การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ
: กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม

นางสาวแพร นีรนาทรังสรรค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF MERCURY CONTENT BY MEASUREMENT OF BACKSCATTERED GAMMA-RAYS : A CASE STUDY OF SLUDGE SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION

Miss Prae Neeranatrangsan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ : กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม
โดย	นางสาวแพร นีรนาทรังสรรค์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

....กรรมการ

(อาจารย์จเด็จ เย็นใจ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แพร นีรนาทรังสรรค์ : การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ : กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม. (DETERMINATION OF MERCURY CONTENT BY MEASUREMENT OF BACKSCATTERED GAMMA RAYS : A CASE STUDY OF SLUDGE SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 59 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม ระบบวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วยหัววัดสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ และต้นกำเนิดรังสีแกมมาอเมริเซียม-241 แบบวงแหวนที่มีความแรงรังสี 1.1 กิกะเบคเคอเรล (30 มิลลิคูรี) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV โดยทำการจัดระบบในลักษณะที่ต้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสีและตัวอย่างอยู่ในแนวแกนร่วม นอกจากนี้ยังได้ออกแบบกำบังรังสีเพิ่มเติมเพื่อลดแบคกราวด์ และศึกษาลักษณะการจัดวางตัวอย่างที่เหมาะสม รวมทั้งผลจากปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่าง จากนั้นได้ทำการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ โดยใช้วิธีการเติมสารมาตรฐาน ซึ่งในการคำนวณหาปริมาณปรอทนั้น ได้ใช้ 4 วิธีเปรียบเทียบกัน ดังนี้คือ วิธีการสร้างกราฟปรับเทียบ เทคนิคการเติมสารมาตรฐานโดยใช้ค่าจากความเข้มรังสีเอกซ์ของปรอท Hg L_α ที่พลังงาน 9.987 keV ความเข้มรังสีเอกซ์ของปรอท Hg L_β ที่พลังงาน 10.873 keV และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีแกมมากระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อความเข้มรังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน (I_{coh}/I_{incoh}) ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจากวิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการเติมสารมาตรฐานที่ใช้ค่าอัตราส่วน I_{coh}/I_{incoh} และถูกต้องมากกว่าการใช้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์ของปรอท

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต ..... แพร นีรนาทรังสรรค์ .....
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2550

##4870409421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: GAMMA-RAY SCATTERING / MERCURY CONTENT

PRAE NEERANATRANGSAN : DETERMINATION OF MERCURY CONTENT BY MEASUREMENT OF BACKSCATTERED GAMMA RAYS : A CASE STUDY OF SLUDGE SAMPLES FROM PETROLEUM PRODUCTION. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.NARES CHANKOW, 59 PP.

In this research, the gamma-ray scattering technique was investigated for determining mercury content in sludge samples from petroleum production. The analysis system consisted of a CdTe semiconductor detector and an annular Am-241 source of 1.11 GBq (30 mCi) activity which emitted 59.6 keV gamma-ray. The system was arranged in the way that the source, the detector and the sample were in coaxial geometry. In addition, additional shielding was implemented to reduce background radiation. The optimum sample geometry and physical factors of the sample were also investigated. Mercury content in sludge samples were then determined using the standard addition technique. For comparison, 4 methods were used to obtained mercury concentration : firstly, directly from the calibration curve; secondly, from the standard addition technique using 9.987 keV Hg L_α; thirdly, from the standard addition technique using 10.873 keV and fourthly, from the standard addition technique using the intensity ratio of coherent to incoherent scattered gamma-rays (I_{coh}/I_{incoh}). It was found that the first and the fourth methods gave similar and better results comparing to the other two methods.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2007

Student's signature. Prae Neeranatrangsan

Advisor's signature. Nares Chankow

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการ พสวท. ที่สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งเรื่องของสถานที่ อุปกรณ์การทำวิจัย และทุนสนับสนุนการทำวิจัย

สำหรับความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ คำแนะนำที่มอบให้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณนิสิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ถามไถ่และให้กำลังใจ

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า บิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอน และน้องๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย………………………………… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ………………………………… จ

กิตติกรรมประกาศ………………………………… ฉ

สารบัญ………………………………… ช

สารบัญตาราง………………………………… ฌ

สารบัญภาพ………………………………… ญ

บทที่

1. บทนำ………………………………… 1
   1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา………………………………… 1
   1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย………………………………… 2
   1.3 ขอบเขตของการวิจัย………………………………… 2
   1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย………………………………… 2
   1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย………………………………… 2
   1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง………………………………… 3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง………………………………… 5
   2.1 สารปรอท………………………………… 5
   2.2 รังสีแกมมา………………………………… 7
   2.3 เทคนิคการวิเคราะห์รังสีแกมมากระเจิงกลับ………………………………… 17
   2.4 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณ………………………………… 18
3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย………………………………… 20
   3.1 วัสดุและอุปกรณ์………………………………… 20
   3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย………………………………… 23
4. ผลการวิจัยและวิเคราห์ผลการวิจัย………………………………… 31
   4.1 การออกแบบและการจัดวางระบบวิเคราะห์………………………………… 31
   4.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์………………………………… 35
   4.3 การทดสอบหลักการของเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิง………………………………… 43
   4.4 การทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ที่ได้จากการผลิตปิโตรเลียม………… 47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ... 52
5.1 สรุปผลการวิจัย.. 52
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 56

.

รายการอ้างอิง.. 57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน, ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน ที่การกระเจิงกรณีต่างๆ....…………….... 33
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงานกับระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง………………………………………. 34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง……………………………………………………………………… 36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง………………………………………………………………. 38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับความหนาแน่นตัวอย่าง……………………………………………………………………………... 41
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับกับปริมาณปรอท(%) 43
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับกับปริมาณปรอท(%) 45
4.8 ปริมาณตัวอย่างสลัดจ์, ปริมาณสารมาตรฐานโลหะปรอทที่เติม และค่าที่คำนวณได้……. 48
4.9 ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ ของตัวอย่างสลัดจ์……………………….. 49
4.10 ปริมาณปรอท (%) ในตัวอย่างสลัดจ์ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆ…………………………... 50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์... 8
2.2 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ของตะกั่ว ที่พลังงานต่างกัน.. 9
2.3 ค่า n ในการเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ..... 10
2.4 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน... 11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน.. 13
2.6 การเกิดแพร์โพรดักชันและแอนนิฮิเลชัน.. 15
2.7 ภาคตัดขวางของการเกิดแพร์โพรดักชัน ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ........................... 16
2.8 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง.. 16
3.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe detector)...................... 21
3.2 ภาพจัดวางระบบวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.. 21
3.3 วัสดุกำบังรังสี ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว.. 22
3.4 ตัวอย่างสลัดจ์.. 22
3.5 โลหะปรอท... 22
3.6 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลการใช้วัสดุตะกั่วกำบังรังสี.................................... 24
3.7 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับระบบวิเคราะห์.......... 25
3.8 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง............................ 26
3.9 การจัดระบบวัดโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างล่าง.. 27
3.10 การจัดระบบวัดโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างบน... 28
4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับ จากตัวอย่างสลัดจ์.. 31
4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน เมื่อมีแผ่นตะกั่วกำบัง และไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง เปรียบเทียบกับ สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับโดยไม่มีตัวอย่าง............ 32
4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน ที่ระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่างต่างๆ.. 34

รูปที่ หน้า

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง... 35
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน... 36
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน... 37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพีคที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน กับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน... 37
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง... 39
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง... 39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพีคที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง... 40
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นของตัวอย่าง... 41
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นของตัวอย่าง... 42
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพีคที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นตัวอย่าง... 42
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)... 43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)... 44
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพีคที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท.... 44

รูปที่ หน้า

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงาน กับปริมาณปรอท (%)………………………………………………………………... 45
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสีย พลังงานกับปริมาณปรอท (%)…………………………………………………………….. 46
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ แบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพีคที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)…………………………………………………………………………………….. 46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรอทเป็นโลหะหนักมีพิษ ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์มากตั้งแต่ เทอร์โมมิเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้าและวิทยาศาสตร์ ไปจนกระทั่ง ด้านทันตกรรมและการทำเครื่องสำอาง ปรอทสามารถถูกดูดซึมผ่านระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และซึมผ่านทางผิวหนังถ้ามีแผลหรือรอยแตกและสะสมพิษเอาไว้ ได้มีมาตรฐานกำหนดปริมาณสารปรอทในอากาศหายใจกำหนดโดย Environmental Protection Agency (EPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาให้อากาศ ซึ่งมีสารปรอทได้ไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร สำหรับปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติหลายแหล่งทั่วโลก มีปริมาณสูง ส่วนในประเทศไทย ตรวจพบครั้งแรกในสภาพของเหลวค่อนข้างบริสุทธิ์ บริเวณอ่าวไทย ก๊าซธรรมชาติที่มีปรอทเจือปน จะมีผลต่อระบบท่อในโรงแยกก๊าซเพราะว่าปรอทมีคุณสมบัติที่จะรวมตัวกับโลหะได้เกือบทุกชนิดซึ่งเรียกว่า Amalgam ปฏิกิริยานี้จะทำให้โครงสร้างของโลหะผสมของท่อในโรงแยกก๊าซเสียหาย ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณปรอทในก๊าซธรรมชาติจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะปรอมมีผลต่อระบบท่อและอุปกรณ์ จึงต้องมีการติดตั้ง Mercury Absorber ก่อนเข้าโรงแยกก๊าซ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ปริมาณปรอทใน ผลผลิตจากก๊าซธรรมชาติ ก็มีความสำคัญด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจาก ส่งผลกระทบต่อ ปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดจากการผลิตปิโตรเลียม

การวิเคราะห์หาปริมาณปรอทโดยส่วนใหญ่ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลานาน รวมทั้งเป็นการวิเคราะห์แบบการทำลายตัวอย่าง จากการศึกษาเบื้องต้นของปริมาณปรอทที่เจือปนอยู่ในสลัดจ์จากการผลิตก๊าซธรรมชาติ (ขุดเจาะแหล่งบงกช) พบว่าปรอทอาจมีอยู่ในปริมาณสูงและไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้น การวิเคราะห์ปริมาณปรอทจึงต้องเลือกวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสม และมีการสุ่มตัวอย่างอย่างระมัดระวัง การสุ่มตัวอย่างปริมาณน้อยอาจเสี่ยงต่อการผิดพลาดในการใช้ผลวิเคราะห์เป็นตัวแทนตัวอย่างทั้งหมด การสุ่มตัวอย่างปริมาณมาก หรือ การวิเคราะห์โดยไม่ต้องสุ่มตัวอย่าง จึงเป็นวิธีที่จะได้ผลวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้มากกว่า

เทคนิคการวิเคราะห์รังสีแกมมากระเจิงกลับ เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่างโดยอาศัยการวัดสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานหรือการกระเจิงเรย์เลย์ (Coherence Scattering, Rayleigh Scattering) และรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงานหรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Incoherence Scattering, Compton Scattering) จากงานวิจัยต่างๆ[1-5] พบว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มการกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงาน (การ

กระเจิงแบบเรย์เลย์) ต่อความเข้มของการกระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน (การกระเจิงแบบคอมป์ตัน) จะขึ้นกับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม ซึ่งเป็นเทคนิควิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง และไม่มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง รวมทั้ง ระบบที่ใช้วิเคราะห์เป็นระบบเดียวกับการวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียมโดยใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ โดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีอะเมอริเซียม (Am -241)

1.3.2 ทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ

1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1.4.3 ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท

1.4.4 ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างสลัดจ์กับโลหะปรอท

1.4.5 หาปริมาณของปรอทในสารตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้แนวทางในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในสารตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียมโดยเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ ซึ่งเป็นวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 **วิศิษฎ์ ปฐมชัยวาลย์**[6] ได้ทำวิจัยเรื่อง**การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา : กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม** นำเสนอเทคนิคสำหรับหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม เทคนิคหลายอย่างไม่สามารถให้ผลที่น่าเชื่อถือได้เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของปรอทในตัวอย่าง เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสองพลังงานถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณมากที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อย่างเช่น แร่และถ่านหินรังสีแกมมาพลังงาน 122 และ 136 keV จากโคบอลต์-57 ที่เลือกมีพลังงานสูงกว่าค่า K-absorption edge ของปรอทเล็กน้อย จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปรอทในตัวอย่าง ในขณะที่รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากซีเซียม-137 ใช้ในการปรับแก้ความแตกต่างของความหนาของตัวอย่าง โดยใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องแบบพกพาในการวัดรังสีแกมมาดังกล่าว เริ่มแรกได้ทดสอบเทคนิคนี้กับตัวอย่างดินผสมตะกั่วก่อน แล้วจึงทดสอบกับตัวอย่างสลัดจ์ ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ หากมีการปรับเทียบที่เหมาะสม สามารถนำเทคนิคที่นำเสนอนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียมและตัวอย่าง อื่น ๆ ที่มีปรอทปนเปื้อน

1.6.2 **สุจิตรา ธำรงวราภรณ์**[7] ได้ทำการวิจัยเรื่อง **การศึกษาสารปรอทอินทรีย์ในก๊าซธรรมชาติที่อาจมีผลต่อการกัดกร่อนของท่อลำเลียงก๊าซ** ศึกษาการกัดกร่อนโลหะเหล็กกล้าและอลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการด้วยสารปรอทไดเมทธิล เพื่อตรวจสอบอัตราการกัดกร่อนและรูปแบบการกัดกร่อนที่ปรากฏ โดยใช้เมทธานอล และปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดระหว่าง 80 – 100 องศาเซลเซียส เป็นตัวทำละลายปรอทไดเมทธิลเพื่อเตรียมสารละลายกัดกร่อน ผลการทดลองพบว่าหลังจากแช่แผ่นโลหะทั้งสองชนิดในสารละลายกัดกร่อนดังกล่าวนานกว่า 700 ชั่วโมง สารละลายปรอทไดเมทธิลในเมธานอลกัดกร่อนอะลูมิเนียมได้มากกว่าเหล็กกล้าถึง 9 เท่า ที่อุณหภูมิปกติ และให้อัตราการกัดกร่อนสูงกว่าตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเธอร์ ส่วนรูปแบบการกัดกร่อนเป็นแบบสม่ำเสมอ โดยลักษณะที่ปรากฏบนแผ่นอะลูมิเนียมจะเด่นชัดกว่าที่ปรากฏบนแผ่นเหล็กกล้า

1.6.3 **Ömer Sögüt, Adnan Küçükönder, Erdogan Büyükkasap**[1] ได้ทำวิจัยเรื่อง **Dependence on average atomic number of coherent/incoherent scattering intensity ratio in compounds** ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างเลขอะตอมเฉลี่ยกับอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นต่อความเข้มของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นจากโมเลกุล ในการวิจัยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ซึ่งปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV ตัวกระเจิงที่ใช้เตรียมจากสารประกอบ ซึ่งมีเลขอะตอมเฉลี่ยแตกต่างกัน รังสีแกมมาที่กระเจิงถูกวัดโดยหัววัด Si(Li) มี FWHM เท่ากับ 155 eV ที่ 5.9 keV ผลการศึกษาที่ได้พบว่า อัตราส่วนระหว่างความเข้มของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นต่อความเข้มของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น

1.6.4 **P.Arikan et al.**[2] ได้ทำวิจัยเรื่อง **Determenation of high-Z materials in low-Z medium by X-ray scattering techniques** โดยทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณหาธาตุที่มีเลขอะตอมสูง (แร่ธาตุและเถ้า) ในตัวกลางที่มีเลขอะตอมต่ำ (ถ่านหิน) โดยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ซึ่งเทคนิควิธีการวัดรังสีเอกซ์ และเทคนิคการการกระเจิงกลับ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ จำนวน 40 ตัวอย่าง ที่มาจากแหล่งต่างๆ ในประเทศตุรกี ปริมาณของเถ้าในถ่านหินที่พบ มีค่าตั้งแต่ 6-25% สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มของเรย์เลย์ต่อคอมป์ตัน(R/C) กับ ปริมาณ เถ้า และ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้ม R/C ปริมาณแร่ธาตุในถ่านหิน ในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงและพหุนามกำลังสอง

1.6.5 **P. Duvanchelle et al**[3] ได้ทำวิจัยเรื่อง **Effective atomic number in the Rayleigh to Compton scattering ratio** โดยทำการตรวจวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ที่กระเจิงแบบเรย์เลย์และคอมป์ตันจากตัวอย่าง ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะตัว ในเบื้องต้นได้จำลองผลของอัตราส่วนระหว่างเรย์เลย์ต่อคอมป์ตัน เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้อัตราส่วนนี้ไม่ขึ้นกับการลดทอนรังสีเอกซ์ภายในตัวอย่าง และค่าอัตราส่วนนี้ขึ้นกับสารผสมเท่านั้น งานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ให้พลังงาน 59.6 keV และหัววัดเจอร์เมเนียม หัววัดประสิทธิภาพ 100% ค่าความสามารถในแยกแยะพลังงานเท่ากับ 480 eV ที่พลังงาน 59.6 keV วิธีการคำนวณค่าเลขอะตอมประสิทธิผลที่นำมาใช้เป็นวิธีการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไป 4 วิธี ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารปรอท[8],[9]

ธาตุปรอทถูกจัดอยู่เป็นลำดับที่ 80 ในตารางธาตุในกลุ่มของธาตุ transition ปรอทเป็นโลหะสีขาวคล้ายเงิน มีมวลโมเลกุล 200.59 ปกติปรอทมีสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติและที่ความดันบรรยากาศสามารถทำให้เป็นของแข็งได้แต่เปราะ ในอุณหภูมิปกติจะระเหยเป็นไอได้ มีจุดหลอมเหลว -38.84ºC จุดเดือด 356.7ºC มีค่าความถ่วงจำเพาะ 13.546 ที่อุณหภูมิ 20º C ละลายน้ำได้เล็กน้อย

ปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติ จะอยู่ในรูปของไอปรอท และปะปนมากับก๊าซธรรมชาติจากแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม เมื่อขึ้นสู่ปากหลุมหรือผ่าน Dew Point Control Unit (DPCU คือ จุดลดอุณหภูมิของก๊าซ เพื่อแยกของเหลวออกจากก๊าซ อุณหภูมิที่ใช้ต้องคำนวณโดยอาศัย Equilibrium ของก๊าซ) ปรอทจะแยกตัวออก ไอปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติมีอยู่ 2 รูป คือ อยู่ในรูปของธาตุปรอท และสารประกอบของปรอท โดยสารประกอบของปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติส่วนมาก ได้แก่ dimethyl mercury (ไดเมทธิลเมอร์คิวรี) และ diethyl mercury (ไดเอทธิลเมอร์คิวรี) การเกิดปรอทในก๊าซธรรมชาติ จากการศึกษาโดย Arne Jernelov พบว่าปรอทเป็นธาตุที่หนัก เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 13 และไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นในการตกตะกอนซึ่งมักจะสะสมในบริเวณใกล้ปากแม่น้ำหรือปากอ่าว ปรอทจะสามารถรวมเป็นสารประกอบ (Form Complex) ได้อย่างแข็งแรงกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จากนั้นจึงตกตะกอนรวมกับตะกอนอื่น ๆ โดยปรอทจะถูกออกซิไดส์ไปเป็น Bivalent lon (Hg+2) และ Hg+2 จะถูก methylate ไปเป็น methyl mercury และ dimethyl mercury จะอยู่ในน้ำ และสะสมในปลา สาหร่าย ตลอดจนสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำ ในขณะที่ dimethylmercury มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนไปกับก๊าซออกสู่บรรยากาศภายนอก ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด และมีแสงอุลตราไวโอเลต dimethyl mercury จะไม่คงตัวและถูกเปลี่ยนไปเป็น methyl mercury ซึ่งอาจตกตะกอนหรือถูกเปลี่ยนไปเป็นธาตุปรอท ขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับขบวนการทางเคมี ชีววิทยาและฟิสิกส์ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ในสหรัฐอเมริการายงานว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จะเกิดร่วมกับปรอท ที่เมือง Mt.idlo ในมลรัฐแคลิฟอร์เนียพบว่าปรอทเกิดร่วมกับน้ำมันดิบและก๊าซ ที่แหล่งปิโตรเลียม Cymric ใน Kern County มลรัฐแคลิฟอร์เนีย พบธาตุปรอทและสารประกอบของปรอท ในน้ำมันดิบ ก๊าซ และ Saline Oilfield Water และพบว่าก๊าซธรรมชาติที่แยกออกจากน้ำมันดิบจะอิ่มตัวด้วยไอปรอท

ปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติของไทย ตรวจพบครั้งแรกในสภาพของเหลวค่อนข้างบริสุทธิ์ เมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2528 บริเวณอ่าวไทย ที่แหล่งปลาทอง และพบที่แหล่งสตูล เมื่อวันที่ 3 กันยายน 2528 โดยเก็บได้ที่ Dew Point Control Unit ส่วนแหล่งเอราวัณ พบปรอทในสภาพเป็นของเหลว เมื่อเดือนสิงหาคม 2531 โดยเก็บได้ที่ Sample Line ของหัวสูบ (Wellhead) ก๊าซธรรมชาติที่มีปริมาณปรอทเจือปน จะมีผลต่อระบบท่อในโรงแยกก๊าซเพราะผลกระทบจะอยู่ในลักษณะการสะสมตัวของสารอะมัลกาเมท (Amalgamate) ซึ่งอยู่ในรูปของโลหะผสม (Alloy) โดยพวกที่ก่อให้เกิดปัญหาการผุกร่อนมากที่สุด คือ โลหะผสมของอลูมิเนียมกับปรอท และพวกโละผสมของทองแดงกับปรอท

การเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ของปรอท

ปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางได้แก่

1.ทางการหายใจหรือทางจมูก โดยสูดหายใจเอาผงหรือไอปรอทเข้าสู่ปอด ซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้างบริเวณจมูกและทำอันตรายแก่กระดูกอ่อนที่กั้นระหว่างจมูก

2.ทางการรับประทานหรือทางปาก การรับประทานสารประกอบของปรอทเข้าไปนั้นมักจะเป็นปรอทอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร โดยเฉพาะอาหารทะเลจำพวกหอย

3.ทางการสัมผัสหรือทางผิวหนัง ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับปรอทซึ่งสัมผัสกับฝุ่นละอองหรือไอระเหยของปรอททำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนังได้

ผลกระทบของปรอทต่อมนุษย์

ปรอทเข้าสู่ร่างกายเราได้ทุกทาง ไอระเหยของโลหะปรอทเข้าทางจมูกและปอดโดยการหายใจ สารละลายเกลือปรอทเข้าทางปากและทางเดินอาหาร ยาที่มีปรอทเป็นส่วนประกอบจะถูกพาโดยการดูดซึมเข้าทาง ผิวหนังผ่านเข้าไปในกระแสเลือดและกระจายตัวตามเนื้อเยื่อต่างๆ ทั่วร่างกาย อวัยวะที่มีการสะสมปรอทได้มากที่สุดคือ ไต ถัดมาตามลำดับคือ ตับ ม้าม สมอง ผนังลำไส้เล็ก หัวใจ กล้ามเนื้อลาย และปอด เมื่อมีการสะสมจะทำให้เซลล์ของระบบประสาทส่วนกลางถูกทำลาย จะเกิดอาการผิดปกติทางประสาทได้หลายประการ เช่น ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของร่างกายได้อย่างปกติ พูดติดอ่าง หูหนวก และตายในที่สุด นอกจากนั้นอาการทางประสาทอื่นๆ ที่อาจปรากฏได้แก่ ปัสสาวะขัด ความจำเสื่อม และการมองเห็นแคบลง เป็นต้น

2.2 รังสีแกมมา[10-14]

รังสีแกมมาจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีประจุ ไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า มีความเร็วเท่ากับแสง ($3\text{x}10^{8}$ m/s) พลังงานของรังสีแกมมาจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ ดังต่อไปนี้

$$E = h\nu \tag{2.1}$$

$$E = \frac{12.4}{\lambda} \tag{2.2}$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (keV)

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant = $4.135\text{x}10^{-18}$ keV.s)

ν คือ ความถี่ของคลื่น (sec^{-1})

λ คือ ความยาวคลื่น ($\mathring{A}$)

รังสีแกมมาแตกต่างกับรังสีเอ็กซ์ ที่แหล่งกำเนิด กล่าวคือ รังสีแกมมาเกิดจากการที่นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลง หลังจากการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวเคลียสจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) และลดระดับพลังงานลงมาอยู่ในสถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปรังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i (สถานะกระตุ้น) และ E_f เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งถึงสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \tag{2.3}$$

2.2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

เนื่องจากกลไกการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาในวัสดุมีความเป็นไปได้หลายกลไก แต่กลไกหลัก 3 ชนิด คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ , กระเจิงคอมป์ตัน และแพร์โพรดักชัน กระบวนการทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดจากรังสีแกมมาเป็นพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลให้รังสีแกมมาหายไปหรือกระเจิงไปที่มุมต่างๆ ในบางกรณี ที่รังสีแกมมาถูกพิจารณาในรูปของอนุภาค อาจถูกเรียกว่า โฟตอน(photon)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ (photoelectric effect)

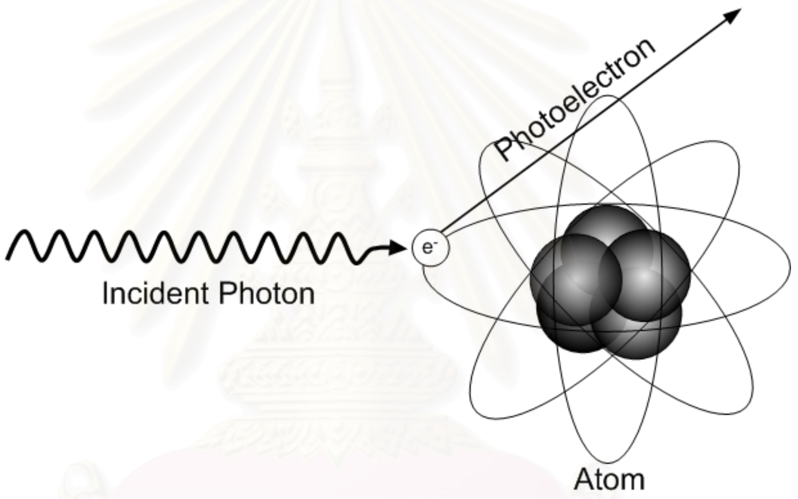
เกิดจากโฟตอน (photon) ทำอันตรกิริยาอิเล็กตรอนในวงโคจรทำให้โฟตอนหายไปและอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมอิเล็กตรอนอยู่ภายในวงโคจรด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวจำนวนหนึ่ง ดังนั้น พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ

$$T \;=\; E_{\gamma} - BE \qquad (2.4)$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

E_{γ} คือ พลังงานของรังสีแกมมาหรือโฟตอน

BE คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



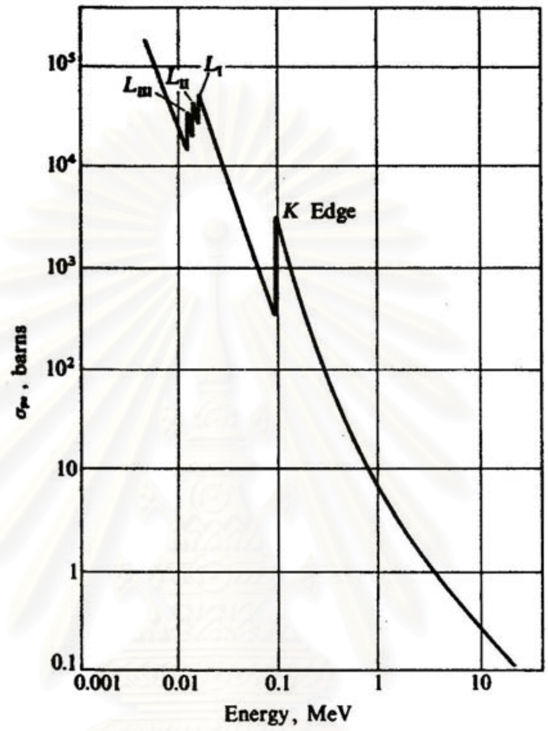
รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนแล้ว เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดช่องว่างในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะเลื่อนเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่างพร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ออกมา

ถ้าให้ σ_{pe} เป็นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I (γ - photon /cm^2.s) ตกกระทบเป้าซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ต่อปริมาตรของเป้า, F_{pe} (cm^{-3} s^{-1}) จะแสดงได้ดังนี้

$$F_{pe} \;=\; I\, N\, \sigma_{pe} \qquad (2.5)$$

ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา σ_{pe} จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น และ σ_{pe} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง รูปที่ 2.2 แสดงค่า σ_{pe} ของตะกั่วที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า σ_{pe} ของตะกั่วมีค่าสูงและจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง แสดงว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทะลุผ่านตะกั่วได้ยาก



รูปที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ของตะกั่ว ที่พลังงานต่างกัน[10]

จากรูปที่ 2.2 ค่า σ_{pe} มีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities) ในบางพลังงานแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่า σ_{pe} อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์ฟชันเอดจ์” (absorption edge) ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้นระดับพลังงานต่าง ๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอบซอร์ฟชันเอดจ์ ต่างกันคือ K_{edge} , L_{edge}, M_{edge} เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่า K_{edge} จึงมีพลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียว เนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วนชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมียอดสันขอบการดูดกลืน 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

K_{edge} เป็นค่าพลังงานที่ตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K- electron) พอดี อะตอมจะมีค่า σ_{pe} สูงชันขึ้น

เพราะฉะนั้นอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานเท่ากับ K_{edge} ได้ดีกว่าในช่วงพลังงานใกล้เคียงกันในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า K_{edge} ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์กับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K-electron) ได้

ส่วน L_I, L_{II} และ L_{III} ก็ทำนองเดียวกันคือ เป็นจุดที่ตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร L (L – electron) ในวงโคจรย่อย (sub shell) ที่ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ

ช่วงที่รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า K_{edge} ขึ้นไป ค่า σ_{pe} จะลดลงตามค่าพลังงานดังนี้

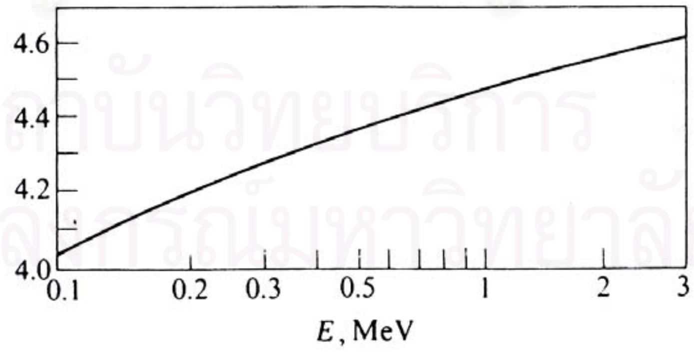
$$\sigma_{pe} \approx E^{-3} \tag{2.6}$$

นอกจากนี้ค่า σ_{pe} ยังขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก คือ

$$\sigma_{pe} \approx Z^{n} \tag{2.7}$$

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่จะมีค่าประมาณ 4 กราฟของค่า n แสดง ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์จึงเกิดกับธาตุที่เลขอะตอมสูงเช่น ตะกั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ จะมีค่าประมาณดังสมการ

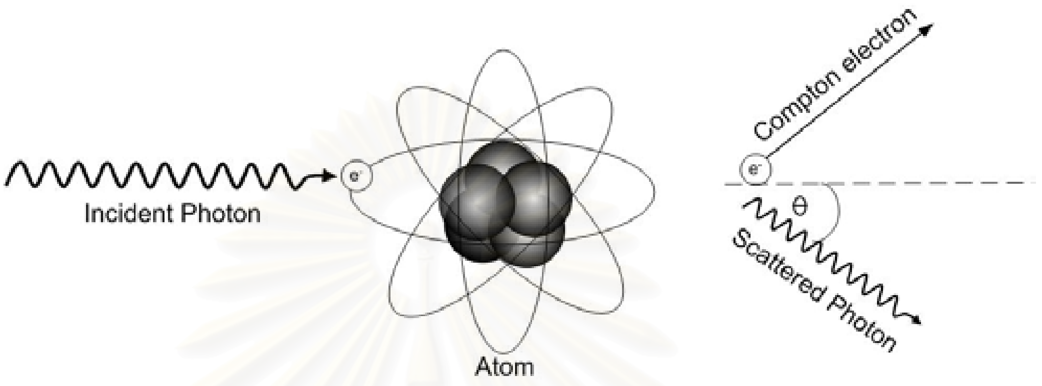
$$\sigma_{pe} \approx \frac{Z^{n}}{E^{3}} \times const \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.3 ค่า n ในการเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ[10]

2.2.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (The Compton Effect)

เมื่อรังสีแกมมาหรือโฟตอนเข้าชนกับอะตอมของตัวกลาง โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้น โฟตอนจะกระเจิงออกมาโดย ทำมุม θ กับแนวการเคลื่อนที่เดิมดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ในการเกิดอันตรกิริยานี้โฟตอนไม่ได้หายไป เพียงแต่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และพลังงาน สำหรับพลังงานของโฟตอนที่หายไปจะถูกถ่ายเทให้อิเล็กตรอนหลังจากการชน จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (โดยสมมุติให้อิเล็กตรอนอยู่กับที่ก่อนการชน) สามารถคำนวณพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนได้

กำหนดให้โฟตอนมีพลังงาน $h\nu$ และโมเมนตัม $h\nu/c$ ตกกระทบกับอิเล็กตรอนที่มีมวลนิ่ง (m_0) รังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาเป็นมุม θ มีพลังงาน $h\nu'$ และโมเมนตัม $h\nu'/c$ (ν' น้อยกว่า ν) จึงทำให้ความยาวคลื่น λ' มากกว่า λ พลังงานของรังสีแกมมาที่ลดลงไป ($h\nu$ - $h\nu'$) กลายเป็นพลังงานจลน์ E_k ของอิเล็กตรอนที่ถอยกลับออกมา ถ้ามวลของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่ากับ m จะได้

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

$$= m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \qquad (2.9)$$

เมื่อ β = v/c โดย v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนถอยกลับและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน (p_e) จะมีค่า

$$p_e = m\beta c$$

$$= \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{2.10}$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน x และ y และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c}\cos\theta + \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\phi \tag{2.11}$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c}\sin\theta - \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\phi \tag{2.12}$$

$$h\nu = h\nu' + E_k$$

$$= h\nu' + m_0 c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \tag{2.13}$$

เมื่อให้ค่าของมุม ϕ คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$p_e c \cos\phi = h\nu - h\nu' \cos\theta \tag{2.14}$$

$$p_e c \sin\phi = h\nu' \sin\theta \tag{2.15}$$

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu')\cos\theta + (h\nu')^2 \tag{2.16}$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0 c^2 \tag{2.17}$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{\left(p^2 c^2 + m_0^2 c^4\right)} \tag{2.18}$$

แทนค่าลงในสมการ (2.17) ได้

$$p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4 = \left(E_k + m_0 c^2\right)^2 \tag{2.19}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และแทนค่า $E_k = h\nu - h\nu'$ จากสมการ (2.13) ได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu - h\nu)^2 + 2(h\nu - h\nu')\, m_0 c^2 \tag{2.20}$$

สมการ (2.16) และสมการ (2.20) เท่ากันดังนั้น

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \tag{2.21}$$

เมื่อ $\alpha = \dfrac{h\nu}{m_0 c^2}$ ซึ่งเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ตกลงบนอิเล็กตรอนที่อยู่ในหน่วยของมวลนิ่งของอิเล็กตรอน

โอกาสการเกิดอันตรกิริยานี้เรียกว่า ค่าภาคตัดขวางคอมป์ตัน (Compton cross section) ซึ่งขึ้นกับ จำนวนอิเล็กตรอนในตัวกลางซึ่งเพิ่มตามเลขอะตอม และขึ้นกับพลังงานโฟตอน

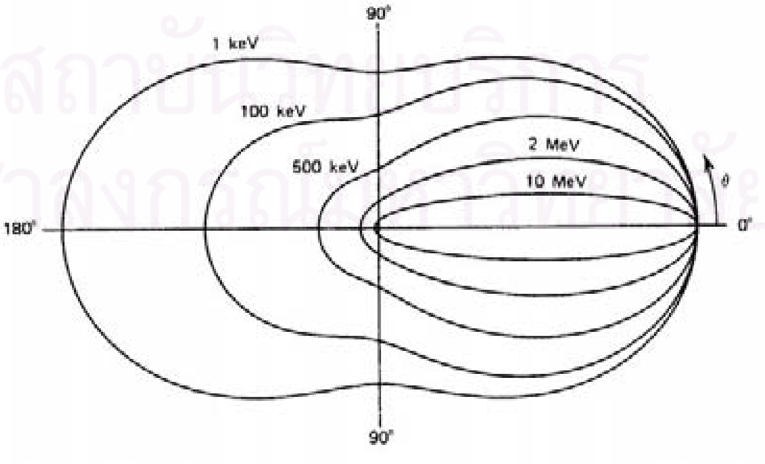
$$\sigma(m^{-1}) = NZf(E_\gamma) \tag{2.22}$$

เมื่อ σ คือ โอกาสการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน ต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของโฟตอน

$f(E_r)$ คือ ฟังก์ชันของ E_r ซึ่งค่าภาคตัดของคอมป์ตันจะลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น

