

การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา:  
กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม



นายวิศิษฐ์ ปฐมชัยวาลย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3675-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF MERCURY CONTENTS USING GAMMA-RAY TRANSMISSION TECHNIQUE :  
A CASE STUDY OF SLUDGE SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION



Mr. Wisit Pathomchaiwal

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

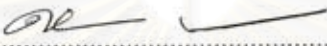
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

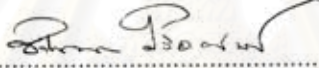
ISBN 974-17-3675-4


|                      |   |
|----------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์    | การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา: |
|                      | กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจจากการผลิตปิโตรเลียม    |
| โดย                  | นายวิศิษฐ์ ปฐมชัยวาลย์                        |
| สาขาวิชา             | นิวเคลียร์เทคโนโลยี                           |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว                |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา           |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

วิศิษฐ์ ปฐมชัยวาลย์ : การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา :

กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม. (DETERMINATION OF MERCURY

CONTENTS USING GAMMA-RAY TRANSMISSION TECHNIQUE : A CASE STUDY OF  
SLUDGE SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว ,อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. สุพิชชา จันทรโยธา, 62 หน้า.

ISBN 974-17-3675-4

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคสำหรับหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม เทคนิคหลายอย่างไม่สามารถให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของปรอทในตัวอย่าง เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณมากที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อย่างเช่น แร่และถ่านหิน

รังสีแกมมาพลังงาน 122 และ 136 keV จากโคบอลต์-57 ที่เลือกมีพลังงานสูงกว่าค่า K-absorption edge ของปรอทเล็กน้อย จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปรอทในตัวอย่าง ในขณะที่รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากซีเซียม-137 ใช้ในการปรับแก้ความแตกต่างของความหนาของตัวอย่าง โดยใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทาลเลียม) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องแบบพกพาในการวัดรังสีแกมมาดังกล่าว เริ่มแรกได้ทดสอบเทคนิคนี้กับตัวอย่างดินผสมตะกั่วก่อน แล้วจึงทดสอบกับตัวอย่างสลัดจ์ ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ หากมีการปรับเทียบที่เหมาะสม สามารถนำเทคนิคที่นำเสนอนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียมและตัวอย่างอื่นๆ ที่มีปรอทปนเปื้อน

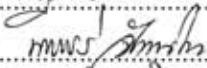
## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา .....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....

สาขาวิชา .....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....

ปีการศึกษา .....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....  .....

## 4670500621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: MERCURY / GAMMA-RAY TRANSMISSION TECHNIQUE

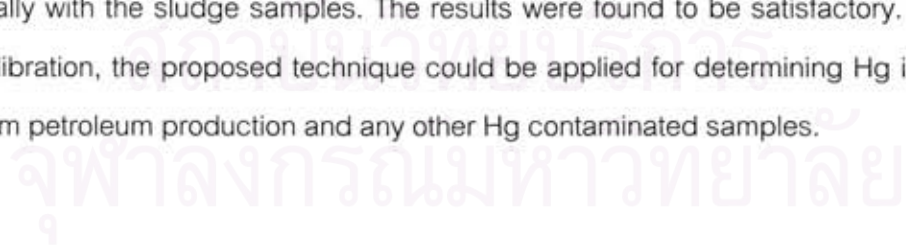
WISIT PHATOMCHAIWAN : DETERMINATION OF MERCURY CONTENTS USING  
GAMMA-RAY TRANSMISSION TECHNIQUE : A CASE STUDY OF SLUDGE  
SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION, THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.  
NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. SUPITCHA  
CHANYOTHA, Ph.D., 62 pp. ISBN 974-17-3675-4

This research proposes a technique for determining mercury (Hg) in sludge samples from petroleum production. Due to inhomogeneity of Hg in the samples, several techniques may fail to give reliable analysis results. The dual gamma-ray transmission technique has been widely used for bulk analysis of inhomogeneous samples like ores and coals.

The selected gamma-rays emitted from <sup>57</sup>Co, 122 and 136 keV, were just above the Hg K-absorption edge thus sensitive to changes in Hg content in the sample while 662-keV gamma-rays from <sup>137</sup>Cs were used to normalize differences in sample density thickness. A 1" x 1" NaI(Tl) detector coupled with a pocket multichannel analyzer was used to detect the gamma-rays. The technique was first tested with soil samples containing lead (Pb) and finally with the sludge samples. The results were found to be satisfactory. With appropriate calibration, the proposed technique could be applied for determining Hg in sludge samples from petroleum production and any other Hg contaminated samples.

Department .....Nuclear Technology.....  
Field of study ....Nuclear Technology.....  
Academic year ..... 2005.....

Student's signature.....  
Advisor's signature.....  
Co-Advisor' signature.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ  
รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทร์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และท่านรองศาสตราจารย์  
ดร. สุพิชชา จันทร์โยธา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นในการวิจัยเป็นอย่างดี  
ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์จเด็จ เย็นใจ ที่ได้ให้  
คำแนะนำและสอนเทคนิคการทดลองและอาจารย์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณนันทนิช จิตต์ธรรม ที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณ คุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี และเพื่อนนิสิตใน  
ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลืออย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....   | ณ    |
| สารบัญภาพ.....   | ญ    |
| บทที่  |      |
| 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ที่มาของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....  | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....  | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....   | 2    |
| 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 3    |
| 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....   | 4    |
| 3 อุปกรณ์ในการทำวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย.....  | 29   |
| 3.1 อุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....   | 29   |
| 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....  | 30   |
| 4 ผลการวิจัย.....  | 39   |
| 4.1 ผลการวิจัย.....  | 39   |
| - ความคงที่ของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา.....  | 39   |
| - ลีอกของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาระหว่างพลังงานต่ำ<br>กับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานและผลการ<br>วิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสัจ..... | 41   |
| - การทดสอบสารตัวอย่างจากปิโตรเลียมเพื่อหาความเข้มข้นปรอท.....  | 50   |
| - ทดสอบความถูกต้องของการหาปริมาณของปรอทโดยใช้เทคนิคการเติม<br>สารมาตรฐาน.....  | 52   |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 53 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....            | 53 |
| 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....         | 55 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ.....                | 56 |
| รายการอ้างอิง.....                 | 57 |
| ภาคผนวก.....                       | 58 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....    | 62 |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ณ

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของดินที่ปริมาณต่างๆ.....   | 39   |
| 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์.....   | 39   |
| 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของปรอท 14.28 เปอร์เซ็นต์.....  | 40   |
| 4.4 ค่าลือกของอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อสัมประ<br>สิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูงของตะกั่ว.....  | 42   |
| 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสถิติ.....  | 45   |
| 4.6 ค่าลือกของอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อสัมประ<br>สิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูงของปรอท.....  | 47   |
| 4.7 ค่าลือกของอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำต่อสัมประ<br>สิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูงของสารตัวอย่างที่มีปรอทปนเปื้อนอยู่จาก<br>ปิโตรเลียม..... | 51   |
| 4.8 ตรวจสอบความถูกต้องในการเติมสารมาตรฐาน.....   | 52   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ญ

| บทที่ | หน้า |
|-------|------|
| 2.1   | 5    |
| 2.2   | 6    |
| 2.3   | 7    |
| 2.4   | 10   |
| 2.5   | 12   |
| 2.6   | 13   |
| 2.7   | 15   |
| 2.8   | 16   |
| 2.9   | 17   |
| 2.10  | 18   |
| 2.11  | 19   |
| 2.12  | 21   |
| 2.13  | 25   |
| 2.14  | 26   |
| 3.1   | 31   |
| 3.2   | 31   |
| 3.3   | 31   |
| 3.4   | 32   |
| 3.5   | 32   |
| 3.6   | 33   |

## สารบัญภาพ

ฉ

| บทที่ | หน้า  |
|-------|---|
| 3.7   | การจัดระบบวัดรังสีในงานวิจัย..... 33  |
| 3.8   | สเปกตรัมรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-57 เมื่อวัดด้วยหัววัดโซเดียมไอโอไดต์(ทลเลียม)..... 34        |
| 3.9   | สเปกตรัมรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดหัววัดโซเดียมไอโอไดต์(ทลเลียม)..... 35 |
| 4.1   | ความสัมพันธ์ระหว่าง density thickness กับ $\ln(I_x / I_0)$ ของดิน, ปรอทและตะกั่ว..... 40                |
| 4.2   | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีแกมมากับความเข้มข้นตะกั่ว..... 43                                 |
| 4.3   | ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับความเข้มข้นปรอท..... 43                                       |
| 4.4   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio กับความเข้มข้นตะกั่ว..... 44  |
| 4.5   | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีแกมมากับความเข้มข้นปรอท..... 48                                   |
| 4.6   | ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับความเข้มข้นปรอท..... 48                                       |
| 4.7   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio กับความเข้มข้นปรอท..... 49  |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรอทเป็นโลหะหนัก เป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมาก มีทั้งคุณอนันต์ในขณะเดียวกันก็มีโทษมหันต์ สามารถดูดซึมผ่านระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหารและซึมผ่านทางผิวหนัง ถ้ามีแผลหรือรอยแตกจะสะสมพิษเอาไว้ ซึ่งแหล่งปรอทในธรรมชาติส่วนใหญ่จะพบในก๊าซธรรมชาติ สำหรับในประเทศไทยตรวจพบครั้งแรกในสภาพโลหะค่อนข้างบริสุทธิ์ ในเดือน สิงหาคม 2528 บริเวณอ่าวไทย ที่แหล่งปลาทอง และพบที่แหล่งสตูล ในเดือน กันยายน 2528 ปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติมีอยู่ 2 รูป คือ อยู่ในรูปของธาตุปรอทและสารประกอบของปรอท และสามารถอึดตัวในอากาศจึงเป็นสารที่มีอันตรายมาก ซึ่งในก๊าซธรรมชาติที่มีปริมาณปรอทเจือปน จะมีผลต่อระบบท่อในโรงแยกก๊าซเพราะว่าปรอทมีคุณสมบัติที่จะรวมตัวกับโลหะได้เกือบทุกชนิดที่เรียกว่า อะมัลกัม ปฏิกริยาที่จะทำให้โครงสร้างของโลหะผสมของท่อในโรงแยกก๊าซเกิดการเสียหาย จากการศึกษเบื้องต้นของปริมาณปรอทที่เจือปนอยู่ในสไลด์จากการผลิต (ชุดเจาะแหล่งบงกช) ก๊าซธรรมชาติพบว่าปรอทอาจมีอยู่ในปริมาณสูงและไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน การวิเคราะห์ปริมาณปรอทจึงต้องเลือกวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสม และมีการสูมตัวอย่างอย่างระมัดระวัง การสูมตัวอย่างปริมาณน้อยอาจเสี่ยงต่อการผิดพลาดในการใช้ผลวิเคราะห์เป็นตัวแทนตัวอย่างทั้งหมด การสูมตัวอย่างปริมาณมากจึงเป็นวิธีที่จะได้ผลวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้มากกว่า งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาในการตรวจหาปริมาณของปรอทในสารตัวอย่างปริมาณมาก โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้อยที่สุดที่ให้ผลรวดเร็วและมีความถูกต้อง

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสไลด์จากการผลิตปิโตรเลียมโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV และ 136 keV จากต้นกำเนิดรังสี Co-57
2. หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่างสลัดจ์ที่อาจมีผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท
3. ทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา
4. ทดสอบความถูกต้องของการหาปริมาณของปรอทโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique)

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
3. ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบตะกั่ว
4. วิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่างสลัดจ์โดยวิธีเรืองรังสีเอกซ์
5. ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างสลัดจ์กับปรอท
6. หาปริมาณของปรอทในสารตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา
7. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีการหาปริมาณปรอทในสารตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียมโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาซึ่งเป็นวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. R.A. Fookes, V.L. Gravitis, J.S. Watt, C.E. Campbell และ E. Steffner, 1983 [7] ได้ศึกษาเรื่อง Feasibility studies of low energy  $\gamma$ -ray techniques for on-line determination of ash content of coal on conveyors โดยเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ ในการใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานต่ำ เพื่อหาปริมาณถ่านหินที่อยู่บนสายพาน ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหิน จากสถานที่ต่าง ๆ จำนวน 4 แห่ง แต่ละแห่งใช้ปริมาณถ่านหิน 100 kg พบว่าความผิดพลาดในการหาปริมาณถ่านหินเป็น 0.99, 1.20, 1.59 และ 2.24 wt% ตามลำดับ โดยปริมาณถ่านหินอยู่ที่ 20.0, 27.1, 24.5 และ 17.1 wt% ash จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ความผิดพลาดส่วนใหญ่ของการหาปริมาณถ่านหิน เนื่องจากความแปรปรวนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในถ่านหิน และ ความผิดพลาดจาก wt% ash เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของถ่านหิน

2. Xu Qi and Zhang Yongchuan, 2000 [8] ทำวิจัยเรื่อง A novel automated separator based on dual energy gamma-ray transmission เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องมือในการวัดปริมาณถ่านหินจากถ่านหินโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของถ่านหินและถ่านหิน โดยการออกแบบอุปกรณ์วัดบนสายพานเป็นการวัดความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านออกมา ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณถ่านหินได้อย่างถูกต้อง

3. M. Yazdi and S.A. Esmailnia, 2003 [9] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวัดปริมาณถ่านหินจาก 3 สถานที่เหมืองแร่ Shahroud, Zirad และ Lushan โดยอยู่ทางเหนือของอิหร่าน เป็นการเปรียบเทียบการวัดถ่านหินด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน การวัดด้วยเทคนิคนี้เป็น การหาเปอร์เซ็นต์ของถ่านหินในถ่านหิน ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี  $^{241}\text{Am}$  (60 keV) และ  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) โดยการวัดด้วยวิธีนี้เป็นเทคนิคที่หาถ่านหินให้มีความรวดเร็วและมีความไวต่อการวัดหาปริมาณถ่านหินในถ่านหิน โดยการใช้นิวเคลียสรังสีแกมมาสองพลังงานจะพบความแตกต่างของถ่านหินในเหมืองต่างๆ

4. A.H. El-Kateb, R.A.M. Rizk and A.M Abdul-Kader, 2002 [10] ได้ศึกษาการวัดส่วนผสมของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอะลูมิเนียมด้วยวิธีส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน โดยความหนาของอะลูมิเนียม 0.39 กับ 0.83 เซนติเมตร พื้นที่ 7.07 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ 81 และ 356 keV โดยได้เปรียบเทียบการใช้เทคนิคพลังงานเดียวและสองพลังงาน หาความเข้มข้นของอะลูมิเนียม สรุปได้ว่ามีความถูกต้องเท่ากับ 98.53 และ 99.09 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เทคนิครังสีแกมมาพลังงานเดียวและรังสีแกมมาสองพลังงานตามลำดับ

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีแกมมา

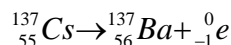
การสลายตัวให้รังสีหรืออนุภาคใดๆ หากนิวไคลด์ถูกกักอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ปรากฏการณ์ที่ตามมา คือ การปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) โดยจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ออกมา เรียกว่า รังสีแกมมาหรือโฟตอน (ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่น และความยาวคลื่นเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

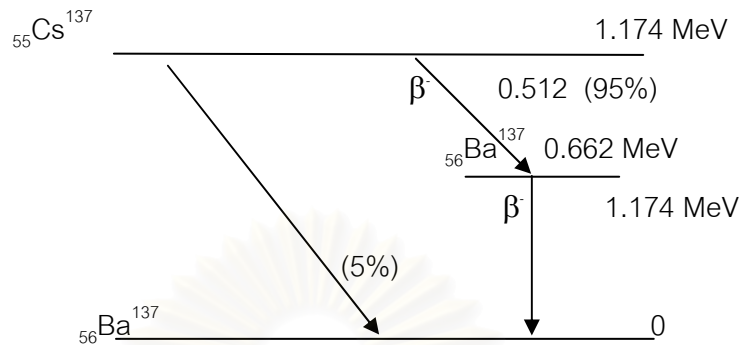
$$E = h\nu \quad (2.1)$$

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

|       |           |                               |                                 |
|-------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|
| เมื่อ | E         | คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV) |                                 |
|       | h         | คือ ค่าคงที่ของพลังค์         | ( $4.136 \times 10^{-15}$ eV.s) |
|       | $\nu$     | คือ ความถี่ของคลื่น           | ( $\text{sec}^{-1}$ )           |
|       | c         | คือ ความเร็วแสง               | ( $2.9979 \times 10^{10}$ cm/s) |
|       | $\lambda$ | คือ ความยาวคลื่น              | (cm)                            |

ช่วงเวลาของการสลายตัวให้รังสีแกมมาสั้นมาก แตกต่างกันแต่นิวไคลด์โดยมักจะอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-10}$  วินาที จึงทำให้รู้ดีว่ารังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาพร้อมๆ กับการสลายตัวของนิวไคลด์แม่ แต่ในบางนิวไคลด์อาจใช้เวลามากกว่า 1 วินาที ในการปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น เช่น  $^{137}\text{Cs}$  สลายตัวให้รังสีบีตา ได้นิวไคลด์ลูก  $^{137}\text{Ba}$  ที่มีครึ่งชีวิต 2.55 นาที ในการปรับตัวสู่สถานะพื้น เรียกสถานะนี้ว่าอุปเสถียร (metastable state) ใช้อักษรย่อ m กำกับไว้ที่นิวไคลด์ เช่น  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ในการปรับตัวสู่สถานะพื้นนิวไคลด์อาจไม่ลงไปสู่สถานะพื้นทันทีแต่จะปรับไปสู่สถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานต่ำลง จนถึงสถานะพื้นทำให้รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมามีหลายพลังงาน โดยรังสีแกมมาอาจมีพลังงานได้ตั้งแต่ระดับ eV จนถึงประมาณ 7 MeV





รูปที่ 2.1 แผนผังการสลายตัวของ  $^{137}\text{Cs}$ [1]

### 2.1.1 อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสาร

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารนั้นมีด้วยกันหลายแบบ โดยอันตรกิริยาที่สำคัญมี 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และแพร์โปรดักชัน (Pair production)

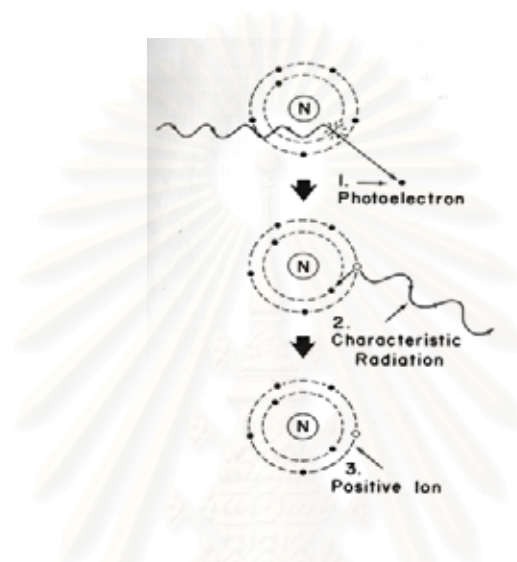
#### 2.1.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)[2]

เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมตัวกลาง พลังงานที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้ต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร ซึ่งเมื่อรังสีแกมมากระทบอะตอมแล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนของสสาร ทำให้รังสีแกมมาหายไป และอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) โดยมีพลังงาน ( $E_e$ ) เท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมา ( $h\nu$ ) กับพลังงานยึดเหนี่ยว (B.E.) ดังสมการ



$$E_e = E_\gamma - E_b = h\nu - B.E. \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_e$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอม  
 $E_\gamma (h\nu)$  คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอะตอม  
 $E_b (B.E)$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเกิดโฟโตอิเล็กทริก

อันตรกิริยานี้มักเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนในวงโคจร K และขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา ( $E_\gamma$ ) และเลขเชิงอะตอมของสสาร ( $Z$ ) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

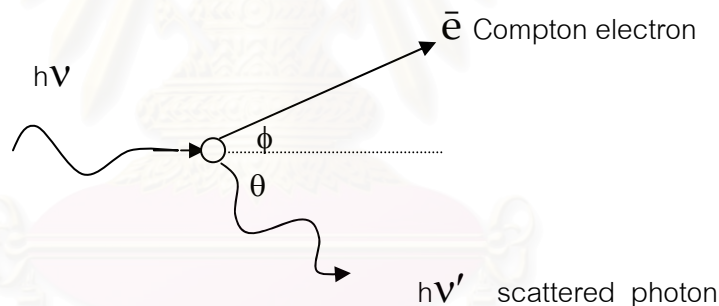
$$\text{โอกาสการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก} \approx \text{ค่าคงตัว} (Z^n / E_\gamma^3)$$

จากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะเกิดมากขึ้น เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดต่ำลง และตัวกลางที่มีเลขเชิงอะตอมสูง โดยอันตรกิริยานี้มีความสำคัญเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า 1 MeV กระแทกกับตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง แต่ในกรณีรังสีแกมมามีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมแล้ว อิเล็กตรอนก็จะไม่หลุดออกจากอะตอม ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก หลังจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกไปแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรรอบนอกจะเข้ามาแทนที่ โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี

เอกซ์ตันั้นจึงสรุปได้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นการดูดกลืนรังสีแกมมาทั้งหมดแล้วให้อิเล็กตรอน และรังสีเอกซ์ออกมา

### 2.1.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton effect) หรือ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

ในปรากฏการณ์คอมป์ตัน รังสีแกมมาเข้าชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบบยึดหยุ่นในการชนแบบนี้ ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย โดยรังสีแกมมาจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรไปในทิศทางทำมุม  $\phi$  กับทิศทางเดิมของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (compton electron ) ส่วนรังสีแกมมาที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปโดยทำมุม  $\theta$  กับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์

ถ้าให้รังสีแกมมาตกกระทบมีพลังงาน ( $h\nu$ ) และโมเมนตัม ( $h\nu/c$ ) กระแทกกับอิเล็กตรอนอิสระที่มีมวลนิ่ง ( $m_0$ ) โดยอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนมีผลทำให้อิเล็กตรอนกระเจิงไปทำมุม  $\theta$  กับแนวเดิมและมีพลังงานเหลือ ( $h\nu'$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนกระเจิงไปเป็นมุม  $\phi$  และมีพลังงานจลน์  $E_k$  จากการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานจะได้

$$\begin{aligned}
 E_k &= mc^2 - m_0c^2 \\
 &= m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $\beta = v/c$  โดยที่  $v$  เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน ( $p_e$ ) จะมีค่า

$$\begin{aligned} p_e &= m\beta c \\ &= \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน  $x$  และ  $y$  และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos \theta + \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos \phi \quad (2.6)$$

$$0 = \frac{hv'}{c} \sin \theta - \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \phi \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} hv &= hv' + E_k \\ &= hv' + m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

เมื่อให้ค่าของมุม  $\phi$  คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$\text{แนวแกน } x; \quad p_e c \cos \phi = hv - hv' \cos \theta \quad (2.9)$$

$$\text{แนวแกน } y; \quad p_e c \sin \phi = hv' \sin \theta \quad (2.10)$$

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (hv)^2 - 2(hv)(hv') \cos \theta + (hv')^2 \quad (2.11)$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0c^2 \quad (2.12)$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{(p^2c^2 + m_0^2c^4)} \quad (2.13)$$

แทนค่าสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.12) ให้เท่ากัน จะได้ว่า

$$p_e^2c^2 + m_0^2c^4 = (E_k + m_0c^2)^2 \quad (2.14)$$

แทนค่า  $E_k = h\nu - h\nu'$  จากสมการ (2.14) ได้

$$p_e^2c^2 = (h\nu - h\nu')^2 + 2(h\nu - h\nu')m_0c^2 \quad (2.15)$$

สมการ (2.11) และสมการ (2.15) เท่ากัน จะได้ว่า

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$  ซึ่งเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ตกลงบนอิเล็กตรอนที่อยู่ใน

หน่วยของมวลนิ่งของอิเล็กตรอนในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของพลังงานจลน์ได้เมื่อ  $\lambda$  และ  $\lambda'$  เป็นความยาวคลื่นของรังสีแกมมาที่เข้าชน และที่โฟตอนสะท้อนออกไป และ  $m$  เป็นมวลของอิเล็กตรอน ความยาวคลื่นของโฟตอนที่เปลี่ยนไป ( $\lambda' - \lambda$ ) คำนวณจากสมการ

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (2.17)$$

ถ้า  $\theta = 90^\circ$   $\cos\theta = 0$  ดังนั้น

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}$$

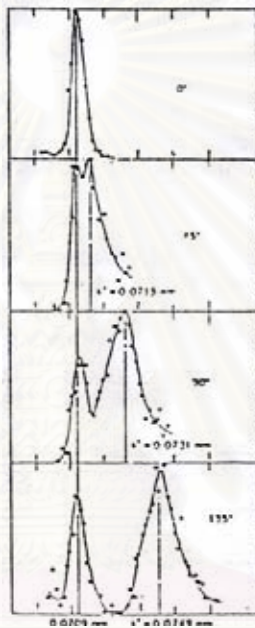
$$= (6.63 \times 10^{-34}) / (9.11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8)$$

$$= 2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$= 0.0243 \text{ \AA}$$

$$\Delta\lambda = 0.02426(1 - \cos\theta) \text{ \AA}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่  $\theta=0^\circ$  ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาไม่เปลี่ยนแปลงส่วนที่มุม  $\theta = 90^\circ$  ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาเปลี่ยนไป  $\Delta\lambda = 0.02426 \text{ \AA}$  และที่มุม  $\theta = 180^\circ$  ทำให้ได้  $\Delta\lambda = 0.4852 \text{ \AA}$  ผลการทดลองหาค่าความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นนั้นแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่างๆ

จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 2.4 ความเข้มของรังสี และความยาวคลื่นของรังสีเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง และความยาวคลื่นที่เปลี่ยนขึ้นอยู่กับมุมสะท้อนของโฟตอน ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ ปฏิกิริยาการรณคอมป์ตันเกิดขึ้นได้ดีกับสสารที่มีค่าเลขอะตอมสูง และลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้น

### 2.1.1.3 แพร่โปรดัคชัน (pair production)

อันตรกิริยาแพร่โปรดัคชันเป็นแบบหนึ่งของการดูดกลืนแกมมาโฟตอน ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าอย่างน้อย 1.022 MeV วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม รังสีแกมมาจะหายไปโดยใช้พลังงานไปในการสร้างอิเล็กตรอน และโพสิตรอนขึ้นมาคู่หนึ่งโดยวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน ซึ่งมวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าเทียบเท่ากับพลังงาน 1.022 MeV ดังนั้นรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าไปต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า 1.022 MeV จึงทำให้เกิดแพร่โปรดัคชันได้ พิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน = ค่าคงตัว (Z/E)

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} + E_{nuc} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $h\nu$  คือ พลังงานของรังสีแกมมาตกกระทบ

$2m_0c^2$  คือ พลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน

$E_{e^-}$ ,  $E_{e^+}$ ,  $E_{nuc}$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน, โพสิตรอนและนิวเคลียสตามลำดับ

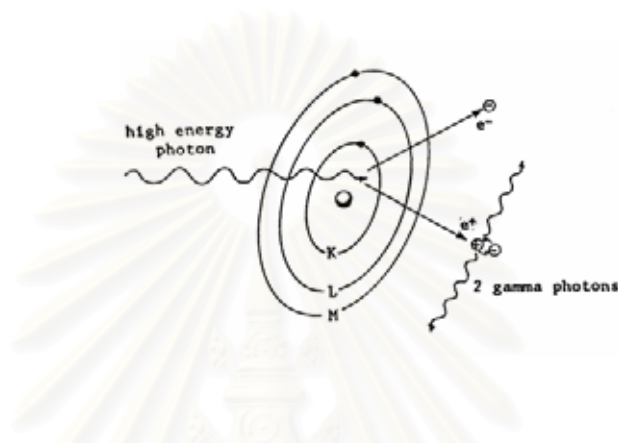
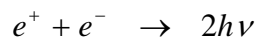
หากคิดว่านิวเคลียสมีมวลมาก  $E_{nuc}$  จะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ สมการจะเหลือ

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+}$$

ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า พลังงานขีดเริ่มที่จะทำให้เกิดขบวนการนี้คือ  $2m_0c^2 \approx 1.022$  MeV พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าเท่ากัน ผลต่างระหว่างพลังงานรังสีแกมมากับพลังงานมวลพัก (rest mass energy) ของโพสิตรอนและอิเล็กตรอนรวมกันดังสมการ

$$E_{k(e^- \text{ or } e^+)} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022) \text{ MeV} \quad (2.19)$$

โดยอันตรกิริยาแบบแพร่โปรดักชันนี้เป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล หลังจากเกิดแพร่โปรดักชัน โฟลิตรอนอาจรวมตัวกับอิเล็กตรอนอื่นแล้วให้โฟตอน 2 ตัว ซึ่งมีพลังงานตัวละ 0.511 MeV เรียกว่า แอนนิฮิเลชัน ( annihilation )

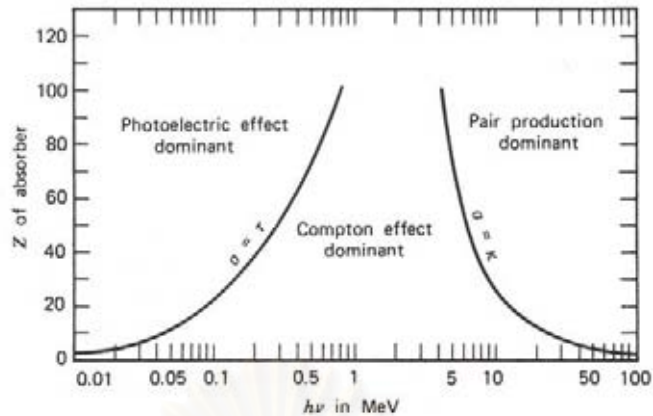


รูปที่ 2.5 การเกิดแพร่โปรดักชันและปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน

ซึ่งโอกาสการเกิดอันตรกิริยาแพร่โปรดักชันขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและเลขอะตอมของสสาร

$$\text{โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาแพร่โปรดักชัน} \approx \text{ค่าคงตัว } Z^2 (E - 1.022)$$

เมื่อเปรียบเทียบโอกาสการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะเห็นได้ว่าอันตรกิริยาแพร่โปรดักชันเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของสสาร และพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิน 1.022 MeV เมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกและคอมป์ตันจะลดลง แต่แพร่โปรดักชันเพิ่มขึ้นสำหรับสสารที่มีเลขอะตอมสูงและช่วงที่พลังงานต่ำประมาณ 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV จะมีโอกาสเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์มากที่สุด ช่วงพลังงานประมาณ 0.1 MeV ถึง 10 MeV จะมีโอกาสการเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์มากที่สุด และช่วงที่พลังงานสูงกว่า 1.022 MeV ขึ้นไป จะเกิดแพร่โปรดักชันจะมีโอกาสในการเกิดมากขึ้นเมื่อพลังงานสูงๆ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ช่วงโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ สัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง และพลังงานของรังสีแกมมา [3]

ในรูปที่ 2.6 เป็นการแสดงถึงความสำคัญของ 3 ปฏิกิริยาการณ โดยบรรยายถึงความแตกต่างของการดูดกลืนของแต่ละธาตุและพลังงานของรังสีแกมมา โดยเส้นด้านซ้ายแทนด้วยพลังงานของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ( $\tau$ ) และปรากฏการณ์คอมป์ตัน ( $\sigma$ ) ที่มีโอกาสการเกิดปฏิกิริยาเท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ โดยเส้นด้านขวาแสดงพลังงานของปรากฏการณ์คอมป์ตัน ( $\sigma$ ) และปรากฏการณ์แฟร์โพรดักชัน ( $\kappa$ ) ที่มีโอกาสการเกิดปฏิกิริยาเท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ โดยทั้งสามพื้นที่จะกล่าวถึงปรากฏการณ์แฟร์โพรดักชัน ปรากฏการณ์คอมป์ตัน และปรากฏการณ์แฟร์โพรดักชัน

### 2.1.2 การลดทอนของรังสีแกมมา[4]

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในตัวกลางใดๆ รังสีถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ ของรังสีแกมมากับสสารบางส่วนที่กระเจิงไป บางส่วนก็ผ่านออกมา ความเข้มของรังสีลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อพิจารณารังสีแกมมาพลังงานเดียวเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง การสูญเสียความเข้มของรังสีในความหนา ที่จุดใด ๆ เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น กับความหนาของตัวกลาง ดังสมการ

$$dI = -\mu I dx$$

- เมื่อ
- $I$  คือ ความเข้มของรังสีแกมมาโฟตอน ( $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ )
  - $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น ( $\text{cm}^{-1}$ )
  - $dx$  คือ ความหนาของตัวกลาง



โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสีแกมมา ถ้าให้  $\sigma$  เป็นภาคตัดขวางรวม (total cross section) ต่ออะตอมของตัวกลาง จะได้สมการ

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c \quad (2.20)$$

คูณด้วยค่าความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง (N) เข้าไปจะได้สมการ

$$N\sigma = N(\sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c) \quad (2.21)$$

ผลคูณระหว่าง  $N\sigma$  นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)” ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนเป็น  $\mu$  ดังนั้น

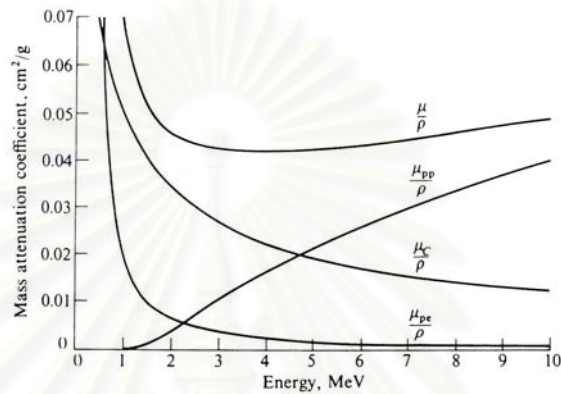
$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_c \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\mu$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม  
 $\mu_{pe}$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กตริก  
 $\mu_c$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากอันตรกิริยาคอมป์ตัน  
 $\mu_{pp}$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากอันตรกิริยาเพริโปรดักชัน

เมื่อ  $\mu$ ,  $\mu_{pe}$ ,  $\mu_{pp}$  และ  $\mu_c$  เป็น สัมประสิทธิ์การลดทอนรวม และของอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ เพริโปรดักชันและการกระเจิงคอมป์ตันตามลำดับ ค่า  $\mu$  นี้มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  และมักพบค่า  $\mu$  ในเทอมของเทอมของ  $(\mu/\rho)$  ซึ่งได้จากการนำค่าความหนาแน่น  $\rho$  (physical density) ของตัวกลางไปหารค่า  $\mu$  สัมประสิทธิ์การลดทอนนี้อาจกล่าวในรูปของเทอมสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ซึ่งมีหน่วย  $\text{cm}^2/\text{g}$  ดังสมการ

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} \quad (2.23)$$

ซึ่งสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของ  
 สสารที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยา  $\frac{\mu_{pe}}{\rho}$  และ  $\frac{\mu_c}{\rho}$  มีค่ามากเมื่อรังสีพลังงานต่ำ จะลดลงเมื่อพลังงาน  
 มีค่ามากขึ้นและ  $\frac{\mu_{pp}}{\rho}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงาน



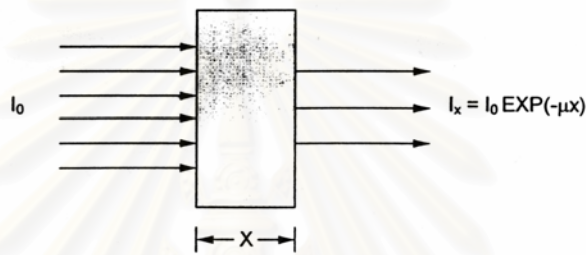
รูปที่ 2.7 ค่า  $\mu/\rho$ ,  $\mu_{pe}/\rho$ ,  $\mu_c/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  ของตะกั่ว [1]

จากรูปที่ 2.7 แสดงค่า  $\mu/\rho$  ของตะกั่ว จะเห็นได้ว่าค่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_c/\rho$  ลดลงเมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ส่วนค่า  $\mu_{pp}/\rho$  จะเริ่มที่พลังงาน 1.022 MeV และสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ถ้าพิจารณา ( $\mu/\rho$ ) รวม จะเห็นได้ว่าพลังงานรังสีแกมมาที่เท่ากับ 3.5 MeV มีค่ารวมที่ต่ำสุด และในช่วงพลังงาน 0.5 ถึง 5 MeV ค่า  $\mu_c/\rho$  ของตะกั่วจะสูงกว่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  ซึ่งในช่วงพลังงานดังกล่าวอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) เนื่องจากค่า  $\sigma_{pe}$  และ  $\sigma_{pp}$  ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวกลางอย่างมาก ดังนั้นธาตุที่มีค่าเลขอะตอมต่ำ ช่วงที่  $\mu_c/\rho$  จะมีค่ามากกว่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  จึงมีช่วงกว้างกว่า ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม ค่า  $\mu_c/\rho$  จะมีค่ามากกว่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  ในช่วงที่รังสีแกมมามีพลังงาน 0.06 ถึง 20 MeV กรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า 1.022 MeV ค่า  $\mu_{pp}/\rho$  จะเท่ากับ 0

ถ้ารังสีแกมมาพลังงานเดียว (monoenergetic  $\gamma$ -ray) ที่เป็นลำขนานแคบ ๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนา  $x$  เซนติเมตร ความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านตัวกลางโดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ ออกมาได้คือ  $I$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ[5]

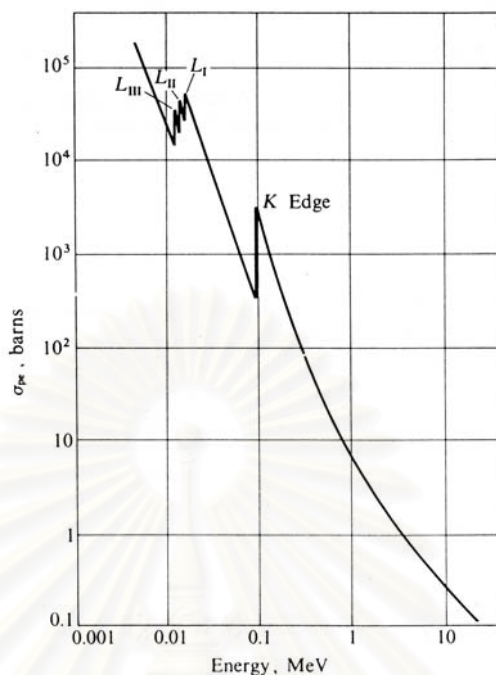
$$I = I_0 e^{-(\mu x)} \quad (2.24)$$

- เมื่อ  $I_0$  เป็นค่าความเข้มเดิม  
 $I$  ค่าความเข้มที่ผ่านตัวกลางออกมาได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ  
 $\mu$  สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )  
 $X$  ความหนาของตัวกลาง (cm)



รูปที่ 2.8 การดูดกลืนรังสีแกมมา

สำหรับ dual energy gamma-ray transmission technique โดยใช้รังสีแกมมาสองพลังงาน ใช้หลักการของ absorption edge ( $K_{\text{edge}}$ ) แสดงถึงระดับพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนในวง K ออกจากอะตอมหลังจากอิเล็กตรอนหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงนอกจะเข้ามาแทนที่ทำให้มีการปล่อยรังสีเอกซ์โดยรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานของโฟตอนที่ทำให้อิเล็กตรอนออกไป .



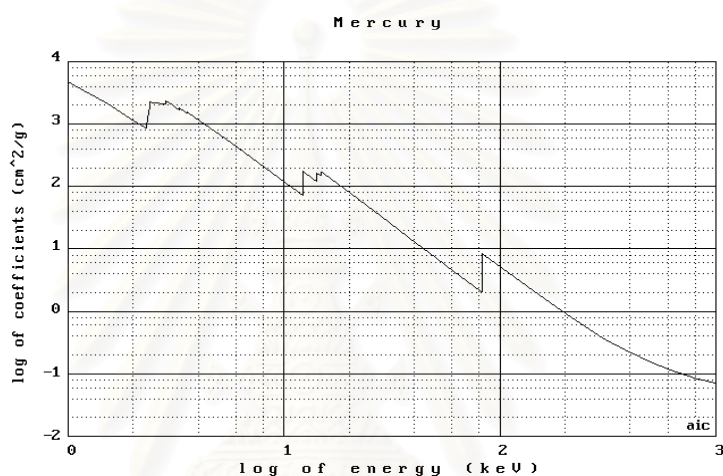
รูปที่ 2.9 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน [4]

จากรูป 2.9 ค่า  $\sigma_{pe}$  มีความไม่ต่อเนื่องในบางพลังงาน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\sigma_{pe}$  อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์ปชันเอจ (absorption edge)” ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้นระดับพลังงานต่างๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอบซอร์ปชันเอจต่างกันคือ  $K_{edge}$ ,  $L_{edge}$ ,  $M_{edge}$  เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่าแอบซอร์ปชันเอจการดูดกลืนของชั้น K จึงมีพลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียวเนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วนชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมีแอบซอร์ปชันเอจ 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

$K_{edge}$  เป็นค่าพลังงานที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K- electron) พอดี อะตอมจะมีค่า  $\sigma_{pe}$  สูงขึ้น เพราะฉะนั้นอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานเท่ากับ  $K_{edge}$  สูงกว่า

ในช่วงพลังงานใกล้เคียงกัน ในกรณีที่มีรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่า  $K_{edge}$  ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคท์กับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K-electron) ได้

ส่วน  $L_I$ ,  $L_{II}$  และ  $L_{III}$  ก็ทำนองเดียวกัน คือ เป็นจุดที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร L (L – electron) ในวงโคจรย่อย (subshell) ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



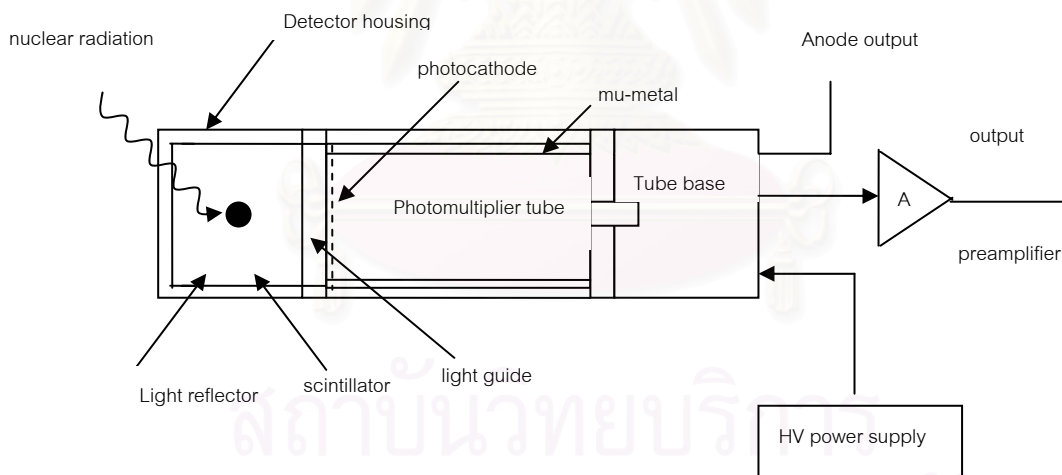
รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรอท

จากรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรอทกับพลังงานของโฟตอน จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟจะปรากฏรอยหยัก แสดงถึงระดับพลังงานที่ต้องใช้ในการผลักรังสีเอกซ์ออกจากวงโคจร ดังเช่นในรูปที่ 2.10 เป็น  $K_{edge}$  ของปรอท ซึ่งมีเลขอะตอมสูง ( $Z=80$ ) ที่  $K_{edge}$  แสดงระดับพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนในวง K หลุดออกจากอะตอม มีค่าเท่ากับ 83.106 keV หลังจากอิเล็กตรอนหลุดออกไปอิเล็กตรอนวงนอกจะเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปล่อยรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จะมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานของโฟตอนชนอิเล็กตรอนออกไป[6]

## 2.2 การทำงานของระบบการเก็บข้อมูลในงานวิจัยของเครื่องวัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)

หัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) เป็นหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลเตอร์ โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ทำอันตรกิริยากับรังสีแกมมาและเกิดการประกายแสง (scintillator) ต่อเชื่อมกับส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ (Photomultiplier tube, PMT) ซึ่งห่อหุ้มด้วยวัสดุ ( $\mu$ -metal) ป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กเพื่อมิให้ของอิเล็กทรอนิกส์เบี่ยงเบนจากบริเวณไดโนด (dynode)

### 2.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของหัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)

เครื่องวัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ประกอบด้วย

#### 2.2.1.1 หัววัดรังสี (Detector) ประกอบด้วย

- ผลึกโซเดียมไอโอไดด์ [NaI (TI) crystal]

- หลอดโฟโตมัลติพลาย (Photomultiplier tube)
- แหล่งจ่ายไฟที่ศักดา (High voltage power supply)
- 프리แอมพลิไฟเออร์ (Preamplifier)
- ส่วนประกอบอื่นๆ

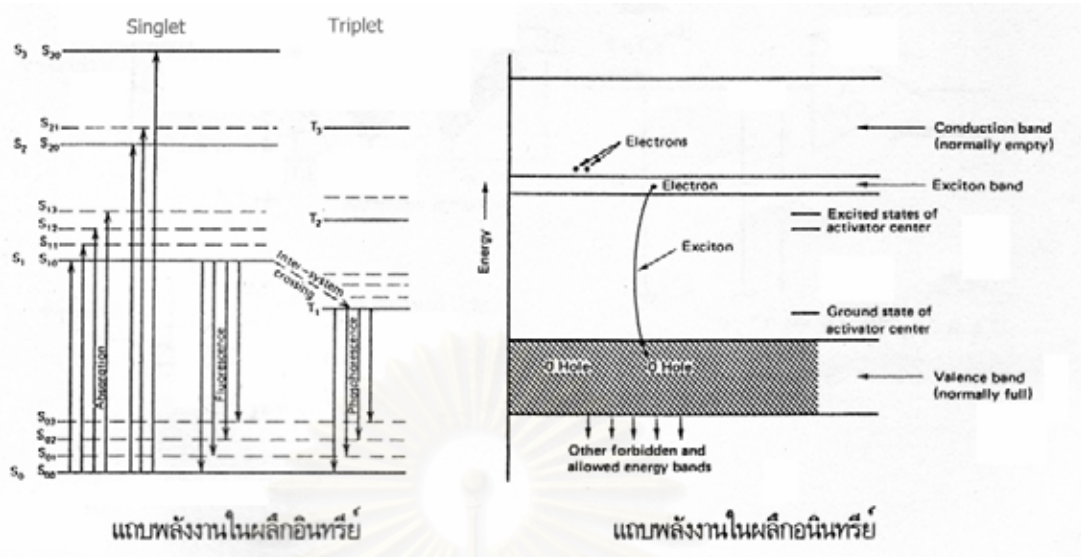
2.2.1.2 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)

2.2.1.3 วิเคราะห์ความสูงสัญญาณ (Pulse height analyzer)

2.2.1.4 ส่วนแสดงผล (Display unit)

## 2.2.2 หัววัดรังสี (Detector) ประกอบด้วย

หัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) [NaI (TI) crystal] เป็นซินทิลเลเตอร์แบบสารอนินทรีย์ (inorganic) ซึ่งมีความหนาแน่น 3.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เลขอะตอมของไอโอดีนเท่ากับ 53 ซึ่งสูงพอที่จะดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงานต่ำและปานกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลึกโซเดียมไอโอไดด์จะเกิดการเรืองแสงที่อุณหภูมิต่ำได้ คือ ที่อุณหภูมิที่ไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen temperature) ถ้าทำการผสม impurities ของทัลเลียม (TI) ลงไป จะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเรืองแสง (scintillation) ได้ที่อุณหภูมิห้องผลึกโซเดียมไอโอไดด์จะดูดความชื้นได้ดี จึงต้องปิดด้วยภาชนะที่ปิดสนิททำด้วยอะลูมิเนียม นอกจากนี้คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของผลึกชนิดนี้ก็คือ มีค่าดัชนีหักเหของแสง 1.85 ซึ่งนับว่าสูงมีผลทำให้แสงที่เกิดขึ้นในผลึกอันเนื่องจากการเกิดรังสีแกมมาเดินทางไปได้ง่าย โดยกระบวนการเกิดซินทิลเลเตอร์ หรือ สารเรืองรังสี คือ กระบวนการดูดกลืนพลังงานโดยตัวกลางแล้วเปล่งประกายแสงออกมาสามารถเห็นได้ เรียกว่า การเรืองแสง (Fluorescence) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยมีกลไกคล้ายกันคือการเกิดเอกซ์ไซเตชัน (Excitation) ของอิเล็กตรอนจากภาวะปกติ สู่ภาวะถูกกระตุ้นที่ระดับพลังงานหนึ่งและกลับลงสู่ภาวะปกติ ด้วยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้หรือใกล้เคียงคลื่นแสงย่านแสงเหนือม่วงดังแสดงกลไกการเกิดประกายแสง และประกายแสงที่เปล่งออกมาจากสารเรืองรังสีจากผลของภาวะถูกกระตุ้นของอิเล็กตรอนโดยรังสีนั้น จะสลายตัวแบบเอกซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของสารกับการเกิดแสงเรือง

โดยผลึกโซเดียมไอโอไดด์เป็น Alkali halides บริสุทธิ์ ประกอบด้วยชั้นพลังงาน คือ Valence Band ถัดขึ้นมาเป็น Conduction Band ซึ่งไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ โดยระหว่างชั้นจะเป็น Forbidden Band ซึ่งปกติไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เมื่อผลึกได้รับรังสีแกมมาพลังงานจากรังสีแกมมา ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจาก Valence Band ไปยัง Conduction Band ทั้งอิเล็กตรอนและช่องว่างที่เกิดขึ้นต่างเคลื่อนที่อย่างอิสระ เรียกว่า Ionization แต่ถ้าอิเล็กตรอนนั้นถูกกระตุ้นไม่ถึง Conduction Band แต่อยู่ที่ Excitation Band ทำให้เกิด electron-hole pair เรียกว่า Excitation ในผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ที่ใช้นี้มี impurity level หรือ trap แทรกอยู่ในชั้นผลึกทำให้เกิดชั้นพลังงานใหม่ แทรกอยู่ใน Forbidden Band ซึ่งเมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นเคลื่อนที่มาถึงชั้นพลังงานนี้ จะถูกดักจับไว้ที่บริเวณนี้ซึ่งเรียกว่า Activation Center ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นมีการแทนที่ของอิเล็กตรอนลงสู่ ground state จะทำให้เกิดแสงในช่วง Fluorescent สารที่ทำให้เกิด impurity level ในผลึกโซเดียมไอโอไดด์ คือ ทาลเลียม (Thallium) โดยปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรังสีแกมมาที่มากกระทบผลึกจะถูกดูดกลืนพลังงานไปทั้งหมดหรือบางส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา 3 อย่างที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) กับ ปฏิกิริยาคอมป์ตัน (Compton effect) และ แพริโปรดักชัน (pair production)



### 2.2.2.1 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tubes)

หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เป็นหลอดที่ต่อจากผลึกซีเดียมไอโอไดด์ มีหน้าที่ผลิตกระแสแบบ pulse จากการกระตุ้นของแสงเพียงเล็กน้อยจากการเรืองแสง (scintillation) ของผลึกซีเดียมไอโอไดด์ โดยหน้าที่หลักของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ มี 2 อย่างคือ เปลี่ยนแสงให้เป็นอิเล็กตรอนและขยายสัญญาณเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอน

### 2.2.2.2 แหล่งจ่ายไฟที่ความต่างศักย์สูง (High voltage power supply)

เป็นส่วนที่สามารถเพิ่มหรือลดความต่างศักย์ที่ใดโหนดแต่ละคู่การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง จะมีผลต่อการขยายสัญญาณอย่างมาก ดังนั้นเวลาที่เลือกซื้อเครื่องวัดรังสีแกมมา จะต้องเลือกเครื่องที่ปรับค่าความต่างศักย์ได้ดีและให้ศักดาไฟฟ้าสูงคงที่ตลอดช่วงการใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานาน

### 2.2.2.3 ส่วนประกอบอื่นๆ (Accessory unit) ของหัวนับวัดรังสี (Detector) ดังนี้

#### ก. คอลลิเมเตอร์ (Collimator)

เครื่องนับวัดรังสีบางชนิดถูกออกแบบให้มีคอลลิเมเตอร์เพื่อนำมาใช้ในงานที่เหมาะสม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งวางอยู่ข้างหน้าผลึกทำหน้าที่จำกัดขอบเขตการวัดรังสีของหัววัดรังสีและขจัดโฟตอนที่เกิดการกระเจิงไม่ให้เข้าสู่หัววัดรังสี โดยคอลลิเมเตอร์ส่วนมากทำมาจากตะกั่ว

#### ข. ผงสะท้อนแสง (Reflecting Powder)

เป็นวัสดุ  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  หรือ  $MgO$  ล้อมรอบผลึกยกเว้นด้านที่ติดกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ เพื่อให้ประกายแสงที่เกิดขึ้นริมๆ ของผลึกสะท้อนเข้าไปในหัววัดให้มากที่สุด

### ค. กระจบอกรันแสง (Light-Tight Can)

กระจบอกรันจะทำด้วยอะลูมิเนียม นอกจากบอกรันแสงจากที่อื่นที่ไม่ได้มาจากสารกัมมันตรังสีที่ต้องการนับวัดแล้ว ยังช่วยบอกรันผลลิกโซเดียมไอโอไดด์จากความชื้นด้วย

### ง. ไลท์ ไพพ์ (Light pipe)

เป็นสารพวก polymethyl methacrylate, lucite, plexigrass, polystyrene หรือ mineral oil ทำหน้าที่ให้แสงที่เกิดขึ้นในผลลิกเดินทางไปยังหลอดโฟโตมัลติพลาย โดยไม่หักเหออกไปเนื่องจากความแตกต่างของดัชนีหักเห

### จ. ตัวรวบรวมอิเล็คตรอน (Integrator)

จะเป็นตัวรวมอิเล็คตรอนที่ออกมาจาก หลอดโฟโตมัลติพลาย ให้กลายเป็นคลื่นที่มีแรงดันไฟฟ้า (electric pulse) ที่เป็นสัดส่วนกับประจุของอิเล็คตรอน ซึ่งเครื่องมือที่ทำหน้าที่นี้คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

### ฉ. วัสดุกันรังสี (shield)

เป็นตะกั่วหนาล้อมส่วนที่เป็นหัววัดรังสีทั้งหมด เหลือที่ว่างไว้สำหรับใส่สารที่จะวัดเท่านั้นหรือบริเวณด้านหน้าของผลลิกโซเดียมไอโอไดด์ วัสดุกันรังสีนี้จะช่วยไม่ให้รังสีจากที่อื่นที่ไม่ต้องการมาถูกวัดรังสี เพราะจะทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง

### ช. วัสดุกันสนามแม่เหล็ก (Magnetic Shield or $\mu$ metal)

เนื่องจากการทำงานของหัววัดรังสี ถ้ามีสนามแม่เหล็กมารบกวนจะทำให้ค่านับวัดผิดพลาด จึงต้องมีวัสดุกันสนามแม่เหล็กครอบหัววัดรังสีทั้งหมด

#### 2.2.2.4 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)

เนื่องจากเป็นสัญญาณจากหลอดโฟโตมัลติพลายและพีแอมพลิไฟเออร์มีขนาดเล็กเป็นมิลลิโวลท์ จึงต้องมีการขยายให้มีความเพิ่มขึ้นเป็นโวลท์โดยใช้แอมพลิไฟเออร์ โดยการเพิ่มความ

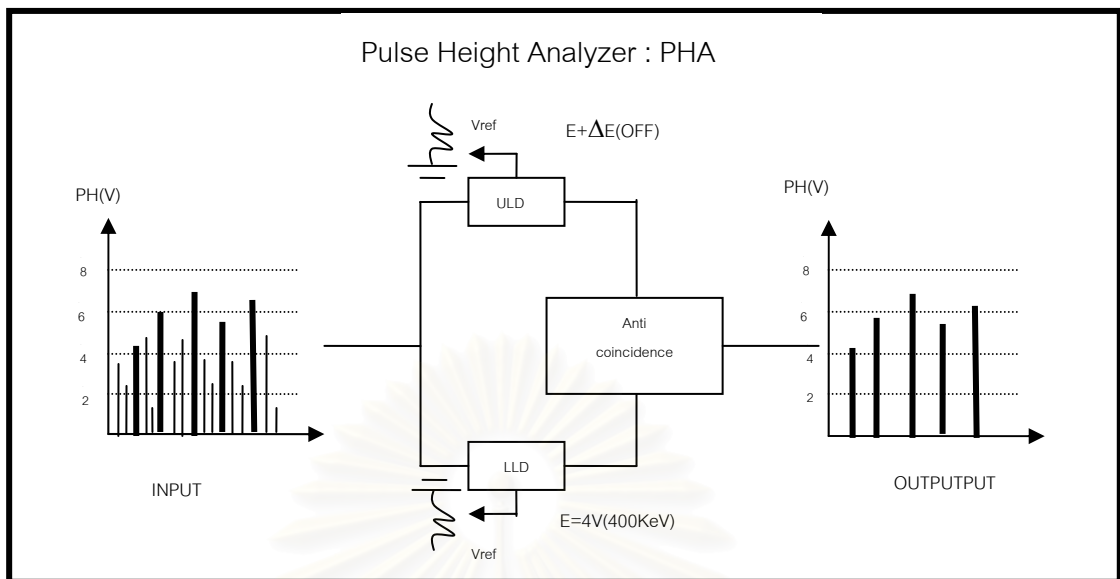
เกน (gain) หรืออัตราขยาย อัตราส่วนของสัญญาณ output ต่อ สัญญาณ input ซึ่งควบคุมโดยชุดควบคุมเกน (stepgain control) ที่มีปุ่มปรับได้ หลังจากขยายสัญญาณแล้วมีการปรับแต่งสัญญาณมี time constant สั้นลงเพื่อที่สัญญาณเหล่านี้แยกออกจากกัน ไม่ซ้อนทับกันและเหมาะสมกับอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล

#### 2.2.2.5 ส่วนวิเคราะห์ความสูงสัญญาณ (Pulse Height Analyzer; PHA)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณเฉพาะที่มีแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดและสัญญาณที่ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดก็ถูกตัดทิ้งไป โดย PHA นี้จะประกอบด้วย Discriminator 2 ชุด และวงจร Anticoincidence โดย Discriminator ตัวหนึ่งทำหน้าที่อนุญาตให้สัญญาณที่สูงกว่าระดับที่ตั้งไว้ (E) ผ่านไปเท่านั้น เรียกว่า LLD (Lower level discriminator) และ Discriminator อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่อนุญาตให้สัญญาณที่ต่ำกว่าระดับ ( $E + \Delta E$ ) ที่ตั้งไว้ผ่านไปเท่านั้น เรียกว่า ULD (Upper level discriminator) สัญญาณที่ผ่านจาก LLD และ ULD ก็จะไปสู่วงจร Anticoincidence ซึ่งเป็นตัวคัดเลือกสัญญาณที่อยู่ระหว่าง LLD และ ULD (window) เท่านั้นที่จะนำออกมาแสดงผลของการนับวัด ดังนั้น สัญญาณที่ถูกส่งมาจากแอมพลิฟายเออร์มายัง PHA นี้จึงไม่ถูกนับวัดทั้งหมด แต่จะถูกนับวัดเฉพาะช่วงที่สนใจเท่านั้น เครื่องนับวัดรังสีที่มี pulse height analyzer ชุดเดียว เรียกว่า Single Channel Analyzer (SCA) แต่ถ้ามีหลาย ๆ ชุด เรียกว่า Multichannel Analyzer (MCA) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Multichannel Analyzer (MCA) ในการทดลอง โดยการวิเคราะห์สัญญาณที่มีความสูงต่างๆกันทำได้ 2 วิธีคือ

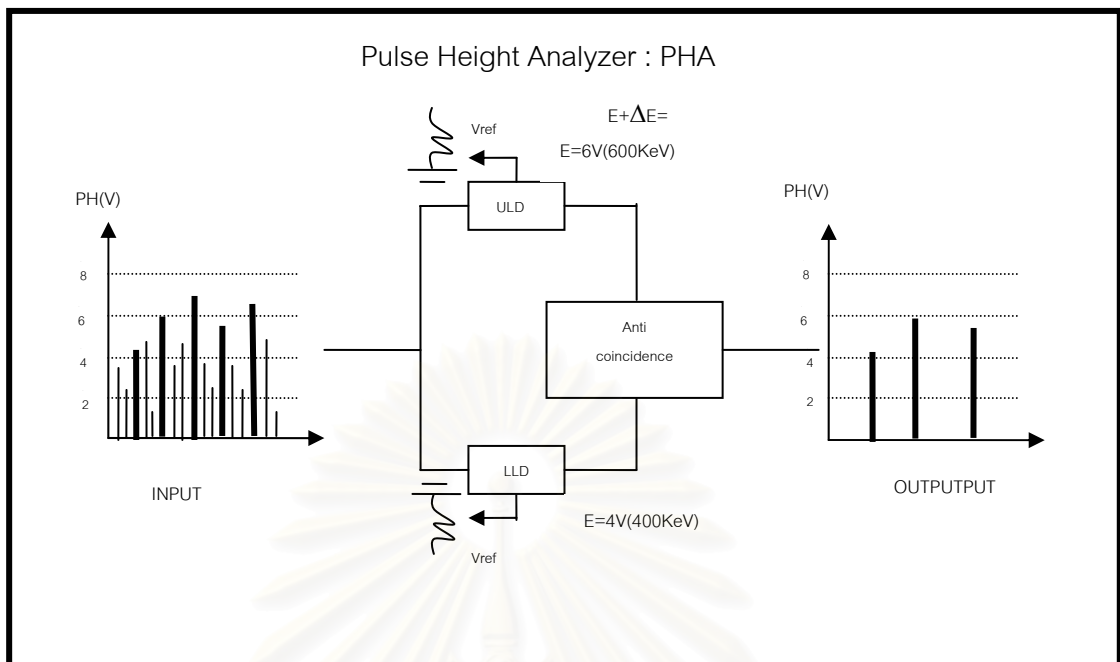
ก. Integral discriminator เป็นการวิเคราะห์ที่ตั้งค่า LLD โดยสัญญาณที่ถูกนับวัดที่มีความสูงมากกว่าค่า LLD ที่ตั้งไว้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13 โดยตั้งค่า LLD ไว้ที่ 4 โวลท์ (400 keV) สัญญาณที่ถูกนับวัดต้องมีค่าความสูงมากกว่า 4 โวลท์ ซึ่งมีทั้งหมด 5 สัญญาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี integral discriminator

ข. Differential discrimination (Window) เป็นการวิเคราะห์ที่ตั้งค่า LLD ที่  $E$  และตั้ง ULD ที่  $E + \Delta E$  โดยสัญญาณที่ถูกนับวัดหรือแสดงผลออกมานี้จะไปวิเคราะห์ก็คือ สัญญาณที่มีความสูงอยู่ระหว่าง LLD และ ULD ( $\Delta E$ : window) ที่ตั้งไว้ ดังตัวอย่างในรูป 2.14 โดยตั้ง LLD ที่ 4 โวลท์ (400 keV) และ ULD ที่ 6 โวลท์ (600 keV) ซึ่งสัญญาณที่ถูกนับวัดจะต้องสูงกว่า 4 โวลท์ แต่ต้องต่ำกว่า 6 โวลท์ (เปิดหน้าต่าง 2 โวลท์ หรือ 200 keV) ซึ่งมีด้วยกันอยู่ 3 สัญญาณที่แสดงผลออกมา



รูปที่ 2.14 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี differential discriminator

## 2.3 เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

### 2.3.1 เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานเดียว

เมื่อลำรังสีแกมมาพลังงานเดียวผ่านชิ้นงาน ความเข้มของรังสีแกมมาที่ส่งผ่านไป ( $I_x$ ) หาได้จากสมการ

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$I_0$  ความเข้มรังสีเริ่มต้น

$I_x$  ค่าความเข้มที่ผ่านตัวกลางออกมาได้

$\mu$  สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$x$  ความหนาของตัวกลาง

โดยสามารถแปลงเป็นสมการ

$$\mu = \frac{1}{\rho\chi} \cdot \ln\left(\frac{I_o}{I_x}\right)$$

$$\rho\chi = \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{I_o}{I_x}\right)$$

### 2.3.2 การส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

การส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานเป็นการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานสูงควบคู่กับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ โดยรังสีแกมมาพลังงานสูงเป็นตัวปรับแก้ความหนาที่แตกต่างกันและรังสีแกมมาพลังงานต่ำเป็นตัววัดสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวอย่าง

### 2.3.3 การส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานสูง

สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ( $\mu_H$ ) ค่อนข้างคงที่และไม่ขึ้นกับปริมาณ น้ำหนักต่อพื้นที่ ( $\rho\chi$ ) ที่ผ่านในลำรังสีหาได้จาก การวัด  $I_{OH}$  และ  $I_{XH}$  โดยต้องทราบค่า  $\mu_H$

$$\mu_H = \frac{1}{\rho\chi} \cdot \ln\left(\frac{I_{OH}}{I_{XH}}\right) \quad (2.26)$$

### 2.3.4 การส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานต่ำ

สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี ( $\mu_L$ ) หาได้จากสมการ

$$\mu_L = \frac{1}{\rho\chi} \cdot \ln\left(\frac{I_{OL}}{I_{XL}}\right) \quad (2.27)$$

ถ้ารังสีแกมมาพลังงานสูงและพลังงานต่ำ ผ่านไปในตัวกลางที่มีความหนาเท่ากันจะได้

สมการ

$$\text{Low energy} = \mu_L = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{I_{OL}}{I_{XL}} \right) \quad (2.28)$$

$$\text{High energy} = \mu_H = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{I_{OH}}{I_{XH}} \right) \quad (2.29)$$

งานวิจัยนี้ใช้รังสีแกมมาสองพลังงานได้สมการดังนี้

$$\log \text{ ratio} = \frac{\mu_L}{\mu_H} = \frac{\ln \left( \frac{I_{OL}}{I_{XL}} \right)}{\ln \left( \frac{I_{OH}}{I_{XH}} \right)} \quad (2.30)$$

$\mu_L$  เป็นค่า attenuation coefficient of low energy

$\mu_H$  เป็นค่า attenuation coefficient of high energy

สมการ (2.30) แสดงให้เห็นการส่งผ่านรังสีแกมมา 2 พลังงานไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของตัวอย่างโดยที่  $\mu_L$  จะแปรผันตามธาตุหรือกลุ่มธาตุที่สนใจโดยรังสีแกมมาพลังงานต่ำมีค่าสูงกว่า absorption edge ของธาตุหรือกลุ่มธาตุที่สนใจอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วน  $\mu_H$  จะมีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า absorption edge ของธาตุหรือกลุ่มธาตุที่สนใจค่อนข้างมาก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### อุปกรณ์การทำวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์สำหรับการวิจัย

- 3.1.1 โลหะปรอท
- 3.1.2 ผงตะกั่วออกไซด์
- 3.1.3 ฟองน้ำ 1 เซนติเมตร
- 3.1.4 แผ่นอะครีลิก (Acrylic) หนา 0.8 เซนติเมตร
- 3.1.5 กล่องบรรจุสาร
- 3.1.6 ตัวอย่างดิน (soil)
- 3.1.7 ไมโครคอมพิวเตอร์ใช้เชื่อมโยงกับ Pocket MCA ในหัวข้อ 3.1.8
- 3.1.8 เครื่องมือวัดรังสี Multichannel Analyzer (Pocket MCA) AMPTEK 8000A
- 3.1.9 หัวนับวัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ([NaI(Tl)] crystal scintillation detector) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว
- 3.1.10 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซีเซียม-137(Cs-137) พลังงาน 662 keV กับ โคบอลต์-57 (Co-57) พลังงาน 122 keV และ 136 keV
- 3.1.11 ที่จับขาตั้งในงานวิจัย (stand)
- 3.1.12 กำบังรังสี (shield) ได้แก่ ทองเหลือง แผ่นตะกั่ว
- 3.1.13 แผ่นแคดเมียม สำหรับดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงาน 122 และ 136 keV

ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วน

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ประกอบด้วยขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนดังนี้
  - เตรียมตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย
  - ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของดิน ดินที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 40 % และดินที่มีความเข้มข้นของปรอท 15 %
  - ทดลองหาค่าล็อกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ระหว่างพลังงานต่ำกับพลังงานสูง โดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน
  - วิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม ด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์



2. การทดลองหาความเข้มข้นของปรอทในสารตัวอย่างจากการผลิตปิโตรเลียม
3. การทดสอบความถูกต้องในการหาปริมาณปรอทโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน  
รายละเอียดตามขั้นตอนการวิจัยมีดังต่อไปนี้

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การทดลองเตรียมตัวอย่างและการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลัก ๆ เช่น ดิน ตะกั่ว ปรอท โดยต้องเตรียมดินบดละเอียด และนำดินที่บดแล้วมาผสมกับตะกั่วและปรอท โดยจะผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระบบวัดรังสีแกมมา

3.2.1.1 เตรียมดินที่ใช้ในงานวิจัย โดยนำดินไปตากแดดให้แห้งเพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่มีอยู่ในดิน จากนั้นนำดินไปบดแล้วร่อนด้วยตะแกรกร่อน เพื่อให้ดินที่จะใช้ในงานวิจัยนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.1.2 นำดินที่เตรียมในหัวข้อ 3.2.1.1 มาผสมกับสารประกอบตะกั่วที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 80 เปอร์เซ็นต์ (ในขั้นแรกได้ใช้ตะกั่วมาแทนปรอทก่อน เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างจากสารประกอบตะกั่วให้เป็นเนื้อเดียวกันสามารถทำได้ง่าย และปลอดภัยกว่ารวมทั้งนี้เพราะตะกั่วมีค่า absorption edge ใกล้เคียงกับปรอทมาก จึงสามารถใช้ทดสอบแทนกันได้) โดยนำเตรียมสารประกอบตะกั่วข้างต้นมาผสมกับดินให้มีความของตะกั่ว 40 % จากนั้นนำตัวอย่างสารผสมนี้ไปวัดรังสีแกมมาพลังงาน 122 และ 136 keV จากโคบอลต์-57 ที่ทะลุผ่านออกมา เพื่อนำข้อมูลไปหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

3.2.1.3 นำดินที่เตรียมในหัวข้อ 3.2.1.1 มาผสมกับโลหะปรอทบริสุทธิ์ ให้มีความเข้มข้นปรอทราว 15 % เพื่อนำข้อมูลไปหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน โดยในการผสมจริงได้ค่าความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 14.28%

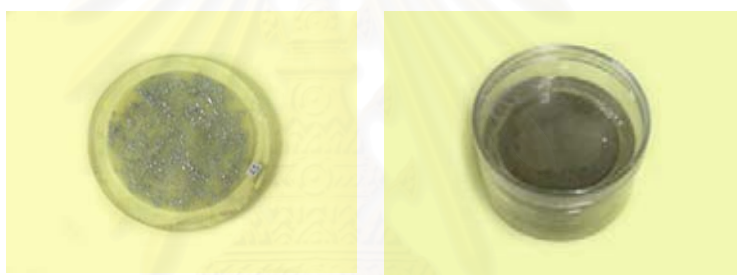
ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 – 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.1



สารตัวอย่างดิน

ผงตะกั่วออกไซด์

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างดินและสารประกอบตะกั่ว



รูปที่ 3.2 สารตัวอย่างที่มีปรอทผสม



หัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์

เครื่อง Pocket MCA

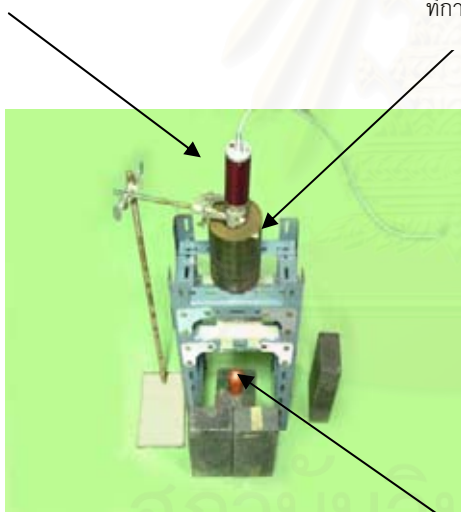
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาชนิดพกพาที่ใช้หัววัดรังสีแบบผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)



รูปที่ 3.4 กำบังรังสี

หัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดต์

ที่กำบังรังสี



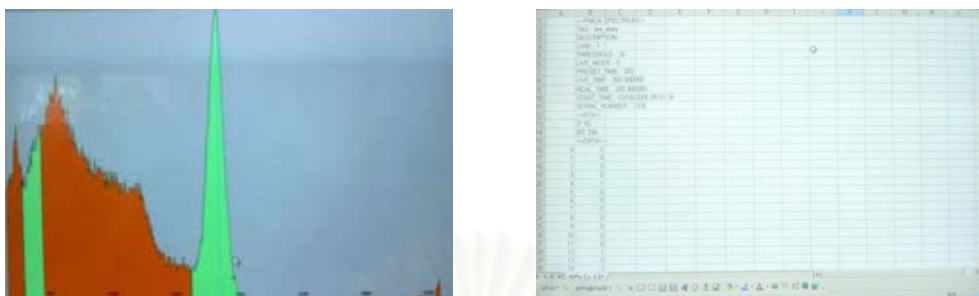
ต้นกำเนิดรังสี



การจัดหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสี

ไมโครคอมพิวเตอร์ที่รับและข้อมูลจากระบบ  
วิเคราะห์รังสีแกมมา

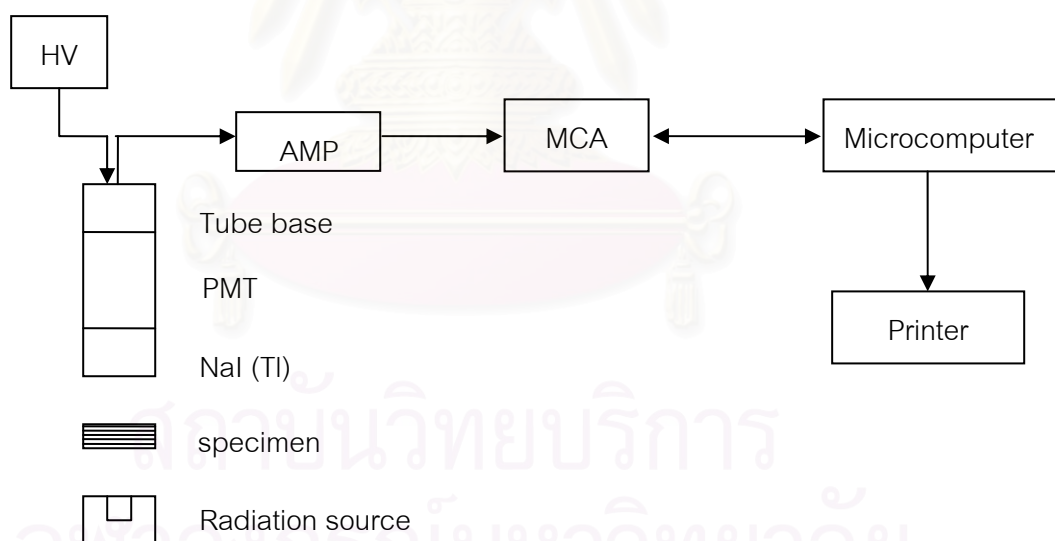
รูปที่ 3.5 การจัดหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดรังสีและไมโครคอมพิวเตอร์ที่รับและแสดงข้อมูลจากระบบ  
วิเคราะห์รังสีแกมมา



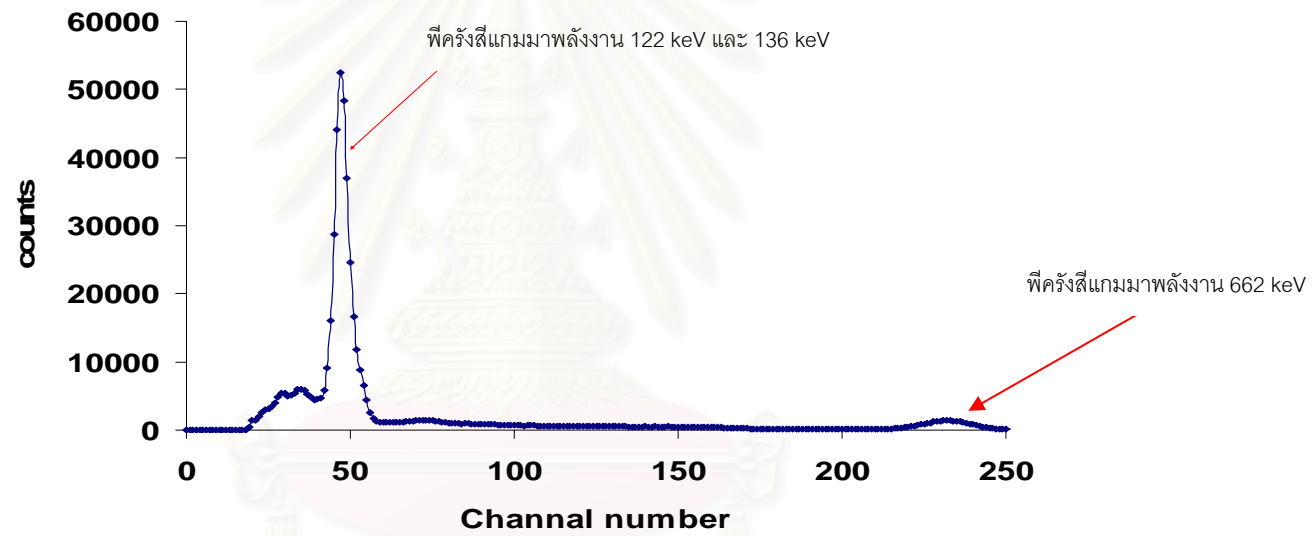
ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมา

ข้อมูลสเปกตรัมเชิงตัวเลขจากเครื่องวิเคราะห์แบบ  
หลายช่องชนิดพกพา

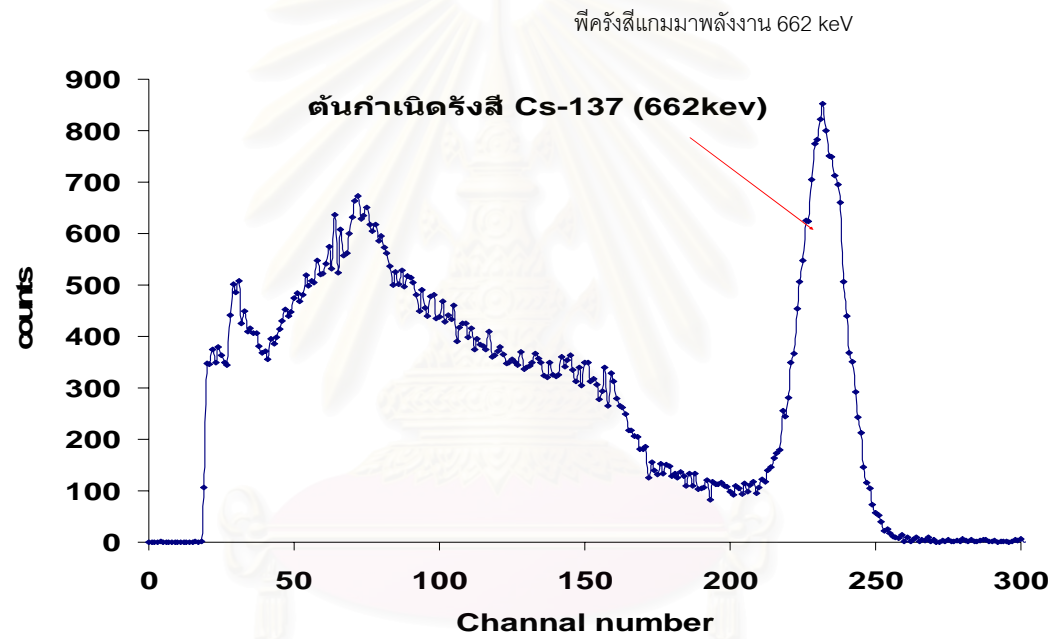
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาและข้อมูลสเปกตรัมเชิงตัวเลขจากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องชนิดพกพา



รูปที่ 3.7 การจัดระบบวัดรังสีในงานวิจัย



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-57 เมื่อวัดด้วยหัววัดโซเดียมไอโอไดด์(ทาลเลียม)



รูปที่ 3.9 สเปกตรัมรังสีแอมมาจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 เมื่อวัดด้วยหัววัดโซเดียมไอโอไดต์(ทลเลียม)

### 3.2.2 การทดลองหาลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน (dual energy gamma-ray transmission technique) และผลการวิเคราะห์ทางเคมีในตัวอย่างสลัดจ์

เนื่องจากปรอทเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงและสามารถระเหยในอากาศได้ จึงได้หลีกเลี่ยงโดยใช้ตะกั่วแทน เนื่องจากค่าพลังงานของ absorption edge ของตะกั่วกับของปรอทมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ค่าพลังงาน absorption edge ของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 88.001 keV ส่วนของปรอทมีค่าเท่ากับ 83.106 keV จึงใช้ตะกั่วในการทดสอบเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานแทนปรอทได้ นอกจากนี้การเตรียมตัวอย่างให้มีเนื้อเดียวกันโดยใช้สารตะกั่วสามารถเตรียมได้ง่ายกว่ามาก

การทดลองหาลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานของสารตะกั่ว

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

ก. นำสารประกอบตะกั่วระหว่างดินกับสารประกอบตะกั่ว ที่ความเข้มข้นของสารตะกั่ว 0%, 13.33%, 20%, 26.67%, 32%, 37.33%, 40% และ 60% โดยน้ำหนักรวม 150 กรัม มาทำการทดลองด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

ข. ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานต่ำโคบอลต์-57 และต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานสูงซีเซียม-137 นำต้นกำเนิดรังสีทั้งสองวางที่ตำแหน่งเดียวกัน ต้นกำเนิดรังสีวางห่างจากสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 25 เซนติเมตร และสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองห่างจากหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร

ค. ขั้นตอนแรกวัดหาพื้นที่ใต้กราฟของรังสีแกมมาพลังงานต่ำ 122 และ 136 keV จากโคบอลต์-57 รวมกัน เนื่องจากหัววัดรังสีชนิดนี้ไม่สามารถแยกพีคพลังงานทั้งสองออกจากกันได้ แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ )

ง. นำแผ่นกรองรังสีแกมมา (แคดเมียมและตะกั่ว) มาวางหน้าหัววัดรังสีแกมมาเพื่อเป็นการกำจัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำ 122 และ 136 keV ซึ่งมีความเข้มข้นสูงมาก ที่มารบกวนรังสีแกมมาพลังงานสูง 622 keV เนื่องจากการเกิดพีครวม (sum peak) จากนั้นหาพื้นที่ใต้พีคของ

รังสีแกมมาพลังงานสูง โดยกำหนดพื้นที่ใต้กราฟให้ครอบคลุมโฟโตพีค (photo peak) ของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ )

จ. หาค่าล็อกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) กับพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) เป็นค่า Log Ratio ( $\mu_L / \mu_H$ ) ดังตารางที่ 4.4 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio และ ความเข้มข้นของสารประกอบตะกั่ว ดังรูปที่ 4.2

การหาค่าล็อกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงของปรอทโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน นำเงื่อนไขเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.2.4(ก-จ) มาใช้กับสารปรอทในการทำเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

ฉ. นำสารตัวอย่างที่มีปรอทผสมระหว่างดินกับปรอท ที่ความเข้มข้นของปรอท 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% และ 40% โดยมีน้ำหนักรวม 100 กรัม มาทำการทดลองด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ตามข้อ 3.2.4.ข ถึง 3.2.4.จ โดยเปลี่ยนระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็น 35 เซนติเมตร และวัสดุในการทดลองห่างจากหัววัดรังสี 10 เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.6

ช. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log Ratio ( $\mu_L / \mu_H$ ) กับความเข้มข้นปรอท ดังรูปที่ 4.4

### 3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม

นำสารตัวอย่างสลัดจ์ (ชุดเจาะแหล่งบงกช) จากการผลิตปิโตรเลียมมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบหลัก เพื่อจะตรวจสอบดูว่ามีสารตัวอย่างมีธาตุหนักที่มีผลต่อเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานหรือไม่โดยใช้วิธีการเรืองรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence, XRF) ธาตุหนักที่มีผลต่อเทคนิคการส่งผ่านรังสีเป็นธาตุมีค่า absorption edge ใกล้เคียงกับปรอท อย่างเช่น ตะกั่ว ทองคำ เป็นต้น )



### 3.2.4 การทดสอบหาความเข้มข้นของปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม

นำตัวอย่างสลัดจ์ (ชุดเจาะแหล่งบงกช) จากการผลิตปิโตรเลียมมาทำการทดสอบด้วยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน เนื่องจากสารตัวอย่างสลัดจ์ได้ผ่านการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แล้วไม่พบธาตุที่มีผลต่อวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาจึงสามารถนำมาทำการวิจัยได้ ดังตารางที่ 4.5 ขั้นตอนวิจัยมีดังนี้

ก. นำสารตัวอย่างสลัดจ์ที่ต้องการทดสอบมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน ตามหมายเลข A, B, C และ D ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5 โดยเปลี่ยนระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา กับสารตัวอย่างเป็น 3.5 เซนติเมตร และระยะสารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร นำค่า Log Ratio ของสารตัวอย่างสลัดจ์มาแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio กับความเข้มข้นปรอท เพื่อหาปริมาณปรอทที่มีอยู่ให้สารตัวอย่างสลัดจ์

### 3.2.5 การทดสอบความถูกต้องของการหาปริมาณของปรอทโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique)

การทดสอบผลการหาค่าความเข้มข้นของปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ โดยเลือกใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique) ของปรอทลงไปในตัวอย่าง การใช้วิธีการเติมสารมาตรฐานนี้เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการทำวิจัยจากการใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด

ก. เตรียมสารตัวอย่างที่มีปรอทผสมระหว่างดินกับปรอทมาทำการตรวจวัดว่ามีปรอทอยู่เท่าไร (งานวิจัยนี้มีปรอทในการทดสอบอยู่ 13.24 เปอร์เซ็นต์) แล้วเติมสารมาตรฐานที่ทราบค่าลงไป (โดยเติมปรอท 10 กรัม ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นเท่ากับ 20.20 เปอร์เซ็นต์) โดยเปลี่ยนระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา กับสารตัวอย่างเป็น 35 เซนติเมตร และระยะสารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร

ข. นำค่า Log Ratio ของสารที่เตรียมมาแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ ระหว่าง Log Ratio กับความเข้มข้นของปรอท เพื่อหาปริมาณปรอทที่มีอยู่ให้สารตัวอย่าง

ค. แล้วทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของปรอทในสารตัวอย่างกับค่าที่ทราบ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการวิจัย

##### 4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา (Gamma-ray attenuation coefficient)

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของดินที่ปริมาณต่าง ๆ

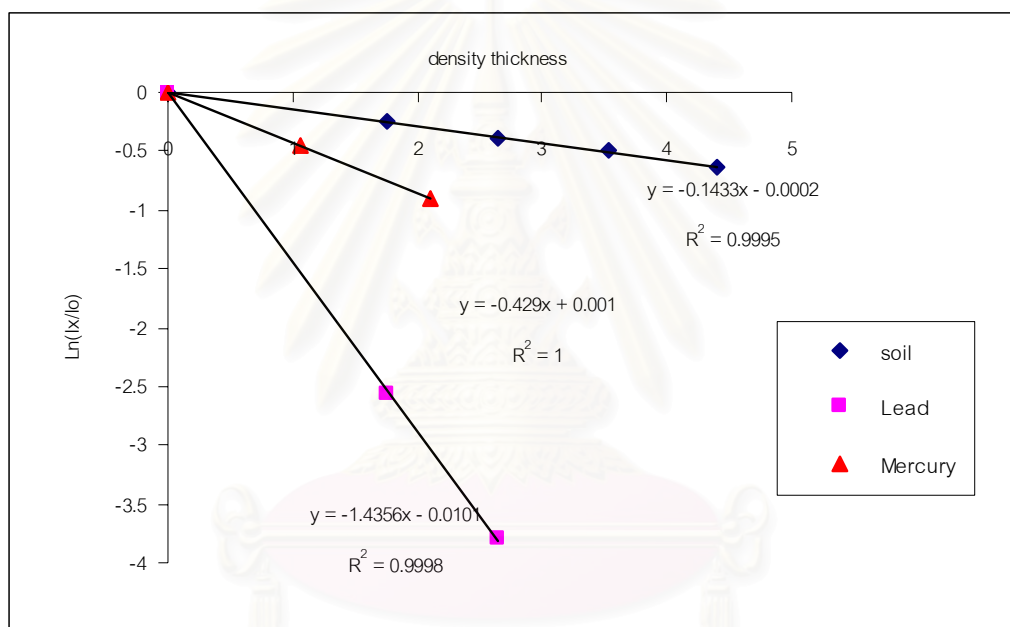
| ดิน (กรัม) | area Co-57      | $I_0 / I$ | $\ln(I_0 / I)$ |
|------------|-----------------|-----------|----------------|
| Blank      | $I_0 = 2627841$ |           |                |
| 100        | 2049467         | 1.282     | 0.249          |
| 150        | 1783288         | 1.474     | 0.388          |
| 200        | 1591752         | 1.651     | 0.501          |
| 250        | 1397933         | 1.880     | 0.631          |

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของความเข้มข้นตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์

| น้ำหนักรวม<br>(กรัม) | ดิน<br>(กรัม) | สารประกอบ<br>ตะกั่ว<br>(กรัม) | area Co-57      | $I_0 / I$ | $\ln(I_0 / I)$ |
|----------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|-----------|----------------|
| Blank                |               |                               | $I_0 = 3711912$ |           |                |
| 100g                 | 50            | 50                            | 283895          | 13.074    | 2.570          |
| 150g                 | 75            | 75                            | 84263           | 44.051    | 3.785          |

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของความเข้มข้นปรอท 14.28 เปอร์เซ็นต์

| น้ำหนักรวม<br>(กรัม) | ดิน<br>(กรัม) | ปรอท<br>(กรัม) | area Co-57      | $I_0 / I$ | $\ln(I_0 / I)$ |
|----------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|----------------|
| Blank                |               |                | $I_0 = 1811655$ |           |                |
| 35                   | 30            | 5              | 1155947         | 1.567     | 0.449          |
| 70                   | 60            | 10             | 733082          | 2.472     | 0.905          |



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง density thickness กับ  $\ln(I_x / I_0)$  ของดิน, ปรอทและตะกั่ว

จากตารางที่ 4.1 น้ำหนักดินเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาของดินเพิ่มขึ้น พื้นที่ใต้พีคจะลดลง และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของดินที่ปริมาณต่างๆ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.1433 โดยพื้นที่ใต้พีคของ Co-57 คือ พลังงาน 122 และ 136 keV ของทั้งสองรวมกัน

จากตารางที่ 4.2 เมื่อน้ำหนักรวมของสารตะกั่วเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากัน พื้นที่ใต้พีคจะลดลง สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของความเข้มข้นตะกั่วมีค่าเท่ากับ 1.4356

จากตารางที่ 4.3 น้ำหนักของสารปรอทเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของปรอทจะมีค่าเท่ากับ 0.429

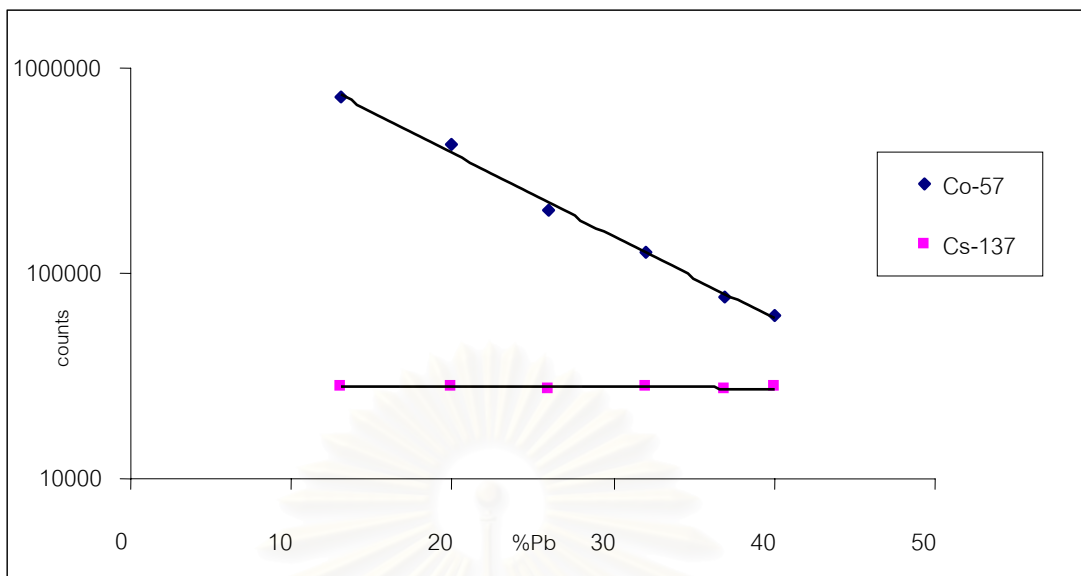
จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของแต่ละธาตุจะมีค่าเฉพาะทำให้ธาตุชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นเท่ากันจะมีความคงที่ของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของสารที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยา

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า density thickness กับ  $\ln(I_x / I_0)$  ได้สมการทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของดิน, ตะกั่วและปรอทได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของดินมีค่าเท่ากับ 0.1433, ของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 1.4356 และของปรอทมีค่าเท่ากับ 0.429

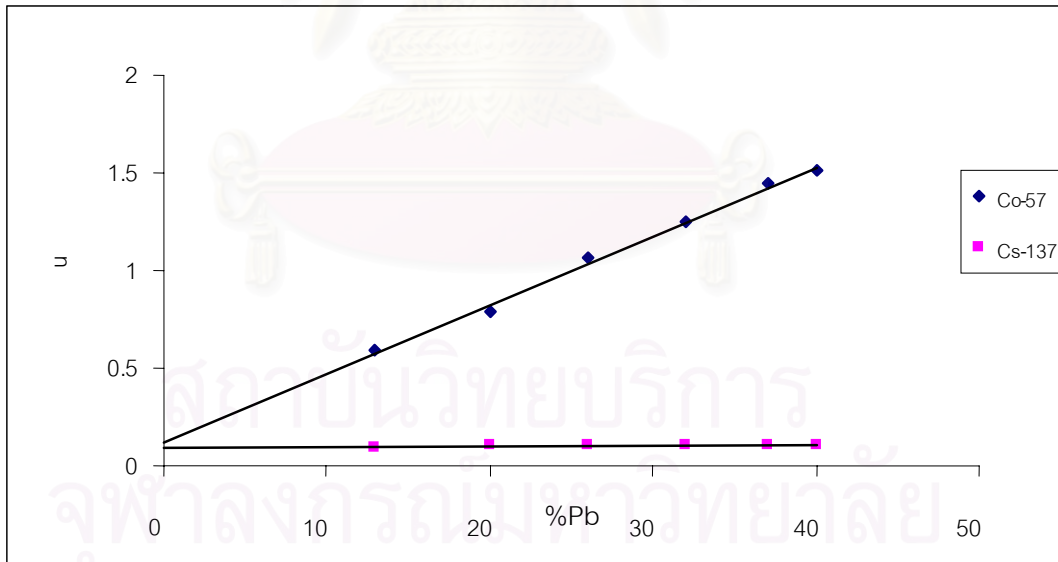
4.1.2 ล็อกของอัตราส่วนระหว่าง สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาระหว่างพลังงานต่ำกับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน (dual energy gamma-ray transmission technique) และผลการวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสลัดจ์

ตารางที่ 4.4 ค่าลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) ของตะกั่ว

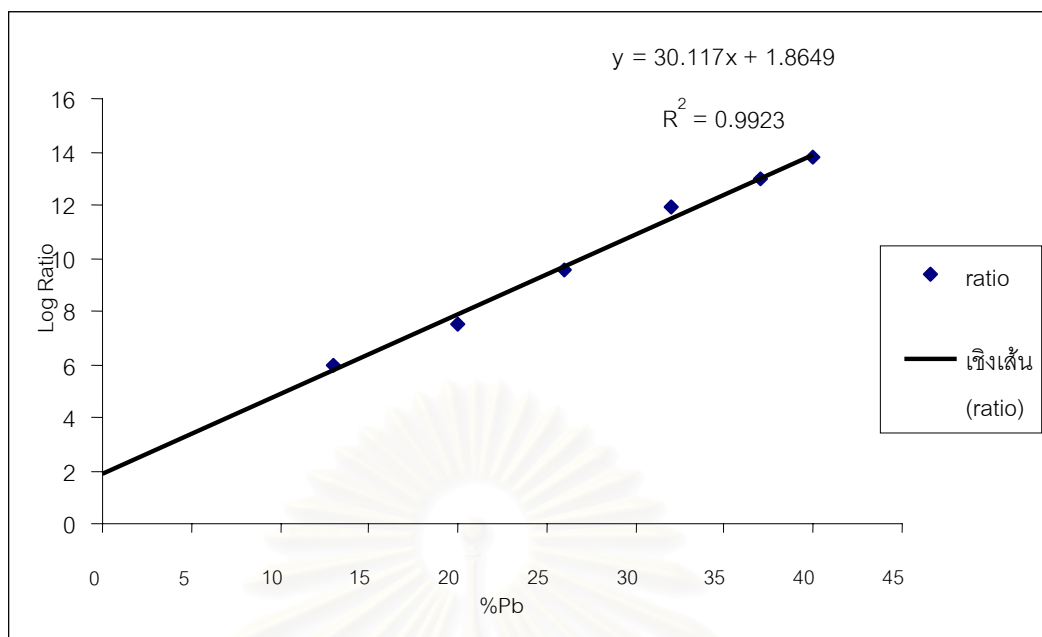
| v%Pb  | area Co-57    | $I_0/I_L$ | $\ln(I_0/I_L)$ | $\mu_L$ | areaCs-137    | $I_0/I_H$ | $\ln(I_0/I_H)$ | $\mu_H$ | $(\mu_L/\mu_H)Ratio$ |
|-------|---------------|-----------|----------------|---------|---------------|-----------|----------------|---------|----------------------|
| Blank | $I_0=3418482$ |           |                |         | $I_0 = 36995$ |           |                |         |                      |
| 13%   | 715001        | 4.7811    | 1.5647         | 0.5922  | 28502         | 1.2980    | 0.2608         | 0.0987  | 5.9993±0.9069        |
| 20%   | 422610        | 8.0890    | 2.0905         | 0.7912  | 28030         | 1.3198    | 0.2775         | 0.1050  | 7.5331±0.8563        |
| 26%   | 205475        | 16.6370   | 2.8116         | 1.0641  | 27563         | 1.3422    | 0.2943         | 0.1114  | 9.5533±0.8114        |
| 32%   | 126688        | 26.9835   | 3.2952         | 1.2471  | 28056         | 1.3186    | 0.2766         | 0.1047  | 11.9142±0.859        |
| 37%   | 75662         | 45.1810   | 3.8107         | 1.4422  | 27575         | 1.3416    | 0.2939         | 0.1112  | 12.9671±0.8126       |
| 40%   | 63212         | 54.0796   | 3.9905         | 1.5102  | 27716         | 1.3348    | 0.2888         | 0.1093  | 13.8187±0.8258       |



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาจากับเปอร์เซ็นต์ตะกั่ว(ความเข้มข้นของสารตะกั่ว)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับเปอร์เซ็นต์ตะกั่ว (ความเข้มข้นของสารตะกั่ว)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio กับเปอร์เซ็นต์ตะกั่ว (ความเข้มข้นของสารตะกั่ว)

จากตารางที่ 4.4 ได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างรังสีแกมมากับความเข้มข้นตะกั่ว และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log Ratio กับ เปอร์เซ็นต์ตะกั่ว

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่รังสีแกมมาพลังงานต่ำ เมื่อความเข้มข้นตะกั่วเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ได้จะลดลงด้วย ในขณะที่รังสีแกมมาพลังงานสูง เมื่อความเข้มข้นตะกั่วเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ได้จะมีความคงที่

จากรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับเปอร์เซ็นต์ตะกั่ว (ความเข้มข้นของสารตะกั่ว) โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) จะมีความไวต่อความหนาและความเข้มข้นของตะกั่ว ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) จะเป็นไม่ขึ้นอยู่กับความหนาและความเข้มข้นตะกั่ว

จากรูปที่ 4.4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Log ratio กับความเข้มข้นตะกั่ว โดยที่ Log ratio คือ ค่า  $\mu_L/\mu_H$  จากความสัมพันธ์จะได้สมการ  $y = 30.177x + 1.8649$  โดยสมการนี้ได้นำไปหาความเข้มข้นของตะกั่วต่อไป (y แทนเป็นค่า Log Ratio, x แทนเป็นค่าความเข้มข้นตะกั่ว) ให้ความถูกต้องอยู่ในช่วง 0%-40% ถ้าได้ความเข้มข้นมากกว่านี้ จะทำให้ค่ามีความถูกต้องลดน้อยลง เนื่องจากความเข้มข้นตะกั่วมีค่ามากเกินไปจะมีผลต่อรังสีแกมมาพลังงานต่ำโคบอลต์-57 ไม่สามารถที่จะทะลุผ่านสารได้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสลัดจ์ (ข้อมูลจากศูนย์เครื่องมือ)

| ตัวอย่าง | ปริมาณ (%) |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | Na         | Mg   | Al   | Si    | P    | S    | Cl   | K    | Ca   | Ti   | Cr   | Mn   | Fe   | Ni   | Cu   | Zn   | Sr   | Zr   | Ba   | Hg   |
| A        | 0.36       | 0.29 | 1.10 | 27.52 | 0.03 | 0.10 | 0.04 | 0.97 | 0.34 | 0.09 | 0.10 | 0.04 | 2.83 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 2.00 | 2.92 |
| B        | 0.59       | 0.41 | 2.42 | 28.27 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 1.55 | 0.57 | 0.14 | 0.06 | 0.02 | 1.63 | 0.01 | 0.13 | 0.03 | 0.06 | -    | 2.40 | -    |
| C        | 0.44       | 0.35 | 1.17 | 25.24 | 0.04 | 0.06 | 0.10 | 0.78 | 0.64 | 0.19 | 0.08 | 0.05 | 4.23 | -    | 0.14 | 0.15 | 0.03 | 0.04 | 2.94 | 0.23 |
| D        | 0.72       | 0.33 | 2.37 | 26.68 | 0.04 | 0.02 | 0.10 | 1.35 | 0.27 | 0.22 | 0.65 | 0.04 | 2.20 | 0.03 | 0.17 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.16 | 0.22 |

ตัวอย่างสลัดจ์ไม่พบธาตุหนักที่มีผลต่อในงานวิจัยในสารตัวอย่างสลัดจ์ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย เมื่อพิจารณาปริมาณปรอท ค่าปริมาณปรอทที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไม่ถึงเป็นค่าที่น่าเชื่อถือได้



จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างสลัดจ์โดยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่ A, B, C และ D มาทำการวิจัย เพื่อดูว่ามีธาตุหนักบางชนิดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลหรือไม่ เพราะปรอท มีค่า k-absorption edge 83.106 keV ถ้าพบธาตุหนักที่มีค่า k-absorption edge ใกล้เคียงกับปรอท จะทำให้มีผลต่อสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลต่องานวิจัยนี้ เช่น ธาตุหนัก ตะกั่ว ซึ่งมีค่า k-absorption edge 88.001 keV ทองคำ มีค่า k-absorption edge 83.106 keV เป็นต้น จากในตารางที่ 4.5 พบว่าผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีในสารตัวอย่างสลัดจ์ไม่พบธาตุหนักที่มีผลต่องานวิจัยในสารตัวอย่างสลัดจ์ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย เมื่อพิจารณาปริมาณปรอท ค่าปริมาณปรอทที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไม่ถือเป็นค่าที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากว่าสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

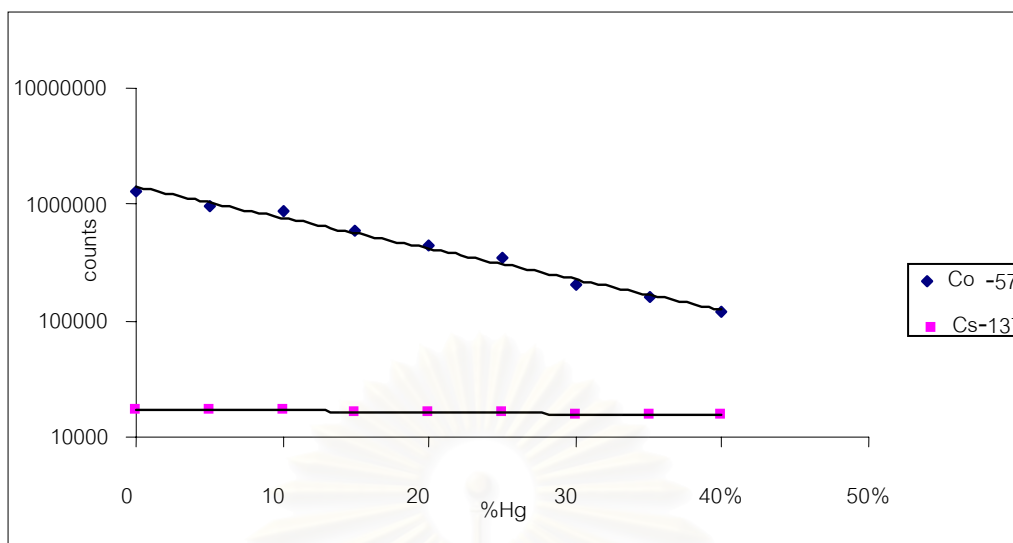


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

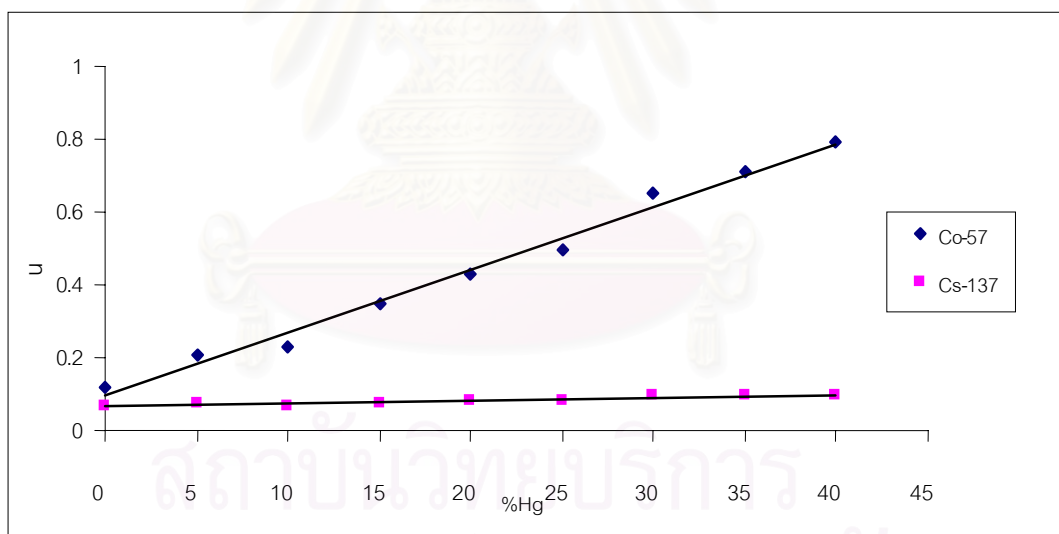
ตารางที่ 4.6 ค่าลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) ของปรอท

| %Hg   | area Co-57    | $I_0/I_L$ | $\ln(I_0/I_L)$ | $\mu_L$ | area Cs137  | $I_0/I_H$ | $\ln(I_0/I_H)$ | $\mu_H$ | $(\mu_L/\mu_H)Ratio$ |
|-------|---------------|-----------|----------------|---------|-------------|-----------|----------------|---------|----------------------|
| Blank | $I_0=1991842$ |           |                |         | $I_0=21730$ |           |                |         |                      |
| 0%    | 1294561       | 1.5386    | 0.4309         | 0.1219  | 17236       | 1.2607    | 0.2317         | 0.0655  | 1.8598±0.1323        |
| 5%    | 962155        | 2.0702    | 0.7276         | 0.2058  | 16856       | 1.2892    | 0.2540         | 0.0719  | 2.8644±0.1213        |
| 10%   | 877481        | 2.2700    | 0.8198         | 0.2319  | 17167       | 1.2658    | 0.2357         | 0.0667  | 3.4776±0.1300        |
| 15%   | 582157        | 3.4215    | 1.2301         | 0.3479  | 16656       | 1.3046    | 0.2659         | 0.0752  | 4.6256±0.1162        |
| 20%   | 437093        | 4.5570    | 1.5167         | 0.4290  | 16328       | 1.3309    | 0.2858         | 0.0808  | 5.3064±0.1087        |
| 25%   | 348010        | 5.7235    | 1.7446         | 0.4935  | 16159       | 1.3448    | 0.2962         | 0.0838  | 5.8894±0.1052        |
| 30%   | 200901        | 9.9145    | 2.2940         | 0.6489  | 15420       | 1.4092    | 0.3430         | 0.0970  | 6.6871±0.0921        |
| 35%   | 160763        | 12.3899   | 2.5169         | 0.7119  | 15520       | 1.4002    | 0.3366         | 0.0952  | 7.4772±0.0937        |
| 40%   | 121783        | 16.3557   | 2.7946         | 0.7905  | 15335       | 1.4170    | 0.3485         | 0.0986  | 8.0178±0.0908        |

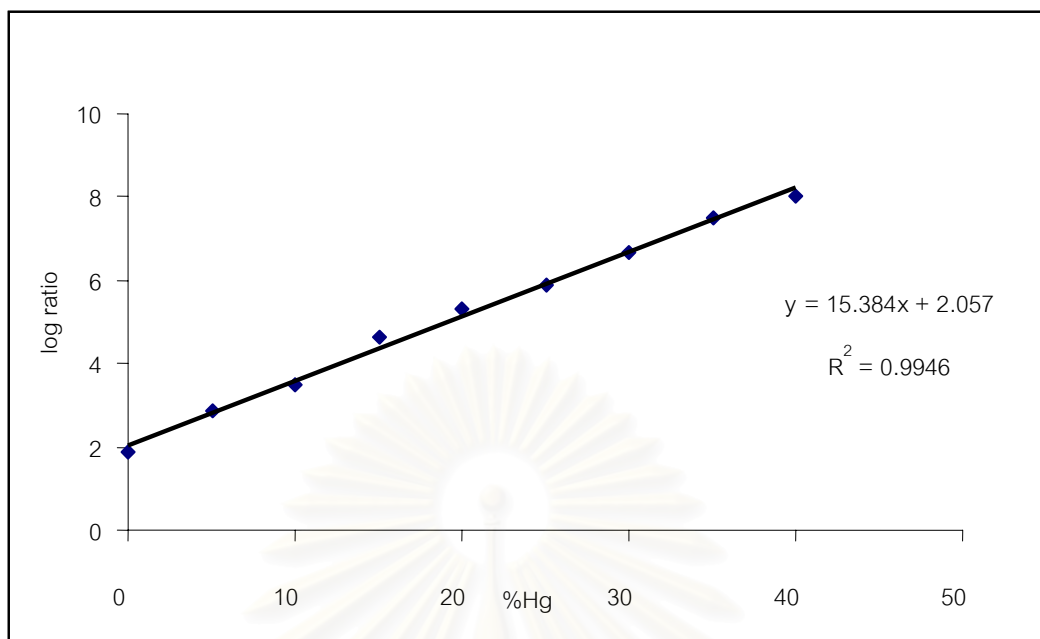
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีแกมมากับความเข้มข้นปรอท



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับเปอร์เซ็นต์ปรอท (ความเข้มข้นของสารปรอท)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Ratio กับความเข้มข้นปรอท

จากตารางที่ 4.6 นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีแกมมากับความเข้มข้นปรอทและความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log Ratio กับ ความเข้มข้นปรอท

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำ เมื่อความเข้มข้นปรอทเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ได้จะลดลงด้วย ในขณะที่รังสีแกมมาพลังงานสูงความเข้มข้นปรอทเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ได้มีความคงที่

จากรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนกับเปอร์เซ็นต์ปรอท (ความเข้มข้นของสารปรอท) โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) จะมีความไวต่อความหนาและความเข้มข้นของปรอท ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) จะเป็นไม่ขึ้นอยู่กับความหนาและความเข้มข้นตะกั่ว

จากรูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log ratio กับความเข้มข้นปรอท โดยที่ Log ratio คือค่า  $\mu_L/\mu_H$  จากสมการ  $y = 15.384x + 2.057$  (y แทนเป็นค่า Log Ratio, x แทนเป็นค่าความเข้มข้นปรอท) ให้ความถูกต้องอยู่ในช่วง 0%-40% ถ้าวัดค่าความเข้มข้นปรอทที่วัดได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ได้จะมีความถูกต้องในการหาความเข้มข้นปรอทลดน้อยลง เนื่องจากความเข้มข้นปรอทมีค่าสูงเกินไป จะทำให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำไม่สามารถทะลุผ่านได้เพราะถูกปรอทดูดกลืนพลังงานรังสี

#### 4.2.3 การทดสอบสารตัวอย่างจากปิโตรเลียมเพื่อหาความเข้มข้นปรอท

จากตารางที่ 4.7 ได้มีการตรวจเช็คว่ามีธาตุที่มีผลต่อเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.5 ไม่พบธาตุที่มีผลต่อเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน จึงนำสถิติมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทได้ โดยได้ความสัมพันธ์ค่า Log ratio ของสารตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ได้แก่ 2.2565, 1.7628, 11.9324 และ 10.1867 ตามลำดับ จากนั้นนำค่า Log ratio ที่ได้จากสารตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง แทนค่าในสมการเทียบมาตรฐานของงานวิจัยนี้ คือ  $y = 15.384x + 2.057$  ได้ความเข้มข้นปรอท 1.297%, ไม่พบปรอท, 64.192% และ 52.845% ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ล็อกของค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ( $\mu_L$ ) ต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานสูง ( $\mu_H$ ) ของสารตัวอย่างที่มีปรอทปนเปื้อนอยู่จากปิโตรเลียม

| สารตัวอย่าง | area Co-57      | $I_0 / I_L$ | $\ln(I_0 / I_L)$ | area Cs-137   | $I_0 / I_H$ | $\ln(I_0 / I_H)$ | ratio   | %Hg     |
|-------------|-----------------|-------------|------------------|---------------|-------------|------------------|---------|---------|
| Blank       | $I_0 = 1755652$ |             |                  | $I_0 = 21599$ |             |                  |         |         |
| A           | 1248565         | 1.4061      | 0.3408           | 18571         | 1.1630      | 0.1510           | 2.2565  | 1.2970  |
| B           | 1319806         | 1.3302      | 0.2853           | 18371         | 1.1757      | 0.1618           | 1.7628  | ไม่พบ   |
| C           | 334271          | 5.2521      | 1.6586           | 18796         | 1.1491      | 0.1390           | 11.9324 | 64.1920 |
| D           | 138348          | 12.6901     | 2.5408           | 16831         | 1.2832      | 0.2494           | 10.1867 | 52.8454 |

ได้มีการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ที่ไม่พบธาตุที่มีผลต่อการใช้เทคนิครังสีแกมมาสองพลังงานในงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานมาวิเคราะห์หาปริมาณปรอทได้

#### 4.2.4 การทดสอบความถูกต้องของการหาปริมาณของปรอทโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน ( Standard addition technique )

ในการทดสอบด้วยวิธีการเติมสารมาตรฐานลงไปในส่วนตัวอย่างที่ทราบค่าอยู่แล้วเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 4.8 ตรวจสอบความถูกต้องในการเติมสารมาตรฐาน

| %Hg    | area Co-57    | $I_0/I_L$ | $\ln(I_0/I_L)$ | area Cs-137 | $I_0/I_L$ | $\ln(I_0/I_L)$ | Log ratio | %Hg    |
|--------|---------------|-----------|----------------|-------------|-----------|----------------|-----------|--------|
| Blank  | $I_0=1829627$ |           |                | $I_0=22059$ |           |                |           |        |
| 13.24% | 550271        | 3.3249    | 1.2014         | 16449       | 1.3410    | 0.2934         | 4.0941    | 13.242 |
| 20.20% | 376330        | 4.8617    | 1.5814         | 16059       | 1.3736    | 0.3174         | 4.9815    | 19.010 |

จากตารางที่ 4.8 เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องในการเติมสารมาตรฐานลงไปพบว่ามีความใกล้เคียงกับปริมาณความเข้มข้นปรอทที่ตรวจสอบจากสมการมาตรฐาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

ในงานวิจัยนี้ได้ มีการทดสอบหาค่าของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของสาร 3 ตัวอย่าง โดยที่สารแต่ละชนิดก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเป็นค่าเฉพาะของแต่ละสาร สารที่ใช้ทดสอบหาความคงที่ของสัมประสิทธิ์มีดังนี้

5.1.1.1 ดินที่น้ำหนักต่างๆ กัน 100 กรัม, 150 กรัม, 200 กรัม และ 250 กรัม โดยผลการวิจัยมีค่าประมาณ  $0.1433 \text{ ซม}^2/\text{กรัม}$

5.1.1.2 ความเข้มข้นตะกั่วที่ 40% สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีค่าประมาณ  $1.4356 \text{ ซม}^2/\text{กรัม}$

5.1.1.3 ความเข้มข้นปรอทที่ 14.28% สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีค่าประมาณ  $0.429 \text{ ซม}^2/\text{กรัม}$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีค่าเฉพาะของแต่ละสาร และสัมประสิทธิ์การลดทอนจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของสารด้วย

##### 5.1.2 การทดสอบหาค่าลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงของตะกั่ว

เนื่องจากว่าปรอทนั้นเป็นสารที่มีพิษ และยังสามารถระเหยได้ในอากาศจึงหลีกเลี่ยงมาใช้ตะกั่วทดสอบดูว่าเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสามารถที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้หรือไม่ เพราะว่าธาตุทั้งสองชนิดนี้มีค่า absorption edge ใกล้เคียงกันจึงสามารถที่จะนำธาตุทั้งสองมาทดสอบแทนกันได้ โดยที่ตะกั่วมีค่า absorption edge  $88.001 \text{ keV}$  และปรอทมีค่า absorption edge  $83.106 \text{ keV}$

5.1.2.1 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดกับค่าความเข้มข้นตะกั่ว โดยที่พลังงานของรังสีแกมมาพลังงานต่ำมีความไวต่อความเข้มข้นตะกั่ว ส่วนรังสีแกมมาพลังงานสูงไม่ขึ้นอยู่กับความหนาและความเข้มข้นตะกั่ว



5.1.2.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log Ratio กับค่าความเข้มข้นต่างๆ ได้จะได้สมการ  $y = 30.177x + 1.8649$  โดยสมการนี้จะให้ความถูกต้องในช่วงความเข้มข้นตะกั่วที่ 0%-40% ค่าที่ถ้ามากกว่า 40 % จะมีความถูกต้องลดน้อยลง

### 5.1.3 การทดสอบหาค่าลึอกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงของปรอทและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสลัดจ์

เนื่องจากได้ทำตามเงื่อนไขในหัวข้อที่ 5.1.2 แล้ว ก็สามารถที่จะนำเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานมาใช้ในการวิจัยได้ ได้ผลดังนี้

5.1.3.1 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดกับค่าความเข้มข้นปรอท โดยที่พลังงานของรังสีแกมมาพลังงานต่ำมีความไวต่อความเข้มข้นปรอท ส่วนรังสีแกมมาพลังงานสูงไม่ขึ้นอยู่กับความหนาและความเข้มข้นปรอท

5.1.3.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log Ratio กับค่าความเข้มข้นต่างๆ ได้จะได้สมการ  $y = 15.384x + 2.057$  โดยสมการนี้จะให้ความถูกต้องในช่วงความเข้มข้นตะกั่วที่ 0%-40% ค่าที่ถ้ามากกว่า 40 % จะมีความถูกต้องลดน้อยลง เพราะปรอทจะดูดกลืนค่าของพลังงานรังสีแกมมาต่ำโคบอลต์-57 ไม่สามารถที่จะทะลุผ่านออกมาได้

5.1.3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างสลัดจ์ โดยใช้วิธีเรอรังสีเอกซ์ (ศูนย์เครื่องมือ) ไม่พบธาตุที่มีผลต่อการใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน เพราะธาตุที่มีผลงานวิจัยนี้คือธาตุที่มีค่าของ absorption edge ใกล้เคียงกับของปรอท อย่างเช่น พวกตะกั่ว ทองคำ ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นธาตุหนัก แต่เมื่อพิจารณาปริมาณของปรอทที่ได้จากการวิเคราะห์ดังในตารางที่ 4.5 อาจมีความคลื่อนและไม่ใช่ค่าที่เป็นตัวแทนของปริมาณปรอทที่มีอยู่จริง เนื่องจากว่าสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

### 5.1.4 การทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงาน

การพัฒนาเทคนิคโดยวิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานแล้วทำการสร้างค่ามาตรฐานขึ้นมา ได้ตั้งสมการ  $y = 15.384x + 2.057$  และได้ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีในสารตัวอย่างสลัดจ์ไม่พบธาตุหนักที่มีผลต่อเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานจึงทำการทดลองได้ผลดังนี้ ในการวิจัยได้ใช้สารตัวอย่างสลัดจ์ตามหมายเลข A, B, C และ D ตามลำดับ

สามารถหาค่าความเข้มข้นของปรอทได้ตามลำดับดังนี้ 12.97, ไม่พบ, 64.192 และ 52.845 ตามลำดับได้

### 5.1.6 การทดสอบความถูกต้องของการหาปริมาณปรอทโดยใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยรู้ค่าปริมาณปรอทตั้งต้น และสุดท้ายของตัวอย่างที่นำมาทดสอบทั้งสองโดยก่อนเติมจะมีความเข้มข้นปรอทที่ 13.24 และเติมปรอทมาตรฐานไปอีก 6.96 % เมื่อทำการทดสอบปรอทหลังเติมควรมีปรอทอยู่ที่ 20.20 % เมื่อทำการวิจัยปรากฏว่าปรอทหลังการเติมสารมาตรฐานมีค่าอยู่ที่ 19.01 %

## 5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

ขั้นตอนการจัดระยะห่างที่เหมาะสมในงานวิจัย 2 กรณีดังนี้

5.2.1 จักระบบวัดรังสีแกมมาโดยระยะห่างต้นกำเนิดรังสีและสารตัวอย่างห่าง 25 เซนติเมตร สารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร โดยระยะห่างนี้ได้นำมาทำการวิจัยในการหาค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การลดทอนและการหาล็อกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานของตะกั่ว (กรณีสารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมาห่าง 10 เซนติเมตร เพราะสารตัวอย่างบรรจุใส่ภาชนะสูง 8 เซนติเมตร จึงจำกัดระยะห่างจากสารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร)

5.2.2 จักระบบวัดรังสีแกมมาโดยระยะห่างต้นกำเนิดรังสีและสารตัวอย่างห่าง 35 เซนติเมตร สารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมา 10 เซนติเมตร โดยหาล็อกของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกับพลังงานสูงโดยใช้วิธีการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานของปรอทกับการทดสอบสารตัวอย่างจากปิโตรเลียมเพื่อหาความเข้มข้นปรอท

ในการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีแกมมากับสารตัวอย่าง และสารตัวอย่างกับหัววัดรังสี โดยการจักระยะห่างต้องมีความเหมาะสมต่องานวิจัยในกรณีการจัดระยะห่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีไว้ในระยะใกล้ๆ เกิดผลต่อความเข้มข้นของรังสีแกมมาเพราะต้นกำเนิดรังสีมีความแรงมากทำให้หัววัดรังสีไม่สามารถที่จะวัดความเข้มข้นรังสีแกมมาได้ เนื่องจากมี Dead time สูง จึงต้องทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสม จึงทำการแก้ไขโดยนำแคดเมียมกั้นหน้าหัววัดรังสีแกมมาทำให้ลดทอนรังสีแกมมาได้และอีกวิธีเพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและสารตัวอย่างโดยช่วงแรกระยะห่างต้นกำเนิดรังสีแกมมากับสารตัวอย่างระยะทาง 25

เซนติเมตร สารตัวอย่างกับหัววัดรังสีแกมมาห่าง 10 เซนติเมตร ผลที่ได้ไม่สามารถวัดได้เพราะค่าความเข้มข้นของ Blank มีค่าน้อยกว่าสารตัวอย่างที่มีดินอยู่โดยแก้ด้วยการนำแผ่นแคดเมียมมาวางหน้าหัววัดรังสีแกมมาเพราะเป็นการลดทอนความแรงรังสีแกมมา และได้ทำการจัดระบบวัดรังสีแกมมาใหม่โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับสารตัวอย่างจาก 25 เซนติเมตร เป็น 35 เซนติเมตร หลังจากทำการจัดระบบวัดรังสีแกมมาได้ระยะที่เหมาะสมได้นำผลมาทำการวัดระบบนี้วัด

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การวิจัยนี้ประสบปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งคือ การเตรียมสารผสมระหว่างปรอทกับดิน หรือสลัดจ์ ซึ่งไม่อาจเตรียมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์ การปรับเทียบจึงส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างด้วย การหาวิธีเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันสำหรับใช้ในการปรับเทียบจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เทคนิคที่น่าเสนอในการวิจัยนี้มาก

5.3.2 เนื่องจากปรอทเป็นธาตุที่มีพิษ เพื่อความปลอดภัยจึงควรลดขั้นตอนในการสุ่มตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่างให้น้อยที่สุด โดยพัฒนาเทคนิคที่น่าเสนอนี้ให้สามารถหาปริมาณปรอทที่อยู่ภายในท่อได้โดยไม่ต้องสุ่มเก็บตัวอย่าง

5.3.3 ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคนิคนิวเคลียร์อื่น ๆ ในการหาปริมาณปรอทในสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม เช่น เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสี (radiation scattering technique) เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา (prompt gamma-ray analysis technique) และ เทคนิคการเกิดแพร์โพรดักชัน (pair production) เป็นต้น เทคนิคนิวเคลียร์เหล่านี้เป็นเทคนิคแบบไม่ทำลาย และสามารถใช้ได้กับตัวอย่างปริมาณมาก

## รายการอ้างอิง

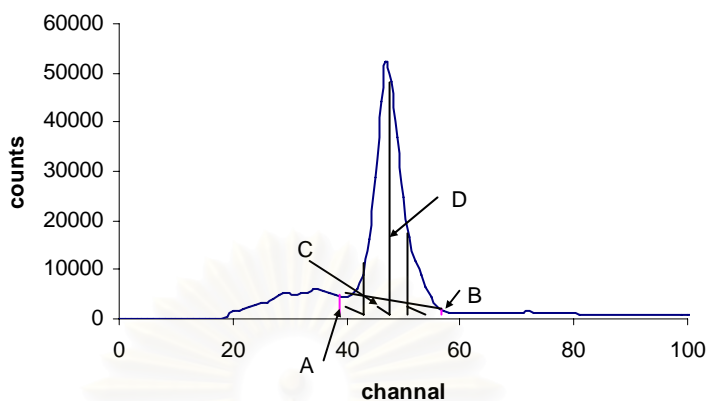
1. นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
2. ธวัช ชิตตระการ. การตรวจและการวัดรังสี. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
3. Glenn F. Knoll. Radiation detection and measurement. USA : John Wiley & Sons, 2000.
- 4.. John R. Lamarsh. Introduction to nuclear engineering. 2<sup>nd</sup> edition. USA : Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
5. อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา. การตรวจหาของบกพร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
6. สัมพันธ์ วงศ์นาวา. เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2547.
7. R.A. Fookes, V.L. Gravitis, J.S. Watt, C.E. Campbell and E. Steffner. Feasibility studies of low energy  $\gamma$ -ray techniques for on-line determination of ash content of coal on conveyors. The International journal of Applied Radiation and Isotopes 34, 1(1983): 37-44.
8. Xu Qi and Zhang Yongchuan. A novel automated separator based on dual energy gamma-ray transmission. Measurement Science and technology 11, 9(2000) : 1383-1388.
9. M. Yazdi and S.A. Esmailnia. Dual-energy gamma-ray transmission technique for quantitative measurement of coal ash in the Shahroud mine. International Journal of Coal Geology 55, 2-4(2003): 151-156.
10. A.H. El-Kateb, R.A.M. Rizk and A.M Abdul-Kader. Determination of aluminium concentration in copper-aluminium alloys using gamma-ray transmission techniques. Annals of Nuclear Energy 29,8(2002): 991-1002.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### วิธีการคำนวณหาค่าพื้นที่และอัตราส่วน Log ratio



spectrum ของต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-57

พื้นที่ใต้กราฟ (net area) = พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด - พื้นที่ฐานใต้กราฟ = D-C

ขั้นตอนการหาพื้นที่ใต้กราฟ (net area)

1. กำหนดพื้นที่ใต้กราฟให้ควบคุมพื้นที่ photo peak โดยนำตำแหน่ง 3 จุดมาเฉลี่ย หาค่ากำหนดให้เป็นจุด A และ B
2. นำค่าที่ได้จากจุด A และ จุด B มาหาค่าเฉลี่ย  $\frac{(A+B)}{2}$  เป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่ใต้กราฟ
3. นำตำแหน่งที่ channel A กับ channel B มาลบกันจะได้เป็นจำนวน channel ที่นำมาคิด; จำนวนchannel = ตำแหน่งA - ตำแหน่งB
4. พื้นที่ใต้ฐานกราฟ(C) = จำนวนchannel x ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟ
5. หาค่าพื้นที่ใต้กราฟ (net area) = พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด - พื้นที่ใต้ฐานกราฟ

$$\text{net area} = D-C$$

จากตารางที่ 4.5 นำค่ามาแสดงการคำนวณได้ดังนี้

| Hg | area Co-57 | $I_0 / I_L$ | $\theta(I_0/I_L)$ | $\mu_L$ | area Cs137 | $I_0 / I_H$ | $\theta(I_0/I_H)$ | $\mu_H$ | Log ratio |
|----|------------|-------------|-------------------|---------|------------|-------------|-------------------|---------|-----------|
|    | 1991842    |             |                   |         | 21730      |             |                   |         |           |
| 0% | 1294561    | 1.5386      | 0.4309            | 0.1219  | 17236      | 1.2607      | 0.2317            | 0.065   | 1.8598    |
| 5% | 962155     | 2.0702      | 0.7276            | 0.2058  | 16856      | 1.2892      | 0.2540            | 0.071   | 2.8644    |

$$\mu_L = \frac{1}{\chi} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_L}\right)$$

$$\mu_H = \frac{1}{\chi} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_H}\right)$$

$I_0$  ความเข้มรังสีเริ่มต้น

$I_0$  ความเข้มรังสีเริ่มต้น

$I_L$  ค่าความเข้มที่ผ่านตัวกลางออกมาได้

$I_H$  ค่าความเข้มที่ผ่านตัวกลางออกมาได้

$\mu_L$  สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา  
พลังงานต่ำ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$\mu_H$  สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา  
พลังงานสูง ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

X ความหนาของตัวกลาง ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

X ความหนาของตัวกลาง ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

$$\mu_L = \frac{1}{\left(\frac{100}{(22/7 * 3 * 3)}\right)} \ln\left(\frac{1991842}{962155}\right)$$

$$\mu_H = \frac{1}{\left(\frac{100}{(22/7 * 3 * 3)}\right)} \ln\left(\frac{21730}{16856}\right)$$

$$\mu_L = 0.2058$$

$$\mu_H = 0.071$$

$$\text{Log Ratio} = \frac{\mu_L}{\mu_H} = \frac{0.2058}{0.071} = 2.8644$$

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตารางการหาค่า standard deviation

| Value                         | Standard deviation                                     |
|-------------------------------|--|
| $x$                           | $a$  |
| $y$                           | $b$  |
| $\ln(x)$                      | $\frac{a}{x}$  |
| $\ln\left(\frac{x}{y}\right)$ | $\left \frac{a^2}{x^2} + \frac{b^2}{y^2}\right ^{1/2}$ |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศิษฐ์ ปฐมชัยวาลย์ เกิดวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2543 แล้วเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย