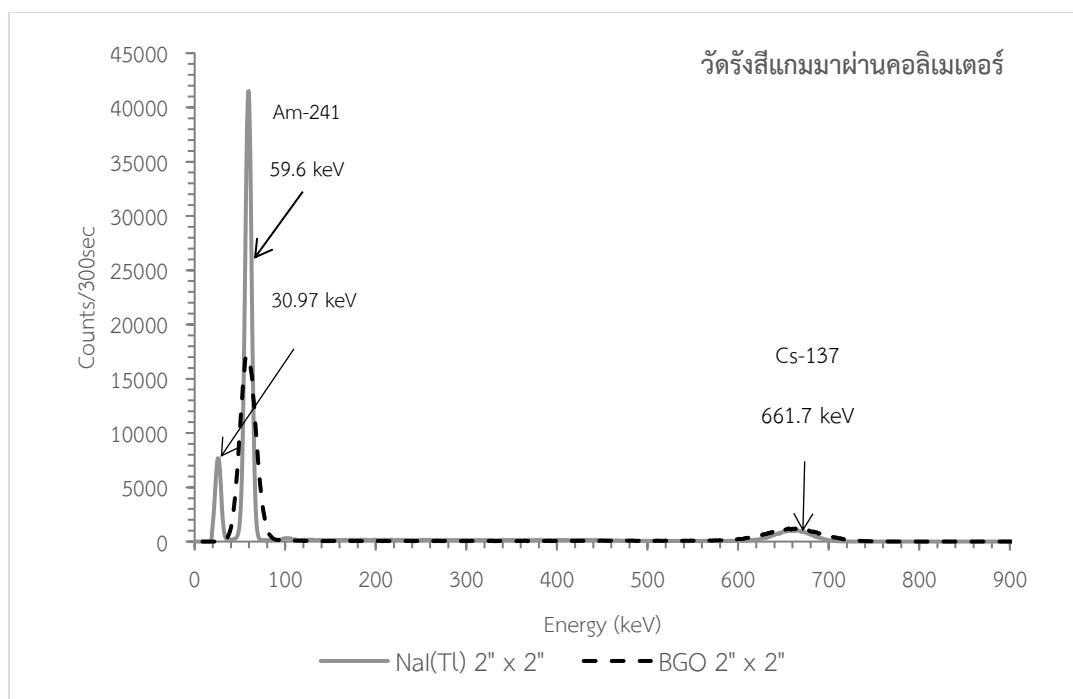


ภาพที่ 25 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 59.6 keV และ 661.7 keV ตามลำดับ เมื่อวัดรังสีแกมมาสองพลังงานไม่ผ่านคอลลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว โดยวัดรังสีแกมมาไม่ผ่านคอลลิเมเตอร์

จากรูปที่ 25 เปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Cs-137 เป็นระยะเวลา 300 วินาที โดยวัดรังสีแกมมาไม่ผ่านคอลลิเมเตอร์ พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) พบสเปกตรัมระดับพลังงาน 30.97 , 59.6 และ 661.7 keV สำหรับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl)
- 2) พบสเปกตรัมระดับพลังงาน 59.6 และ 661.7 keV สำหรับหัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO)

จากผลการทดลองพบว่า การส่งผ่านรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ที่มีรังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV และต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่มีระดับรังสีแกมมาพลังงาน 661.7 keV และเมื่อใช้หัววัดรังสี NaI(Tl) วัดการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานไม่ผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสี ปรากฏสเปกตรัม ที่ระดับพลังงาน 30.97 keV ที่ตำแหน่งชิดกับสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ระดับ 59.6 keV แต่ไม่พบสเปกตรัมพลังงาน 30.97 keV นี้ เมื่อใช้หัววัดรังสี โดยสเปกตรัมของการวัดแบบไม่ผ่านคอลิเมเตอร์แสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 26 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาสองพลังงาน คือ Am-241 และ Cs-137 เมื่อวัดด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน โดยผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว

จากรูปที่ 26 เปรียบเทียบของหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว กับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ทำการวัดจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Cs-137 เป็นระยะเวลา 300 วินาที โดยวัดรังสีแกมมาผ่านคอลิเมเตอร์ พบว่าสเปกตรัมพลังงานดังต่อไปนี้

- 1) พบสเปกตรัมระดับพลังงาน 30.97 , 59.6 และ 661.7 keV สำหรับหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl)
- 2) พบสเปกตรัมระดับพลังงาน 59.6 และ 661.7 keV สำหรับหัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสเมทเจอร์มาเนต (BGO)

ตารางที่ 8 ข้อมูลของสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 59.6 และ 661.7 keV พลังงานเมื่อวัดกับหัววัดรังสี BGO เปรียบเทียบกับหัววัดรังสี NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เท่ากัน โดยวัดผ่านคอลลิเมเตอร์

หัววัด รังสี	รังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV			รังสีแกมมาระดับพลังงาน 661.67 keV		
			%			%
	Counts(300s)	FWHM(keV)	Resolution	Counts(300s)	FWHM(keV)	Resolution
NaI(Tl)	318878±1803	8.41	14.11	41472±370	45.61	6.9
BGO	397584±729	20.53	34.44	86845±1433	69.43	10.49

Counts คือ อัตราการนับรังสีใน 300 วินาที

Resolution คือ การจำแนกพลังงานของหัววัดรังสีแกมมา

จากผลการทดลองที่รังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV หัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ตรวจวัดรังสีแกมมาได้ใกล้เคียงหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO การจำแนกพลังงานของรังสีแกมมาหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) จำแนกพลังงานได้ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO คิดเป็น 2.44 เท่า การวัดรังสีแกมมาระดับพลังงาน 661.7 keV หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ตรวจวัดได้มากกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) คิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 2.09 เท่า การจำแนกพลังงานของรังสีแกมมาหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) จำแนกพลังงานได้ดีกว่าหัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO คิดเป็น 1.52 เท่า ดังนั้นการส่งผ่านรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานโดยหัววัดรังสี NaI(Tl) วัดผ่านคอลลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสี ปรากฏสเปกตรัมที่ระดับพลังงาน 30.97 keV เป็น escaped peak ที่ตำแหน่งซิดกับสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ระดับ 59.6 keV แต่ไม่พบสเปกตรัมในหัววัดรังสีหัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO) ดังแสดงในภาพที่ 26

4.1 ผลทดสอบเทคนิคการหาปริมาณแร่ในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ที่แน่นอน ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO

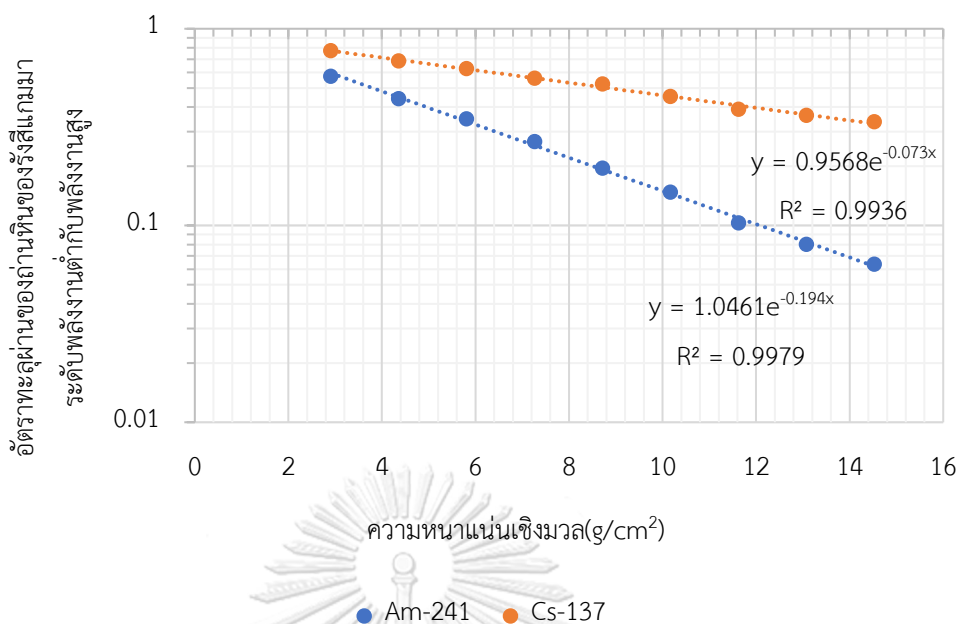
4.1.1 ผลการทดลองเทคนิคการหาปริมาณแร่ในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ 7.87

เปอร์เซ็นต์ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO

ตารางที่ 9 ข้อมูลอัตราส่วนความเข้มของรังสีแกมมาสองพลังงานทะลุผ่านตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณแร่ ร้อยละ 7.87

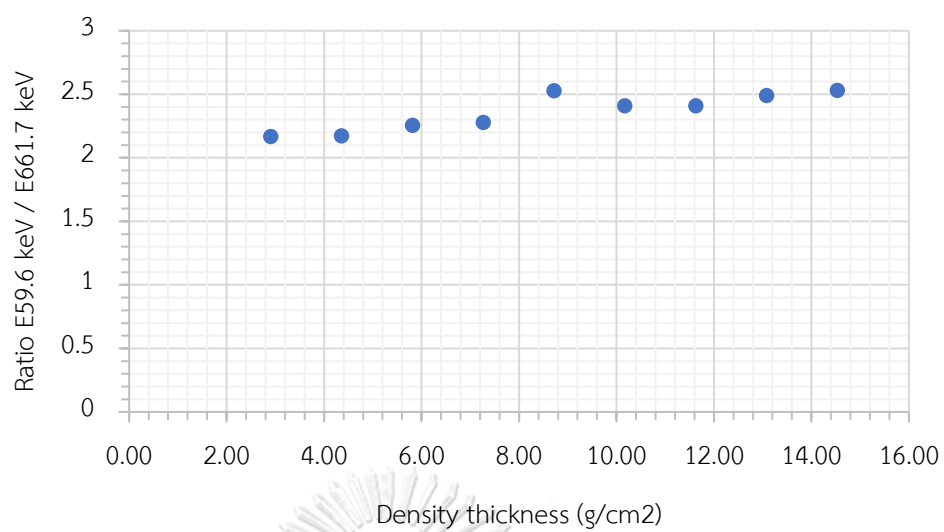
ความหนาแน่นเชิงมวล (g/cm ²)	อัตราความเข้มรังสีทะลุผ่านต่อ 300 วินาที		$\mu_{00.0000}$ $\mu_{000.0000}$
	\square/\square 59.6 keV	\square/\square 661.7 keV	
2.91	0.57	0.77	2.91
4.36	0.44	0.69	4.36
5.81	0.35	0.63	5.81
7.27	0.27	0.56	7.27
8.72	0.20	0.52	8.72
10.17	0.15	0.45	10.17
11.63	0.10	0.39	11.63
13.08	0.08	0.36	13.08
14.53	0.06	0.34	14.53

จากตารางที่ 9 เมื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินที่มีปริมาณแรร้อยละ 7.87 มากขึ้น พบว่าการทะลุผ่านรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 59.6 keV มีค่าน้อยกว่าการทะลุผ่านรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 661.7 keV ในช่วงความหนาแน่นเชิง,ของถ่านหิน 2.91 ถึง 8.72 g/cm² ค่าอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อพลังงานสูง เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ต่างจากความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของถ่านหินช่วง 8.72 ถึง 14.53 g/cm² เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย จากอัตราทะลุผ่านของถ่านหินของรังสีแกมมาระดับพลังงานต่ำกับพลังงานสูงมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 27



ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแอมมาต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าของถ่านหิน ร้อยละ 7.87

จากภาพที่ 27 เมื่อนำค่าอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแอมมา มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของตัวอย่างถ่านหินนี้ ซึ่งทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/p) ของรังสีแอมมาที่พลังงาน 59.6 keV ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.194 \text{ cm}^2/\text{g}$ และเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/p) ของรังสีแอมมาที่พลังงาน 661.7 keV เท่ากับ $0.078 \text{ cm}^2/\text{g}$ และเมื่อนำค่าทั้งสองนี้เพื่อหาอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลพลังงานต่ำต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของพลังงานสูงมีค่าเท่ากับ 2.4359 เมื่อนำค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีทะลุผ่านของพลังงานต่ำต่อค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีทะลุผ่านของพลังงานสูงกับค่าความหนาแน่นเชิงมวล มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในภาพที่ 28 และเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าเท่ากับ 2.3602 ± 0.1453



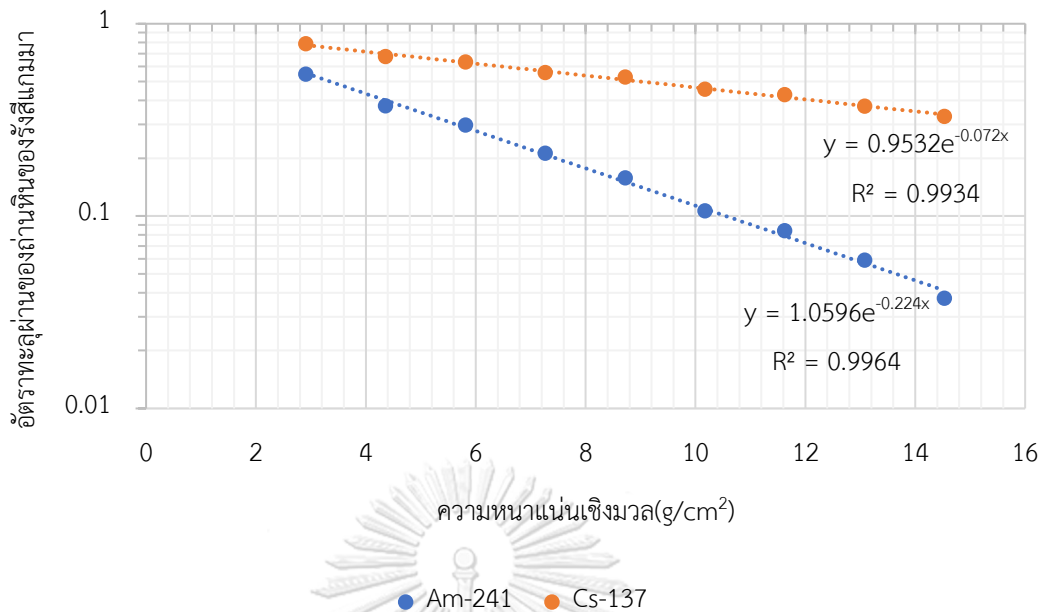
ภาพที่ 28 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูง ต่อ ความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินของถ่านหินมีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 7.87

- 4.1.2 ผลการทดลองเทคนิคการหาปริมาณแร่ในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ 37.1 เปอร์เซ็นต์ ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดบิสมัทเจอร์มาเนต (BGO)

ตารางที่ 10 ข้อมูลอัตราส่วนความเข้มของรังสีแกมมาสองพลังงานทะลุผ่านตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณแร่ 37.1 เปอร์เซ็นต์

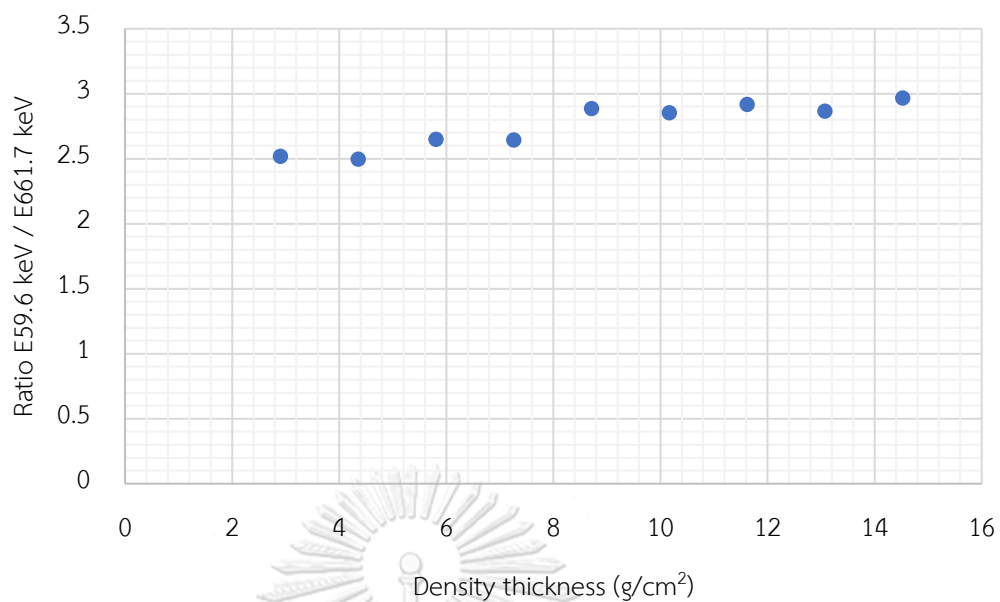
ความหนาแน่นเชิงมวล (g/cm ²)	อัตราความเข้มรังสีทะลุผ่านต่อ 300 วินาที		$\mu_{0.0000}$ $\mu_{000.0000}$
	\square/\square_0 59.6 keV	\square/\square_0 661.7 keV	
2.91	0.55	0.79	2.52
4.36	0.37	0.67	2.50
5.81	0.30	0.63	2.65
7.27	0.21	0.56	2.65
8.72	0.16	0.53	2.89
10.17	0.11	0.46	2.85
11.63	0.08	0.43	2.92
13.08	0.06	0.37	2.87
14.53	0.04	0.33	2.97

จากตารางที่ 10 เมื่อความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินที่มีปริมาณแร่ ร้อยละ 37.1 มีการเพิ่มขึ้น การทะลุผ่านรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 59.6 keV มีค่าน้อยกว่าการทะลุผ่านรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 661.7 keV ในช่วงความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหิน 2.91 ถึง 8.72 g/cm² อัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อพลังงานสูง เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ต่างจากความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินช่วง 8.72 ถึง 14.53 g/cm² เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย จากอัตราทะลุผ่านของถ่านหินของรังสีแกมมาระดับพลังงานต่ำกับพลังงานสูงกับค่าความหนาแน่นเชิงมวล มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ได้ในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่อความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าของถ่านหิน ร้อยละ 37.1

จากภาพที่ 29 เมื่อนำค่าอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมา มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเชิงมวลของตัวอย่างถ่านหินนี้ ซึ่งทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/p) ของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 59.6 keV ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.224 \text{ cm}^2/\text{g}$ และเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/p) ของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 661.7 keV เท่ากับ $0.072 \text{ cm}^2/\text{g}$ และเมื่อนำค่าทั้งสองนี้เพื่อหาอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของพลังงานต่ำต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของพลังงานสูง คือมีค่าเท่ากับ 3.11 เมื่อนำค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีทะลุผ่านของพลังงานต่ำต่อค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีทะลุผ่านของพลังงานสูงกับค่าความหนาแน่นเชิงมวลที่มาสสร้างกราฟความสัมพันธ์ แสดงในภาพที่ 30 และเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าเท่ากับ 2.7556 ± 0.1790



ภาพที่ 30 สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูง ต่อ ความหนาของถ่านหินเชิงมวล ของถ่านหินมีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 37.1

- 4.1.3 ผลการทดลองการทะลุผ่านของรังสีแกมมาผ่านตัวอย่างถ่านหินที่ทราบปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO เพื่อนำมาใช้สร้างสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาสองพลังงานกับปริมาณเถ้าในถ่านหิน

ตารางที่ 11 ข้อมูลผลการทดลองของถ่านหินที่ทราบปริมาณเถ้าในถ่านหินที่แน่นอนวัดด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานโดยวัดรังสีผ่านคอลิเมเตอร์เข้าสู่หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO

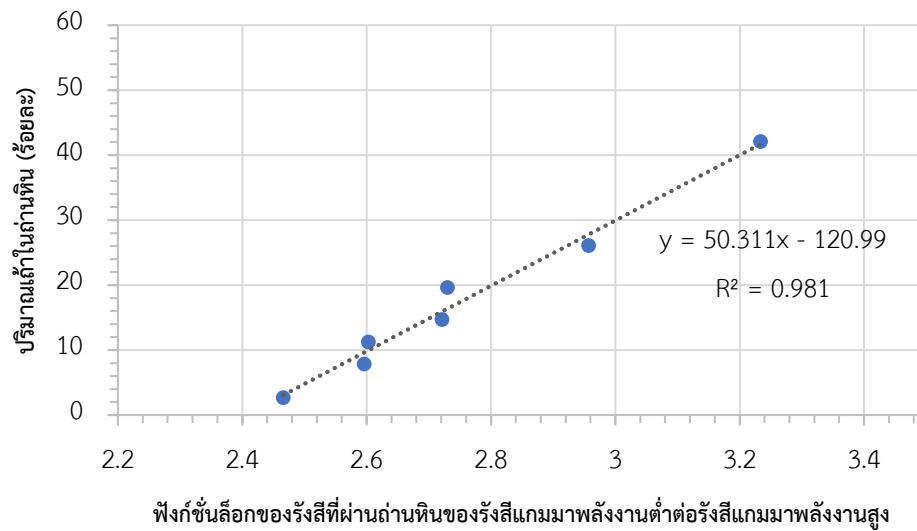
ถ่านหินลำดับที่	ปริมาณเถ้าในถ่านหิน	อัตราความเข้มรังสีทะลุผ่าน		$\frac{(\square/\square)\square\square\square}{(\square/\square)\square\square\square}$
		$\square/\square_{0\square\square\square}$	$\square/\square_{0\square\square\square}$	
1	2.72	0.1909	0.5109	2.4661
2	7.87	0.1841	0.5211	2.5964
3	11.30	0.1688	0.5049	2.6029
4	14.72	0.1767	0.5289	2.7217
5	19.67	0.1654	0.5174	2.7305
6	26.13	0.1577	0.5355	2.9572
7	42.10	0.1271	0.5284	3.2336

$(I_x/I_0)_{Low}$ คือ อัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV

$(I_x/I_0)_{High}$ คือ อัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 661.7 keV

จากตารางที่ 11 ข้อมูลจากการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านถ่านหินด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงาน ใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ในการวัดถ่านหิน 7 ตัวอย่างที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 2.72 – 42.1 มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 8.72 g/cm³ ที่ได้จากการนำถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 7.87 และ 42.1 มาผสมกันทำให้มีถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 11.3, 14.72, 19.67 และ 26.13 จากข้อมูลในตารางที่ 13 สร้างกราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันล็อกของรังสีที่ผ่านถ่านหินของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูงต่อปริมาณเถ้าในถ่านหิน แสดงในภาพที่ 31 ได้สมการเชิงเส้น %Ash = (50.311xLog Ratio) - 120.99 โดยมี R² เท่ากับ 0.981 เพื่อสำหรับเป็นสมการปรับเทียบในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าใน

ถ่านหินที่ได้จากค่าอัตราส่วนฟังก์ชันล็อกของอัตราการทะลุผ่านของรังสีสองพลังงาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินอื่น ๆ จำนวน 6 ตัวอย่าง ที่ได้จากเทคนิคนี้แสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ฟังก์ชันล็อกของรังสีทะลุที่ผ่านถ่านหินของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูงกับปริมาณถ่านหินในถ่านหิน



4.2 ผลทดลองวัดหาปริมาณเถ้าในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน

ตารางที่ 12 ผลการทดลองวัดหาปริมาณเถ้าในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน

ถ่านหิน ลำดับที่	อัตราความเข้มรังสีทะลุผ่าน		$\frac{(\square/\square)_{\square\square\square}}{(\square/\square)_{\square\square\square}}$	A ₁	A ₂	ΔA
	$(\square/\square)_{\square\square\square}$	$(\square/\square)_{\square\square\square}$				
1	0.1474	0.5287	3.0047	30.18	34.8	-4.62
2	0.1183	0.5325	3.3861	49.37	49	+0.37
3	0.1263	0.5476	3.4351	51.83	41.9	+9.99
4	0.1306	0.5361	3.2653	43.29	49.5	-6.21
5	0.1106	0.5257	3.4233	51.24	64	-
						12.76
6	0.1139	0.5205	3.3277	46.43	42.2	+4.23

$(I_x/I_0)_{Low}$ คือ อัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV

$(I_x/I_0)_{High}$ คือ อัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมารังสีแกมมาระดับพลังงาน 661.7 keV

$\frac{(\square/\square)_{\square\square\square}}{(\square/\square)_{\square\square\square}}$ คือ อัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อพลังงานสูง

A₁ คือ ผลวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยเทคนิคทางรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น (ร้อยละ)

A₂ คือ ผลวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM 3174 (ร้อยละ)

ΔA คือ ค่าผลต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิเคราะห์มาตรฐาน

จากตารางที่ 14 ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของถ่านหิน 6 ตัวอย่าง โดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินร้อยละ 30.18 ถึงร้อยละ 51.83 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 34.8 ถึง ร้อยละ 64 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองวิธีการนี้มีค่าความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยเทคนิคการทางรังสีกับผลวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหินด้วยเทคนิควิธีมาตรฐาน มีค่าอยู่ระหว่าง -12.76 ถึง +9.99

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงเทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินด้วยเทคนิคส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสี BGO กับหัววัดรังสี NaI(Tl) ที่พลังงาน 59.6, 356 และ 661.67 keV สรุปได้ว่า

- 1) การวัดรังสีแกมมาระดับพลังงาน 59.6 keV ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี BGO และหัววัดรังสี NaI(Tl) ใกล้เคียงกัน คิดเป็นอัตราส่วนประสิทธิภาพในการวัดรังสีมีค่าเท่ากับ 1.13 เท่า และการวัดโดยหัววัดรังสี BGO ไม่ปรากฏ Escape peak ที่รบกวนต่อการวัดในระดับพลังงาน 59.6 keV การวัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 356 keV หัววัดรังสี BGO ไม่มีความเหมาะสมต่อการวัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 356 keV เพราะสเปกตรัมพลังงานไม่แยกเด่นชัด แสดงในภาพที่ 21 และ 22 การวัดรังสีแกมมาระดับพลังงาน 661.7 keV ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี BGO อยู่ที่ 13.76 % หัววัดรังสี NaI(Tl) อยู่ที่ 6.19 % คิดเป็นอัตราส่วนประสิทธิภาพในการวัดรังสีมีค่าเท่ากับ 2.22 เท่า เมื่อขนาดหัววัดรังสีมีขนาดเท่ากัน ในการใช้งานภาคอุตสาหกรรมต้นกำเนิดรังสีต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงรังสีสูง รังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่ำจะป้องกันได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาพลังงานสูง ดังนั้นหัววัดรังสี BGO ทำให้สามารถลดการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาเหลือครึ่งหนึ่งจากความแรงรังสีเดิมของรังสีแกมมาพลังงานระดับ 661.7 keV
- 2) เมื่อวัดรังสีแกมมาสองพลังงานผ่านคอลิเมเตอร์ช่วยลดปัญหารังสีแกมมาที่กระเจิงเข้าสู่หัววัด ลดปัญหาการเคลื่อนที่ของสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ทำการวัด ทำให้ผลการวัดมีความแม่นยำขึ้น

5.1.2 จากผลทดสอบเทคนิคการหาปริมาณแร่ในถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ที่แน่นอน ด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ที่ใช้หัววัดรังสี BGO สรุปได้ว่า

- 1) ในการหาสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ่านหินที่มีปริมาณแร่ต่างกัน พบว่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ่านหินที่มีปริมาณแร่ต่ำ จะมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ่านหินที่มีปริมาณแร่สูง จากการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ส่วนการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ปริมาณแร่ในถ่านหินต่ำหรือสูงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของถ่านหินพลังงานต่ำต่อพลังงานสูง หรือ $\mu_{\square} / \mu_{\square}$ ถ่านหินจะมีค่าสูงตามปริมาณแร่ในถ่านหิน ในงานวิจัยนี้มีตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณที่จำกัดจึงเลือกถ่านหินที่มีปริมาณแร่ในถ่านหินที่ต่ำหนึ่งค่าและปริมาณแร่ในถ่านหินสูงหนึ่งค่า เพื่อหาสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสี ความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานนี้ ควรมีค่าตั้งแต่ 8.72 – 14.53 g/cm² เพราะเป็นช่วงที่อัตราส่วนของอัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่ออัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นเชิงมวลของถ่านหินน้อยกว่า 8.72 g/cm² เป็นช่วงที่กราฟมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน
- 2) การเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณแร่ในถ่านหินจากฟังก์ชันล็อกของอัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อพลังงานสูงต้องใช้ถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ในถ่านหินที่แน่นอนมาปรับวัด ในงานวิจัยนี้นำถ่านหินที่ทราบค่าปริมาณแร่ในถ่านหินจากวิธีมาตรฐาน จำนวน 3 ค่า คือ ถ่านหินที่มีปริมาณแร่ในถ่านหิน ร้อยละ 2.72, 7.87 และ 42.1 มาผสมเพื่อใช้เป็นถ่านหิน 7 ตัวอย่างที่มีปริมาณแร่ในถ่านหิน ร้อยละ 2.72 – 42.1 มีความหนาแน่นเชิงมวล 8.72 g/cm² นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีพลังงานต่ำต่อพลังงานสูงต่อปริมาณแร่ในถ่านหิน โดยมีค่าความสัมพันธ์ R² เท่ากับ 0.981 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างดี
- 3) เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานมีความรวดเร็วในการวัดหาปริมาณแร่ในถ่านหิน ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์คร่าวๆ ปริมาณมาก ๆ ได้ และตัวอย่างถ่านหินที่นำมาวิเคราะห์ยังสามารถนำกลับมาวิเคราะห์ซ้ำได้

5.1.3 ผลทดลองวัดหาปริมาณแก้วในถ่านหินตัวอย่างจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน

ผลที่การวิเคราะห์ปริมาณแก้วในถ่านหินที่ได้ด้วยวิธีมาตรฐานกับเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น มีค่าแตกต่างกันมากและน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในถ่านหิน เช่น องค์ประกอบภายในของถ่านหินที่มีปริมาณแก้วภายใน ร้อยละ 64 ด้วยวิธีมาตรฐาน ประกอบไปด้วย ธาตุ Al ในรูปสารประกอบ Al_2O_3 อยู่ร้อยละ 23.84 ธาตุ Si ในรูป SiO_2 ร้อยละ 28.92 และสารอื่นอีก ร้อยละ 11.24 จากผล XRF แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางรังสีแกมมาสองพลังงานมีค่าเท่ากับ 51.24 และองค์ประกอบภายในของถ่านหินที่มีปริมาณแก้วภายใน ร้อยละ 42.2 ด้วยวิธีมาตรฐาน ประกอบไปด้วย ธาตุ Al ในรูปสารประกอบ Al_2O_3 อยู่ร้อยละ 12.21 ธาตุ Si ในรูป SiO_2 ร้อยละ 17.50 และสารอื่นอีก ร้อยละ 12.49 จากผล XRF แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางรังสีแกมมาสองพลังงานมีค่าเท่ากับ 46.43 เทคนิคทางรังสีสามารถวิเคราะห์ถ่านหินปริมาณแก้วในถ่านหินได้ผลที่รวดเร็ว ตัวอย่างถ่านหินที่นำไปวิเคราะห์ยังสามารถนำกลับมาวิเคราะห์ซ้ำได้อีก ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางรังสีต้องอาศัยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานควบคู่กันเพื่อการวิเคราะห์ที่แม่นยำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ขนาดของรูคอลลิเมเตอร์มีผลต่อการให้รังสีทะลุผ่านเข้าไปในหัววัด เพื่อที่จะได้ค่าการวัดรังสีแกมมามากกว่านี้ควรเพิ่มขนาดของรูคอลลิเมเตอร์ขึ้น
- 5.2.2 ควรมีการต่อยอดออกแบบและเครื่องมือขนาดเล็กสำหรับงานภาคสนาม เพื่อจะได้ผลที่รวดเร็วต่อการประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ
- 5.2.3 หัววัดรังสี BGO มีความเหมาะสมต่อการวัดรังสีแกมมาพลังงานสูง สำหรับงานที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานสูงควรเลือกใช้หัววัดรังสี BGO เพื่อความรวดเร็วในการวัดและมีปลอดภัยขึ้นในการทำงานด้านรังสีที่ต้องใช้พลังงานสูง
- 5.2.4 ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าของฟังก์ชันลือกของรังสีทะลุที่ผ่านถ่านหินของรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อรังสีแกมมาพลังงานสูงกับปริมาณแก้วในถ่านหินเฉพาะต่อตัวอย่างถ่านหิน 1 แหล่งการผลิต และควรใช้ตัวอย่างถ่านหินมาตรฐานมากกว่า [22] ขึ้นไปเพื่อให้ได้ฟังก์ชันลือกที่แม่นยำขึ้นการวิเคราะห์
- 5.2.5 เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น

รายการอ้างอิง

1. เพียรมนกุล, พ. and น. เจียวิริยะบุญญา, ถ่านหิน (การเผาไหม้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้และการจัดการ).
2. จันทรตรี, ก., ทำการศึกษาหาปริมาณถ่านหินในถ่านหินลิกไนต์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน. 2537.
3. Rizk, R.A.M., A.H. El-kateb, and A.M. Abdul-kader, *On-line nuclear ash gauge for coal based on gamma-ray transmission techniques*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1999. 242: p. 139-145.
4. Yazdi, M. and S.A. Esmailnia, *Dual-energy gamma-ray technique for quantitative measurement of coal ash in the Shahroud mine, Iran*. International Journal of Coal Geology, 2003. 55(2-4): p. 151-156.
5. Sowerby, B.D. and J.S. Watt, *Development of nuclear techniques for on-line analysis in the coal industry*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1990. 299(1): p. 642-647.
6. Watt, J.S. and E.J. Steffner, *Dual energy gamma-ray transmission techniques applied to on-line analysis in the coal and mineral industries*. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1985. 36(11): p. 867-877.
7. *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*, in ASTM D3174.
8. Ludwig, D., A. Nanni, and J. E. Shoenberger, *Application of Roller-Compacted Concrete (RCC) Technology to Roadway Paving*. Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program. 1994. 150.
9. F, K.G., *Radiation Detectibn and Measurement*. 3 ed.
10. การแบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดตามคามยาวคลื่น. Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/17/2/EMW.html>.
11. แผนผังการสลายตัว Cs-137. Available from: <http://www.nst.or.th/article/article54/article54-004.html>.
12. Am-241, &. Available from: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1005/1005.1442.pdf>.

13. การเกิดโฟโตอิเล็กทริก. Available from: <http://www.amptek.com/xrf/>.
14. การเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์. Available from: <https://sites.google.com/site/puenggphysics/home/unit-iv/compton-effect>.
15. John R. Lamarsh, A.J.B., *Introduction to Nuclear Engineering*.
16. การเกิดปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน. Available from: <https://www.med-ed.virginia.edu/courses/rad/radbiol/01physics/phys-03-05.html>.
17. สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตะกั่วกับพลังงานรังสีแกมมา. Available from: <http://www.the-phoney-photon.com/>.
18. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของธาตุบางชนิด. Available from: http://images.slideplayer.com/20/5962322/slides/slide_47.jpg.
19. Clayton, C.G. and M.R. Wormald, *Coal analysis by nuclear methods*. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1983. 34(1): p. 3-22.
20. Sowerby, B.D., *Nuclear techniques for the on-line bulk analysis of carbon in coal-fired power stations*. Appl Radiat Isot, 2009. 67(9): p. 1638-43.
21. โครงสร้างหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน.
22. Lim, C.S., B.D. Sowerby, and D.A. Abernethy, *On-Belt Analysis of Ash in Coal*. Coal Preparation, 2002. 22(3): p. 165-179.



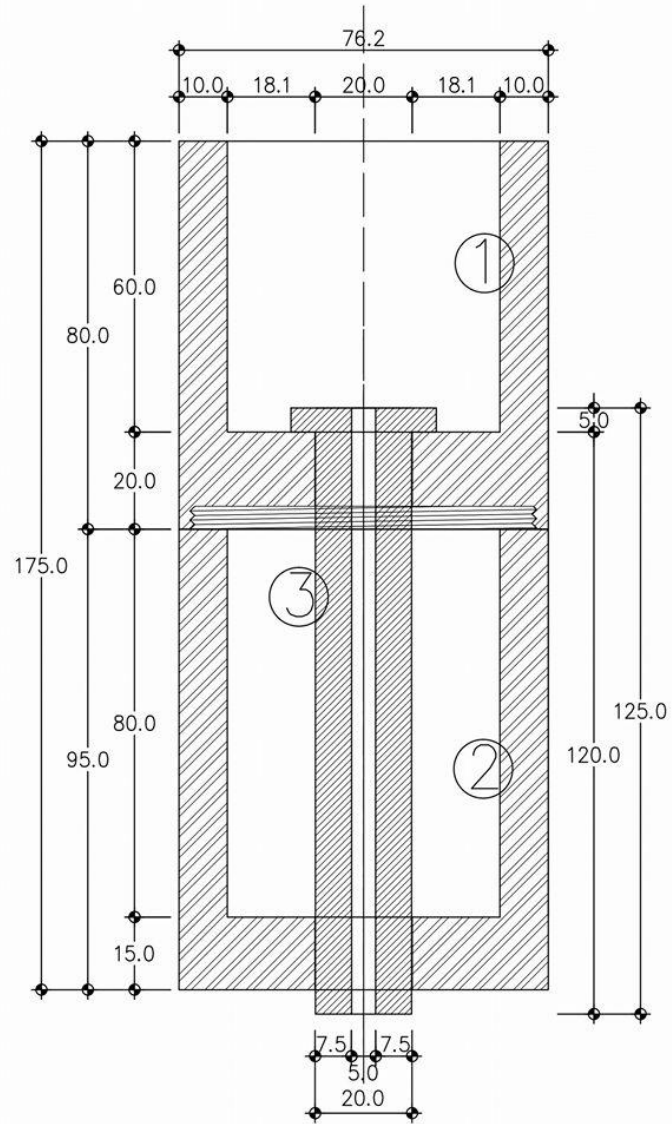
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

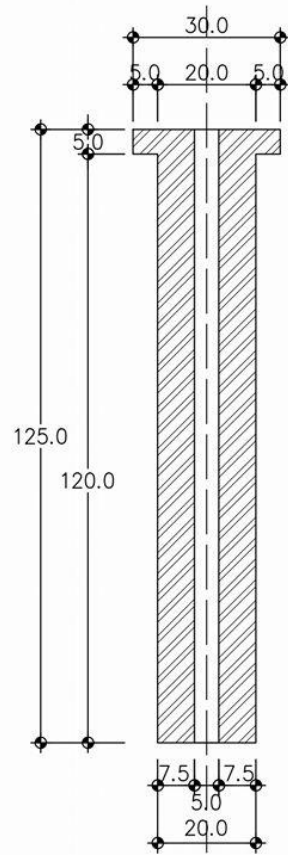
ภาคผนวก ก

แผนภาพแสดงโครงสร้างคอลิเมเตอร์เทคนิคการหาปริมาณแก้วในถ่านหินบนสายพานด้วยวิธีการ
ส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยใช้หัววัดรังสี BGO

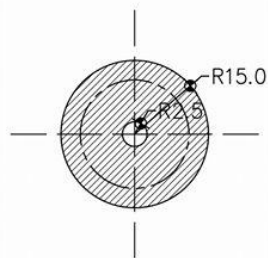




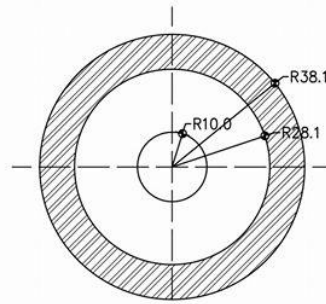
รูป รวมด้าน-ตัดข้าง
SCALE 1:100



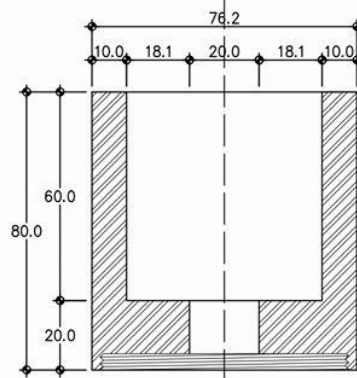
รูปด้าน-ตัดข้าง ③
SCALE 1:100



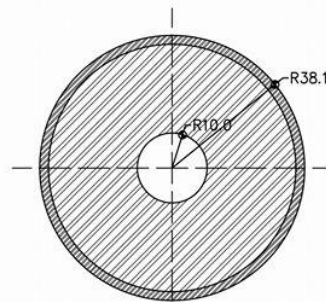
รูปด้านล่าง ③
SCALE 1:100



รูปด้านบน ①
SCALE 1:100



รูปด้าน-ตัดข้าง ①
SCALE 1:100



รูปด้านล่าง ①
SCALE 1:100

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านหิน ด้วยวิธีมาตรฐาน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



No. 0306/ 7833

To: Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering Chulalongkorn University

The Department of Science Service presents the test report for the samples named "1) Coal 2, 2) Coal 3, 3) Coal 4, 4) Coal 5, 5) Coal 6, 6) Coal 7, 7) Coal 8, 8) Coal 9, 9) Coal 10 and 10) Coal 11" Laboratory No. L60/03793.1- L60/03793.10 as the total of 10 samples with reference to the request No. L60/03793 dated 7 June 2017.

Enclosed herewith the following result avails for your acknowledgement.



Division of Chemicals and Consumer Products

Tel: 0 2201 7211-2

Fax: 0 2201 7213

E-mail: chemistry@dss.go.th

แบบ ๗๘.๗



Department of Science Service

TEST REPORT

Department of Science Service

Sample's name	Mark / Brand	Laboratory No.
1. Coal 2	-	L60/03793.1
2. Coal 3	-	L60/03793.2
3. Coal 4	-	L60/03793.3
4. Coal 5	-	L60/03793.4
5. Coal 6	-	L60/03793.5
6. Coal 7	-	L60/03793.6
7. Coal 8	-	L60/03793.7
8. Coal 9	-	L60/03793.8
9. Coal 10	-	L60/03793.9
10. Coal 11	-	L60/03793.10

Test Result

	Ash, %
L60/03793.1	42.1
L60/03793.2	34.8
L60/03793.3	50.2
L60/03793.4	37.1
L60/03793.5	49.0
L60/03793.6	41.9
L60/03793.7	49.5
L60/03793.8	27.0
L60/03793.9	64.4
L60/03793.10	42.2

This report is only valid for the sample received. The above statement is not intended for advertising purposes and shall not be reproduced or shall not manifest partially without the written permission of the Department of Science Service.

Department of Science Service, Ministry of Science and Technology
Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

Page 2/3

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)
ถ่านหินตัวอย่างมาตรฐานที่มีปริมาณกำมะถันในถ่านหิน ร้อยละ 2.72

7/3/2561 11:34:04

Page 1

Philips Analytical

Quantification of sample 088861@1 Unknow

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 100.5 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	2.089
2	C	24.890
3	N	29.026
4	O	38.375
5	Na	<<
6	Mg	0.199
7	Al	0.970
8	Si	1.639
9	S	1.122
10	K	0.084
11	Ca	0.943
12	Ti	<<
13	Mn	<<
14	Fe	0.663
15	Cu	<<
16	Sr	<<
17	Ba	<<
18	Pb	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Calibrated	MgO	0.329	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	1.832	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	3.507	Calculate
S	Calibrated	SO3	2.803	Calculate
K	Calibrated	K2O	0.101	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	1.320	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	0.948	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	89.160	Fixed

Calibration: semiq
Calibration folder: c:\program files\philips\superq\userdata
Quantification level: 20.0
Mass thickness (mg/mm2): 2.829421
Apply Drift correction: Yes
Always excl. elements set: None
Always excluded lines set: None

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)
ถ่านหินตัวอย่างมาตรฐานที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 7.87

7/3/2561 13:17:07

Page 1

Philips Analytical

Quantification of sample 088861@8 SCG 7.87

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 92.7 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	2.243
2	C	26.729
3	N	31.170
4	O	37.598
5	Na	<<
6	Mg	<<
7	Al	0.172
8	Si	0.210
9	S	0.762
10	K	<<
11	Ca	0.640
12	Mn	<<
13	Fe	0.475
14	Cu	<<
15	Sr	<<
16	Ba	<<
17	Pb	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Al	Calibrated	Al2O3	0.324	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	0.450	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.904	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	0.896	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	0.680	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	95.746	Fixed

Calibration: semiq
Calibration folder: c:\program files\philips\superq\userdata
Quantification level: 20.0
Mass thickness (mg/mm2): 2.829421
Apply Drift correction: Yes
Always excl. elements set: None
Always excluded lines set: None

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)
ถ่านหินตัวอย่างมาตรฐานที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 42.1

7/3/2561 11:31:47

Page 1

Philips Analytical

Quantification of sample 088861@2 2

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 77.7 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	1.327
2	C	15.816
3	N	18.444
4	O	41.771
5	Na	0.473
6	Mg	<<
7	Al	4.578
8	Si	11.841
9	P	0.049
10	S	0.565
11	K	0.827
12	Ca	0.175
13	Ti	0.271
14	V	<<
15	Mn	<<
16	Fe	3.812
17	Cu	<<
18	As	<<
19	Rb	<<
20	Sr	0.052
21	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H28O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	0.638	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	8.645	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	25.332	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.113	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.411	Calculate
K	Calibrated	K2O	0.996	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	0.245	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	0.453	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	5.450	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.062	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	56.656	Fixed

Calibration: semiq
Calibration folder: c:\program files\philips\superq\userdata

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 64

7/3/2561 13:13:33

Philips Analytical

Page 1

Quantification of sample 088861@6 10

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 60.4 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	0.828
2	C	9.869
3	N	11.509
4	O	43.361
5	Na	1.813
6	Mg	<<
7	Al	12.616
8	Si	13.516
9	P	0.052
10	S	0.441
11	K	1.948
12	Ca	2.232
13	Ti	0.904
14	Mn	<<
15	Fe	0.712
16	Cu	<<
17	Rb	<<
18	Sr	0.198
19	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	2.444	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	23.838	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	28.915	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.120	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.101	Calculate
K	Calibrated	K2O	2.347	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	3.123	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	1.508	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	1.018	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.234	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	35.352	Fixed

Calibration: semiq
Calibration folder: c:\program files\philips\superq\userdata
Quantification level: 20.0
Mass thickness (mg/mm2): 2.829421

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 37.1

7/3/2561 13:21:47

Philips Analytical

Page 1

Quantification of sample 088861@3 5

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	88.5 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	1.000
Weight after pressing (g):	2.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	None
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	gp semiq
Results database in:	c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	1.419
2	C	16.907
3	N	19.716
4	O	40.992
5	Na	0.881
6	Mg	<<
7	Al	7.081
8	Si	7.943
9	P	0.054
10	S	0.739
11	K	1.238
12	Ca	1.288
13	Ti	0.606
14	V	<<
15	Mn	<<
16	Fe	1.054
17	Cu	<<
18	As	<<
19	Rb	<<
20	Sr	0.082
21	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	1.187	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	13.380	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	16.993	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.124	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.845	Calculate
K	Calibrated	K2O	1.492	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	1.799	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	1.011	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	1.507	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.097	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	60.564	Fixed

Calibration:	semiq
Calibration folder:	c:\program files\philips\superq\userdata

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 42.2

7/3/2561 13:15:27

Philips Analytical

Page 1

Quantification of sample 088861@7 11

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 77.8 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: qp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	1.342
2	C	15.992
3	N	18.650
4	O	40.566
5	Na	0.801
6	Mg	<<
7	Al	6.480
8	Si	8.179
9	P	0.046
10	S	0.670
11	K	1.027
12	Ca	3.206
13	Ti	0.341
14	V	<<
15	Mn	0.083
16	Fe	2.566
17	Cu	<<
18	As	<<
19	Rb	<<
20	Sr	0.071
21	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	1.080	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	12.206	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	17.498	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.105	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.672	Calculate
K	Calibrated	K2O	1.237	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	4.486	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	0.569	Calculate
Mn	Calibrated	MnO	0.108	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	3.669	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.084	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	57.287	Fixed

Calibration: semiq

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 49.5

7/3/2561 13:07:29

Philips Analytical

Page 1

Quantification of sample 088861@5 8 MYANMAR

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 68.3 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	1.148
2	C	13.684
3	N	15.958
4	O	42.327
5	Na	1.189
6	Mg	<<
7	Al	10.068
8	Si	10.816
9	P	0.052
10	S	0.555
11	K	1.889
12	Ca	0.385
13	Ti	0.698
14	V	<<
15	Mn	<<
16	Fe	1.125
17	Cu	<<
18	As	<<
19	Rb	<<
20	Sr	0.107
21	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H28O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	1.603	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	19.020	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	23.139	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.120	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.388	Calculate
K	Calibrated	K2O	2.275	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	0.538	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	1.165	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	1.609	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.126	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	49.019	Fixed

Calibration: semiq
Calibration folder: c:\program files\philips\superq\userdata

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าในถ่านหิน ร้อยละ 41.9

7/3/2561 11:38:32

Philips Analytical

Page 1

Quantification of sample 088861@4 7

R.M.S.: 0.000
Sum before normalization: 76.3 %
Normalised to: 100.0 %
Sample type: Pressed powder
Initial sample weight (g): 1.000
Weight after pressing (g): 2.000
Correction applied for medium: No
Correction applied for film: None
Used Compound list: OXIDES
Results database: gp semiq
Results database in: c:\program files\philips\superq\userdata

	Element	Conc. (%)
1	H	1.354
2	C	16.130
3	N	18.810
4	O	39.876
5	Na	0.709
6	Mg	0.219
7	Al	6.420
8	Si	6.969
9	P	0.073
10	S	0.534
11	K	1.171
12	Ca	5.521
13	Ti	0.396
14	Mn	0.081
15	Fe	1.648
16	Cu	<<
17	As	<<
18	Rb	<<
19	Sr	0.090
20	Zr	<<

Binder

Chemical formula	Weight (g)
C24H29O5	1.0

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
Na	Calibrated	Na2O	0.955	Calculate
Mg	Calibrated	MgO	0.363	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	12.131	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	14.908	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.167	Calculate
S	Calibrated	SO3	1.332	Calculate
K	Calibrated	K2O	1.411	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	7.725	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	0.660	Calculate
Mn	Calibrated	MnO	0.104	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	2.356	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.107	Calculate
<C>	Not Found	CHNO	57.780	Fixed

Calibration: semiq

ภาคผนวก ง

ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241

เอกสารกำกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน..... 7

CERTIFICATE OF GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Am-241 Half-life: 432.2 years
 Customer: IAEA P.O. No.: INT/1/039/F008D
 Catalog No.: 290M Source No.: 214-17-579 Reference Date: 4-1-88
 Contained Radioactivity: 0.977 μ Ci

Description of Source
 a. Capsule type: "M"
 b. Nature of active deposit: evaporated & diffusion bonded americium
 c. Active diameter: 0.12" oxide
 d. Backing: 0.002" nickel
 e. Cover: 0.002" aluminum & 0.010" mylar

Radioimpurities
none detected

Method of Calibration
 The source was assayed by gamma spectrometry, integrating under the 0.0595 Mev peak(s). The branching ratio(s) used was/were 0.359 gamma rays per decay.
 The source was prepared from a weight aliquot of solution whose activity in uCi/gram was determined by the method above.

Uncertainty of Measurement
 a. Systematic uncertainty in instrument calibration: \pm 2.1 %
 b. Random uncertainty
 1. In assay: \pm 1.4 %
 2. In weighing(s): \pm _____ %
 c. Total Uncertainty: \pm 3.0 % at the 99% confidence level.

NBS Traceability
 This calibration is implicitly traceable to the National Bureau of Standards.

Notes
 1. Nuclear data were taken from "Table of Isotopes", Seventh Edition, edited by C. Michael Lederer et al.
 2. IPL participates in an NBS measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NBS certification) of Standard Reference Materials. (As in NRC Regulatory Guide 4.15)

Michel Devine

 Quality Control

ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES
 1800 No. Keystone St., Burbank, California 91504
 (818) 843-7000

ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Ba-133



Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Ba-133	Customer:	ENTSYS TECHNOLOGIES CO. LTD.
Half-life:	3832 ± 15 days	P.O. No.:	E1485
Catalog No.:	GF-133-M	Reference Date:	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1794-1-1	Contained Radioactivity:	10.54 µCi 390.0 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	302.9, 356.0 keV
Branching ratio used:	0.183, 0.619 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 5 years.

Daniel James Van Dorem
Quality Control

19-Dec-14
Date

EZIP Ref. No. 1794-1

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory

24937 Avenue Tibbitts - Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory

1800 North Keystone Street - Burbank, California 91504

ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137



Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Cs-137	Customer: ENTSYS TECHNOLOGIES CO. LTD.
Half-life: 30.17 ± 0.16 years	P.O. No.: E1485
Catalog No.: GF-137-M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1794-1-5	Contained Radioactivity: 10.28 µCi 380.4 kBq

Physical Description:

A. Capsule type	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Cs-134 = 0.0589% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	661.7 keV
Branching ratio used:	0.851 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.5 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-E19, 1991.
- This source has a working life of 5 years.

David Jameson Dalton
Quality Control

19-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1794-1

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts, Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street, Burbank, California 91504

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจอมพล ขุนธวิวงศ์ เกิดวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยราชภัฏ อุบลราชธานี ในปี พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา นิเวศลิยร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