โอกาสเกิดรังสีแกมมากระเจิงที่มุมต่างๆ สามารถหาได้จากสมการของ Klein-Nishina อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \left(\frac{1}{1+\alpha(1-\cos\theta}\right)^2 \left(\frac{1+\cos^2\theta}{2}\right)\left(1+\frac{\alpha^2(1-\cos\theta)^2}{(1+\cos^2\theta)[1+\alpha(1-\cos\theta)]}\right) \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน[11]

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งดิฟเฟอเรนเชียลของค่าภาคตัดขวางสำหรับกระเจิงแบบคอมป์ตัน ดังสมการ

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \left[1+\alpha(1-\cos\theta\right]^{-2} \left[1+\cos^2\theta + \frac{\alpha^2(1-\cos\theta)^2}{1+\alpha(1-\cos\theta)}\right] S(X,Z) \qquad (2.24)$$

เมื่อ S(x,z) คือ ฟังก์ชันของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น

2.2.1.3 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Coherent Scattering)

นอกจากกระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน หรือ การกระเจิงแบบคอมป์ตันแล้ว การกระเจิงอีกชนิดหนึ่ง คือการกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงาน หรือ การกระเจิงแบบเรย์เลย์ ซึ่งรังสีแกมมา ที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานเท่าเดิม เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นแต่เปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ โดยมากจะเกิดในรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ไม่กี่ร้อยอิเล็กตรอนโวลต์ และ เกิดมากในตัวกลางที่มีค่าเลขอะตอมสูง

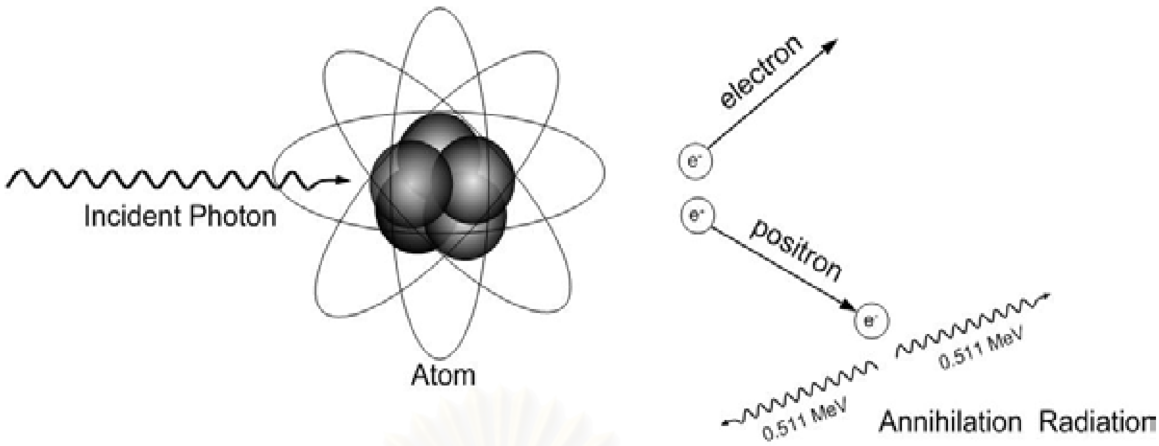
ค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าภาคตัดขวางสำหรับการกระเจิงแบบเรยเลย์ ดังสมการ

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \left(1+\cos^2\theta\right)\left[F(x,z)\right]^2 \qquad (2.25)$$

2.2.1.4. แพร์โพรดักชัน (pair production)

แพร์โพรดักชันเป็นอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสนามนิวเคลียส ส่งผลโฟตอนหายไปกลายเป็น อิเล็กตรอนและโพสิตรอนวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม แม้ว่านิวเคลียสที่เกิดอันตรกิริยาไปมีการปลี่ยนแปลง แต่รังสีแกมมาไม่สามารถหายไปและผลิตอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนได้ในพื้นที่ที่ว่าง(ไม่มีนิวเคลียสของอะตอม) อันตรกิริยานี้เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ดังนั้นพลังงานเริ่มต้นจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับมวลนิ่ง (rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน นั่นคือ 1.022 MeV

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - 1.022 MeV \qquad (2.26)$$



รูปที่ 2.6 การเกิดแพร์โพรดักชันและแอนนิฮิเลชัน

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ถ้าพลังงานของรังสีแกมมาที่ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบโพรดักชันมีค่ามากกว่า 1.022 MeV พลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022MeV) \qquad (2.27)$$

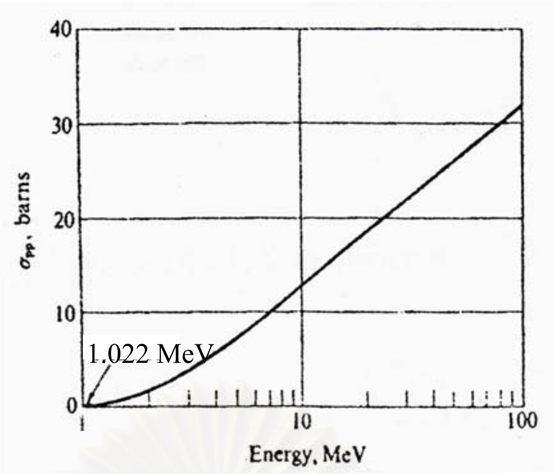
เมื่อโพสิตรอนที่เกิดเคลื่อนไปจนพลังงานจลน์หมด ก็จะสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดโฟตอน 2 ตัวที่มีพลังงานตัวละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (annihilation) เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงมวลไปเป็นพลังงาน ตรงข้ามกับอันตรกิริยาแบบแพร์โพรดักชัน

ค่าภาคตัดขวางของการเกิดแพร์โพรดักชันจะขึ้นกับพลังงานและเลขอะตอมของตัวกลาง สามารถเขียนได้โดย

$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z) \qquad (2.28)$$

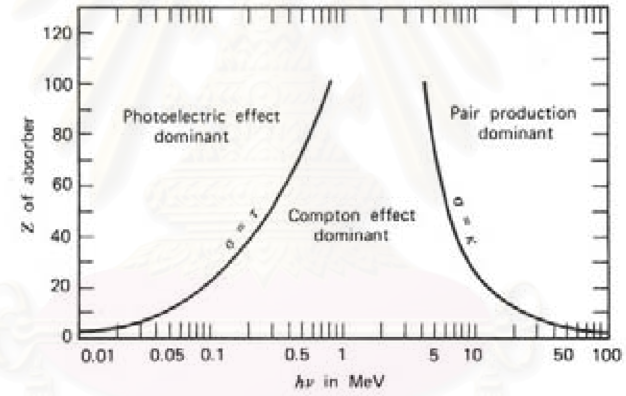
เมื่อ κ คือ โอกาสการเกิดการเกิดแพร์โพรดักชัน ต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของโฟตอน

$f(E_r,Z)$ คือ ฟังก์ชันซึ่งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตาม Z และ เพิ่มขึ้นตาม E_r



รูปที่ 2.7 ภาคตัดขวางของการเกิดแพร์โพรดักชัน ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ [10]

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละแบบนั้นจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมาและตัวกลางที่รังสีแกมมาไปทำอันตรกิริยาดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง[11]

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์รังสีแกมมากระเจิงกลับ

การกระเจิงกลับของรังสีแกมมาจะขึ้นอยู่กับชนิดของอัตรากิริยาที่เกิดกับตัวกลาง ซึ่งโอกาสในการเกิดอันตรกิริยานั่นก็ ขึ้นกับ พลังงานงานของรังสีและ เลขอะตอมของตัวกลาง

ค่าสัมประสิทธิการลดทอนเชิงมวลโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ τ cm^2 / g ขึ้นกับ Z^4 และ E^{-3}

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลคอมป์ตัน σ_C cm^2 / g ไม่ขึ้นกับ Z แต่ แปรตาม E^{-1} ในการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ถ้ารังสีแกมมาตกกระทบมีพลังงานสูง (>1MeV) เมื่อกระเจิงจากตัวอย่างจะมีการสูญเสียพลังงานมาก กว่า รังสีแกมมาตกกระทบที่มีพลังงานต่ำ

สำหรับการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ซึ่ง รังสีแกมมาตกกระทบ กับรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมามีพลังงานเท่ากัน โอกาสเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น σ_{coh} cm^2 / g ขึ้นกับ Z แต่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโอกาสเกิดคอมป์ตัน ยกเว้น รังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า 100 keV

ในการวัดความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับ I (counts /s) จากตัวอย่าง แสดงดังสมการ

$$I = kI_0 \frac{(\sigma_c + \sigma_{coh})}{(\mu + \mu')}\left[1 - \exp\{-(\mu + \mu')m\}\right] \qquad (2.29)$$

เมื่อ μ, μ' คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล $(\tau + \sigma_c + \sigma_{coh})$ ที่ พลังงานรังสีแกมมาตกกระทบ และรังสีแกมมากระเจิง ตามลำดับ

k คือ ประสิทธิภาพของระบบวัด

I_0 คือ ความแรงรังสีจากต้นกำเนิด (phontons / s)

และเมื่อพิจารณา ความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับ ที่มีความเข้มที่ 95% ของจุดอิ่มตัว จะได้ค่าความหนาเชิงมวลของวัสดุตัวกลาง ดังสมการ

$$m_{sat} = \frac{3}{\mu + \mu'} \qquad (2.30)$$

เมื่อพิจารณา ตัวอย่างที่มีความหนามากๆ จะได้ ความเข้มของรังสีแกมมาดังสมการ

$$I_{inc} = \frac{I_0 k_1 \sigma_{inc}}{\mu_s(E) + A\mu_s(E')} \qquad (2.31)$$

และ

$$I_{coh} = \frac{I_0 k_1 \sigma_{coh}}{\mu_s(E) + A\mu_s(E)} \qquad (2.32)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

2.3.1 การสร้างกราฟปรับเทียบ (calibration curve)

เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ เช่น ความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะ หรือค่าสัมประสิทธิการลดทอน กราฟดังกล่าวนี้ สร้างขึ้นจากสารมาตรฐานที่มีส่วนประกอบและความเข้มข้นต่างๆกัน ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆของตัวอย่างที่ใช้ทำสร้างกราฟปรับเทียบ จะต้องใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ต้องการจะวิเคราะห์มากที่สุด

2.3.2 วิธีการเติมสารมาตรฐาน (standard addition)

การเติมธาตุมาตรฐานลงไปในตัวอย่างนั้นเป็นการเติมธาตุชนิดเดียวกับธาตุที่จะวิเคราะห์ลงไป เพื่อวัดค่าตัวแปรที่สนใจเทียบกับ ค่าตัวแปรที่สนใจก่อนเติมสารมาตรฐาน

สมมุติให้เติมธาตุที่สนใจ มีความเข้มข้นเท่ากับ C_x วัดค่าความเข้มรังสีได้เท่ากับ I_x เมื่อเติมธาตุมาตรฐานลงไปจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้ธาตุที่สนใจมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น $C_{x+\Delta x}$ วัดค่าความเข้มรังสีได้ $I_{x+\Delta x}$

$$I_x \propto C_x$$
$$\therefore I_x = kC_x \tag{2.33}$$

$$I_{x+\Delta x} \propto C_{x+\Delta x}$$
$$\therefore I_{x+\Delta x} = k'C_{x+\Delta x}$$

$$I_{x+\Delta x} = k'(DC_x + C_{\Delta x}) \tag{2.34}$$

เมื่อ Δx มีค่าน้อย k มีค่าใกล้เคียง k′ จะได้

$$\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}} = \frac{C_x}{DC_x + C_{\Delta x}} \tag{2.35}$$

เมื่อ D คือ Dilution factor

$$D = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง} + \text{น้ำหนักสารมาตรฐานที่เติม}}$$

$C_{\Delta x}$ คือ ความเข้มของธาตุที่สนใจจากสารมาตรฐานที่เติมลงไป (คิดเป็นความเข้มข้นในตัวอย่าง)

$$C_{\Delta x} = \frac{\text{น้ำหนักของธาตุที่เติมลงไป}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง + น้ำหนักสารมาตรฐานที่เติม}}$$

จากสมการที่ (2.35) จัดรูปใหม่ จะได้

$$C_x = \frac{C_{\Delta x}}{\frac{I_{x+\Delta x}}{I_x} - D} \tag{2.36}$$

และอีกกรณีหนึ่ง คือในกรณีที่ความเข้มรังสีที่เราสนใจมีค่าลดลงเมื่อธาตุที่สนใจมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เช่น ความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน

$$I_x \propto \frac{1}{C_x}$$

$$\therefore I_x = \frac{k}{C_x} \tag{2.37}$$

$$I_{x+\Delta x} \propto \frac{1}{C_{x+\Delta x}}$$

$$\therefore I_{x+\Delta x} = \frac{k'}{C_{x+\Delta x}}$$

$$I_{x+\Delta x} = \frac{k'}{(DC_x + C_{\Delta x})} \tag{2.38}$$

เมื่อ Δx มีค่าน้อย k มีค่าใกล้เคียง k' จะได้

$$\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}} = \frac{DC_x + C_{\Delta x}}{C_x} \tag{2.39}$$

จากสมการที่ (2.39) จัดรูปใหม่ จะได้

$$C_x = \frac{C_{\Delta x}}{\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}} - D} \tag{2.40}$$

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe detector) รุ่น XR-100T-CdTe ของ Amptek ขนาด 3 มิลลิเมตร x 3 มิลลิเมตร (9 ตารางมิลลิเมตร) ความหนาผลึก 1 มิลลิเมตร โดยมี ค่า FWHM ที่พลังงาน 5.9 keV เท่ากับ 290 eV และที่พลังงาน 59.6 keV เท่ากับ 600 eV

3.1.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณและแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง รุ่น PX2T-CdTe

3.1.3 ไมโครคอมพิวเตอร์/เครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง

3.1.4 ต้นกำเนิดรังสีอเมริเซียม (Am-241) แบบวงแหวน ความแรงรังสี 30 mCi

3.1.5 วัสดุกำบังรังสีสำหรับหัววัด ได้แก่ ทองแดง และตะกั่ว

3.1.6 กระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร

3.1.7 กระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร

3.1.8 ตัวอย่างดิน สำหรับการทดสอบหลักการของเทคนิค

3.1.9 ตัวอย่างสลัดจ์ จากการผลิตปิโตรเลียม

3.1.10 สารประกอบปรอท Hg_2Cl_2

3.1.11 โลหะปรอท

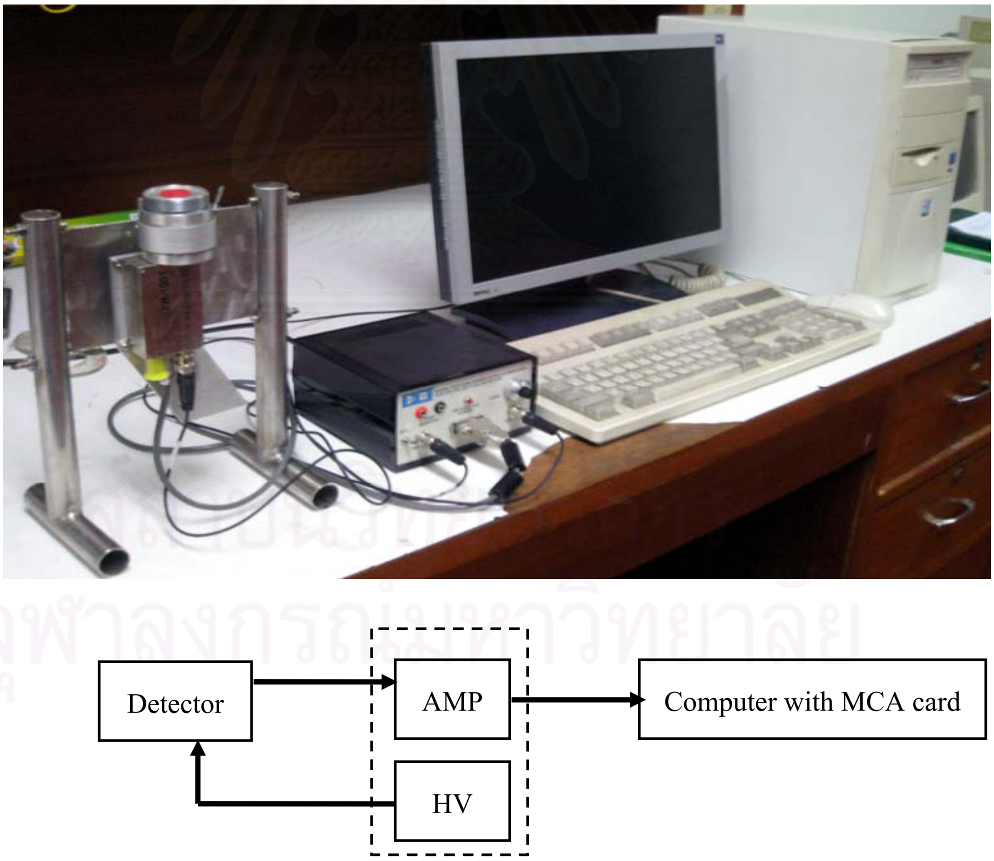
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ
และแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

ส่วนของหัววัดรังสี

องค์ประกอบของหัววัดรังสี CdTe

รูปที่ 3.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe detector)



รูปที่ 3.2 ภาพจัดวางระบบวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ทองแดง **ตะกั่ว**

รูปที่ 3.3 วัสดุกำบังรังสี ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างสลัดจ์

รูปที่ 3.5 โลหะปรอท

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

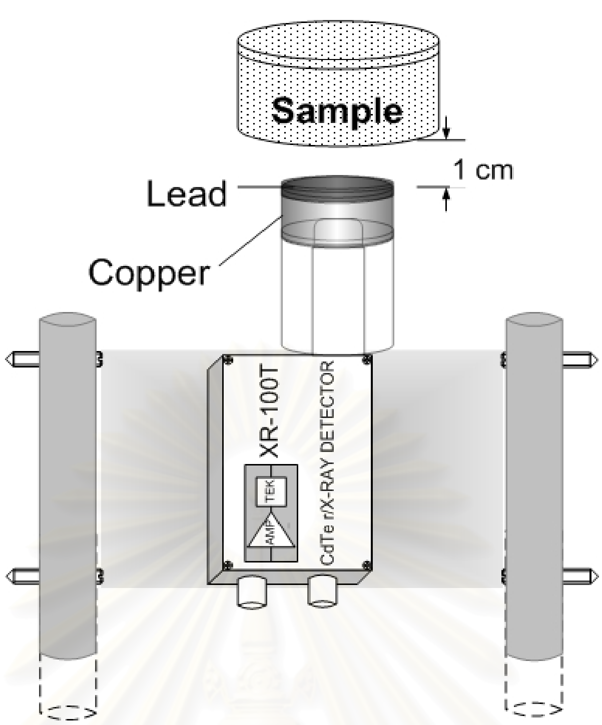
วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์นี้อาศัยเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่าง โดยอาศัยการวัดรังสีแกมมาที่เกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน (การกระเจิงแบบคอมป์ตัน หรืออินโคฮีเรนท์) และอันตรกิริยาการกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงาน (การกระเจิงแบบเรย์เลย์ หรือโคฮีเรนท์) กับตัวอย่าง โดยก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง ต้องศึกษาการออกแบบและการจัดวางระบบวิเคราะห์ ให้เหมาะสม กับเครื่องมือและอุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่าง ที่มีผลต่อการกระเจิงของรังสีแกมมา และทำการทดสอบเทคนิคการวัด

3.2.1 การออกแบบและการจัดวางระบบวิเคราะห์

ในการออกแบบและการจัดวางระบบวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยใช้ระบบวิเคราะห์เดียวกับการวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง[15] ที่มีในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ความแรงรังสี 30 มิลลิคูรี แบบวงแหวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.8 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.2 เซนติเมตร เพื่อเป็นเพิ่มความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวอย่าง และหัววัดที่ใช้เป็นหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe detector) รุ่น XR-100T-CdTe ของ Amptek ขนาด 3 มิลลิเมตร x 3 มิลลิเมตร (9 ตารางมิลลิเมตร) ความหนาผลึก 1 มิลลิเมตร โดยมีค่า FWHM ที่พลังงาน 5.9 keV เท่ากับ 290 eV และที่พลังงาน 59.6 keV เท่ากับ 600 eV โดยส่วนที่เป็นผลึกบรรจุอยู่ในวัสดุกำบังรังสีทรงกระบอกที่ทำจากทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร ที่มีรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร และต้นกำเนิดรังสี วางบนวัสดุกำบังทองแดง จากการจัดวางข้างต้น สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับที่วัดได้จากตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.1

3.2.1.1 ศึกษาผลการใช้วัสดุตะกั่วกำบัง

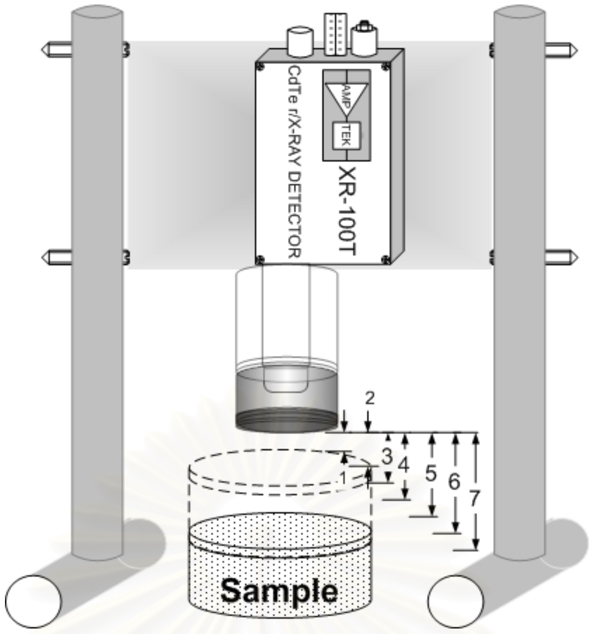
เนื่องจาก ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้มีความแรง 30 มิลลิคูรี ประกอบกับระบบวิเคราะห์ที่ใช้ เดิมมีเพียง วัสดุกำบังทองแดง เป็นตัวกำบังรังสี อาจจะไม่เพียงพอในการกำบังรังสีแกมมา 59.6 keV ซึ่งมีความแรงรังสีค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงทำการศึกษาการ เพิ่มวัสดุกำบัง โดยวัสดุกำบังที่ใช้เป็นแผ่นตะกั่ว กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เซนติเมตร บาง 0.2 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลาง ขนาดรู 1.3 เซนติเมตร โดยวางไว้ระหว่างต้นกำเนิดรังสีและวัสดุกำบังทองแดง จากนั้นทำการศึกษาโดยทำการวัดสเปกตรัมที่กระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน เมื่อมีแผ่นตะกั่ว และไม่มีแผ่นตะกั่ว เป็นเวลานาน 300 วินาที ดังรูปที่ 3.6 และเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ได้ กับสเปกตรัมที่ได้จากการวัดโดยไม่มีตัวอย่าง ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 3.6 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลการใช้วัสดุตะกั่วกำบังรังสี

3.2.1.2 ศึกษาผลระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับระบบวิเคราะห์

ในการออกแบบการวางตัวอย่างต้องทำการศึกษาระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับระบบวัดเพื่อให้เหมาะสมต่อมุมกระเจิงที่สนใจ ทำการศึกษาโดยจัดวางระบบดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ตัวอย่างดินผสมสารประกอบปรอท บรรจุในกระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ทำการวัดโดยวางให้กระปุกติดกับต้นกำเนิดรังสี และวัดเป็นเวลานาน 300 วินาที จากให้เพิ่มระยะห่างจากกระปุกถึงหัววัด ครั้งละ 1 เซนติเมตร จนกระทั่งระยะห่างจากหัววัด เท่ากับ 7 เซนติเมตร ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 – 4.4



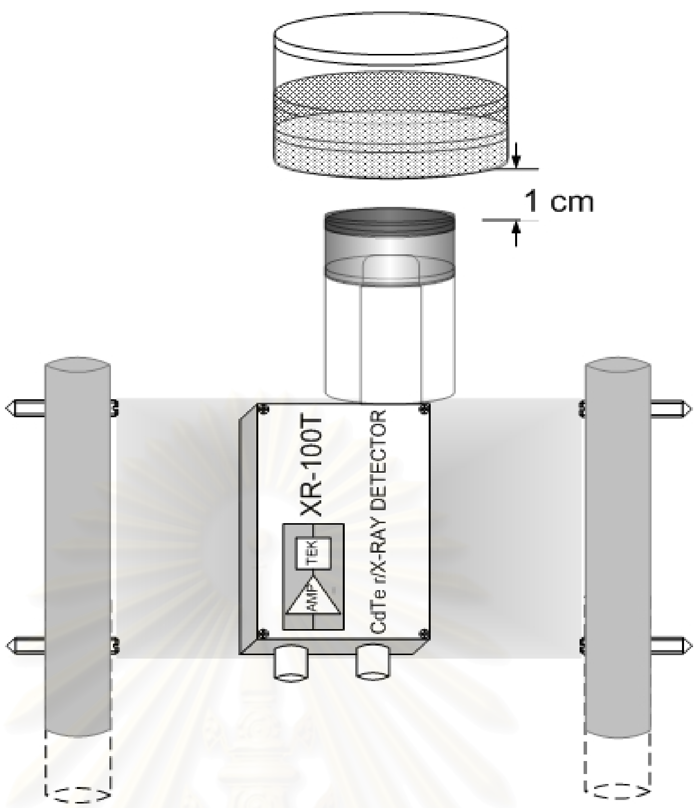
รูปที่ 3.7 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับระบบวิเคราะห์

3.2.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

เนื่องจากการกระเจิงของรังสีแกมมา ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณตัวอย่าง, ความหนาแน่นของตัวอย่าง ไปจนกระทั่งความชื้นของตัวอย่าง ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจริง จะต้องทำการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการกระเจิงของรังสีแกมมา เพื่อออกแบบการวัดรังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างโดย ไม่ให้มีผลกระทบจากปัจจัยเหล่านี้

3.2.2.1 ศึกษาผลความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง

ในการทดลองศึกษาผลของความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง จัดวางระบบการวิเคราะห์ ดังแสดงใน รูปที่ 3.8 โดยให้ระบบวิเคราะห์ หงายขึ้น และระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง เท่ากับ 1 เซนติเมตร ซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 3.2.1.2 แล้วทำการปรับเปลี่ยนความหนาของตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างดินที่ไม่มีสารประกอบปรอท ดังนั้นความหนาอิ่มตัวที่ได้จากการทดลองจะเป็นความหนามากที่สุด เนื่องจาก เมื่อตัวอย่างดินมีสารประกอบปรอทผสมอยู่ด้วย จะทำให้ความหนาอิ่มตัวของตัวอย่างลดลงตามปริมาณปรอทที่เพิ่มขึ้น ในการศึกษานี้ทำการวัดตัวอย่างนาน 300 วินาที เริ่มวัดที่ความหนาตัวอย่าง เท่ากับ 0 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมรังสีแกมมาที่กระเจิงจากกระปุกเปล่า จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณดิน ครั้งละ 30 กรัม แล้วทำการวัด แต่ละครั้ง ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 – 4.7



รูปที่ 3.8 การจัดระบบวัดเพื่อทำการศึกษาผลความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง

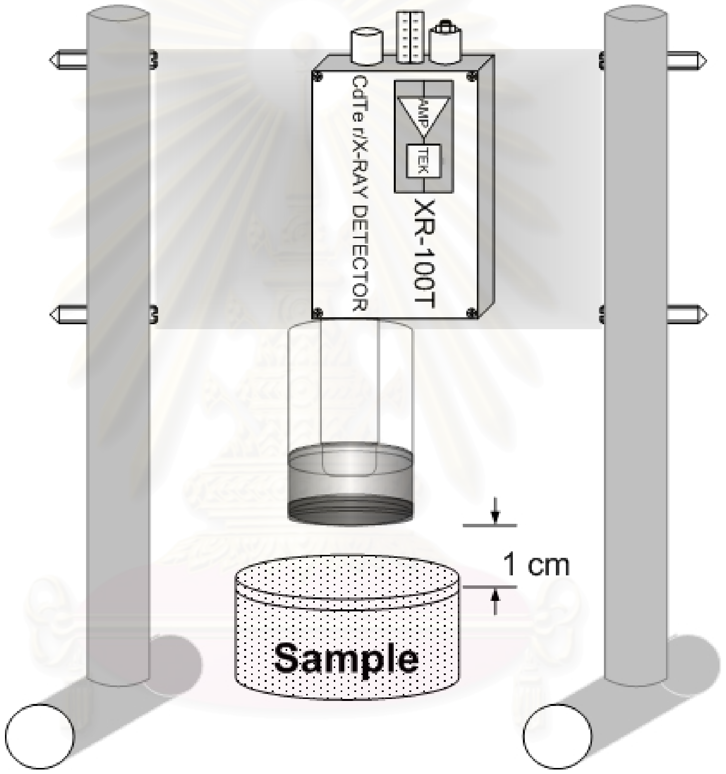
3.2.2.2 ศึกษาผลความชื้นของตัวอย่าง

ในการทดลองศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างดินที่ไม่มีปรอท บรรจุในกระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร และจัดวางระบบการวิเคราะห์ ดังแสดงใน รูปที่ 3.9 ระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง เท่ากับ 1 เซนติเมตร แล้วทำการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับของตัวอย่างที่มีความชื้นเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้ง ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที จากนั้นทำการเพิ่มความชื้น โดยเติมน้ำ แล้ว คำนวณหาเปอร์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง ตามสมการที่ 3.1 แล้วทำการวัด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 – 4.10

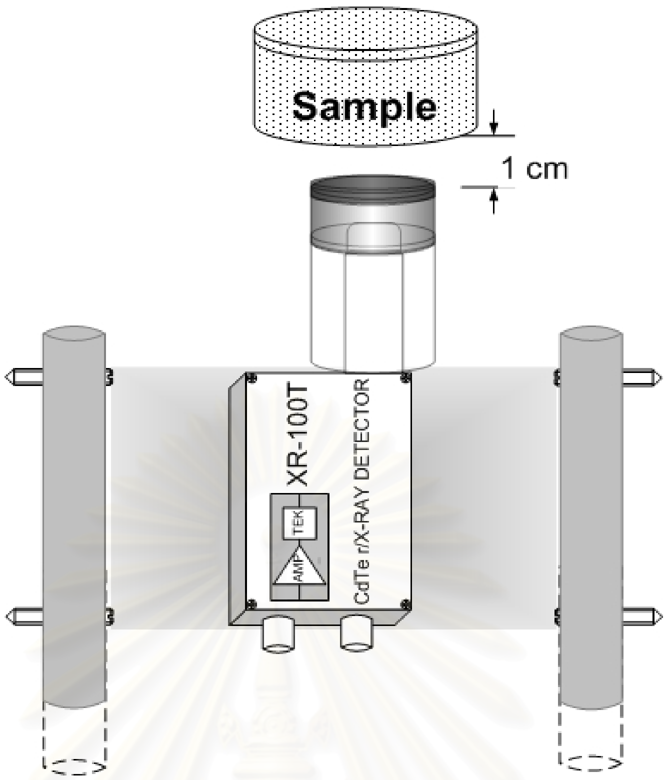
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น ต่อน้ำหนักแห้ง} = \frac{(\text{มวลดินเริ่มต้น} - \text{มวลดินแห้ง}) \times 100}{\text{มวลดินแห้ง}} \qquad (3.1)$$

3.2.2.3 ศึกษาผลความหนาแน่นของตัวอย่าง

ในการทดลองศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวอย่าง จัดระบบการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใส่ตัวอย่างดินเต็มกระปุก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตร 153.94 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งจะได้ความหนาแน่นปกติของดิน ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยเพิ่มปริมาณดินในภาชนะบรรจุขนาดเดิม ทำการอัดให้แน่น เพื่อความหนาของตัวอย่างสูง 4 เซนติเมตร เท่ากัน แล้วทำการวัด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 – 4.13



รูปที่ 3.9 การจัดระบบวัดโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างล่าง



รูปที่ 3.10 การจัดระบบวัดโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างบน

3.2.3 การทดสอบหลักการของเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิง

ก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจริงต้องทำการศึกษาหลักการของเทคนิค โดยจำลองตัวอย่างให้เหมือนกับตัวอย่างจริงมากที่สุด ซึ่งจากงานวิจัยอื่นๆ[6],[16] พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์ส่วนใหญ่ คล้ายกับดิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ใช้ตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหลักการของเทคนิค และใช้สารประกอบปรอท (Hg_2Cl_2) เป็นสารมาตรฐานที่ใช้เติมเพื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของปรอท

3.2.3.1 ทดสอบหลักการ โดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท

3.2.3.1.1 เตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัย โดยนำตัวอย่างดินเข้าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำการอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

3.2.3.1.2 จากนั้นนำดินที่ผ่านการอบไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้ว มาบดให้ละเอียด แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อน เพื่อให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด

3.2.3.1.3 นำดินที่ผ่านการอบ การบด และการร่อนแล้ว มาเตรียมเพื่อเป็นตัวอย่างดินที่มีปริมาณปรอทในดินต่างๆ กัน โดยเติมสารประกอบปรอท ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (Hg_2Cl_2) โดยเตรียมตัวอย่างที่ความเข้มข้นปรอท 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

3.2.3.1.4 บรรจุในกระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ซึ่งได้ค่าความหนาดินจากการทดลอง 3.2.2.1 และจัดระบบวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทำการวัดตัวอย่าง เป็นเวลานาน 300 วินาที จากนั้นนำค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงาน และค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบไม่สูญเสียพลังงานมา สร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระว่างความเข้มข้นของปรอทและค่าการนับพื้นที่ใต้พีค

3.2.3.2 ทดสอบหลักการโดยใช้ตัวอย่างสลัดจ์กับโลหะปรอท

3.2.3.2.1 นำตัวอย่างสลัดจ์ที่มีปรอทปนเปื้อนน้อยมาก คือ ตัวอย่างจากงานวิจัยของวิศิษฎ์ ปฐมชัยวาลย์[6] ซึ่งวัดโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา ไม่พบปริมาณปรอท มาทดสอบหลักการของเทคนิค บรรจุในกระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร และ ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของปรอท โดยใช้โลหะปรอท จัดระบบวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.9 ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที

3.2.3.2.2 จัดระบบวิเคราะห์ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที

3.2.3.2.3 นำค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน และค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบไม่สูญเสียพลังงาน จากการวัดระบบวิเคราะห์ ทั้งสองแบบมาหาค่าเฉลี่ย สร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทและค่าการนับพื้นที่ใต้พีค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 การทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ที่ได้จากการผลิตปิโตรเลียม

จากการศึกษาผลการวิจัยข้างต้น พบว่าปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่างมีผลต่อความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับมาก ไม่ว่าจะเป็นความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง ปริมาณน้ำหรือความชื้นในตัวอย่าง ไปจนกระทั่ง ความหนาแน่นของตัวอย่าง ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้การกระเจิงของรังสีแกมมาแตกต่างกัน แม้ว่าตัวอย่างจะมีองค์ประกอบเมื่อกันทุกประการ ประกอบกับตัวอย่างในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะผลผลิตจากการผลิตปิโตรเลียม เช่น สลัดจ์ ซึ่งนอกจากจะมีปัจจัยทางกายภาพต่างที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างแล้ว ยังมีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่เหมือนกันอีกด้วย

ดังนั้นในการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ จึงใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique) โดยสารมาตรฐานที่ใช้คือ โลหะปรอท เนื่องจาก ปรอทที่พบในตัวอย่างสลัดจ์ส่วนใหญ่ จะอยู่ในรูป ของโลหะปรอท โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

3.2.4.1.1 นำตัวอย่างสลัดจ์ บรรจุในกระปุกพลาสติกบรรจุตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร จัดระบบวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.9 ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที

3.2.4.1.2 จัดระบบวิเคราะห์ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำการวัดเป็นเวลา 300 วินาที

3.2.4.1.3 ทำการเติมสารมาตรฐาน คือ โลหะปรอท และทำการวัด โดยจัดระบบดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

3.2.4.1.4 ทำการคำนวณ และเปรียบเทียบการคำนวณกับวิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน ที่ได้จากการทดสอบหลักการโดยใช้ตัวอย่างสลัดจ์กับปรอท ซึ่งผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.8 – 4.10

3.2.5 การนิยามตัวแปร

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณปรอท เพื่อความสะดวก จึงนิยามตัวแปร ดังต่อไปนี้

I_{inc} คือ ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน

I_{coh} คือ ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน

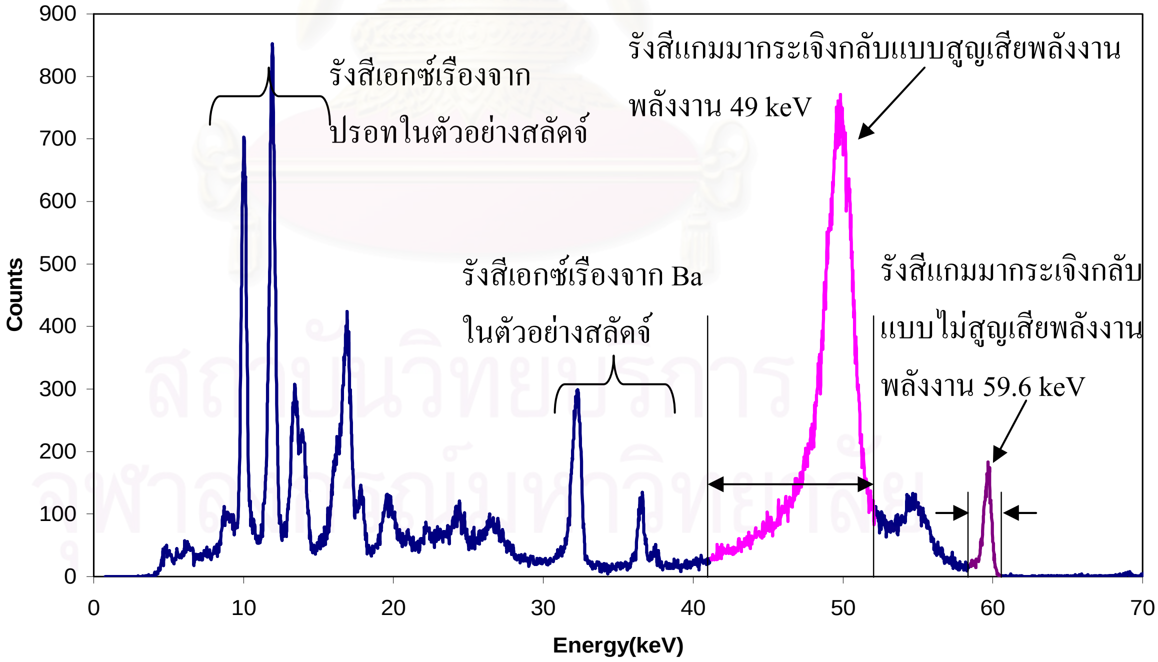
$R_{coh/inc}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน ต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 การออกแบบและการจัดวางระบบวิเคราะห์

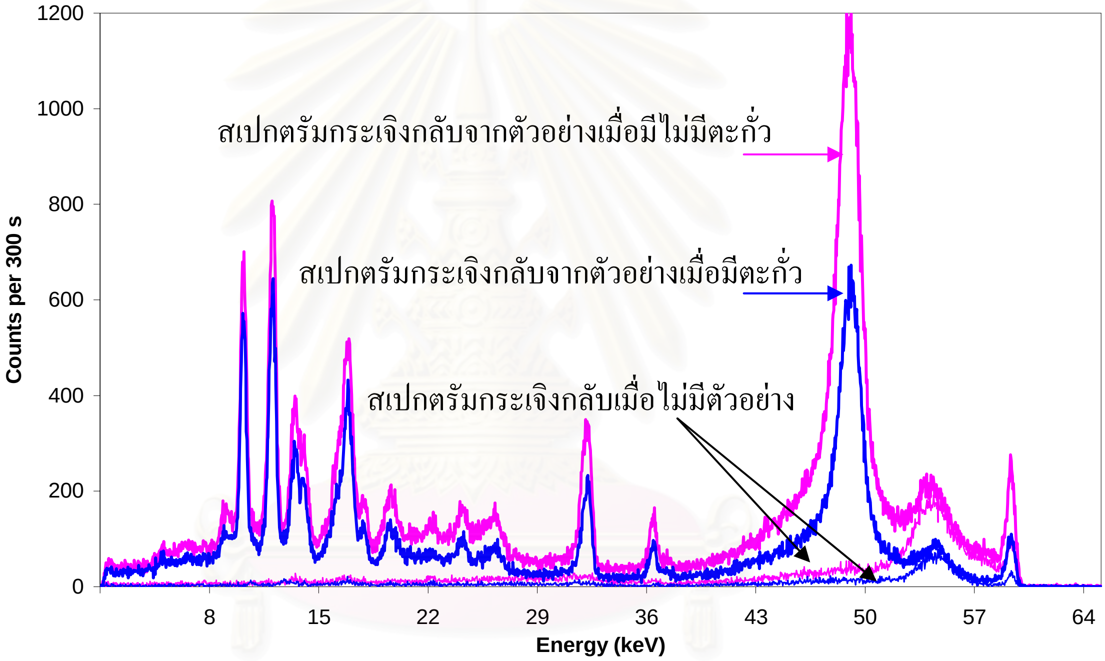
สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับ ดังรูปที่ 4.1 วัดได้จากตัวอย่างสลัดจ์ โดยจัดวางระบบการวัดแบบ Coaxial คือ ต้นกำเนิดรังสี และ หัววัดรังสีอยู่แนวแกนเดียวกัน ซึ่งใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลูไรด์(CdTe) ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 แบบวงแหวน ความแรงรังสี 30 มิลลิคูรี ซึ่งปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV จากสเปกตรัมจะเห็นว่า รังสีแกมมากระเจิงกลับส่วนใหญ่ มีพลังงาน 49 keV คิดเป็นมุมกระเจิง เท่ากับ 149 องศา ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ โดยใช้ ช่วงพลังงานของรังสีแกมมาที่สนใจ 2 ช่วงพลังงาน คือ รังสีแกมมาที่กระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน ช่วงพลังงานที่เลือก คือ พลังงานที่ 41 keV ถึง พลังงานที่ 52 keV และรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน ช่วงพลังงานที่เลือก คือ พลังงานที่ 58.5 keV ถึงพลังงานที่ 60.5 keV ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และใช้ค่าการนับแบบอินทิกรัล มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่างๆ



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับ จากตัวอย่างสลัดจ์

4.1.1 ผลการศึกษาการวางวัสดุกำบังตะกั่ว

จากรูปที่ 4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน เมื่อมีแผ่นตะกั่วกำบัง และไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง เ ปรียบเทียบกับ สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับโดยไม่มีตัวอย่างดิน จะเห็นว่า เมื่อวางแผ่นตะกั่วกำบัง ทำให้ค่า I_{inc} และ I_{coh} ลดลง และ เมื่อพิจารณาค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบอินทิกรัล ของทั้งสองพีค ดังตารางที่ 4.1 และ หาอัตราส่วนระหว่าง ค่าการนับแบบอินทิกรัลเมื่อทำการวัดโดยมีตัวอย่าง ต่อ ค่าการนับแบบอินทิกรัลเมื่อทำการวัดโดยไม่มีตัวอย่าง พบว่าค่าอัตราส่วน เมื่อมีการใช้แผ่นตะกั่วกำบัง มีค่าสูงว่าเมื่อไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือก ใช้แผ่นตะกั่วกำบัง



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน เมื่อมีแผ่นตะกั่วกำบัง และไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง เปรียบเทียบกับ สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับโดยไม่มีตัวอย่าง

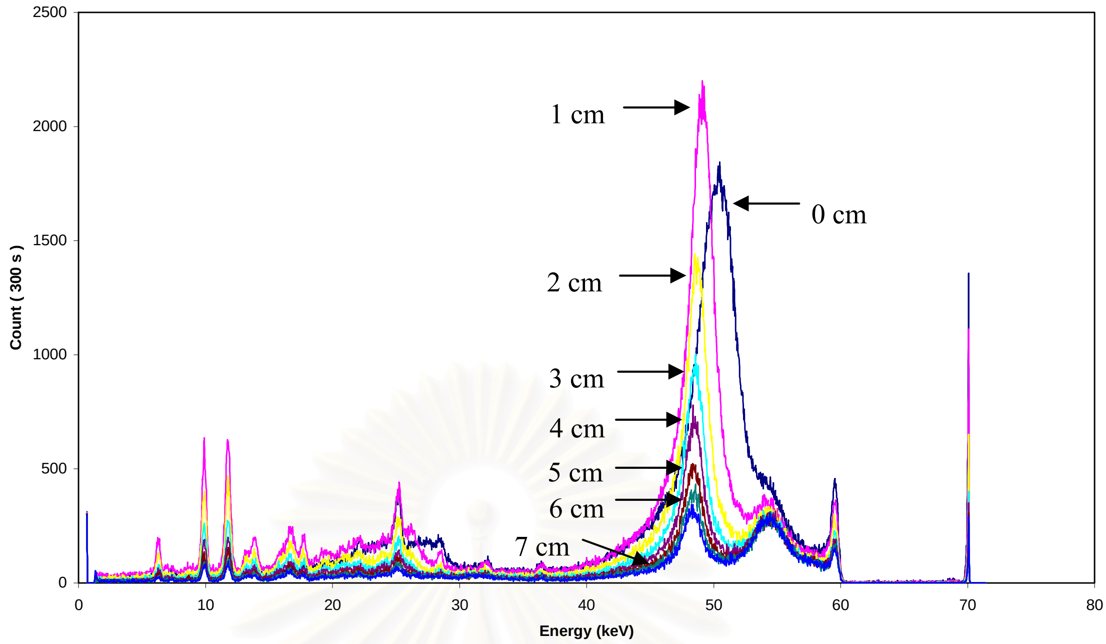
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน, ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน ที่การกระเจิงกรณีต่างๆ

การกระเจิงกรณีต่าง ๆ		I_{inc}	I_{coh}
ไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง	ไม่มีตัวอย่างดิน (1)	8546 ± 277	2572 ± 152
	มีตัวอย่างดิน (2)	99502 ± 946	6034 ± 233
มีแผ่นตะกั่วกำบัง	ไม่มีตัวอย่างดิน (1)	3090 ± 167	557 ± 71
	มีตัวอย่างดิน (2)	51383 ± 680	2306 ± 144
ค่าอัตราส่วน (2) / (1) เมื่อไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง		11.643 ± 1.290	2.346 ± 0.221
ค่าอัตราส่วน (2) / (1) ไม่มีแผ่นตะกั่วกำบัง		16.629 ± 3.660	4.140 ± 1.078

4.1.2 ศึกษาผลระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับระบบวิเคราะห์

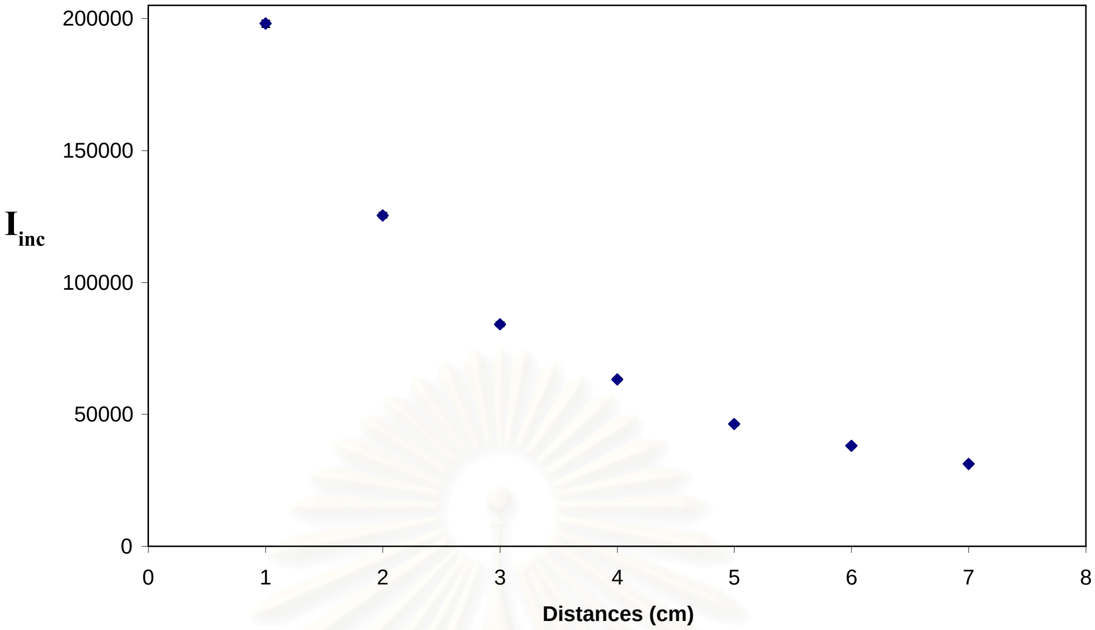
จากรูปที่ 4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน ที่ระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่างต่างๆ จะเห็นว่า สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน ที่ระยะห่าง 0 เซนติเมตร มีมุมการกระเจิง ส่วนใหญ่ แตกต่างกับที่ระยะอื่นๆ ซึ่งมุมการกระเจิงต่ำกว่า และ เมื่อเลื่อนตัวอย่างออกห่างจากระบบวัด ปรากฏว่า I_{inc} ที่ พลังงาน 49 keV ที่ได้มีค่าลดลง และลดลงมากขึ้น เมื่อระยะห่างจากระบบวิเคราะห์มีค่ามากขึ้น ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีค กับระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 4.2 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคกับระยะห่างได้ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ แบบเอกซ์โปแนนเชียล ดังนั้น ระยะที่ใช้ในการวางตัวอย่างกับระบบวิเคราะห์ คือ 1 เซนติเมตร เพื่อให้ความเข้มรังสีแกมมากระเจิงกลับมีค่ามากที่สุด และมุมการกระเจิงส่วนใหญ่ คงที่



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับจากตัวอย่างดิน ที่ระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่างต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงานกับระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง

ระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง (เซนติเมตร)	I_{inc}
0	175933 ± 1258
1	198065 ± 1335
2	125447 ± 1063
3	84183 ± 870
4	63245 ± 754
5	46315 ± 646
6	38087 ± 585
7	31230 ± 530



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง

4.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

4.2.1 ผลการศึกษาความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง

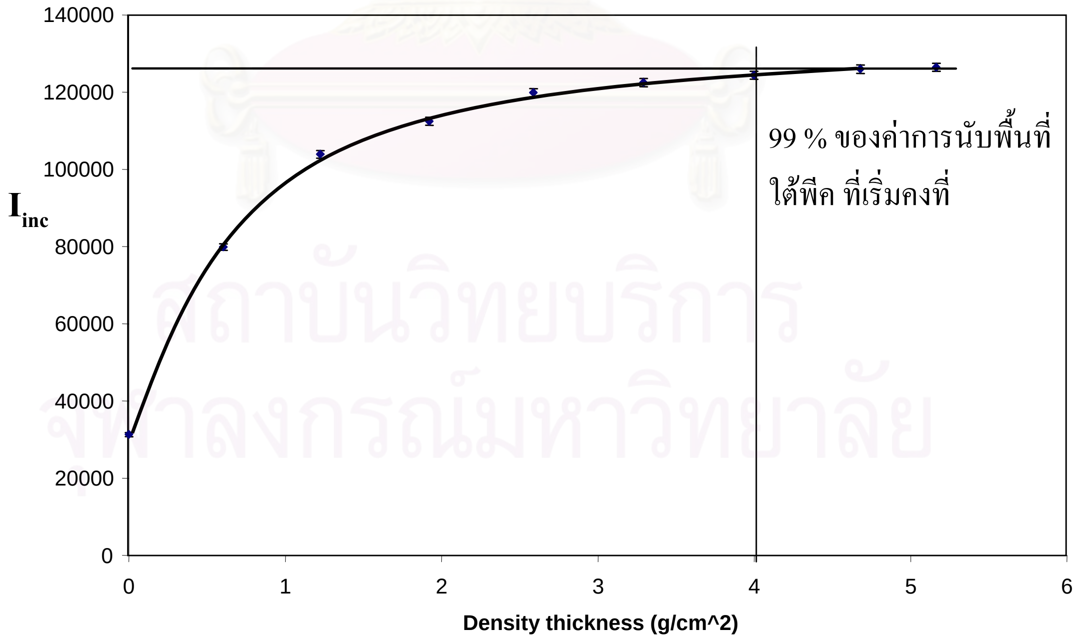
ผลการศึกษาความหนาเชิงมวลของตัวอย่างโดยใช้ ตัวอย่างดินที่ไม่มีปรอท ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแสดงในตารางที่ 4.3 และสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคกับความหนาเชิงมวลได้ ดังรูปที่ 4.5 – 4.7

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่า I_{inc} และ I_{coh} แปรผันตรงกับความหนาเชิงมวล โดยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาเชิงมวลของตัวอย่างมากขึ้น และเริ่มคงที่ ณ ความหนาเชิงมวลค่าหนึ่ง เรียกว่า ความหนาเชิงมวลอิ่มตัว ซึ่งมีความเข้มรังสีแกมมากระเจิงมากที่สุด จากรูปที่ 4.5 สามารถคำนวณหา ความหนาเชิงมวลที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองได้ โดยใช้ที่ความหนาที่มีทำให้ได้ค่าการนับพื้นที่ใต้พีคเป็น 99% ของค่าการนับพื้นที่ใต้พีคมากที่สุด นั่นคือที่ความหนาเชิงมวล เท่ากับ 4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

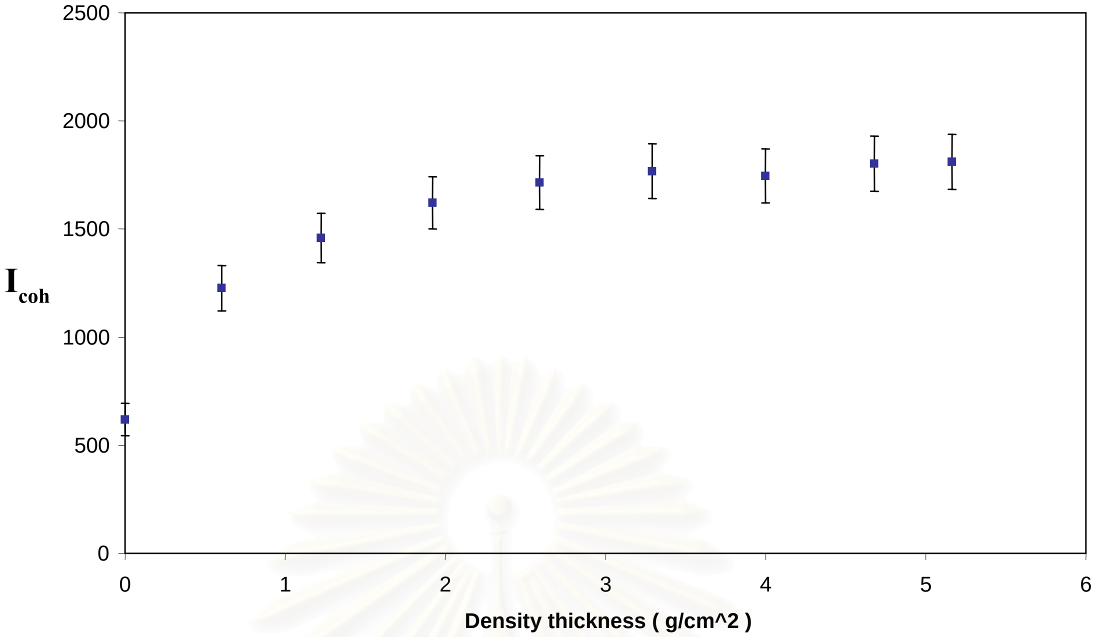
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า $R_{coh/inc}$ มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง เนื่องจาก ค่าเลขอะตอมประสิทธิผลมีค่าคงที่ ในวัสดุชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง

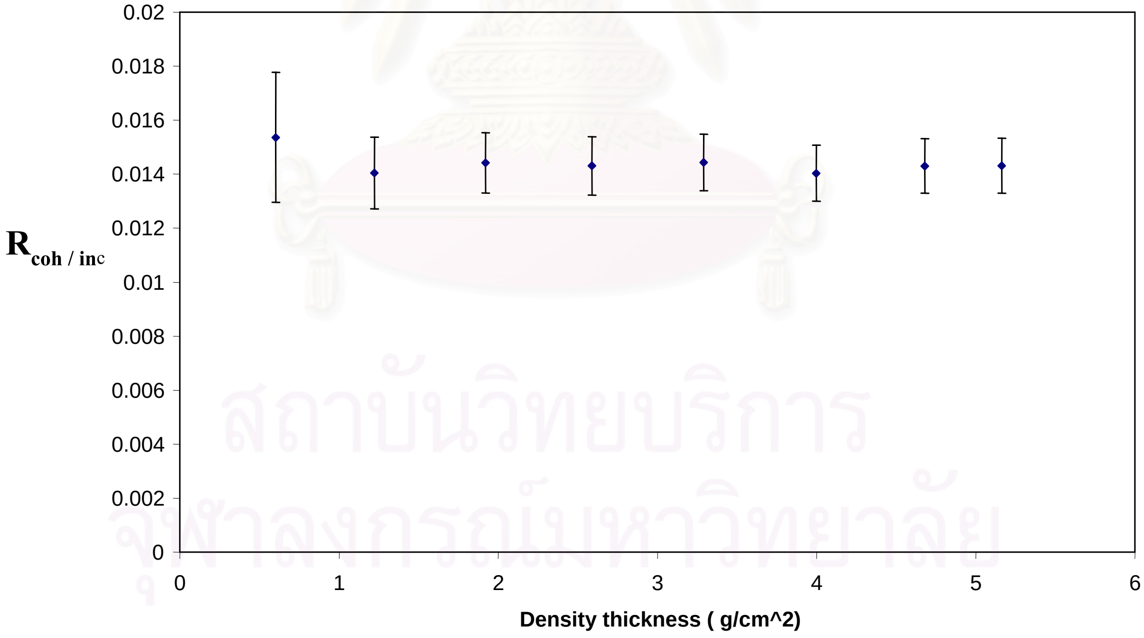
ความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
0	31329 ± 531	619 ± 75	0.01976 ± 0.00241
0.603	79863 ± 848	1227 ± 105	0.01536 ± 0.00133
1.223	103899 ± 967	1459 ± 115	0.01404 ± 0.00111
1.920	112491 ± 1006	1622 ± 121	0.01442 ± 0.00108
2.588	119862 ± 1039	1715 ± 124	0.01431 ± 0.00104
3.292	122499 ± 1050	1768 ± 126	0.01443 ± 0.00104
3.999	124417 ± 1058	1746 ± 125	0.01403 ± 0.00102
4.679	125974 ± 1065	1802 ± 127	0.01430 ± 0.00102
5.163	126485 ± 1067	1811 ± 128	0.01432 ± 0.00102



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน กับความหนาเชิงมวลของตัวอย่างดิน

4.2.2 ผลการศึกษาความชื้นของตัวอย่าง

ผลการศึกษาความชื้นของตัวอย่างโดยใช้ ตัวอย่างดินที่ไม่มีปรอท ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแสดงในตารางที่ 4.4 และสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งได้ ดังรูปที่ 4.8 – 4.10

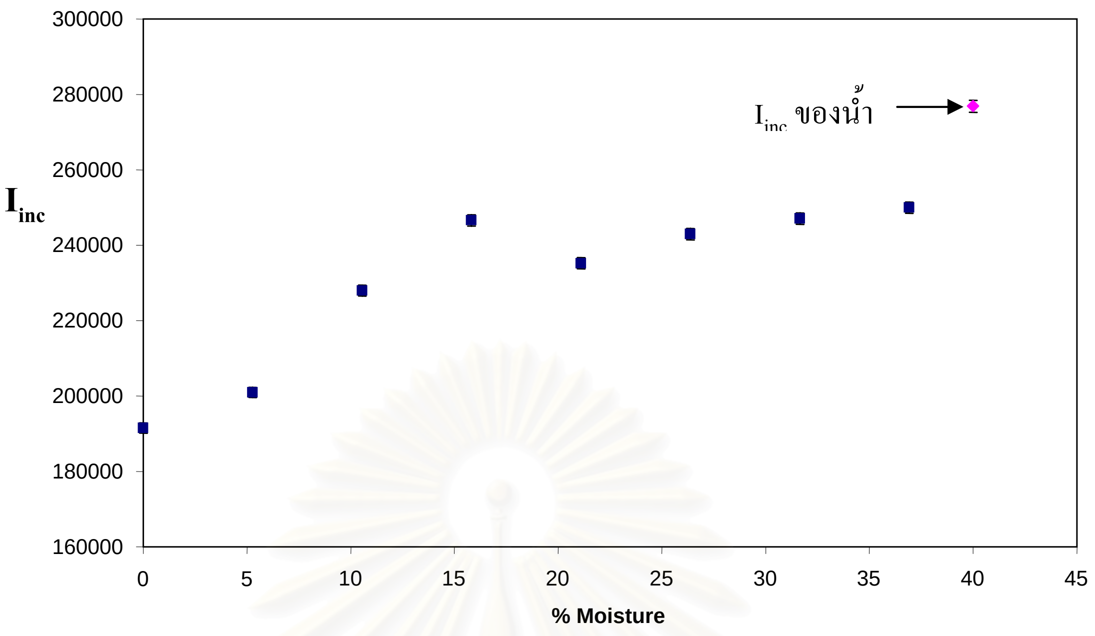
จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่า I_{inc} และ I_{coh} แปรผันตรงกับความชื้นของตัวอย่าง โดยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของตัวอย่างมากขึ้น และเริ่มคงที่ ณ ความชื้นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า $R_{coh/inc}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากขึ้น

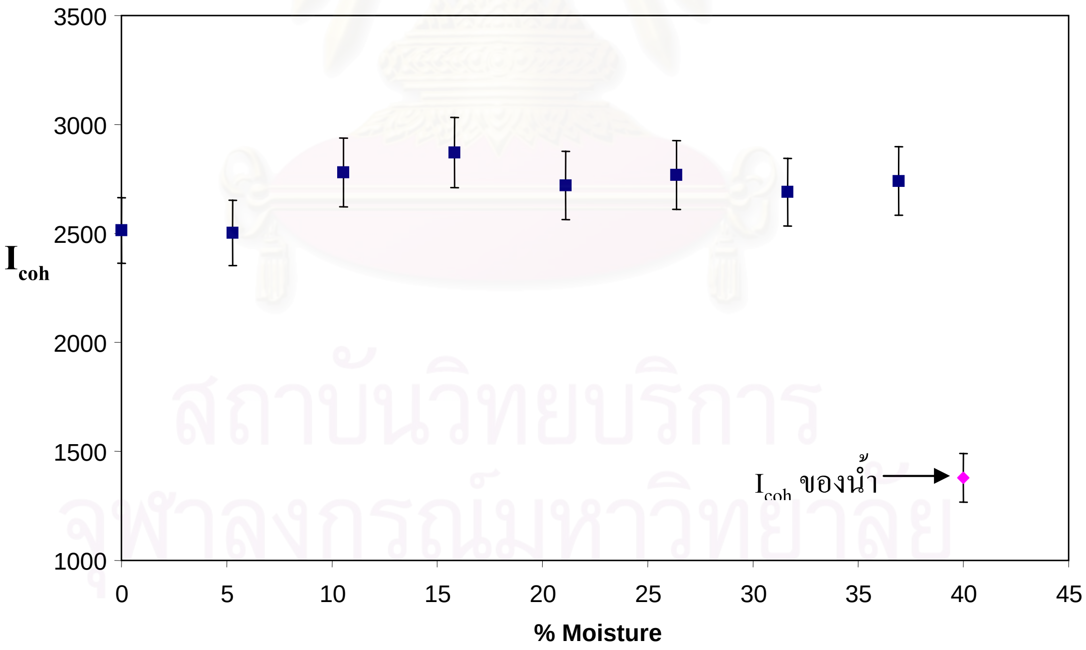
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง

เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง (%)	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
0.000	191550 ± 1313	2514 ± 150	0.01312 ± 0.00079
5.274	200933 ± 1345	2503 ± 150	0.01246 ± 0.00075
10.549	227991 ± 1433	2780 ± 158	0.01219 ± 0.00070
15.823	246592 ± 1490	2872 ± 161	0.01165 ± 0.00066
21.097	235237 ± 1455	2720 ± 156	0.01156 ± 0.00067
26.371	242962 ± 1479	2768 ± 159	0.01139 ± 0.00065
31.646	247110 ± 1491	2690 ± 156	0.01089 ± 0.00063
36.920	249976 ± 1500	2741 ± 157	0.01097 ± 0.00063
น้ำ	276911 ± 1579	1379 ± 111	0.00498 ± 0.00040

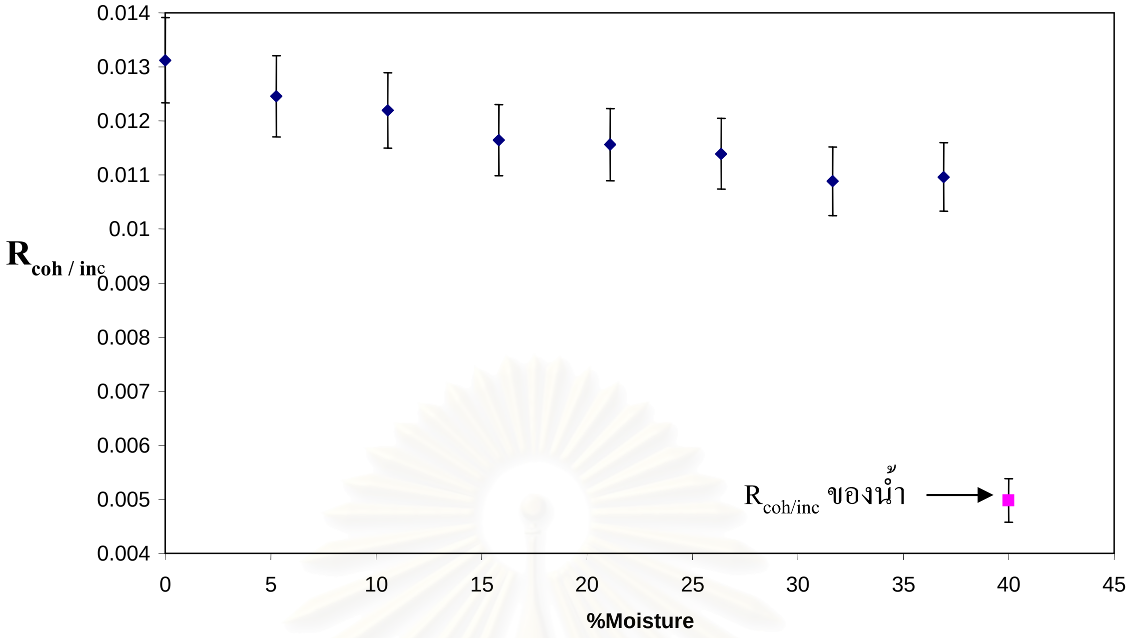
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง

4.2.3 ผลการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่าง

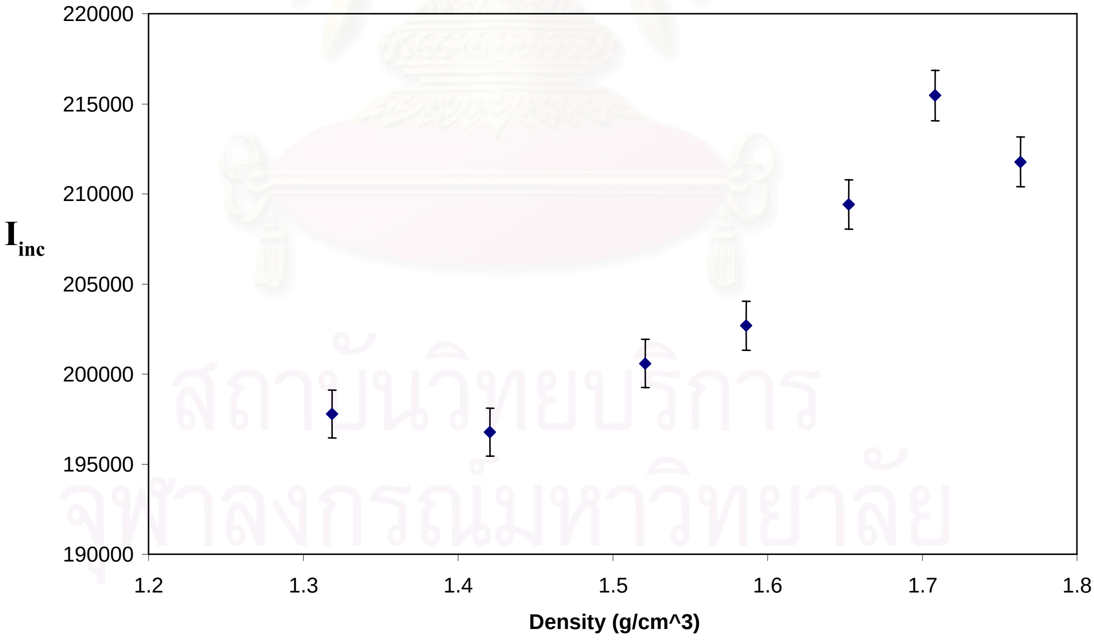
ผลการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่างโดยใช้ ตัวอย่างดินที่ไม่มีปรอท ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแสดงในตารางที่ 4.5 และสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคกับความหนาแน่นของตัวอย่างได้ ดังรูปที่ 4.11 – 4.13

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่า I_{inc} และ I_{coh} แปรผันตรงกับความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความหนาแน่นของตัวอย่างของตัวอย่างมากขึ้น

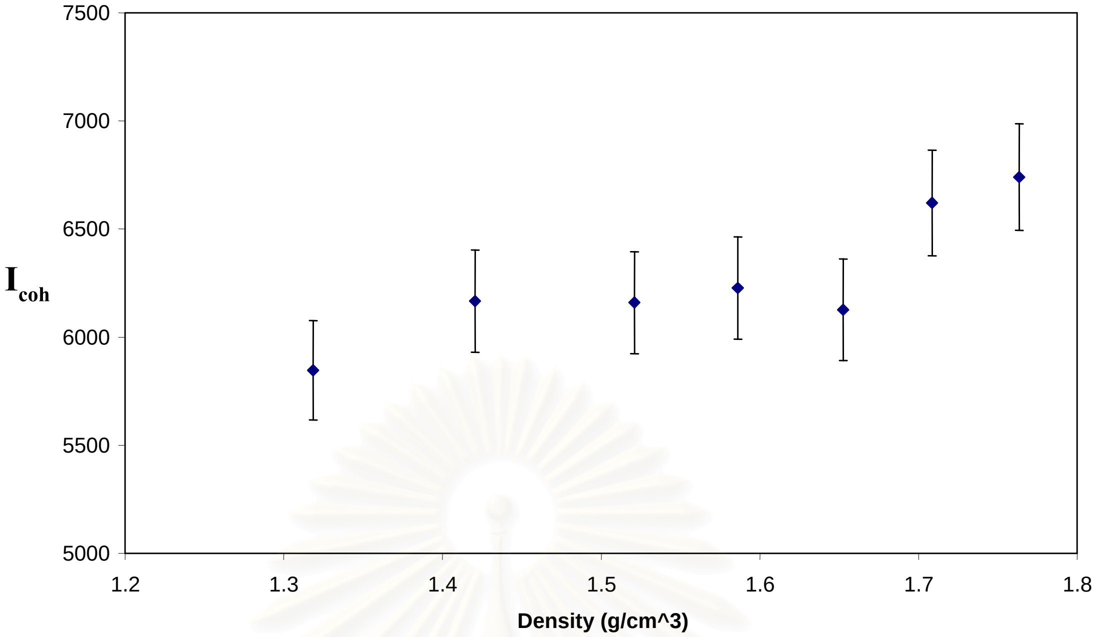
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า $R_{coh/inc}$ แนวโน้มลดลง เนื่องปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ให้ ค่าเลขอะตอมประสิทธิผลมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับความหนาแน่นตัวอย่าง

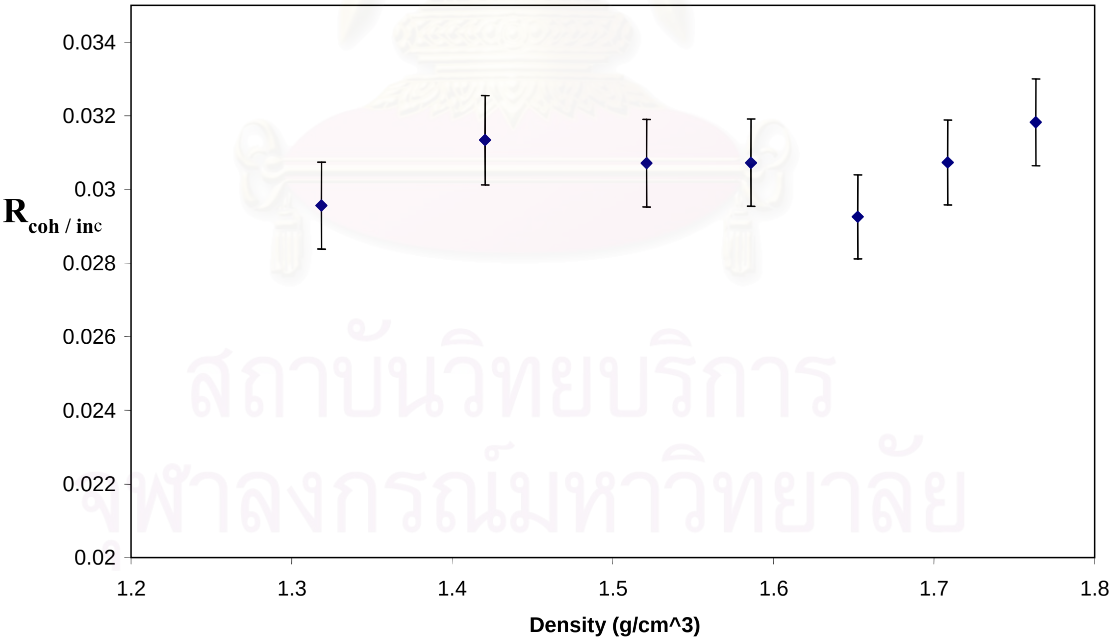
น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
202.98	1.319	197790 ± 1334	5847 ± 229	0.02956 ± 0.00118
218.68	1.421	196782 ± 1331	6167 ± 236	0.03134 ± 0.00122
234.15	1.521	200592 ± 1344	6160 ± 235	0.03071 ± 0.00119
244.17	1.586	202687 ± 1351	6227 ± 237	0.03072 ± 0.00119
254.38	1.652	209420 ± 1373	6127 ± 235	0.02926 ± 0.00114
263.00	1.708	215464 ± 1393	6621 ± 244	0.03073 ± 0.00115
271.45	1.763	211774 ± 1381	6740 ± 246	0.03183 ± 0.00118



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นของตัวอย่าง



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นของตัวอย่าง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับความหนาแน่นตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

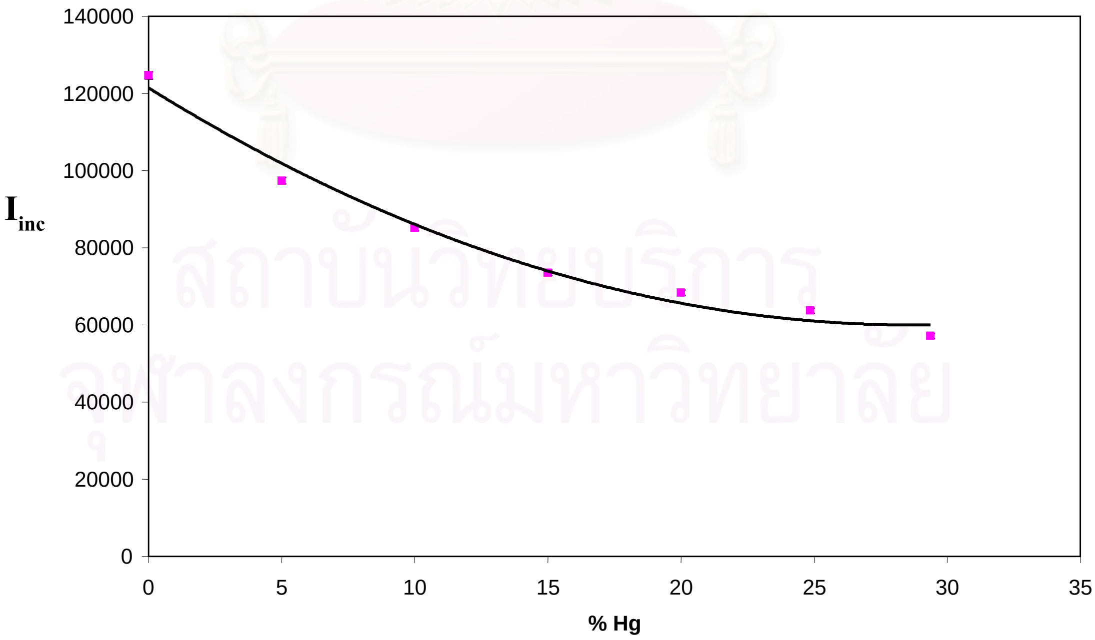
4.3 การทดสอบหลักการของเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิง

4.3.1 ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท

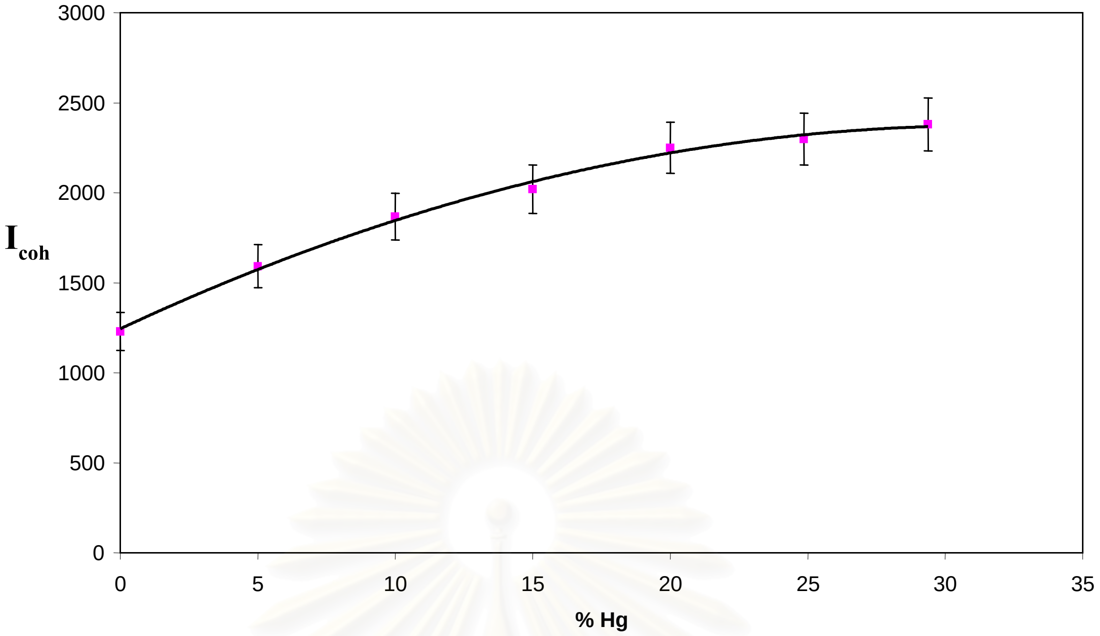
ผลการทดสอบหลักการของเทคนิค ซึ่งใช้ตัวอย่างดินที่ไม่ปรอทกับสารประกอบปรอท ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงแสดงในตารางที่ 4.6 และสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับกับปริมาณปรอท(%) ดังรูปที่ 4.14 – 4.16

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับปริมาณปรอท (%)

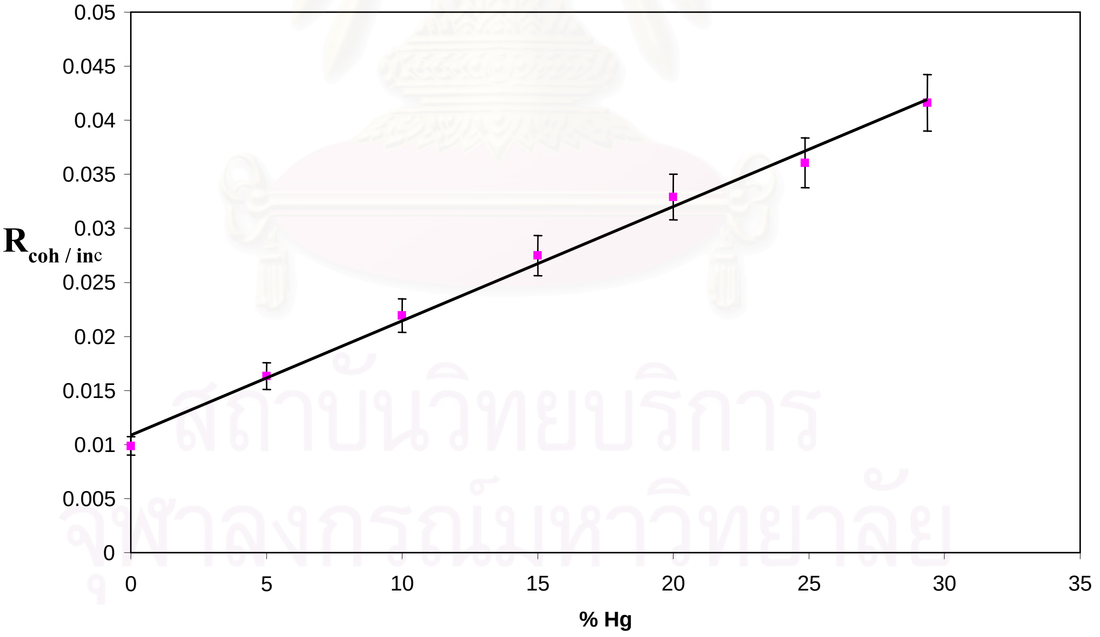
ปริมาณปรอท (%)	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
0	124665 ± 1059	1230 ± 105	0.00987 ± 0.00085
5	97406 ± 936	1592 ± 120	0.01634 ± 0.00124
10	85136 ± 875	186 8 ± 130	0.02194 ± 0.00154
15	73536 ± 814	2021 ± 135	0.02748 ± 0.00186
20	68402 ± 785	2250 ± 142	0.03289 ± 0.00211
24.86	63735 ± 757	2298 ± 143	0.03606 ± 0.00230
29.37	57173 ± 717	2380 ± 146	0.04163 ± 0.00261



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)



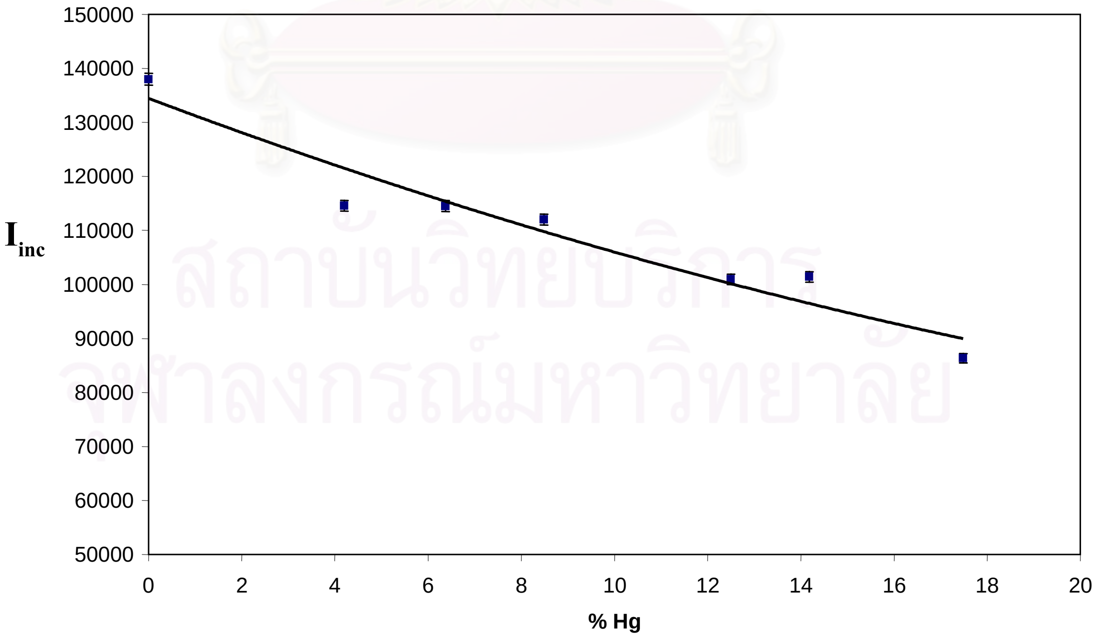
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท

4.3.2 ทดสอบหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างสลัดจ์กับโลหะปรอท

ผลการทดสอบหลักการของเทคนิค ซึ่งใช้ตัวอย่างสลัดจ์โลหะปรอท ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกับปริมาณปรอท (%) แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีคนี้เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคที่ได้จากการจัดวางระบบโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างบน และการจัดวางระบบโดยให้ตัวอย่างอยู่ข้างล่าง และสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับกับปริมาณปรอท(%) ดังรูปที่ 4.17– 4.19

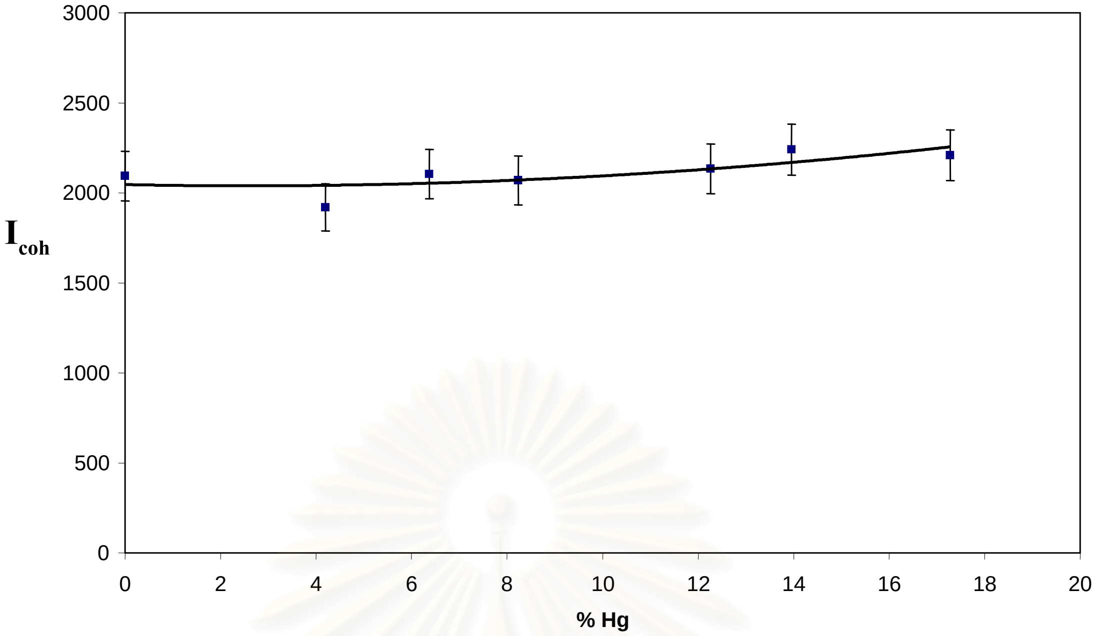
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ กับปริมาณปรอท(%)

ปริมาณปรอท (%)	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
0	138012 ± 1114	2094 ± 137	0.01517 ±0.00100
4.20	114577 ± 1015	1920 ± 131	0.01675 ±0.00116
6.37	114551 ± 1015	2105 ± 137	0.01837 ±0.00121
8.48	112022 ± 1004	2070 ± 136	0.01847 ±0.00123
12.49	100943 ± 953	2134 ± 138	0.02114 ±0.00139
14.18	101421 ± 955	2241 ± 142	0.02209 ±0.00142
17.48	86335 ± 881	2210 ± 141	0.02559 ±0.00165

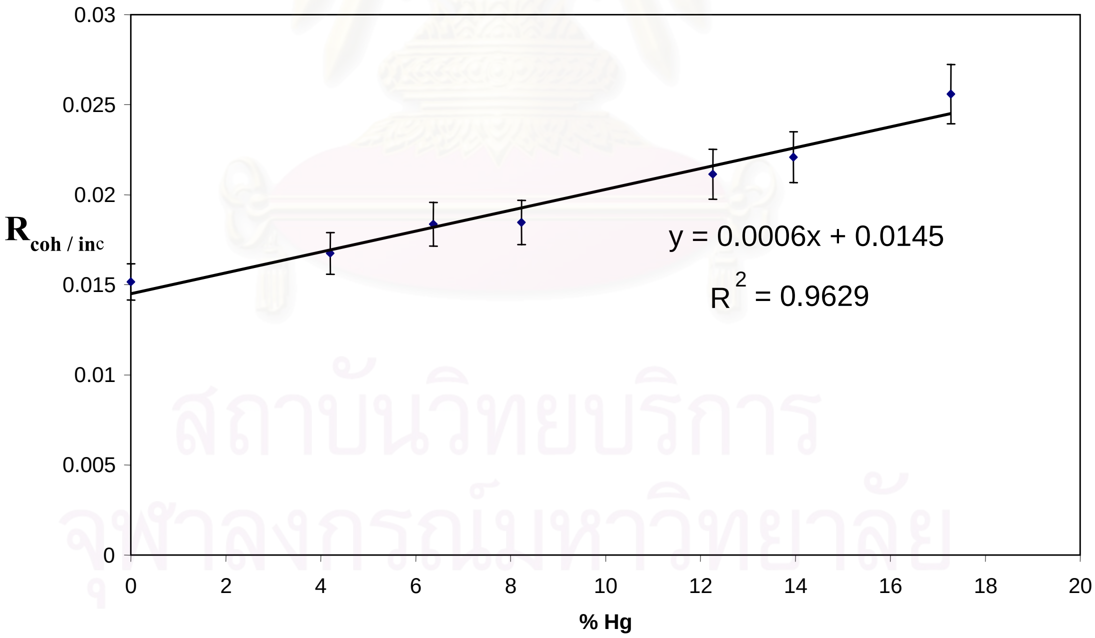


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีคการกระเจิงรังสีแกมมาแบบไม่สูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท (%)

จากกราฟรูปที่ 4.19 พบว่า $R_{coh/inc}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปรอท (%) โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงใช้ กราฟนี้เป็นกราฟปรับเทียบ โดยมีสมการของกราฟปรับเทียบคือ

$$y = 6x10^{-4} x + 0.0145 \quad (4.1)$$

โดยที่ y : ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน($R_{coh/inc}$)

x : ปริมาณปรอทในตัวอย่าง

และ ค่า R^2 สำหรับสมการนี้คือ 0.9629

4.4 การทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ที่ได้จากการผลิตปิโตรเลียม

การหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ที่ได้จากผลิตปิโตรเลียม ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิธีการเติมสารมาตรฐาน ซึ่งวิธีนี้ต้องทราบค่าปริมาณตัวอย่างที่ใช้ และ ปริมาณปรอทที่เติมลงไป เพื่อนำค่าไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณตามสมการที่ 2.36 ซึ่งค่าต่างๆ และค่า factor ที่ได้จากการคำนวณ แสดงในตารางที่ 4.8 ผละ ผลการวัดรังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างสลัดจ์ แสดงดังตารางที่ 4.9

ในการคำนวณจะใช้ ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV จากปรอท, ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 11.823 keV จากปรอท และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน($R_{coh/inc}$) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้

นอกจากนี้ ยังใช้วิธีการสร้างกราฟปรับเทียบในการคำนวณหาปริมาณปรอท ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4.1 ผลการคำนวณหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์แสดงดังตารางที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ปริมาณตัวอย่างสลัดจ์, ปริมาณสารมาตรฐานโลหะปรอทที่เติม และค่าที่คำนวณได้

ตัวอย่าง	ปริมาณตัวอย่าง สลัดจ์ (กรัม)	ปริมาณโลหะปรอทที่เติม (กรัม)	Dilution factor (D)	$C_{\Delta x}$ (%)
A	164.929	6.463	0.96229	3.770
B	144.533	6.016	0.96004	3.996
C	173.771	7.482	0.95872	4.128

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง A

$$D = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง} + \text{น้ำหนักสารมาตรฐานที่เติม}}$$

$$= \frac{164.929}{164.929 + 6.463} = 0.96229$$

$$C_{\Delta x} = \frac{\text{น้ำหนักของธาตุที่เติมลงไป}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง} + \text{น้ำหนักสารมาตรฐานที่เติม}}$$

$$= \frac{6.463}{164.929 + 6.463} = 3.770$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับ ของตัวอย่างสลัดจ์

ตัวอย่าง		ค่าการนับพื้นที่ใต้พีค รังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV จากปรอท	ค่าการนับพื้นที่ใต้พีค รังสีเอกซ์พลังงาน 11.823 keV จากปรอท	I_{inc}	I_{coh}	$R_{coh/inc}$
A	ก่อนเติมโลหะปรอท	5892	8365	49522	2190	0.04422
	หลังเติมโลหะปรอท	5510	8178	47173	2175	0.04611
B	ก่อนเติมโลหะปรอท	0	0	117267	1639	0.01398
	หลังเติมโลหะปรอท	0	207.5	99697	1714	0.01719
C	ก่อนเติมโลหะปรอท	5876	8501	50902	2273	0.04465
	หลังเติมโลหะปรอท	6371	8969	47090	2192	0.04655

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ปริมาณปรอท (%) ในตัวอย่างสลัดจ์ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆ

ตัวอย่าง	เทคนิคการสร้างกราฟมาตรฐาน	เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน โดยใช้ค่าจาก		
		พื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV	พื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 10.873 keV	$R_{coh/inc}$
A	49.53	ไม่พบ	245.5448	37.28
B	ไม่พบ	0	0	ไม่พบ
C	50.25	32.86	42.85	39.65

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง A

เทคนิคการสร้างกราฟมาตรฐาน

ค่า $R_{coh/inc}$ ก่อนเติมโลหะปรอท = 0.04422 แทนค่า y ในสมการที่ 4.1 เพื่อหาค่า x

$$0.04422 = 6x10^{-4}\ x + 0.0145$$

$$x = 49.53$$ (ปริมาณปรอท(%))

เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน

- พื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV

ค่าพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV ก่อนเติมโลหะปรอท คือ I_x

ค่าพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV ก่อนเติมโลหะปรอท คือ $I_{x+\Delta x}$

แทนค่าในสมการ $C_x = \dfrac{C_{\Delta x}}{\dfrac{I_{x+\Delta x}}{I_x} - D}$ โดยใช้ค่า $C_{\Delta x}$ และ D จากตารางที่ 4.8

คำนวณหาค่า C_x ดังนี้

$$C_x = \frac{3.77}{\frac{5510}{5892} - 0.96229}$$

$$C_x = -139.401$$

เนื่องจากเป็นค่าติดลบจึงถือว่าไม่พบปริมาณปรอท

- พื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 10.873 keV

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณโดยใช้พื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 10.873 keV ดังแสดง

$$C_x = \frac{3.77}{\frac{8178}{8365} - 0.96229}$$

$$C_x = 245.5448$$

- ค่า $R_{coh/inc}$

เนื่องจากสูตร การคำนวณ C_x ได้จากความสัมพันธ์ที่สมการตัดกราฟที่จุด 0,0 ดังนั้นก่อนนำค่า $R_{coh/inc}$ มาคำนวณค่าที่การเลื่อนแกนโดย นำ ค่า 0.0145 ไปลบออก ซึ่ง ค่านี้ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{coh/inc}$ กับปริมาณปรอท ดังรูปที่ 4.19 และแทนค่าในสมการหา C_x

$$C_x = \frac{3.77}{\frac{(0.04611 - 0.0145)}{(0.04422 - 0.0145)} - 0.96229}$$

$$C_x = 37.28$$

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 เนื่องจากในงานวิจัยใช้ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา ซึ่งเป็นระบบวิเคราะห์เดียวกับระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เป็นการจัดระบบวิเคราะห์ แบบ Coaxial geometry โดยจัดให้ส่วนของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ตัวอย่าง และหัววัดที่ใช้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ คือ Am-241 แบบวงแหวน วางอยู่บนวัสดุทองแดงกำบังรังสี แต่เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีที่ใช้มีความแรงรังสี 30 มิลลิคูรี ทำให้รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีอาจเล็ดลอดเข้าสู่หัววัด ประกอบกับในงานวิจัยนี้ใช้ รังสีแกมมาพลังงาน 59.6 keV ในการวิเคราะห์ด้วย ดังนั้นจึงต้องลดแบคกราวด์ ที่เกิดจากต้นกำเนิดรังสี โดยทำการวางวัสดุกำบังรังสี ซึ่งเป็นแผ่นตะกั่ว ระหว่างต้นกำเนิดรังสี กับวัสดุทองแดงกำบังรังสี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าเมื่อใช้วัสดุตะกั่วกำบังรังสี ค่าการนับพื้นที่ใต้พีคของแบคกราวด์ลดลงก็จริง แต่ก็ทำให้ค่าการนับพื้นที่ใต้พีคที่รังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างลดลงไปด้วย ดังนั้นในการพิจารณาว่า การวางวัสดุตะกั่วกำบังรังสีนั่น ได้ผลดีหรือไม่ จึงพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมาจากแบคกราวด์ (เมื่อไม่มีตัวอย่าง) ซึ่งจะพิจารณาทั้งพีครังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน และพีครังสีแกมมากระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงาน และพบว่า ค่าอัตราส่วนเมื่อมีการใช้วัสดุตะกั่วกำบังรังสี มีค่าสูงกว่า จึงเพิ่มวัสดุตะกั่วกำบังรังสี เข้าไปกับระบบเดิม (ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง)

นอกจากนี้ในการออกแบบ ระบบวิเคราะห์รังสีแกมมา งานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่าง ซึ่งค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน มีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างระบบวิเคราะห์กับตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยมีมุมการกระเจิงส่วนใหญ่ เท่ากันคือที่ มุม 140 องศา ยกเว้น ที่ระยะห่าง 0 เซนติเมตร มีมุมการกระเจิงส่วนใหญ่ แตกต่างกับที่ระยะอื่นๆ เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของการวาง ซึ่งอาจทำให้มุมการกระเจิงเปลี่ยนแปลง จึงไม่วางตัวอย่างติดกับระบบวิเคราะห์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ ระยะห่างที่ 1 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสียพลังงานมากที่สุด

5.1.2 ในการศึกษาปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่าง งานวิจัยได้ศึกษา ผลของความหนาเชิงมวลของตัวอย่าง , ผลของความชื้น และ ผลของความหนาแน่น พบว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลทำให้ความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับแตกต่างกัน โดย ความเข้มรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงาน และแบบไม่สูญเสียพลังงาน แปรผันตรงกับ ความหนาเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากความหนาที่ไม่เท่ากันของตัวอย่าง จึงต้องทำการวิเคราะห์ที่ความหนาเชิงมวลอิ่มตัว ซึ่งทำให้ความเข้มรังสีแกมมากระเจิงอิ่มตัว หรือมีค่ามากที่สุด จากการศึกษา จะได้ความหนาเชิงมวลอิ่มตัวของตัวอย่างดิน ประมาณ 4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และในการศึกษานี้ ได้ใช้ตัวอย่างดินที่ไม่ผสมปรอทในการหาความหนาเชิงมวลอิ่มตัว เนื่องจากความหนาที่ได้จะเป็นความหนาที่มากสุด เพราะถ้ามีปรอทผสม ความหนาเชิงมวลอิ่มตัวย่อมมีค่าลดลง และเมื่อหา $R_{coh/inc}$ ปรากฏว่าค่าอัตราส่วนมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความหนาเชิงมวล เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวอย่างชนิดเดียว กล่าวคือ มีค่าเลขอะตอมประสิทธิผลเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งตรงกับงานวิจัย อื่นๆ ที่ค่าอัตราส่วนระหว่างการกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อการกระเจิงแบบสูญเสียพลังงาน ขึ้นกับค่าเลขอะตอมประสิทธิผลเท่านั้น

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งมากขึ้น ส่งผลให้ รังสีแกมมากระเจิงกลับทั้งแบบสูญเสียพลังงาน และรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน มีค่ามากขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงาน กลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความชื้น หรือ ปริมาณน้ำ ในเพิ่มขึ้นในตัวอย่าง ทำให้ค่าเลขอะตอมประสิทธิผล มีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากขึ้น

สำหรับผลการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างดินไม่ผสมปรอท พบว่าเมื่อตัวอย่างมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงทั้งแบบสูญเสียพลังงาน และแบบไม่สูญเสียพลังงาน มากขึ้นด้วย เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นทำให้โอกาสในการกระเจิงมากขึ้นแม้จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาค่า $R_{coh/inc}$ พบว่า มีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากค่าเลขอะตอมประสิทธิผล มีค่าเท่าเดิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.3 การทดสอบหลักการของเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิง

จากการศึกษาข้างต้นปัจจัยทางกายภาพของตัวอย่างมีผลกระทบต่อความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการทดสอบหลักการของเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงเบื้องต้น จึงเลือกใช้ตัวอย่างดินที่ผ่านการอบ และการบด เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว และใช้สารประกอบปรอท (Hg_2Cl_2) เติมลงไปในตัวอย่างดิน เพื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของปรอท ในตัวอย่าง การที่ใช้สารประกอบปรอทก็ เพื่อให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากผลการศึกษา รูปที่4.14 พบว่าค่า I_{inc} แปรผกผันกับปริมาณปรอท หรือความเข้มข้นของปรอทในตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียน จากกราฟจะเห็นว่า ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นปรอทของรังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสีย จะมีความไวในช่วงที่ความเข้มข้น หรือปริมาณปรอทต่ำๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 0-20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นปรอท มีค่าสูงขึ้น ความไวของรังสีแกมมากระเจิงกลับเริ่มมีค่าลดลง นั่นหมายความว่า สำหรับตัวอย่างสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นปรอทสูง I_{inc} อาจไม่แตกต่างกันนัก กล่าวคือ มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นปรอทน้อยลง

จากรูปที่ 4.15 พบว่า I_{coh} แปรผันตรงกับปริมาณ หรือความเข้มข้นของปรอทในตัวอย่าง กล่าวคือ เมื่อปริมาณปรอทเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการนับรังสีแกมมากระเจิงแบบสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่า $R_{coh/inc}$ แปรผันตรงกับ ปริมาณปรอท โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น สมการความสัมพันธ์ $y = 0.0011x + 0.0109$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9949$ แสดงว่าค่าอัตราส่วนนี้ แปรผันตรง กับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล เนื่องจากปริมาณปรอทในตัวอย่างดินมากขึ้น ทำให้ ค่าเลขอะตอมประสิทธิผลมากขึ้นด้วย

จากการศึกษาหลักการของเทคนิคโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท พบว่าเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับ สามารถนำมาใช้ใน หาปริมาณธาตุหนักในวัสดุที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุเบา เนื่องจาก $R_{coh/inc}$ แปรผันตรงกับ ค่าเลขอะตอมประสิทธิผล และจากการศึกษาเบื้องต้น ในเรื่องปัจจัยทางกายภาพพบว่า ค่าอัตราส่วนนี้ขึ้นกับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล เท่านั้น ไม่ขึ้นกับความหนาเชิงมวล หรือความหนาแน่นของตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับมาหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ แต่เนื่องจาก สภาพของปรอทที่ถูกพบในตัวอย่างสลัดจ์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโลหะปรอท ซึ่งทำให้ตัวอย่างไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ในการวิจัยขั้นต่อไป คือ ทดสอบหลักการของเทคนิคนี้โดยใช้ ตัวอย่างสลัดจ์จริง ที่มีปริมาณปรอทน้อยมาก (จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยของนายวิศิษฏ์ ปฐมชัยวาลย์[6]) และใช้โลหะปรอท เติมลงไปในตัวอย่างสลัดจ์ เพื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ ผลการศึกษาจากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงานมีแน้วโน้มลดลง เมื่อปริมาณปรอทเพิ่มขึ้น แต่ความไว หรือ ความชันของกราฟที่ลดลงนั้นมีค่าต่ำว่า ในการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบกับ ตัวอย่างสลัดจ์มีความชื้นเล็กน้อย ทำให้ลักษณะตัวอย่างสลัดจ์มีช่องว่างระหว่างดิน เมื่อเติมโลหะปรอทจึงไปแทรกในช่องว่างดังกล่าว ทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีการทดสอบหลักการโดยใช้ตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท เนื่องจากดินที่ใช้เป็นดินที่ผ่านการอบและการบด ดังนั้นจึงไม่มีความชื้นในดิน เมื่อเติมสารประกอบปรอทลงไปทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเปลี่ยนแปลง ค่าการนับพื้นที่ใต้พีคพลังงานรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบสูญเสียพลังงานจึงมีความไวมากกว่า และเช่นเดียวกันกับ ความสัมพันธ์ของรังสีแกมมากระเจิงกลับแบบไม่สูญเสียพลังงาน รูปที่ 4.18 กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อปริมาณปรอทเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีแกมมากระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานต่อค่าการนับพื้นที่ใต้พีคแบบสูญเสียพลังงานกับปริมาณปรอท พบว่า มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยมีสมการความสัมพันธ์ $y = 6x10^{-4} x + 0.0145$ โดย ค่า $R^2 = 0.9629$ ซึ่งสามารถนำกราฟนี้ไปใช้เป็นกราฟปรับเทียบ และเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์นี้กับตัวอย่างดินกับสารประกอบปรอท พบว่าตัวอย่างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมีความไวมากกว่า

สำหรับการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ โดยวิธีการสร้างกราฟปรับเทียบ จะใช้ได้ดีในกรณีที่ ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ มีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับ ตัวอย่างที่นำมาสร้างกราฟปรับเทียบ ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ ต้นกำเนิดรังสี Am-241 แบบวงแหวน เพื่อเพิ่มความเข้มของต้นกำเนิดรังสีในการเข้าทำอันตรกิริยากับเนื้อสาร ประกอบกับต้องการใช้ระบบเดียวกับระบบการวัดรังสีเอกซ์เรือง แต่ รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีมีพลังงาน 59.6 keV นับว่าเป็นพลังงานที่ไม่สูงมากนัก จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในตัวอย่างสลัดจ์ เพราะโดยธรรมชาติของตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม มักจะมีองค์ประกอบของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำในสัดส่วนที่ค่อนข้างแปรปรวน

5.1.4 การทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ที่ได้จากการผลิตปิโตรเลียม

ในการทดลองหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์ ได้ใช้วิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน 4 วิธีดังนี้ วิธีการคำนวณจากการใช้กราฟปรับเทียบ สมการที่ 4.1, วิธีการคำนวณจากการเทคนิควิธีการเติมสารมาตรฐานโดยใช้ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 9.987 keV จากปรอท, ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์พลังงาน 11.823 keV จากปรอท, ใช้ค่า $R_{coh/inc}$ ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ค่าที่คำนวณได้ในตัวอย่าง A วิธีการใช้กราฟปรับเทียบ และการเติมสารมาตรฐานได้ใช้ค่า $R_{coh/inc}$ พบว่ามีปริมาณปรอทในระดับสูง จะเห็นว่าค่าแตกต่างกันมากเมื่อคำนวณจากพีครังสีเอกซ์เรืองจากปรอท เนื่องจากลักษณะของตัวอย่าง A นั้นไม่มีความเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน ปรอทส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโลหะปรอทเมื่อเติมสารมาตรฐานเข้าไป ไม่ได้ทำให้ ค่าการนับพื้นที่ใต้พีครังสีเอกซ์จากปรอทเพิ่มขึ้น เนื่องจาก รังสีเอกซ์เรืองจากปรอทมีพลังงานต่ำ ที่วัดได้ส่วนจะมาจากปรอทที่อยู่ที่พื้นผิวเท่านั้น ส่วนค่าที่คำนวณได้จาก ซึ่งแตกต่างกับ ตัวอย่าง B และ C ค่าที่คำนวณได้อยู่ในช่วงเดียวกัน โดยตัวอย่าง B ไม่พบปริมาณปรอท และตัวอย่าง C มีค่าปริมาณปรอทในระดับสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีพลังงานสูงกว่า K_{ab} ของปรอท เช่น รังสีแกมมาพลังงาน 122 keV จาก Co-57 เพื่อลดความไวต่อขององค์ประกอบที่เป็นธาตุเลขอะตอมต่ำ ในตัวอย่าง รวมทั้งเป็นการเพิ่มปริมาณตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากรังสีสามารถเดินเข้าไปทำอันตรกิริยาได้ไกลขึ้น

2. เนื่องจากผลของการไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง ทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดมาก ดังนั้น ในการวัดอาจต้องทำการวัดรังสีแกมมากระเจิงที่มุมต่างๆ กัน เช่น 90 องศา, 180 องศา เพื่อเป็นการเพิ่มค่าเฉลี่ยของการกระเจิงให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3. ใช้เทคนิคการวิเคราะห์นี้ ร่วมกับการวิเคราะห์แบบอื่นๆ ซึ่งใช้ระบบวิเคราะห์ระบบเดียวกัน โดยทำการวัดเพียงครั้งเดียว เช่น วิเคราะห์ปรอทในระบบรังสีเอกซ์เรือง โดยวิเคราะห์พีคพลังงานปรอท ร่วมกับรังสีแกมมากระเจิง เนื่องจากในการวัดรังสีเอกซ์เรืองจากตัวอย่างนั้น ย่อมมีการกระเจิงของต้นกำเนิดรังสีจากตัวอย่าง

4. เนื่องจากในตัวอย่างสลัดจ์มีปริมาณ Ba ค่อนข้างสูง และมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตัวอย่าง และ ค่า K_{ab} ของ Ba ใกล้กับพลังงานรังสีแกมมาที่ใช้ จึงส่งผลต่อความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับ ดังนั้นในการวิเคราะห์ จึงอาจต้องมีการแก้ค่า จากปริมาณ Ba

รายการอ้างอิง

[1] Omer Sogut et al. Dependence on average atomic number of coherent/incoherent scttering intensity ratios in compounds. Journal of Quantitative Spectroscopy& Radiative Transfer 87 (2004) 15-23

[2] P.Arikan et al. Determination of high-Z materials in low-Z medium by X-ray scattering techniques. Nuclear Instruments and Method in Physics Research B 95 (1995) 82-86

[3] P.Duvauchelle et al. Effective atomic number in the Rayleigh to Compton scattering ratio. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 155 (1999) 221-228

[4] O.Içelli, S. Erezenoğlu. Experimental study on ratios of coherent scattering to Compton scattering for elements with atomic numbers $26 \leq Z \leq 82$ in 59.5 keV for 55° and 115°. Spectrochimica Acta Part B 57 (2002) 1317-1323

[5] D. V. RAO et al. Elastic and Compton Scattering Cross Sections in the Atomic Region $12 \leq Z \leq 82$. Appl. Radiat. Isot. Vol. 47 No. 2 (1996) 219-227

[6] วิศิษฏ์ ปฐมชัยวาลย์.การหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา:กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548

[7] สุจิตรา ธำรงวราภรณ์ .การศึกษาสารปรอทอินทรีย์ในก๊าซธรรมชาติที่อาจมีผลต่อการกัดกร่อนของท่อลำเลียงก๊าซ.รายงานฉบับสมบูรณ์ วิทยาลัยปิโตรเลียมละปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537

[8] นันทนิช วานิชาชีวะ. การทำปรอทจากอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติให้บริสุทธิ์และผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540

[9] มารยาท วีรวิกรม. ปรอทในก๊าซธรรมชาติ. แหล่งที่มา http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/parod/parodn.htm

[10] John R.Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983.

[11] Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

[12] Gilmore Gordon and John D. Hemingway. Practical Gamma–Ray Spectrometry. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.

[13] จรัญ พรมสุวรรณ. ปฏิกิริยานิวเคลียร์เชิงทฤษฎี. พิษณุโลก : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2540.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[14] ธำรง เมธาศิริ. ฟิสิกส์แผนใหม่: ความรู้พื้นฐานสำหรับนักฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[15] อรวรรณ ตรรกนาถ. การวิเคราะห์วัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่ ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบรังสีเอกซ์เรืองแบบเคลื่อนย้ายได้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

[16] Asia et al. Characterization and treatment of sludge from the petroleum industry. African Journal of Biotechnology Vol. 5 (2006) 461-466

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวแพร นีรนาทรังสรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิวเคลียร์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย