

การตรวจสอบการกััดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้  
เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี

นางสาวสราพรรณ พจน์ชนะชัย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

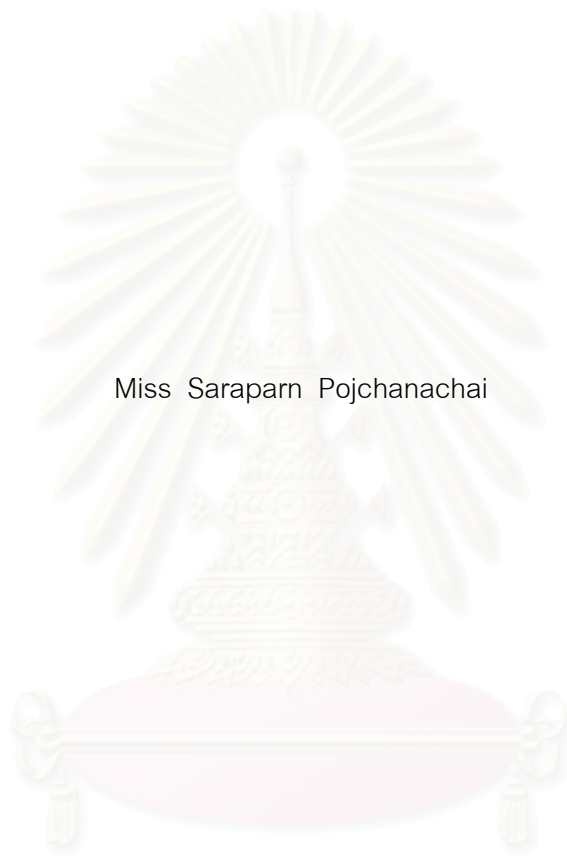
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1531-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INSPECTION OF CORROSION OF REBARS IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING  
THE DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY

Miss Saraparn Pojchanachai



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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1531-3



สราพรรณ พจน์ชนะชัย : การตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี. (INSPECTION OF CORROSION OF REBARS IN REINFORCED CONCRETE COLOUMNS USING THE DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY)  
 อ. ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 92 หน้า. ISBN 974-03-1531-3.

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคสำหรับการตรวจสอบเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี ระบบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีซีซีเอ็ม-137 ความแรง 5 มิลลิคูรี ซึ่งวางท่ามุมฉากกับหัววัดรังสีบีสมัทเจอร์มานิต ลำรังสีตกกระทบถูกบังคับให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ส่วนหัววัดรังสีถูกกำบังรังสีเฉพาะด้านข้าง เพื่อให้รังสีแกมมากระเจิงจากชิ้นงานสามารถเข้าสู่ด้านหน้าของหัววัดรังสีจากมุมต่าง ๆ กัน

ได้ทำการทดสอบเทคนิคนี้กับตัวอย่างเสาคอนกรีตขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. ซึ่งมีเหล็กเส้นอยู่ที่มุมทั้งสี่ ผลการวิจัยพบว่า ผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงตามขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี นอกจากนี้ยังพบว่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักของเหล็กที่หายไป งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสามารถออกแบบเครื่องมือชนิดเคลื่อนย้ายได้ที่ใช้เทคนิคนี้สำหรับการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
 สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
 ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4170569521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: Differential gamma-ray scattering / Nondestructive inspection / steel rebar

SARAPARN POJCHANACHAI : INSPECTION OF CORROSION OF REBARS  
IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING THE DIFFERENTIAL  
GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY. THESIS ADVISOR :  
ASSOC.PROF.NARES CHANKOW , 92 PP. ISBN 974-03-1531-3.

The main objectives of this research were to study and develop a technique for inspection of steel rebars in reinforced concrete columns using Differential Gamma-Ray Scattering Spectroscopy (DGSS). The system consisted of a 5 mCi  $^{137}\text{Cs}$  gamma-ray source positioned perpendicularly to a 2 in. x 2 in. bismuth germanate (BGO) detector. The incident gamma-ray beam was collimated with lead collimator to a diameter of 0.8 cm while the detector was only side shielded allowing scattered gamma-rays from the specimen to reach the detector face from different angles.

The technique was then tested with 20 cm x 20 cm x 20 cm concrete mortar specimens containing 4 steel rebars at its corners. It was found that integral of the differential spectrum changed corresponding to the size and position of the steel rebar which was in front of the source and the detector. Furthermore, it was also found that integral of the differential spectrum increased with increasing of corrosion degree of the steel rebar. The results indicated that a portable unit using single channel analyzer (SCA) could be designed to use as a tool in nondestructive inspection of materials.

Department Nuclear Technology

Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2001

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และได้กรุณาตรวจทานและแก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์โดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณบัญชา คุณพานิช ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในส่วนอิเล็กทรอนิกส์ คุณจเด็จ เย็นใจ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณบัณฑิต สีสัครานนท์และห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และ น้องในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจและคำแนะนำที่มีประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนสำหรับอุดหนุนงานวิจัย ในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจด้วยดี เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสารและ เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี.....	6
2.1 รังสีแกมมา.....	6
2.2 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา.....	7
2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสาร.....	10
2.4 สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมา.....	24
2.5 การถ่ายเทพลังงานในตัวกลางของรังสีแกมมา.....	28
2.6 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี.....	29
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	33
3.2 การจัดระบบวัดรังสี.....	34
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	46

4. ผลการวิจัย.....	52
4.1 การศึกษาดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อขนาดของเหล็กเส้น ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน.....	56
4.2 การศึกษาดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของเหล็กเส้น ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน.....	58
4.3 การศึกษาดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้น ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างกัน.....	65
5. สรุป วิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	88
ภาคผนวก ค.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญตาราง

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 1..... 36

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 2..... 37

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
หัววัดรังสี (ระยะ  $y$  ในรูป 3.8)..... 40

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีสัมพันธ์กับตำแหน่งของหัววัดรังสี (ระยะ  $x$  ในรูป 3.8)..... 41

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน  
0-600 keV กับในช่วงพลังงาน 180-400 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี..... 53

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 กับ 1.5  
ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม..... 57

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ลึกจาก  
ผิวคอนกรีต 1 ซม..... 59

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ลึกจาก  
ผิวคอนกรีต 1.5 ซม..... 60

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ลึกจาก  
ผิวคอนกรีต 2 ซม..... 61

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ  
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ลึกจาก  
ผิวคอนกรีต 2.5 ซม..... 62

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจาก ผิวคอนกรีต 2.8 ซม.....	63
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจาก ผิวคอนกรีต 3.5 ซม.....	64
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 3.5 ซม. ที่น้ำหนักของ เหล็กเส้นหายไป 8.73 , 10.9 , 20 และ 23.64%.....	65
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละโดยน้ำหนักเหล็กที่หายไป.....	67
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับร้อยละ โดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 ซม.....	67

## สารบัญภาพ

2.1	ผังการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีบางชนิด.....	8
2.2	การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์.....	11
2.3	ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน.....	12
2.4	ค่า $n$ ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ.....	14
2.5	การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟคต์.....	14
2.6	สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความ ยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่างๆ.....	17
2.7	ค่า ${}_{e}\sigma_c$ ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ.....	18
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิง เป็นมุม $\theta$ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน.....	20
2.9	การเกิดแฟร์โรไดคชันและปรากฏการณ์แอนนิลเลชัน.....	22
2.10	ค่า $\sigma_{pp}$ ของตะกั่วที่พลังงานต่างๆ.....	22
2.11	โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ สัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน.....	23
2.12	ค่า $\mu/p$ , $\mu_{pe}/p$ , $\mu_c/p$ และ $\mu_{pp}/p$ ของตะกั่ว.....	25
2.13	ค่า $\mu/p$ ของธาตุบางชนิด.....	26
2.14	การทะลุผ่านของรังสีแกมมา.....	27
2.15	การกระเจิงของรังสีแกมมาจากชิ้นงานเข้าสู่หัววัดรังสี.....	30
2.16	การสร้างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	32
3.1	การจัดอุปกรณ์และระบบวัดรังสีแกมมา.....	33
3.2	การบังคับลำรังสี 2 แบบ.....	34
3.3	ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อบังคับลำรังสีแบบที่ 1.....	36
3.4	ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อบังคับลำรังสีแบบที่ 2.....	37
3.5	ชุดต้นกำเนิดรังสีและกำบังรังสี.....	38
3.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) และ BGO.....	39
3.7	การกำบังรังสีของหัววัดรังสี.....	39
3.8	ตำแหน่งของหัววัดรังสี.....	40
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม	

กับตำแหน่งของหัววัดรังสี (ระยะ $y$ ในรูปที่ 3.8).....	41
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีสัมพันธ์กับตำแหน่งของหัววัดรังสี (ระยะ $x$ ในรูปที่ 3.8).....	42
3.11 แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีแกมมากระเจิงจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	43
3.12 สเปกตรัมที่ได้จากการกระเจิงที่มุม 90 องศาของแท่งเหล็ก ใช้เวลาในการวัดรังสี 600 วินาที.....	44
3.13 แสดงการจัดระบบวัดรังสี.....	45
3.14 การตกกระทบและการกระเจิงรังสีจากตัวอย่าง.....	46
3.15 ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี.....	47
3.16 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีเมื่อขนาดของเหล็กเส้น ในเสาคอนกรีตต่างๆ กัน อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.....	48
3.17 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ.....	49
3.18 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม เมื่อสภาพการกีดกันของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตต่างกัน.....	50
3.19 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อเร่งการกีดกัน.....	51
4.1 สเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตต้น ขนาด 20 ซม x 20 ซม.x 20 ซม.....	52
4.2 สเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตมาตรฐาน ขนาด 20 ซม x 20 ซม.x 20 ซม.....	52
4.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างเสาคอนกรีตต้นและเสาคอนกรีต มาตรฐาน ที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสี 2.5 ซม.....	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 0 - 600 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี.....	54
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 180 - 400 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี.....	54
4.6 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.....	56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	

0.9, 1.2 และ 1.5 ซม.....	57
4.8 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	
1.9 มม.อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 1 ซม.....	58
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม อยู่ลึกจากผิว	
คอนกรีต 1 ซม.....	59
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่ง	
ของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.	
อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1.5 ซม.....	60
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม	
อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 2 ซม. ....	61
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม	
อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 2.5 ซม. ....	62
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม	
อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 2.8 ซม. ....	63
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม	
อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 3.5 ซม. ....	64
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของ	
ต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.ที่ น้ำหนักของเหล็ก	
หายไป 8.73, 10.9, 20 และ 23.64 %.....	66
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับ	
ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี	
2, 2.5 และ 3 ซม.....	66
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับ	
ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี	
2.5 และ 3 ซม.....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลง เช่น ทำให้เกิดการแตกร้าวของผิวคอนกรีตซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ปัจจุบันการตรวจสอบแบบไม่ทำลายมีบทบาทสำคัญกับอุตสาหกรรมต่างๆมาก วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย คือ 1. เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์ โดยการตรวจสอบชิ้นงานประเมินความบกพร่องว่ามีอยู่เท่าใดแล้วตัดสินใจว่าความบกพร่องที่มึ้นนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือไม่ 2. เพื่อปรับปรุงเทคนิคการผลิต เช่น ตรวจสอบรอยเชื่อมเพื่อหาวิธีการเชื่อมที่จะได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพ 3. เพื่อลดต้นทุนการผลิต ทำให้สามารถดึงเอาผลิตภัณฑ์ของเสียออกหรือนำมาซ่อมแซมเพิ่มเติมได้เป็นการลดการสูญเสียไป กระบวนการผลิต และ 4. เพื่อติดตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สิ่งแวดล้อมหรือการใช้งานของผลิตภัณฑ์อาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสื่อมลง เช่น การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดในกระบวนการผลิตแต่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจึงต้องอาศัยการติดตามการตรวจสอบ วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อหารอยบกพร่องภายในที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ การถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic Testing) การใช้คลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic testing) เป็นต้น แต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดในการตรวจสอบต่างกัน เช่น การถ่ายภาพด้วยรังสีต้องจัดให้ต้นกำเนิดรังสีและฟิล์มอยู่คนละด้านของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบและจำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงรังสีค่อนข้างสูงและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบอีกด้วย ส่วนการตรวจสอบด้วยคลื่นอุลตราโซนิกนั้นมีข้อเสียสำหรับการตรวจสอบคอนกรีต คือ คลื่นเสียงจะมีการกระเจิงในคอนกรีตสูงมากเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีต การตัดสินใจตรวจสอบต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญ

เทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี (Differential Gamma ray Scattering Spectroscopy , DGSS) เป็นเทคนิคที่ประยุกต์การกระเจิงคอมป์ตันมาใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งอาศัยอันตรกิริยาระหว่าง



รังสีแกมมา กับคอนกรีตและเหล็กเส้นที่อยู่ภายใน เมื่อเหล็กเกิดการกัดกร่อนบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้นคุณสมบัติของเหล็กจะเปลี่ยนไปจากโลหะไปเป็นอโลหะที่ไม่มีคุณสมบัติของโลหะเหลืออยู่ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพเหล็กสมบูรณ์กับสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพเหล็กเปลี่ยนไปจะต่างกัน เมื่อนำสเปกตรัมทั้งสองมาหักล้างกันสเปกตรัมที่ได้จะเรียกว่า ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (Differential Spectrum) ซึ่งจะแสดงถึงสภาพของเหล็กที่แตกต่างกันได้

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของเทคนิคนี้ก็คือการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน 2 ชิ้นว่าเหมือนกันหรือไม่จากดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้ หากชิ้นงาน 2 ชิ้นเหมือนกันทุกประการผลลัพธ์ของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะมีค่าเป็นศูนย์ (มีการแปรปรวนตามสถิติของการนับรังสี) แต่ถ้าชิ้นงาน 2 ชิ้นต่างกัน เช่น มีรอยบกพร่อง มีวัตถุแปลกปลอม ผลลัพธ์ของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะเบี่ยงเบนไปจากศูนย์มากหรือน้อยและจะเป็นบวกหรือติดลบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ขนาด รูปร่าง ตำแหน่งของรอยบกพร่อง ชนิดของวัตถุแปลกปลอม เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้ยังใหม่จึงยังต้องการการศึกษาวิจัยอีกมาก ซึ่งในการวิจัยนี้มุ่งเน้นการตอบสนองของเทคนิคนี้ต่อตำแหน่งและขนาดของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีต รวมทั้งสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่อยู่ภายใน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปีในการตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปีในการตรวจสอบสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี  $^{137}\text{Cs}$

1.3.2 หาปัจจัยที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากคอนกรีตและเหล็กเส้น ได้แก่ มุมตกกระทบ ตำแหน่งของหัววัดรังสี รวมทั้งตำแหน่งและขนาดของเหล็กเส้น

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในระบอบวัด
- 1.4.3 ทำการทดลองเพื่อจัดระบบวัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจสอบการกักร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี
  - 1.4.4 จัดทำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. ที่มีขนาด ตำแหน่งและสภาพการกักร่อนของเหล็กเส้นภายในที่ต่างกัน
  - 1.4.5 ทำการทดลองโดยจัดระบบวัดที่ได้ในข้อ 1.4.3 และตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในข้อ 1.4.4
  - 1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่สามารถตรวจสอบสภาพการกักร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือเพื่อตรวจสอบชิ้นงานโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา<sup>[1]</sup> ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีตรวจหารอยบกร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี รอยบกร่องภายในชิ้นงานอะลูมิเนียมสามารถวิเคราะห์ได้จากดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมซึ่งได้จากการนำคอมป์ตันสแกตเทอริงที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลบออกจากคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมอ้างอิงที่ไม่มีรอยบกร่อง ในการทดลองได้ใช้ชิ้นงานอะลูมิเนียมต้นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร ต้นกำเนิดรังสี  $^{137}\text{Cs}$  ความแรงรังสี 5.5 มิลลิวูรี และหัววัดรังสีชนิด HPGe จัดระบบวัดรังสีให้หัววัดรังสีทำมุม 90 องศากับแนวลำรังสี แล้ววัดรังสีที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมเข้าสู่หัววัดรังสี ขนาดของรอยบกร่องที่เล็กที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตร



1.6.2 S.K. Mullin and E.M.A. Hussein<sup>[2]</sup> ได้นำเทคนิควิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากการกระเจิงคอมป์ตันสำหรับตรวจสอบความบกพร่องในชิ้นงาน ระบบวัดที่ใช้จะจำกัดลำรังสีเฉพาะต้นกำเนิดรังสีไม่จำกัดลำรังสีที่จะเข้าสู่หัววัดรังสี โดยจัดให้ต้นกำเนิดรังสีทำมุม 90 องศากับหัววัดรังสี ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้คือ  $^{60}\text{Co}$  ได้ทำการตรวจสอบแท่งอะลูมิเนียมที่มีรอยบกพร่องเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ใช้เวลาวัด 2 ชั่วโมง สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างแท่งอะลูมิเนียมที่มีรอยบกพร่องและไม่มีได้

1.6.3 Samin, Anghate ; Larry, L ; Humphries ; and Nils, J. Diaz.<sup>[3]</sup> ได้นำเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริงสเปกโทรสโคปีมาตรวจสอบหารอยบกพร่องในชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งนำหลักการกระเจิงคอมป์ตันมาประยุกต์ ในชิ้นงานตัวอย่างใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบจะถูกฉายรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาลำแคบ และมีหัววัด high-purity germanium มาวัดรังสีที่กระเจิงจากชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ หัววัด high-purity germanium มีความสามารถในการแยกพลังงานสูง ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นรายละเอียดของสเปกตรัมที่พลังงานต่างๆได้ สเปกตรัมที่ได้นี้จะนำไปลบกับสเปกตรัมอ้างอิงซึ่งวัดจากชิ้นงานที่ไม่มีรอยบกพร่องจะได้ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมนี้จะแสดงถึงรอยบกพร่องในชิ้นงาน ซึ่งเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันสามารถตรวจสอบรอยบกพร่องได้ทั้งที่อยู่และไม่อยู่ในแนวลำรังสีผ่านได้

1.6.4 Shiro Tuzi and Otomura Sato<sup>[4]</sup> ได้ทำการหาตำแหน่ง ขนาด ความลึกและระยะห่างของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี  $^{133}\text{Ba}$  และ  $^{137}\text{Cs}$  ระบบวัดที่ใช้จะจำกัดลำรังสีทั้งหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสี โดยระบบวัดรังสีแกมมาจะบรรจุท่อบนรถเลื่อนเล็กแล้วสแกนไปบนผิวของคอนกรีตเสริมเหล็ก แล้ววัดอัตราการนับรังสีที่กระเจิงจากคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อระบบวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมอัตรานับที่ได้จะตกลง จึงสามารถหาตำแหน่ง ขนาด ความลึกและระยะห่างของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็กได้

1.6.5 Skoulikidis,Th. ,Marinakis,D. and Batis,G<sup>[5]</sup> ได้นำการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์มาใช้ตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทำนายการแตกร้าวของคอนกรีต โดยทำตัวอย่างคอนกรีตแล้วนำไปแช่ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5 % ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ภายใต้ anodic charge ที่ 850 มิลลิโวลต์เพื่อจำลองการกัดกร่อน ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น 0.01 นาโนเมตร หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 0, 5, 11, 17, 22, 26, 28, 30, 33, 37, 41, 45, 49 และ 55

วันและในวันที่ 28 จะเริ่มสังเกตเห็นการแตกร้าว ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ด้วยการใช้ electron probe micro-analysis (EPMA) จะทำให้เห็นการซึมของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) เข้าไปในเนื้อคอนกรีต จึงทำให้ทำนายการแตกร้าวของคอนกรีตได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสารและ เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี

#### 2.1 รังสีแกมมา

เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง รังสีแกมมาเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

$$= h\frac{c}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant =  $4.136 \times 10^{-15}$  eV.s)

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่น ( $\text{sec}^{-1}$ )

$c$  คือ ความเร็วแสง ( $=2.9979 \times 10^{10}$  cm/s)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (cm)

เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) ภายหลังจากปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตาและกระบวนการอื่น ๆ ที่ได้กล่าวต่อไป การลดระดับพลังงานของนิวคลีออนลงสู่สถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่ารังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน  $E_i$  (เป็นสถานะกระตุ้น) และ  $E_f$  เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

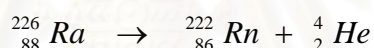
## 2.2 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา <sup>[6],[7]</sup>

### 2.2.1 รังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวได้รังสีแกมมามักจะเกิดตามหลังการสลายตัวให้รังสีแอลฟาหรือรังสีบีตา เพราะนิวเคลียสที่มีการสลายตัวจะได้นิวเคลียสใหม่ นิวเคลียสใหม่มักอยู่ในสถานะกระตุ้น เมื่อกลับสู่สถานะพื้นจะปล่อยรังสีแกมมาออกมา ระดับพลังงานในนิวเคลียสอยู่ในระดับ MeV ส่วนอะตอมอยู่ในระดับ eV เท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ปล่อยออกจากนิวเคลียสจึงสูงมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ปล่อยจากอะตอม

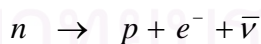
#### 2.2.1.1 การสลายตัวให้รังสีแอลฟา ( $\alpha$ decay)

การสลายตัวให้รังสีแอลฟาจะเกิดกับนิวเคลียสที่มีมวลมากๆ มีมวลอะตอมมากกว่า 82 ขึ้นไป ดังนั้นจะเสียมวลอย่างรวดเร็วเพื่อเป็นไอโซโทปที่มีมวลต่ำลง นิวเคลียสที่ใหม่จะมีประจุลดลง 2 หน่วย และเลขมวลอะตอมจะลดลง 4 หน่วย เช่น



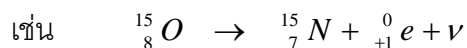
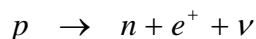
#### 2.2.1.2 การสลายตัวให้รังสีบีตาลบ ( $\beta^-$ decay)

เนื่องจากในนิวเคลียสมีจำนวนนิวตรอนมากเกินไป นิวตรอนจะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอน โดยปล่อยอิเล็กตรอนกับแอนตินิวตริโน ดังนั้นประจุของนิวเคลียสใหม่จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ดังสมการ



#### 2.2.1.3 การสลายตัวให้รังสีบีตาบวก ( $\beta^+$ decay)

เนื่องจากในนิวเคลียสมีจำนวนนิวตรอนน้อยเกินไป โปรตอนจะเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน โดยปล่อยโพสิตรอนกับนิวตริโน ดังนั้นประจุของนิวเคลียสใหม่จะลดลง 1 หน่วย ดังสมการ



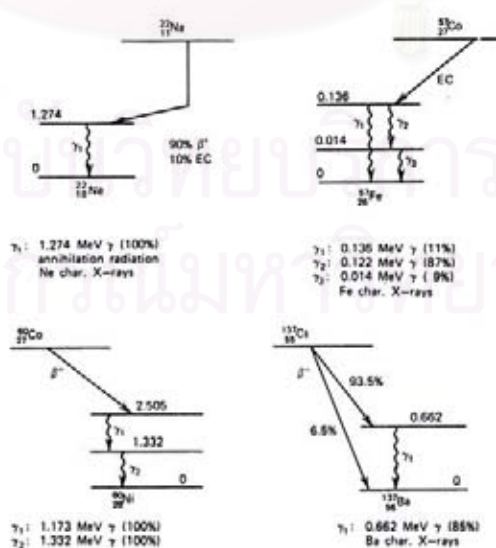
#### 2.2.1.4 การจับอิเล็กตรอน (electron capture)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์คล้ายคลึงกับการสลายตัวให้รังสีบีตาบวก คือ นิวเคลียสขาดนิวตรอนแต่พลังงานไม่มากพอที่จะเกิดการสลายตัวให้รังสีบีตาบวกได้ ดังนั้นนิวเคลียสจึงดึงอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ เพื่อรวมกับโปรตอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน อิเล็กตรอนที่ถูกดึงมักอยู่ในชั้น K จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เคแคปเจอร์ (K-capture) นิวเคลียสใหม่ประจุบวกจะลดลงไป 1 หน่วย แต่มวลอะตอมยังคงเดิมแล้วปล่อยแอนตินิวตริโนออกมาดังสมการ



ผลที่ตามมาจากการที่อิเล็กตรอนชั้นวงโคจรในถูกจับเข้าไปในนิวเคลียสก็คือ การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-rays) เพราะว่างขึ้นทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นนอกเข้าไปแทนที่

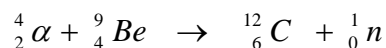
ต้นกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เช่น  ${}^{22}\text{Na}$   ${}^{57}\text{Co}$   ${}^{60}\text{Co}$  และ  ${}^{137}\text{Cs}$  ซึ่งมีผังการสลายตัว (decay scheme) ดังรูป 2.1



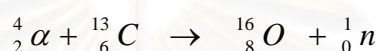
รูปที่ 2.1 ผังการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีบางชนิด<sup>[7]</sup>

## 2.2.2 รังสีแกมมาที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยานิวเคลียร์

ถ้าต้องการต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่าที่ได้จากการสลายตัวของ รังสีบีตา ปฏิกิริยานิวเคลียร์บางปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสถานะกระตุ้นจึงถูกนำมาใช้ เช่น



ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาคือนิวเคลียส  ${}^{12}_6\text{C}$  ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ในการสลายตัวจะ ปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 4.4 MeV ออกมา ตัวอย่างอีกปฏิกิริยาหนึ่ง คือ



ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาคือนิวเคลียส  ${}^{16}_8\text{O}$  ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ในการสลายตัวจะ ปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงถึง 6.130 MeV

## 2.2.3 ปฏิกิริยาการแอนนิฮิเลชัน (Annihilation Radiation)

หลังจากเกิดการสลายตัวให้รังสีบีตาบวกและหลังจากการเกิดกระบวนการแปร โพรตักชันจะได้โพสิตรอนออกมา เมื่อโพสิตรอนสูญเสียพลังงานในตัวกลางจนกระทั่งพลังงานลด ต่ำลงจะรวมตัวกับอิเล็กตรอน ผลที่ได้คือโพสิตรอนกับอิเล็กตรอนหายไปเกิดรังสีแกมมา 2 ตัว พลังงาน 0.511 MeV ปลดปล่อยไปในทิศทางตรงกันข้าม

## 2.2.4 อินเทอร์นัลคอนเวอร์ชัน (Internal conversion)

รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวนั้น มีโอกาสชนอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบ นิวเคลียส เมื่อรังสีแกมมาชนอิเล็กตรอนมันจะถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนรับ พลังงานก็จะกระเด็นหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่หลุดจากอะตอมโดยกระบวนการนี้เรียกว่า คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน (conversion electron) ก็คือรังสีบีตาที่มีพลังงานเดียวซึ่งออกมาจาก อะตอมแทนรังสีแกมมา เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งในว่างลงอิเล็กตรอนวงนอกจะมาแทนที่ การเกิดอิน เทอร์นัลคอนเวอร์ชันรังสีแกมมาจะหายไปแต่ได้อิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ออกมา



## 2.2.5 การเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Bremsstrahlung)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าวิ่งไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสที่มีประจุบวก เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเปลี่ยนไป ทางทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ อนุภาคจะปล่อยรังสีในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่า รังสีเบรมสตราลุงห์ ความเข้มรังสีขึ้นกับประจุ ( $z$ ) มวลของอนุภาคที่เข้าชน ( $M$ ) และเลขอะตอม ( $Z$ ) ของสารที่ถูกชนดังสมการ (2.4)

$$I \propto \left[ \frac{z Z}{M} \right]^2 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มรังสี

$M, z$  คือ มวลและประจุของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน

$Z$  คือ เลขอะตอมของสารที่ถูกชน

จากสมการจะเห็นว่าอนุภาคบีตาเกิดเบรมสตราลุงห์ได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟา ในการกั้นรังสีบีตาจึงไม่นิยมใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงๆ เนื่องจากการเกิดเบรมสตราลุงห์นั่นเอง ดังนั้นในการกั้นรังสีบีตานิยมใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ

## 2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสาร

อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารนั้นมีด้วยกันหลายแบบ โดยอันตรกิริยาที่สำคัญมี 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (compton effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton scattering) และแพร์โพรดักชัน (pair production)

### 2.3.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) <sup>[6],[7],[8]</sup>

เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมตัวกลาง เกิดมากกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำประมาณ 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV โดยพลังงานที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้จะต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนเข้าชนอะตอมจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้รังสีแกมมาหายไปและอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนอยู่ภายในวงโคจรด้วยพลังงานยึด

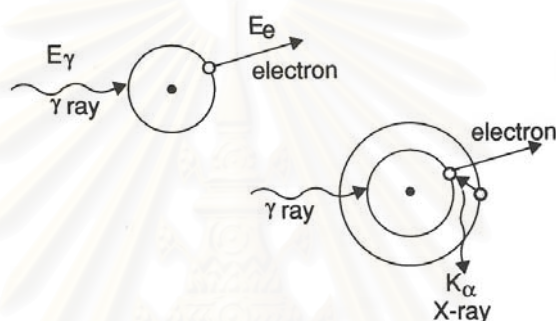
หนึ่งจำนวนหนึ่ง ดังนั้น พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.5)

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ  $E_e$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

$E_\gamma$  คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอะตอม

$E_b$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์<sup>[8]</sup>

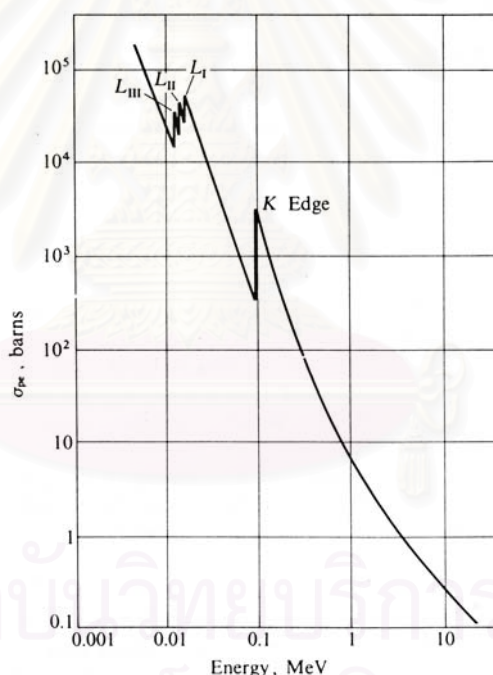
อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photo electron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนแล้วโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวเมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสาร และเมื่อมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดช่องว่างในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะเลื่อนเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่างพร้อมกับการปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) ออกมา และอาจจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรอบนอกแล้วทำให้เกิดไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจร การดูดกลืนรังสีแกมมาจะเป็นไปไม่ได้กับอิเล็กตรอนอิสระเพราะขัดกับหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานแต่ในกรณีของ อิเล็กตรอนที่มีขอบเขตที่อยู่ในอะตอมนั้น การดูดกลืนเกิดขึ้นได้เพราะอะตอมจะเป็นตัวถอยหลัง แต่เนื่องจากอะตอมมีมวลมาก การถอยหลังจึงน้อยจนถือว่าอะตอมไม่มีการถอยหลังเลย เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้าในแนวเดียวกับทิศของรังสีแกมมา ส่วนรังสีแกมมาที่มาตกกระทบมีพลังงานต่ำมักจะส่งอิเล็กตรอนในแนวทำมุมฉาก



ถ้าให้  $\sigma_{pe}$  เป็นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมา ความเข้ม  $I$  ( $\gamma$  - photon /cm<sup>2</sup>.s) ตกกระทบเป้า ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ  $N$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ต่อปริมาตรของเป้า,  $F_{pe}$  (cm<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) จะคำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$F_{pe} = I N \sigma_{pe} \dots\dots\dots(2.6)$$

ค่า  $\sigma_{pe}$  ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา  $\sigma_{pe}$  จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น และ  $\sigma_{pe}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง รูปที่ 2.3 แสดงค่า  $\sigma_{pe}$  ของตะกั่วที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า  $\sigma_{pe}$  ของตะกั่วมีค่าสูงและจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง นั่นก็หมายความว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทะลุผ่านตะกั่วได้ยาก



รูปที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน [6]

จากรูป 2.3 ค่า  $\sigma_{pe}$  มีความไม่ต่อเนื่องในบางพลังงานแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\sigma_{pe}$  อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์ฟชันเอจ” (absorption edge) ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำ

ให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้นระดับพลังงานต่างๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชันแอดจ์ ต่างกันคือ  $K_{edge}$ ,  $L_{edge}$ ,  $M_{edge}$  เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของชั้น K จึงมีพลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียวเนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วนชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมียอดสัมประสิทธิ์การดูดกลืน 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

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

ช่วงที่รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า  $K_{edge}$  ขึ้นไป ค่า  $\sigma_{pe}$  จะลดลงตามค่าพลังงานดังนี้

$$\sigma_{pe} = E^{-3} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

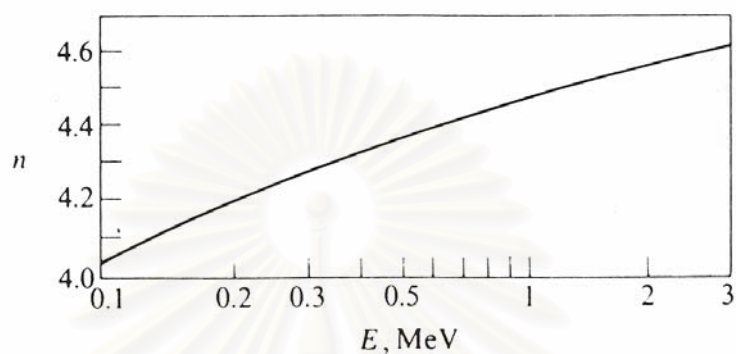
นอกจากนี้ค่า  $\sigma_{pe}$  ยังขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก คือ

$$\sigma_{pe} = Z^n \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่จะมีค่าประมาณ 4 กราฟของค่า n แสดง ดังรูป 2.4 โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ จะมีค่าประมาณดังสมการ

$$\sigma_{pe} = \frac{Z^n}{E^3} \times const \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

การที่ค่า  $\sigma_{pe}$  ขึ้นอยู่กับค่า  $Z$  ของตัวกลางอย่างมาก ดังนั้นธาตุที่เลขอะตอมสูงเช่น ตะกั่ว จึงใช้ในการกำบังรังสีแกมมาได้ดี การเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ เป็นอันตรกิริยาที่พึงประสงค์ในการกำบังรังสีแกมมา ทั้งนี้เพราะรังสีแกมมาจะหายไปและเปลี่ยนไปเป็นอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถกำบังได้ง่ายกว่ารังสีแกมมา



รูปที่ 2.4 ค่า  $n$  ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ<sup>[6]</sup>

2.3.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (compton effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton scattering)<sup>[6],[7],[8]</sup>

เป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาชนแบบยืดหยุ่นกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เกิดมากกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำประมาณ 0.1 MeV ถึง 10 MeV รังสีแกมมา จะเสียพลังงานบางส่วนให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ส่วนรังสีแกมมาจะกระเจิงทำมุม  $\theta$  กับแนวการเคลื่อนที่เดิมดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์<sup>[8]</sup>

ถ้าให้รังสีแกมมาตกกระทบบมีพลังงาน,  $h\nu$  และ โมเมนตัม ,  $h\nu/c$  ตกกระทบบกับอิเล็กตรอนอิสระที่มีมวลนิ่ง ( $m_0$ ) อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนมีผลทำให้รังสีแกมมากระเจิงไปเป็นมุม  $\theta$  และมีพลังงานเหลือเป็น  $h\nu'$  ( $< h\nu$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนกระเด็นถอยหลังไปเป็นมุม  $\phi$  และมีพลังงานจลน์ของการถอยหลังเป็น  $E_k$  ดังรูป 2.5 จากการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน จะได้

$$\begin{aligned} E_k &= mc^2 - m_0c^2 \\ &= m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

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

$$\begin{aligned} p_e &= m\beta c \\ &= \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน  $x$  และ  $y$  และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos\phi \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin\theta - \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin\phi \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu' + E_k \\ &= h\nu' + m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

เมื่อให้ค่าของมุม  $\phi$  คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$p_e c \cos\phi = h\nu - h\nu' \cos\theta \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$p_e c \sin\phi = h\nu' \sin\theta \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu')\cos\theta + (h\nu')^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0c^2 \dots\dots\dots(2.18)$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{(p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4)} \dots\dots\dots(2.19)$$

แทนค่าสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.18) ได้

$$p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (E_k + m_0c^2)^2 \dots\dots\dots(2.20)$$

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

$$p_e^2 c^2 = (h\nu - h\nu')^2 + 2(h\nu - h\nu')m_0c^2 \dots\dots\dots(2.21)$$

สมการ (2.17) และสมการ (2.21) เท่ากัน จะได้ว่า

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(2.22)$$

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

หน่วยของมวลนิ่งของอิเล็กตรอนในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของพลังงานจลน์ได้

$$\begin{aligned} E_k &= h\nu - h\nu' \\ &= h\nu \left( 1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \\ &= h\nu \left( \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \dots\dots\dots(2.23) \end{aligned}$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{2}{(1 + \alpha)^2 \tan^2\phi + 1} \dots\dots\dots(2.24)$$

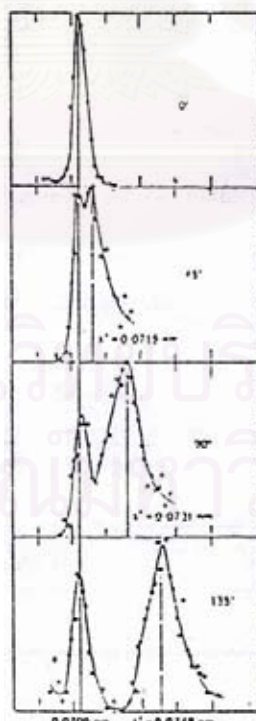
จากสมการ (2.22) เมื่อเปลี่ยนความถี่คลื่นให้อยู่ในรูปความยาวคลื่นจะได้เป็น

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นมากกว่าโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนและความยาวคลื่นที่เปลี่ยน ( $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ) ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบอิเล็กตรอน แต่จะขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง  $\theta$  และมวลของอิเล็กตรอน  $m_0$  สำหรับค่า  $h/m_0 c$  มีหน่วยเป็นความยาวเรียกว่า ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (compton wavelength) เมื่อแทนค่า  $m_0$ ,  $h$  และ  $c$  แล้วจะได้  $h/m_0 c = 0.02426 \text{ \AA}$  ดังนั้นจากสมการ (2.25) ได้

$$\Delta\lambda = 0.02426(1 - \cos \theta) \text{ \AA} \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

ที่  $\theta = 0^\circ$  ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนที่มุม  $\theta = 90^\circ$  ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาเปลี่ยนไป  $\Delta\lambda = 0.02426 \text{ \AA}$  และที่มุม  $\theta = 180^\circ$  ทำให้ได้  $\Delta\lambda = 2 \times 0.02426 = 0.4852 \text{ \AA}$  ผลการทดลองหาค่าความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นนั้นแสดงดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าความเข้มของรังสีและความยาวคลื่นของรังสีเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่างๆ<sup>[1]</sup>



สามารถคำนวณหาค่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนได้ โดยใช้สมการ (2.23) จากการวัดพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมกระเจิง 180° จาก

$$E_k = hv \left( \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \right) = hv \left( \frac{2hv/m_0c^2}{1+2hv/m_0c^2} \right) \dots\dots\dots(2.27)$$

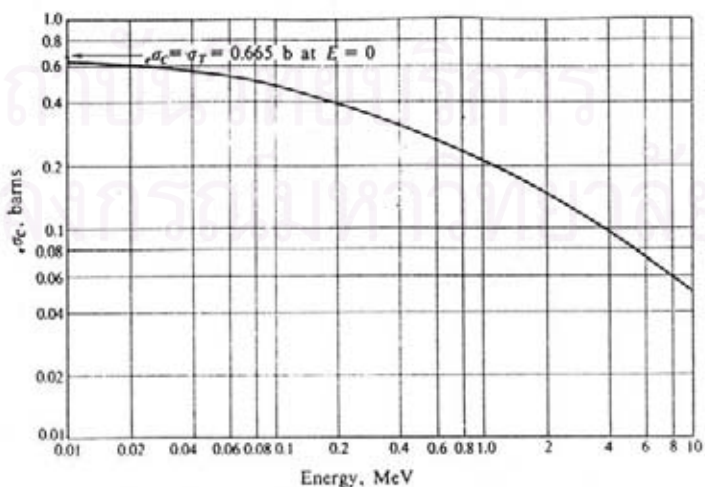
ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันต่ออะตอม ( $\sigma_c$ ) จึงเป็นค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน ( ${}_e\sigma_c$ ) ซึ่ง

$${}_e\sigma_c = {}_e\sigma_s + {}_e\sigma_a \dots\dots\dots(2.28)$$

เมื่อ  ${}_e\sigma_s$  คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการกระเจิงพลังงานของรังสีแกมมา

${}_e\sigma_a$  คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการดูดกลืนพลังงานโดยอิเล็กตรอน

และค่าภาคตัดขวางนี้จะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นจากที่สูงสุด 0.655บารน์ ( barns) ที่พลังงาน 0 MeV ซึ่งเรียกว่าภาคตัดขวางทอมสัน (Thomson cross section,  $\sigma_T$ ) ดังรูป 2.7 จะเห็นว่าที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นจน  $E_r \gg E_e$  ค่า  ${}_e\sigma_c$  จะแปรผันตรงตามค่า  $E^{-1}$



รูปที่ 2.7 ค่า  ${}_e\sigma_c$  ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ [6]

ค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออะตอม ( $\sigma_c$ ) จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน ดังสมการ (2.29)

$$\sigma_c = Z \sigma_e \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\sigma_c \propto E_\gamma^{-1} \quad \dots\dots\dots(2.30)$$

ดังนั้นโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟคต์จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของตัวดูดกลืน และจะเกิดได้ดีกับสารที่มีเลขอะตอม, Z สูง และจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมา,  $E_\gamma$  สูงขึ้น

$$\sigma_c \approx \frac{Z}{E_\gamma} \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในหน่วย  $\text{cm}^{-1}$  จะได้

$$\mu_\sigma = \frac{\rho N_A Z}{A} \sigma_c \quad \dots\dots\dots(2.32)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง ( $\text{g/cm}^3$ )

$N_A$  คือ เลขอะโวกาโดร

$Z$  คือ เลขอะตอมของตัวกลาง

$A$  คือ เลขมวลของตัวกลาง

ค่าของ  $\sigma_c$  ( $\text{cm}^2 / e^-$ ) ไม่ขึ้นกับสมบัติของตัวดูดกลืน ในขณะที่  $\mu_\sigma$  เป็นฟังก์ชันอะตอมของตัวดูดกลืน และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล จะกำหนดได้โดย

$$\frac{\mu}{\rho} = N \left( \frac{Z}{A} \right) \sigma_c \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

จะเห็นว่าในกรณีธาตุเบา  $Z/A \sim 0.5$  สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุเบาแต่ละธาตุจะมีค่าคงตัวที่พลังงานของโฟตอนเดียวกัน

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง ที่กระเจิงเป็นมุมต่างๆ สามารถคำนวณหาได้จากสูตรของ Klein-Nishina ดังสมการ (2.34)



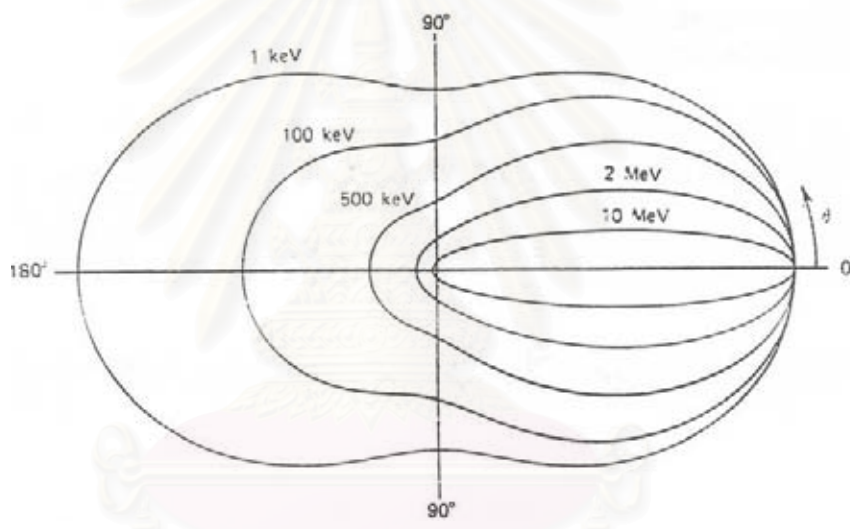
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \dots(2.34)$$

เมื่อ  $r_0$  คือ classical electron radius =  $2.82 \times 10^{-13}$  cm

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0c^2} = \frac{662 \text{ keV}}{511 \text{ keV}} = 1.29 \quad \text{for } ^{137}\text{Cs}$$

$\theta$  คือ มุมกระเจิง

ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงจากโฟตอนระดับพลังงานต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 2.8 จากสมการของ Klein-Nishina เมื่อพลังงานของรังสีตกกระทบยิ่งสูงมาก การกระเจิงส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) และที่พลังงานต่ำๆ  $E \approx E_0$  สมการ (2.34) จะลดรูปเหลือเป็น  $(1 + \cos^2\theta)$  ซึ่งจะสมมาตรที่มุม  $90^\circ$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม  $\theta$  จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน [7]

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์และปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ก็คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอน แต่ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันนั้นเพียงแต่ลดขนาดพลังงานเดิมของโฟตอน เกิดโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลงและอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง หลังจากการเกิดคอมป์ตันแล้วโฟตอนที่มีพลังงานต่ำลงก็อาจจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ได้อีก

2.2.3 แพร่โพดำกัซัน (pair production)<sup>[6],[7],[8]</sup>

ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าสูงกว่า 1.02 MeV เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงเคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในอะตอมรังสีแกมมาจะหายไป กลายเป็นอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม พิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} + E_{nuc} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

เมื่อ  $h\nu$  คือ พลังงานของรังสีแกมมาตกกระทบ  
 $2m_0c^2$  คือ พลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน  
 $E_{e^-}, E_{e^+}, E_{nuc}$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน, โพสิตรอนและนิวเคลียสตามลำดับ

หากคิดว่านิวเคลียสมีมวลมาก  $E_{nuc}$  จะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ สมการ (2.35) จะเหลือ

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

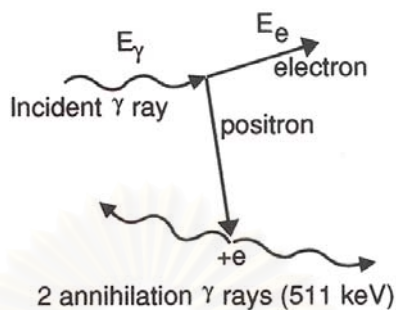
ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พลังงานขีดเริ่มที่จะทำให้เกิดกระบวนการนี้คือ  $2m_0c^2$  หรือ 1.02 MeV พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะมีค่าเท่ากันคือ เท่ากับค่าผลต่างระหว่างพลังงานรังสีแกมมากับพลังงานมวลพัก (rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนรวมกัน นั่นคือ

$$E_{k(e^-ore^+)} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.02) \text{ MeV} \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

อันตรกิริยาแบบแพร่โพดำกัซันนี้เป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ซึ่งตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (annihilation) ของอิเล็กตรอนกับโพสิตรอน แต่เมื่อโพสิตรอนมีค่าพลังงานต่ำลงจะสามารถรวมกับอิเล็กตรอน เกิดเป็นรังสีแกมมา 2 ตัวคือเกิด แอนนิฮิเลชัน ขึ้นได้

$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu$$

รังสีแกมมาที่เกิดจากมวลของโพสิตรอนและอิเล็กตรอน จะมีพลังงาน 0.511 MeV และวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม



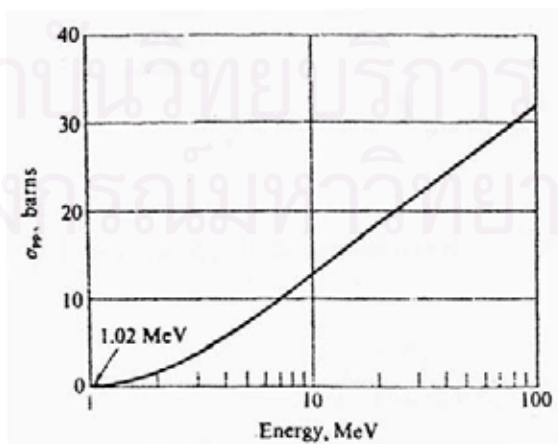
รูปที่ 2.9 การเกิดโพสิตรอนและปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน<sup>[8]</sup>

โอกาสในการเกิดโพสิตรอนของรังสีแกมมาที่พลังงานสูงกว่า 1.02 MeV จะมีค่าสูงขึ้น ให้  $\sigma_{pp}$  เป็นภาคตัดขวางในการเกิดโพสิตรอน ต่ออะตอมของตัวกลาง และ Z คือเลขอะตอมของตัวกลาง

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \dots\dots\dots(2.38)$$

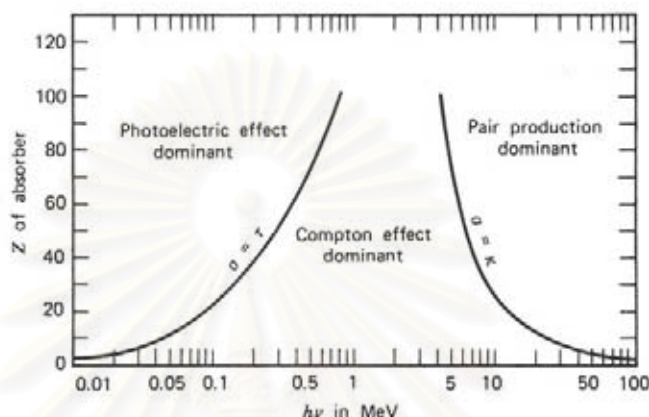
ดังนั้นโอกาสของการเกิดโพสิตรอน จะประมาณได้ว่า

$$\sigma_{pp} \equiv Z^2(E - 1.02) \dots\dots\dots(2.39)$$



รูปที่ 2.10 ค่า  $\sigma_{pp}$  ของตะกั่วที่พลังงานต่างๆ<sup>[6]</sup>

เมื่อเปรียบเทียบโอกาสการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะได้ว่าที่พลังงานต่ำประมาณ 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV จะมีโอกาสเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์มากที่สุด ส่วนที่พลังงานประมาณ 0.1 MeV ถึง 10 MeV จะมีโอกาสเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์มากที่สุด และพลังงานที่สูงกว่า 1.02 MeV ขึ้นไปจะสามารถเกิดแพร์โปรดักชันได้ และจะมีโอกาสในการเกิดมากขึ้นเมื่อพลังงานสูงๆ



รูปที่ 2.11 โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน<sup>[7]</sup>

นอกจากอันตรกิริยาที่สำคัญทั้งสาม จะขอล่าวถึง อันตรกิริยาบางแบบที่เกิดขึ้นกับรังสีแกมมา แล้วทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของรังสีแกมมา หรือการดูดกลืนรังสีแกมมา ในแบบอื่น ถึงแม้ว่าจะไม่มีผลต่อการดูดกลืนรังสีแกมมามากนักก็ตาม ได้แก่<sup>[9]</sup>

(i) การกระเจิงเรย์ลี (Rayleigh Scattering) เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้นในกรณีที่โฟตอนตกกระทบกับอิเล็กตรอน แล้วพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับไม่เพียงพอที่จะทำให้มันหลุดออกไปจากอะตอมได้ เกิดกับโฟตอนพลังงานต่ำ และตัวดูดกลืนที่มีเลขอะตอมสูงๆ

(ii) การกระเจิงทอมสัน (Thomson Scattering) เรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่าการกระเจิงคอมป์ตันกับนิวเคลียส (nuclear Compton scattering) เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนกับนิวเคลียส แต่เนื่องจากนิวเคลียสมีมวลมาก การกระเจิงของทอมสันจึงมีผลน้อยมาก

(iii) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับนิวเคลียส (Nuclear Photoelectric Effect) โฟตอนพลังงานสูงอาจถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียส เป็นผลให้นิวคลีออนหลุดออกมาจากนิวเคลียส กระบวนการนี้เกิดกับนิวเคลียสที่มีเลขอะตอมสูงๆ

## 2.4 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) <sup>[6]</sup>

เป็นสัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีแกมมา ถ้าให้  $\sigma$  เป็นภาคตัดขวางรวม (total cross section) ต่ออะตอมของตัวกลาง ดังนั้น

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

คูณค่าความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง (N) เข้าไปในสมการ (2.40) จะได้

$$N\sigma = N(\sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c) \quad \dots\dots\dots(2.41)$$

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

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_c \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

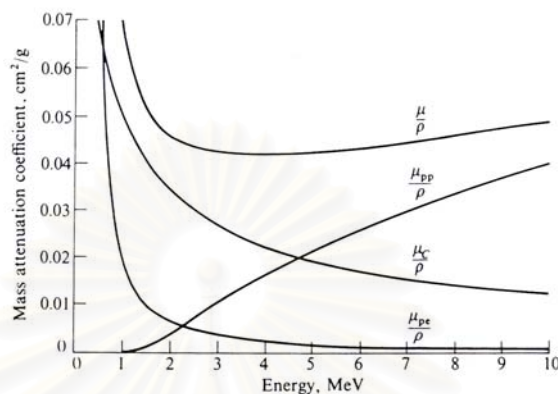
เมื่อ  $\mu$ ,  $\mu_{pe}$ ,  $\mu_{pp}$  และ  $\mu_c$  เป็น สัมประสิทธิ์การลดทอนรวม และของอันตรกิริยาแบบ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ แพริโฟรตักชันและการกระเจิงคอมป์ตันตามลำดับ ค่า  $\mu$  นี้มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเรียก  $\mu$  ว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น” (linear attenuation coefficient) ในการคำนวณเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน มักจะพบค่า  $\mu$  ใน เทอมของ ( $\mu/\rho$ ) ซึ่งได้จากการนำค่าความหนาแน่น,  $\rho$  (physical density) ของตัวกลางไปหารค่า  $\mu$

ค่า ( $\mu/\rho$ ) นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล” (mass attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  จากสมการที่ (2.42) จะได้

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

รูปที่ 2.12 แสดงค่า  $\mu/\rho$  ของตะกั่ว จะเห็นได้ว่าค่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_c/\rho$  ลดลงเมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ส่วนค่า  $\mu_{pp}/\rho$  จะเริ่มที่พลังงาน 1.02 MeV และสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ถ้าพิจารณา ( $\mu/\rho$ ) รวม จะพบว่าที่พลังงานรังสีแกมมาเท่ากับ 3.5 MeV ค่า ( $\mu/\rho$ ) รวมมีค่าต่ำสุด ในช่วงพลังงาน 0.5 ถึง 5 MeV ค่า  $\mu_c/\rho$  ของตะกั่วจะสูงกว่า  $\mu_{pe}/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  กล่าวคือในช่วงพลังงานดังกล่าวอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton scattering) เนื่องจากค่า  $\sigma_{pe}$  และ  $\sigma_{pp}$  ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวกลาง

อย่างมาก 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



รูปที่ 2.12 ค่า  $\mu/\rho$ ,  $\mu_{pe}/\rho$ ,  $\mu_c/\rho$  และ  $\mu_{pp}/\rho$  ของตะกั่ว [6]

ในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า 1.02 MeV ค่า  $\mu_{pp}/\rho$  จะเท่ากับ 0 ดังนั้น  $(\mu/\rho)$  รวมจะเท่ากับ  $\mu_{pe}/\rho + \mu_c/\rho$  และในช่วงที่  $\mu_c/\rho$  มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่า  $\mu_{pe}/\rho$  และค่า  $\mu_{pp}/\rho$  จะได้

$$\frac{\mu}{\rho} \cong \frac{\mu_c}{\rho} = \frac{N\sigma_c}{\rho} \dots\dots\dots(2.44)$$

แทนค่า ความหนาแน่นอะตอม,  $N = \frac{\rho N_A}{M}$  ในสมการที่ (2.44) จะได้

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A \sigma_c}{M} = N_A \left( \frac{Z}{M} \right)_e \sigma_c \dots\dots\dots(2.45)$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักของอะตอม (g)

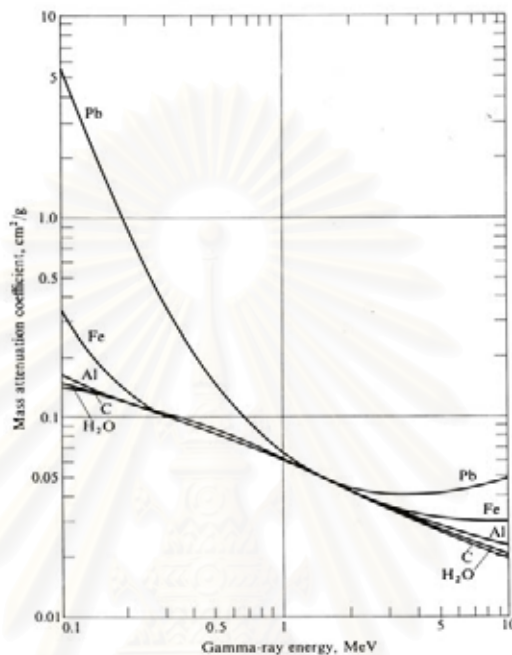
ค่า  $Z/M$  มีค่าประมาณ 1/2 ยกเว้นไฮโดรเจน และธาตุหนักๆ ดังนั้น

$$\frac{\mu}{\rho} \cong \frac{1}{2} N_A \sigma_c \dots\dots\dots(2.46)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน (Compton cross section per electron)



จากสมการที่ 2.46 จะเห็นได้ว่าในช่วงการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) เด่นเมื่อเทียบกับโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) และแพร์โปรดักชัน (pair production) นั้น ค่า  $\mu/\rho$  ของธาตุเกือบทุกธาตุจะมีค่าเท่าๆกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.13 โดยเฉพาะในช่วงพลังงาน 1 –2 MeV



รูปที่ 2.13 ค่า  $\mu/\rho$  ของธาตุบางชนิด [6]

ค่า  $\mu$  และ  $\mu/\rho$  ของของผสมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_{total} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + K K \quad \dots\dots\dots(2.47)$$

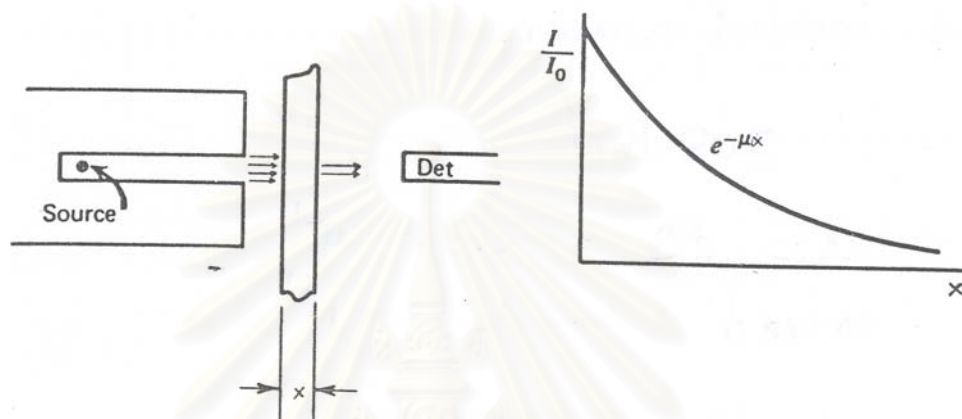
เมื่อ  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) ของธาตุที่ 1, 2, 3 ..... ในของผสม ตามลำดับ และ

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{total} = 0.01 \left[ w_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + w_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + K K \right] \quad \dots\dots(2.48)$$

เมื่อ  $(\mu/\rho)_1, (\mu/\rho)_2, \dots$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ของธาตุที่ 1, 2, ..... ในส่วนผสมและ  $W_1, W_2, \dots$  เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่ 1, 2, ..... ตามลำดับ

ระยะทางเฉลี่ยอิสระ (mean free path;  $\lambda$ ) ของรังสีแกมมาในตัวกลางมีค่าเท่ากับส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (mean free path หมายถึงระยะทางเฉลี่ยที่รังสีจะเคลื่อนไปได้ในตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ)

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \text{ cm} \quad \dots\dots\dots(2.49)$$



รูปที่ 2.14 การทะลุผ่านของรังสีแกมมา <sup>[7]</sup>

ถ้ามีรังสีแกมมาพลังงานเดียว (monoenergetic  $\gamma$ -ray) มีความเข้ม  $I_0$  ( $\gamma$ -rays/cm<sup>2</sup>-s) ตกกระทบเป้าหมายหนา  $x$  ซม. ความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับเป้าเลยจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-(\mu x)} \quad \dots\dots\dots(2.50)$$

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad \dots\dots\dots(2.51)$$

เมื่อ  $I$  คือความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัสดุหนา  $x$  ไปโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ และค่า  $\rho x$  นี้เรียกว่า “ความหนาแน่นเชิงมวล (density thickness)” มีหน่วยเป็น g/cm<sup>2</sup>



2.5 การถ่ายเทพลังงาน (Energy Deposition) ในตัวกลาง <sup>[6]</sup>

เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I ตกกระทบเป้า ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) เท่ากับ  $\mu$  สามารถคำนวณหาอัตราการเกิดอันตรกิริยาต่อหน่วยปริมาตร , F (interactions/cm<sup>3</sup>-s) ได้จาก

$$F = I\mu \quad \dots\dots\dots(2.52)$$

ถ้า E เป็นพลังงานของรังสีแกมมาในหน่วย MeV ค่าอัตราพลังงานที่รังสีแกมมา ถ่ายเทให้กับเป้าต่อหน่วยปริมาตรจะหาได้จาก

$$EF = EI\mu \quad \dots\dots\dots(2.53)$$

ทั้งอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์(photoelectric effect) และแพริโพรดัคชัน(pair production) ถือว่าพลังงานทั้งหมดถ่ายเทในตัวกลาง ยกเว้นในกรณีในตัวกลางบางมาก สำหรับการชนแบบคอมป์ตัน (compton scattering) พลังงานที่ถ่ายเทในตัวกลาง คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน(ในที่นี้คือ recoil electron)

ถ้าให้ T เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของ recoil electron ดังนั้นพลังงานเฉลี่ยที่ถ่ายเทในตัวกลางโดยการชนแบบคอมป์ตัน คือ  $T I \mu_c$

ถ้าให้  $\sigma_c$  เป็นภาคตัดขวางของการชนแบบคอมป์ตัน (compton cross section) ต่ออะตอมของตัวกลาง จะได้

$$E\sigma_c = T\sigma_c \quad \dots\dots\dots(2.54)$$

$$E\mu_c = T\mu_c \quad \dots\dots\dots(2.55)$$

ค่าพลังงานที่ถ่ายเทในตัวกลางโดยการชนแบบคอมป์ตัน ก็สามารถคำนวณได้จาก

$$(EF)_c = EI\mu_c \quad \dots\dots\dots(2.56)$$

เมื่อ  $(EF)_c$  เป็นอัตราการถ่ายเทพลังงานในตัวกลางเนื่องจากการชนแบบคอมป์ตัน, MeV/cm<sup>3</sup>-s

ถ้า  $W$  เป็นพลังงานทั้งหมดที่ถ่ายเทในตัวกลางต่อหน่วยเวลาต่อปริมาตร จะได้

$$\begin{aligned} W &= EI(\mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_c) \\ &= EI\mu_a \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.57)$$

เมื่อ  $\mu_a = \mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_{ca}$  เรียก  $\mu_a$  ว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (linear absorption coefficient)” มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) ทำนองเดียวกัน ค่า  $(\mu_a/\rho)$  จะเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass absorption coefficient)” มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$

ถ้า  $\rho$  เป็นความหนาแน่น (physical density) ของตัวกลาง  $EI(\mu_a/\rho)$  จะเป็นอัตราการถ่ายเทพลังงานของรังสีแกมมาในตัวกลางต่อหน่วยน้ำหนัก ( $\text{MeV}/\text{g}\cdot\text{s}$ )

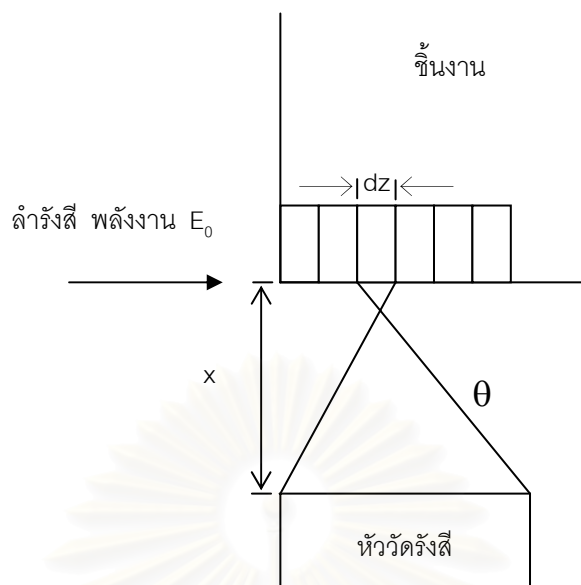
ค่า  $EI$  มีชื่อเรียกว่า “energy flux” มีหน่วยเป็น  $\text{MeV}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$

## 2.6 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี<sup>[3]</sup>

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่ประยุกต์การกระเจิงคอมป์ตันมาใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยอาศัยการวัดการกระจายพลังงานของคอมป์ตันสแกตเทอริงที่กระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี ให้  $\theta$  เป็นมุมที่รังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี  $E$  และ  $E'$  คือพลังงานของรังสีแกมมาก่อนและหลังการกระเจิงตามลำดับ พลังงานของรังสีแกมมาหลังการกระเจิง (keV) จะหาได้จากสมการ (2.58)

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{511}(1 - \cos\theta)} \quad \dots\dots\dots(2.58)$$

พิจารณาในกรณีนี้ที่หัววัดรังสีวางห่างจากต้นกำเนิดรังสี (ลำรังสีแคบจากรังสีแกมมาพลังงานเดียว) เป็นระยะ  $x$  ถ้าตัวอย่างที่มีเนื้อเดียวกันหมดยาว  $dz$  วางอยู่ในทางเดินลำรังสี รังสีแกมมาจะกระเจิงจากชิ้นงานเข้าสู่หัววัดรังสี ถ้าพิจารณาว่ารังสีแกมมาที่เข้าสู่หัววัดรังสีมีการกระเจิงเพียงครั้งเดียว จำนวนโฟตอนที่กระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีด้วยมุม  $\theta$  ,  $N(\theta)$  สามารถหาได้จากสมการ (2.59)



รูปที่ 2.15 การกระเจิงของรังสีแกมมาจากชั้นงานเข้าสู่หัววัดรังสี

$$N(\theta)d\theta = I_0 A_0 \frac{\rho N_0 Z_n}{M} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta \delta\phi dz \quad \dots(2.59)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมที่รังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี

$I_0$  คือ จำนวนโฟตอนในลำรังสี ( photon/cm-s )

$A_0$  คือ พื้นที่ของลำรังสี (cm<sup>2</sup>)

$Z_n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่ออะตอม ในตัวอย่าง

$N_0$  คือ เลขอะโวกาโดร

$M$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่าง (g/mol)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (g/cm<sup>3</sup>)

$\sigma(\theta)$  คือ ภาคตัดขวางจุดภาคของการกระเจิงที่มุม  $\theta$  ต่ออิเล็กตรอน (cm<sup>2</sup>)

$\delta\phi$  คือ มุมอะซิมุท

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปีคือ การนำคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของชั้นงาน 2 ชั้นงานมาลบกัน ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จะเรียกว่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม หากชั้นงานนั้นเหมือนกันทุกประการดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อชั้นงานนั้นแตกต่างกันดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมก็จะแสดงถึงความต่างนั้น ถ้าให้ชั้นงาน 2

ชั้นงานนั้นคือ ชั้นงานอ้างอิงและชั้นงานตัวอย่าง จำนวนโฟตอนที่กระเจิงจากชั้นงานตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีที่มุม  $\theta$ ,  $N_1(\theta)$  จะหาได้จากสมการ (2.60)

$$N_1(\theta)d\theta = \frac{I_0 A_0 N_0 Z_n}{M} \int_0^D [\rho_1(z) \exp(-\mu_1 z) \times \exp(-\mu'_1 z') \sigma(\theta) d\Omega] dz \dots\dots(2.60)$$

เมื่อ D คือ ความยาวของลำรังสีที่มาตกกระทบในชั้นงานอ้างอิงและชั้นงานตัวอย่าง

$\mu, z$  คือ สัมประสิทธิ์ลดทอนและระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางก่อนการกระเจิง

$\mu', z'$  คือ สัมประสิทธิ์ลดทอนและระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางหลังการกระเจิง

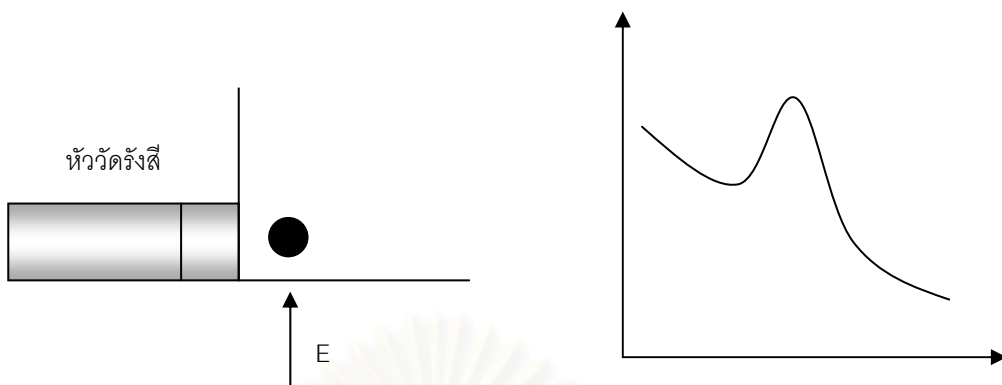
และจำนวนโฟตอนที่กระเจิงจากชั้นงานตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีที่มุม  $\theta$ ,  $N_2(\theta)$  จะหาได้จากสมการ

$$N_2(\theta)d\theta = \frac{I_0 A_0 N_0 Z_n}{M} \int_0^D [\rho_2(z) \exp(-\mu_2 z) \times \exp(-\mu'_2 z') \sigma(\theta) d\Omega] dz \dots\dots(2.61)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างชั้นงานอ้างอิงและชั้นงานตัวอย่าง คือ

$$(N_1 - N_2)(\theta)d\theta = \frac{I_0 A_0 N_0 Z_n}{M} [\delta \rho_d(z) \exp(-\mu_d z) \times \exp(-\mu'_d z') \sigma(\theta) \delta \Omega \delta z] dz$$

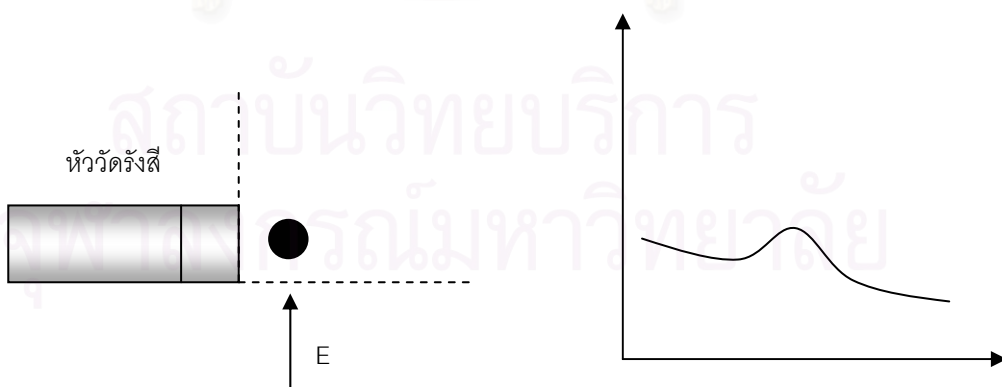
ในการวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พิจารณาเมื่อเสาคอนกรีตอ้างอิงและเสาคอนกรีตตัวอย่างมีลักษณะเหมือนกันทุกประการยกเว้นสิ่งที่ต้องการศึกษาคือ ขนาด ตำแหน่งหรือสภาพของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีต ดังนั้นดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างเสาคอนกรีตอ้างอิงและเสาคอนกรีตตัวอย่างก็จะแสดงถึงขนาด ตำแหน่งหรือสภาพของเหล็กที่แตกต่างนั้น ดังรูป 2.16



ก. คอมพิวเตอร์สแกตเตอร์ริงสเปกตรัมจากชิ้นงานตัวอย่าง



ข. คอมพิวเตอร์สแกตเตอร์ริงสเปกตรัมจากชิ้นงานอ้างอิง



ค. ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (ก -ข)

รูปที่ 2.16 การสร้างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม

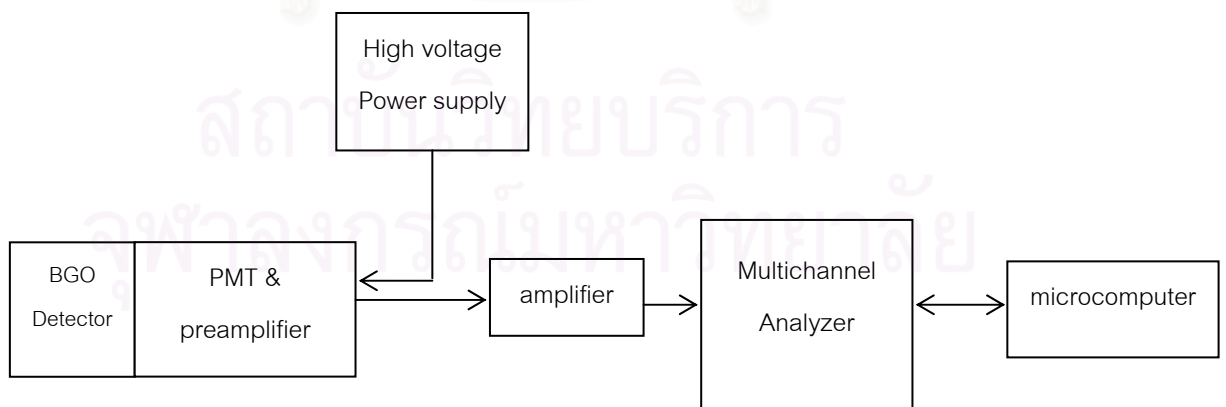
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ความแรงรังสี 5.5 มิลลิวูรี่
2. ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม.
3. หัววัดรังสีซิลิเกตเลชันชนิด BGO (Bismuth germanate) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว  
ของ BICRON MODEL 2M2BGO/2
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ( High Voltage Power Supply ) ของ ORTEC  
MODEL 456
5. PMT & Preamplifier ของ BICRON MODEL PA-14
6. Amplifier ของ CANBERRA MODEL 2022
7. เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องพลังงาน (MCA) CANBERRA SERIES 35  
PLUS
8. ไมโครคอมพิวเตอร์
9. ตะกั่วกำบังรังสี



รูปที่ 3.1 การจัดอุปกรณ์และระบบวัดรังสีแกมมา

### 3.2 การจัดระบบวัดรังสี

ระบบวัดรังสีมีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างมาก ส่วนประกอบสำคัญในระบบวัดรังสีได้แก่ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาคือเสาคอนกรีตขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. ดังนั้นเพื่อลดปัญหาจากการรบกวนของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านจากต้นกำเนิดรังสีไปยังหัววัดรังสีเพื่อจะได้ตรวจวัดรังสีเฉพาะที่ผ่านการกระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีต จึงได้เลือกจัดหัววัดรังสีให้ทำมุม 90 องศากับต้นกำเนิดรังสี แล้วจัดหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี ซึ่งการเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีนั้นเป็นการเปลี่ยนมุมของรังสีที่กระเจิงเข้าหัววัดรังสีด้วย

#### 3.2.1 ต้นกำเนิดรังสี

การเลือกใช้ชนิดของต้นกำเนิดรังสีซึ่งต้องนำมาพิจารณาคือ พลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ควรเป็นช่วงที่มีโอกาสเกิดการกระเจิงคอมป์ตันสูงๆ และการกำบังรังสี

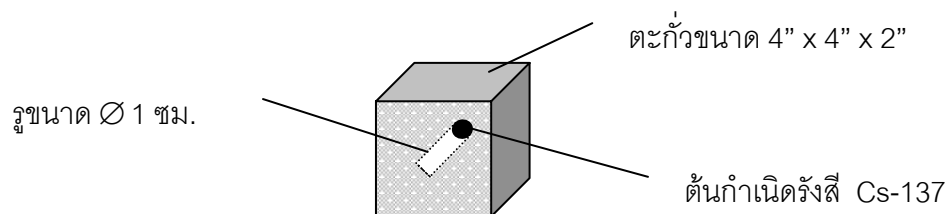
##### 3.2.1.1 การเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสี

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา  $^{137}\text{Cs}$  เนื่องจากเป็นต้นกำเนิดรังสีที่ให้รังสีแกมมาพลังงานเดียว (monoenergetic gamma-ray) คือ 662 keV ซึ่งอยู่ในช่วงพลังงานที่มีโอกาสเกิดการกระเจิงคอมป์ตันสูง ต้นกำเนิดรังสีแกมมา  $^{137}\text{Cs}$  ที่ใช้ความแรงรังสี 5.5 มิลลิวูรี บรรจุอยู่ภายในตะกั่วที่มีความกว้าง 4 นิ้ว ยาว 4 นิ้วและหนา 2 นิ้ว มีรูตรงกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 เซนติเมตร

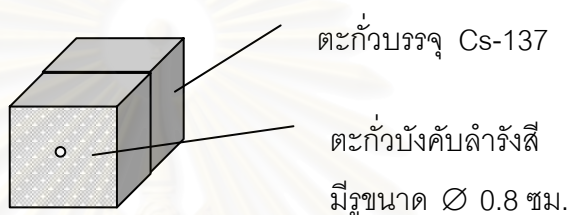
##### 3.2.1.2 การบังคับลำรังสีและกำบังรังสีของต้นกำเนิดรังสี

ดังรูป 3.2 พิจารณาลักษณะตะกั่ว 2 แบบที่นำมาใช้ในการบังคับลำรังสี คือ แบบที่ 1. ใช้ตะกั่วที่มีความกว้าง 4 นิ้ว ยาว 4 นิ้วและหนา 2 นิ้ว มีรูทะลุตรงกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร และแบบที่ 2. ใช้ตะกั่วที่มีความกว้าง 4 นิ้ว ยาว 8 นิ้วและหนา 2 นิ้ว จำนวน 2 แท่งนำมาวางเป็นช่องขนาด 1 เซนติเมตร

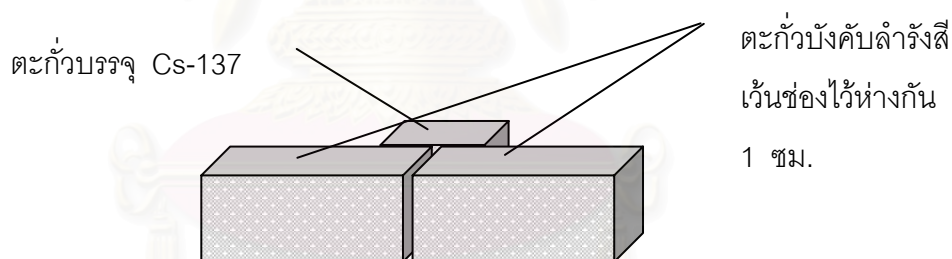




ก. ตะกั่วบรรจุต้นกำเนิดรังสี Cs-137



ข. ตะกั่วบังคับลำรังสีแบบที่ 1



ค. ตะกั่วบังคับลำรังสีแบบที่ 2

รูปที่ 3.2 การบังคับลำรังสี 2 แบบ

ในการวิจัยนี้เลือกใช้ตะกั่วบังคับลำรังสีแบบที่ 1 เนื่องจากต้องการจำกัดบริเวณที่มีผลต่อการเกิดการกระเจิงให้น้อยลง เพื่อสะดวกในการควบคุมการทดลองและในการตีความผลที่ได้ อย่างไรก็ตามการใช้ตะกั่วบังคับลำรังสีแบบที่ 2 มีข้อดีในทางปฏิบัติ 2 ประการคือ ประการแรกให้ค่าความเข้มของรังสีกระเจิงกลับสูงกว่ามาก ประการที่สองบริเวณที่มีผลต่อการกระเจิงกว้างกว่า อาจทำให้มีความไวสูงและเหมาะสมกับการตรวจสอบเบื้องต้น ก่อนการตรวจสอบเฉพาะบริเวณอีกครั้งหนึ่งหากพบข้อบกพร่องหรือผิดปกติ

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี เมื่อใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 1

ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
0	20836
0.5	-8962
1	-4986
1.5	1394
2	21983
2.5	58587
3	46925
3.5	18141
4	-18998
4.5	-30003

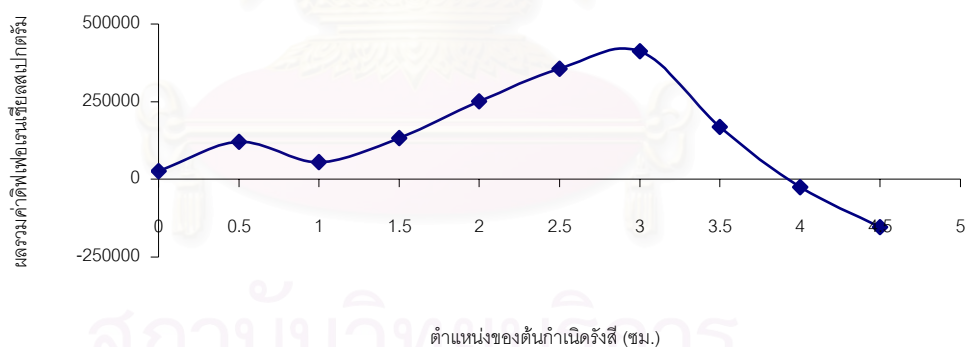


รูปที่ 3.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อบังคับลำรังสีแบบที่ 1

หมายเหตุ ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในรูปที่ 3.3 ได้จากการนำคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมจากเสาคอนกรีตมาตรฐานลบด้วยคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมจากเสาคอนกรีตตัน โดยใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 1 ในการจัดระบบวัดรังสีตามรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี เมื่อใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 2

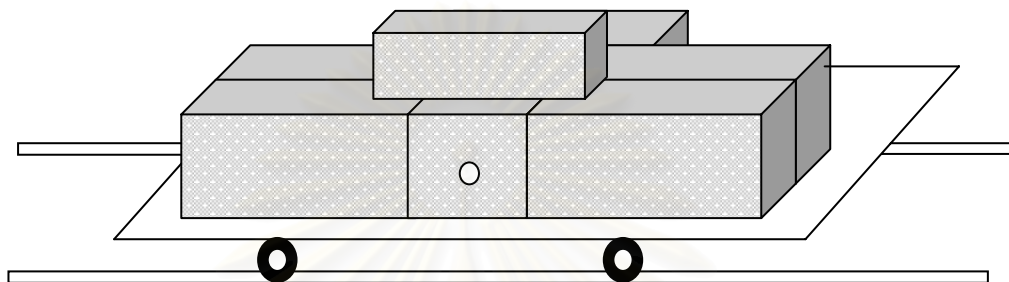
ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
0	26126
0.5	121288
1	54881
1.5	132460
2	251859
2.5	355327
3	412073
3.5	168001
4	-25561
4.5	-153133



รูปที่ 3.4 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อบังคับลำรังสีแบบที่ 2

หมายเหตุ ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในรูปที่ 3.4 ได้จากการนำคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมจากเสาคอนกรีตมาตรฐานลบด้วยคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมจากเสาคอนกรีตตัน โดยใช้การบังคับลำรังสีแบบที่ 2 ในการจัดระบบวัดรังสีตามรูปที่ 3.11

ส่วนการกำบังรังสีที่ต้นกำเนิดรังสีนั้นใช้แท่งตะกั่วขนาดกว้าง 4 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว และหนา 2 นิ้ว มาวางด้านข้าง ด้านหลังและด้านบนของต้นกำเนิดรังสี เมื่อนำการบังคับลำรังสีและการกำบังรังสีมารวมกันจะได้เป็นชุดต้นกำเนิดรังสี เพื่อให้ง่ายกับการเคลื่อนที่จึงวางชุดต้นกำเนิดรังสีบนรถขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ได้บนราง ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดต้นกำเนิดรังสีและกำบังรังสี

### 3.2.1.3 ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่าง

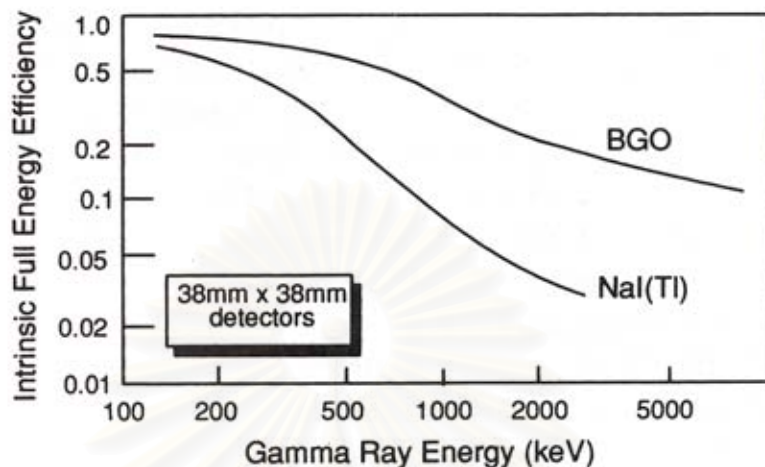
ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่างควรจัดวางให้มีระยะที่ใกล้ที่สุด เพื่อลดการสูญเสียความเข้มรังสีที่ตกกระทบตัวอย่างแล้วกระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสี ทั้งนี้ยังคงมีปัจจัยต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องกล่าวคือ การกำบังและบังคับลำรังสีจากต้นกำเนิดรังสี จากการเลือกใช้ตะกั่วกำบังและบังคับลำรังสีที่มีลักษณะเป็นรูเปิดขนาด 0.8 เซนติเมตร ทำให้ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่างเป็น 10 เซนติเมตร ระยะห่างนี้ยังช่วยลดการกระเจิงของรังสีเข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรงจากต้นกำเนิดรังสีได้อีกด้วย

## 3.2.2 หัววัดรังสี

### 3.2.2.1 การเลือกใช้หัววัดรังสี

จากการศึกษาตีฟเฟอเรนเซียลสเปกตรัมครั้งนี้พบว่าค่าที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นผลรวมของอัตราการนับที่ได้จากการกระเจิงที่มุมต่างๆ จากตัวอย่างเสาคอนกรีตเข้าสู่หัววัดรังสี จึงไม่ต้องการหัววัดที่มีความสามารถในการแยกพลังงานสูงๆ แต่ต้องการหัววัดที่มี

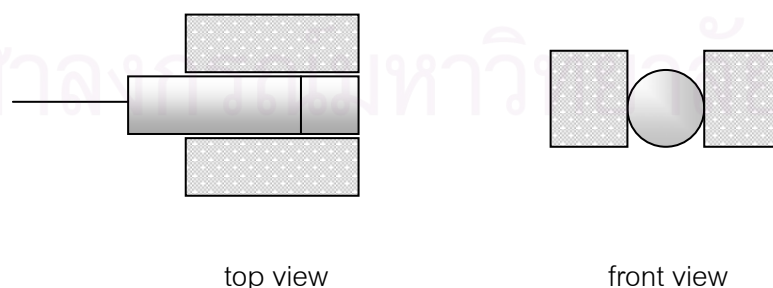
ประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูง เพื่อจะให้เห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้หัววัดรังสีชนิด BGO เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูง



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) และ BGO <sup>[4]</sup>

### 3.2.2.2 การกำบังรังสีของหัววัดรังสี

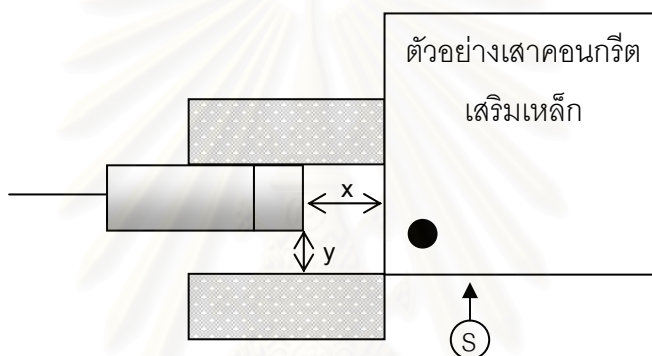
หัววัดรังสีที่ใช้เป็นหัววัดรังสีชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เมื่อนำไปวางในระบบวัดที่จัดไว้พบว่ามีแบคกราวด์สูงเนื่องจากรังสีจากต้นกำเนิดรังสี <sup>137</sup>Cs ที่ทะลุและกระเจิงเข้ามาด้านข้าง รวมทั้งรังสีจากสิ่งแวดล้อม จึงใช้ตะกั่วมากำบังรังสีโดยวางประกบด้านข้างของหัววัดรังสีทั้ง 2 ด้านพบว่าแบคกราวด์ลดลง ดังรูป 3.7 ส่วนด้านหน้าของหัววัดรังสีไม่มีการกำบังรังสีเนื่องจากต้องการให้หัววัดรังสีนับรังสีแกมมาที่กระเจิงมาจากตำแหน่งต่างๆกัน และมีความเข้มของรังสีที่กระเจิงสูงจึงเป็นการลดเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 3.7 การกำบังรังสีของหัววัดรังสี

### 3.2.2.3 ตำแหน่งของหัววัดรังสี

ตำแหน่งของหัววัดรังสีก็เช่นกันควรจัดวางให้มีระยะที่ใกล้ที่สุดเพื่อลดการสูญเสียความเข้มรังสีที่กระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี เนื่องจากหัววัดรังสีไม่มีการบังคับลำรังสีในด้านหน้าของหัววัดรังสี ตำแหน่งของหัววัดรังสีจึงเกี่ยวข้องกับปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา  $^{137}\text{Cs}$  ที่เข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรง จึงได้ศึกษาตำแหน่งของหัววัดรังสีโดยแบ่งเป็น ระยะ  $x$  และ  $y$  ในรูปที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบผลของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้ โดยคำนึงถึงค่าเดดไทม์ (dead time) ของระบบวัดรังสีและการลดลงของความเข้มรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสีเมื่อหัววัดรังสีอยู่ไกลจากตัวอย่างเสาคอนกรีตมากขึ้น สำหรับระยะ  $x$  ในรูปที่ 3.8 ที่นำมาศึกษาคือระยะ  $x$  เท่ากับ 0, 1, 2 และ 3 นิ้ว ส่วนระยะ  $y$  ในรูปที่ 3.8 ที่นำมาศึกษาคือระยะ  $y$  เท่ากับ 0, 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 นิ้ว

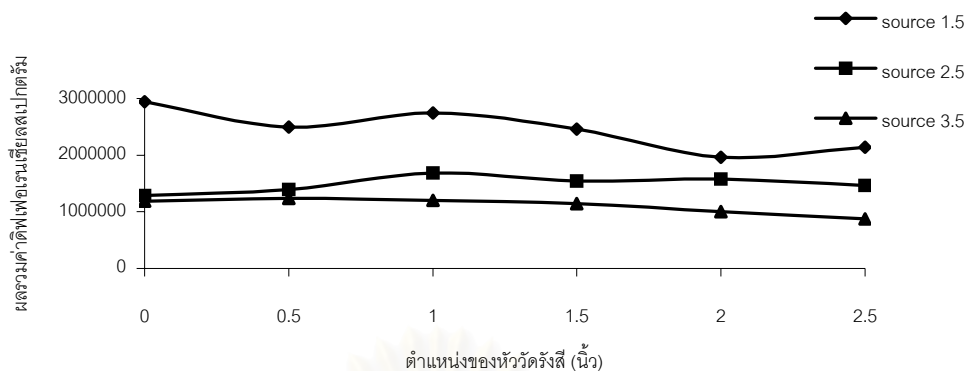


รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของหัววัดรังสี

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของหัววัดรังสี (ระยะ  $y$  ในรูปที่ 3.8) ที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสีต่างๆ

ตำแหน่งของหัววัดรังสี ระยะ $y$ (นิ้ว)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม		
	ระยะ $s = 1.5$ ซม.	ระยะ $s = 2.5$ ซม.	ระยะ $s = 3.5$ ซม.
0	2944742	1289800	1185886
0.5	2496181	1392533	1239524
1	2742915	1681429	1197945
1.5	2460204	1539696	1142428
2	1963520	1576116	1002273
2.5	2141324	1462728	873944

เมื่อ  $s$  คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของห้วัดรังสี (ระยะ y ในรูปที่ 3.8) ที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสีต่างๆ

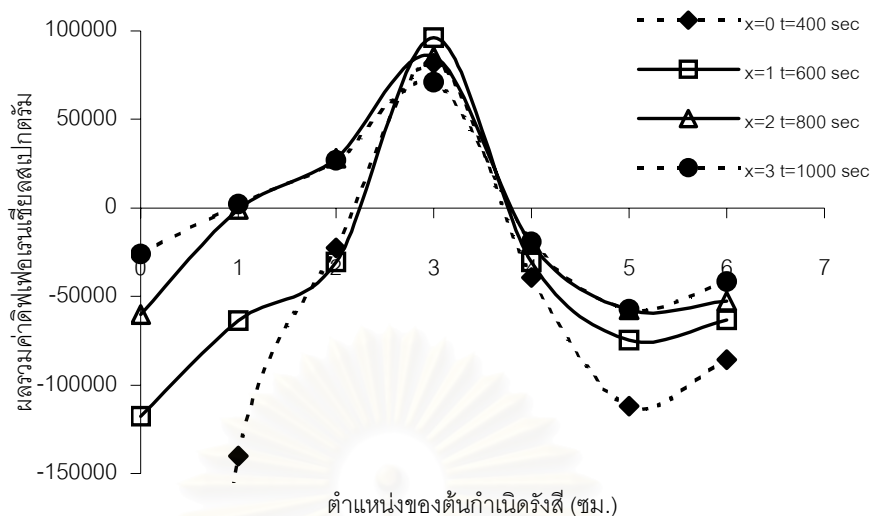
จะเห็นว่าเมื่อตำแหน่งของห้วัดรังสีในระยะ y เปลี่ยนไปผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเดียวกันมีค่าต่างกันไม่มากนัก จากรูป 3.8 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง y = 0 นิ้วนั้น จะสามารถวางตะกั่วเพื่อกำบังรังสีจากต้นกำเนิดรังสีที่จะเข้าสู่ห้วัดรังสีโดยตรงและรังสีจากแบคกราวนด์ได้สะดวกที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกตำแหน่งของห้วัดรังสีในระยะ y อยู่ติดกับตะกั่วกำบังรังสีของชุดต้นกำเนิดรังสีนั่นเอง

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีสัมพันธ์กับตำแหน่งของห้วัดรังสี (ระยะ x ในรูปที่ 3.8)

ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ซม.)	ผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม			
	x = 0 นิ้ว	x = 1 นิ้ว	x = 2 นิ้ว	x = 3 นิ้ว
0	-618918	-117502	-60297	-25773
1	-140087	-63598	-795	2293
2	-22571	-30386	28198	26925
3	81708	96237	85569	71014
4	-39161	-30702	-20073	-19091
5	-112008	-74570	-57654	-57007
6	-85707	-63386	-52602	-41399

เมื่อ x คือ ระยะระหว่างผิวหน้าของห้วัดรังสีกับผิวของตัวอย่างเสาคอนกรีตตามรูปที่ 3.8





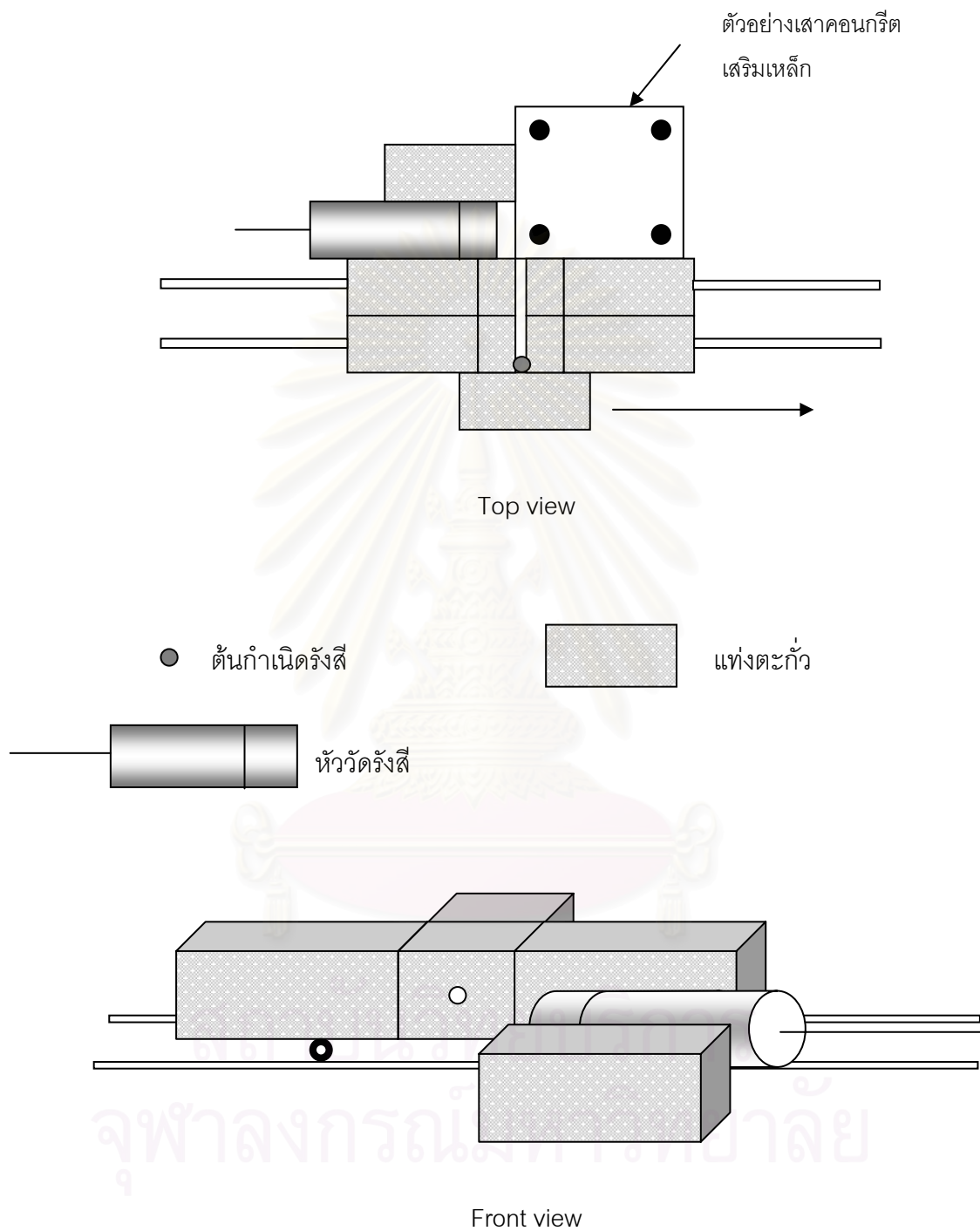
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิพโพลโมเมนต์เชิงเวกเตอร์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีสัมพันธ์ที่ระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีกับผิวของเสาคอนกรีตต่างๆกัน (ระยะ  $x$  ในรูปที่ 3.8)

เมื่อระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีกับตัวอย่างมากขึ้นอัตราการนับรังสีที่ได้จะลดลง เพื่อพิจารณาค่าผลรวมของดิพโพลโมเมนต์เชิงเวกเตอร์จึงได้เพิ่มเวลาที่ใช้ในการนับรังสี ดังนี้ ที่ระยะ  $x = 0$  นี้ใช้เวลา 400 วินาที ที่ระยะ  $x = 1$  นี้ใช้เวลา 600 วินาที ที่ระยะ  $x = 2$  นี้ใช้เวลา 800 วินาทีและที่ระยะ  $x = 3$  นี้ใช้เวลา 1000 วินาที จากรูป 3.10 จะเห็นว่าความไวต่อตำแหน่งและขนาดของเหล็กเส้นภายในนั้นที่ตำแหน่ง  $x = 0$  และ 1 นิ้ว ดีกว่าในตำแหน่งที่  $x = 2$  และ 3 นิ้ว แต่ที่ตำแหน่ง  $x = 0$  นิ้ว มีรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีเข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรง จึงมีผลทำให้ค่าเดดไทม์ของหัววัดรังสีมีค่าสูง จึงเลือกตำแหน่งที่  $x = 1$  นิ้วสำหรับใช้ในขั้นตอนต่อไป

### 3.2.3 การจัดระบบหัววัดรังสี

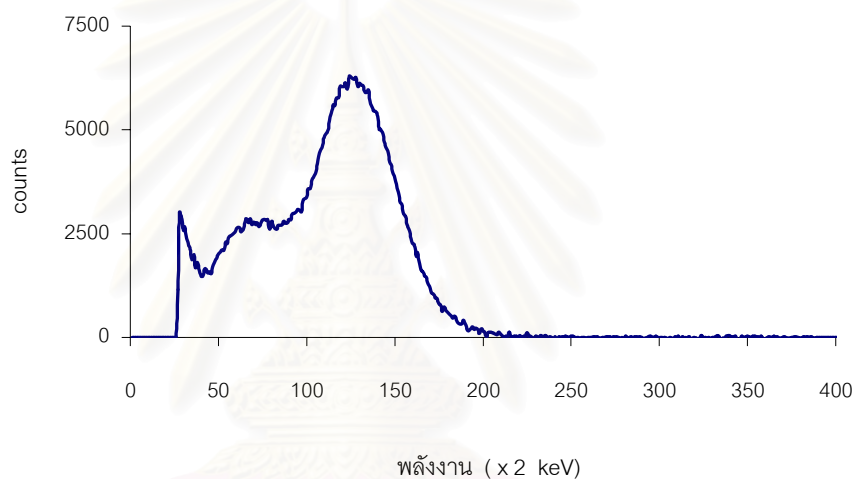
เมื่อได้ชนิดของหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสีที่จะใช้งานแล้ว มาพิจารณาที่ลักษณะของตัวอย่างเสาคอนกรีตเพื่อให้ง่ายกับการจัดระบบ จึงได้จัดให้ต้นกำเนิดรังสีทำมุมเป็นมุมฉากกับหัววัดรังสีคือเข้ามุมฉากของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพอดี หัววัดรังสีจะถูกจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนไม่เคลื่อนที่ ส่วนต้นกำเนิดรังสีจะมีการเคลื่อนที่ไปในแนวขนานกับ

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อศึกษาตีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้ในระยะเวลาต่างๆของเสา  
คอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป 3.11



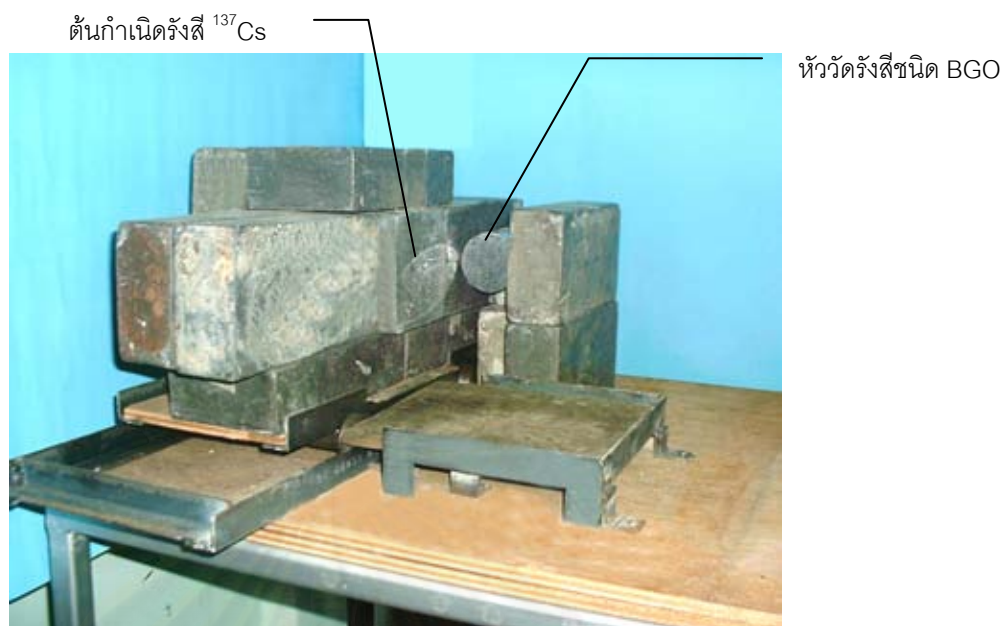
รูปที่ 3.11 แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีแกมมากระเจิงจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการจัดระบบวัดรังสีดังรูป 3.11 เมื่อตัวอย่างเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะจัดให้แนวกึ่งกลางของหัววัดรังสีอยู่ห่างจากขอบตัวอย่างด้านที่มีต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะ 2.5 เซนติเมตร ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่างเป็น 10 เซนติเมตรโดยที่ตะกั่วบังค้ำลำรังสีซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตรจะถูกวางอยู่ติดกับเสาคอนกรีตตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่าระบบวัดรังสีที่จัดขึ้นสามารถวัดรังสีที่กระเจิงจากตัวอย่างจะเข้าสู่หัววัดรังสีที่มุม 90 องศา จึงนำแท่งเหล็กมาวางโดยมีระยะระหว่างหัววัดรังสีถึงแท่งเหล็กเป็น 5 เซนติเมตรและระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงแท่งเหล็กเป็น 12.5 เซนติเมตร จากสเปกตรัมที่ได้จะแสดงถึงพลังงานที่กระเจิงจากแท่งเหล็กเข้าสู่หัววัดรังสี



รูปที่ 3.12 สเปกตรัมที่ได้จากการกระเจิงที่มุม 90 องศาของแท่งเหล็กใช้เวลาในการวัดรังสี 600 วินาที

จากรูป 3.12 พลังงานที่กระเจิงจากแท่งเหล็กเข้าสู่หัววัดรังสีคือพลังงานประมาณ 260 keV ซึ่งเป็นพลังงานที่แสดงถึงการกระเจิงจากมุม 100 องศา เนื่องจากการบังค้ำลำรังสีที่หน้าหัววัดรังสีและหัววัดรังสีที่ใช้มีประสิทธิภาพในการแยกพลังงานต่ำ จึงมีส่วนทำให้ค่าพลังงานที่กระเจิงมีค่าค่อนข้างกว้าง



(ก) ระบบวัดรังสี



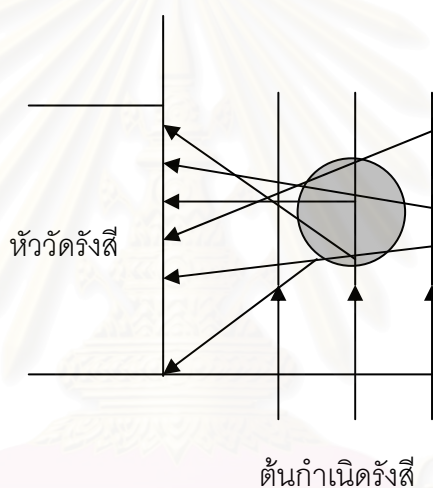
(ข) ระบบวัดรังสีเมื่อมีตัวอย่างเสาคอนกรีต

รูป 3.13 แสดงการจัดระบบวัดรังสี

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบการกักตัวของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี (Differential Gamma ray Scattering Spectroscopy, DGSS) โดยศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของสเปกตรัมที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตเมื่อขนาด ตำแหน่งและสภาพการกักตัวของเหล็กเส้นภายในต่างกัน สเปกตรัมที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตต้นและสเปกตรัมที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐาน\*

พิจารณารังสีที่ตกกระทบตัวอย่างจากต้นกำเนิดรังสีและกระเจิงผ่านตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี แบ่งเป็นกรณี 3 ใหญ่ๆ ดังรูป 3.14



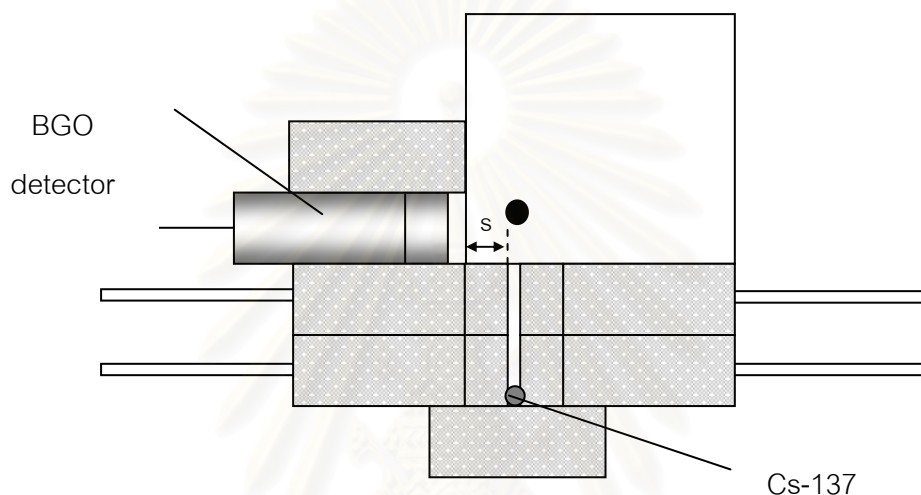
รูปที่ 3.14 การตกกระทบและการกระเจิงรังสีจากตัวอย่าง

กรณีที่ 1 รังสีตกกระทบคอนกรีตและกระเจิงผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าสู่หัววัดรังสี  
กรณีที่ 2 รังสีตกกระทบเหล็กเส้นภายในและกระเจิงผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าสู่หัววัดรังสี และกรณีที่ 3 รังสีตกกระทบเนื้อคอนกรีตและกระเจิงผ่านเหล็กเส้นและคอนกรีตเข้าสู่หัววัดรังสี จากทั้ง 3 กรณี ทำให้ความเข้มรังสีที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสีมีค่าต่างกัน นั่นคือสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ดังนั้นเมื่อนำสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีมาหักล้างกันระหว่างสเปกตรัมของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการตรวจสอบกับสเปกตรัมของ

\* ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐานในงานวิจัยครั้งนี้คือ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. ใช้เหล็กเส้นในการหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตรและวางลึกลงจากผิวคอนกรีตเป็นระยะ 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้ทำให้สามารถตรวจสอบได้ทั้งขนาด ตำแหน่งและสภาพการกัดกร่อนเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เพื่อศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในแต่ละตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีที่ระยะต่างๆ (ระยะ  $s$ ) ระบบวัดรังสีที่ใช้จึงมีการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดรังสีไปในแนวขนานกับตัวอย่างเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี

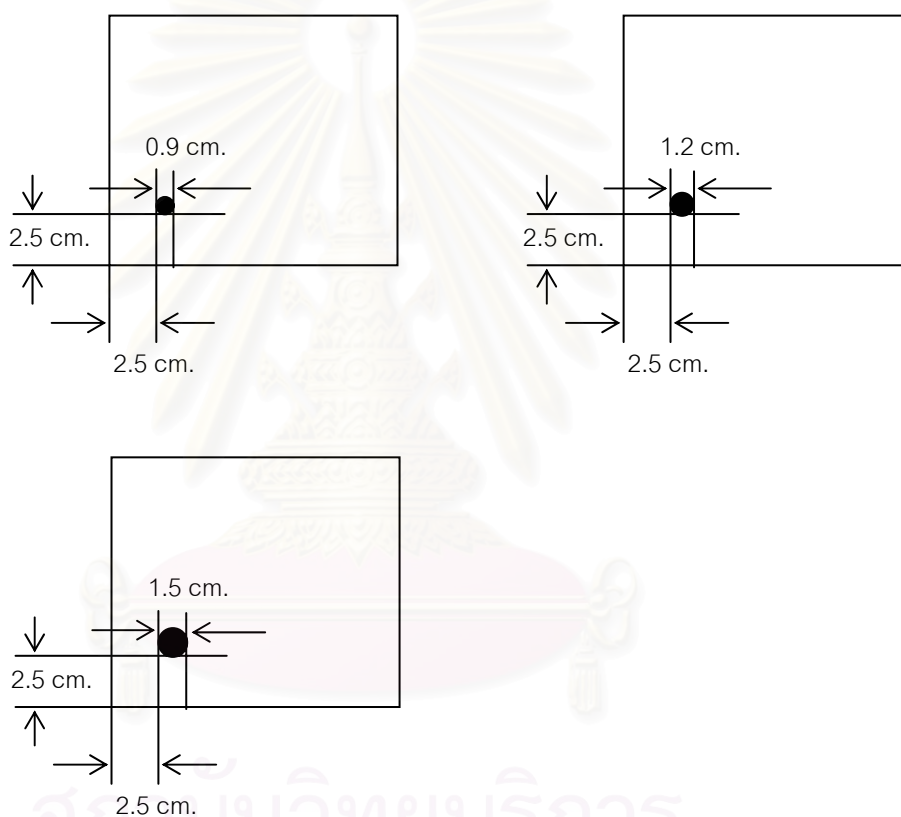
เมื่อนำค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในแต่ละตำแหน่งที่ต้นกำเนิดรังสีเคลื่อนที่ห่างจากขอบตัวอย่างมาสร้างกราฟสัมพันธ์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี กราฟที่ได้จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมซึ่งก็คือ ขนาด ตำแหน่งและสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั่นเอง ในการวิจัยนี้มีขั้นตอนการวิจัยดังนี้คือ

- ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อขนาดของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน
- ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน
- ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างกัน



3.3.1 ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อขนาดของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน

ในการศึกษาครั้งนี้เสาคอนกรีตข้างอิงเป็นเสาคอนกรีตต้นส่วนเสาคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบเป็นเสาคอนกรีตที่มีขนาดของเหล็กเสริมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 และ 1.5 เซนติเมตร ตำแหน่งของเหล็กแต่ละเส้นจากผิวคอนกรีตเท่ากันที่ 2.5 เซนติเมตร โดยเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งใช้เวลาในการนับรังสี 600 วินาที

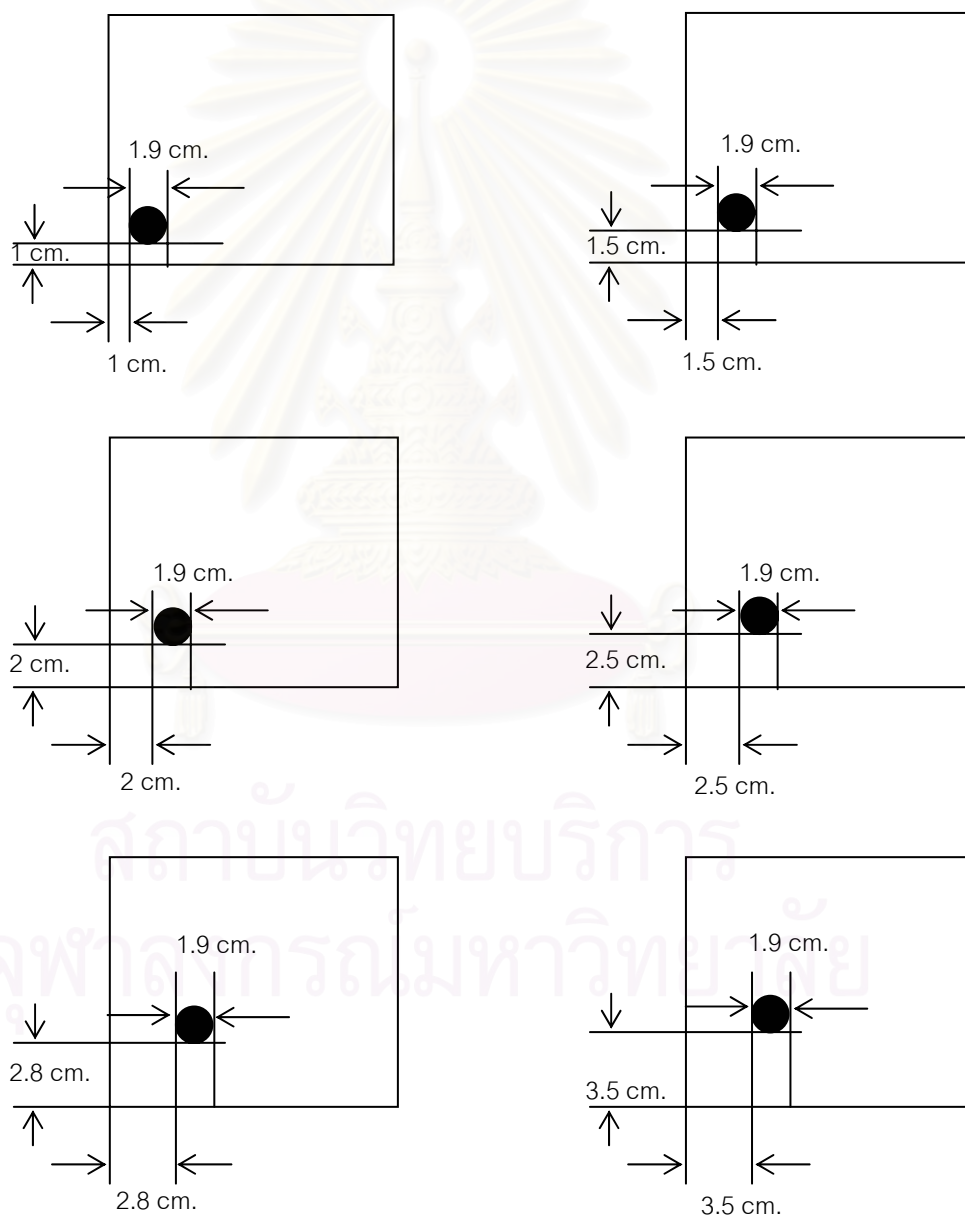


รูปที่ 3.16 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีขนาดของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆ  
กัน อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.



### 3.3.2 ศึกษาตีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน

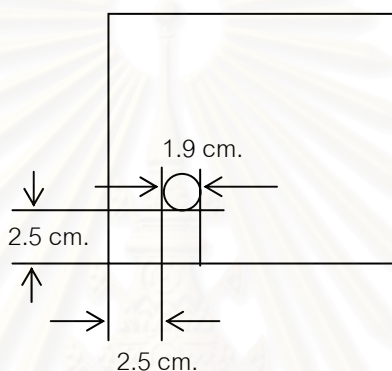
ในการศึกษาครั้งนี้เสาคอนกรีตข้างอิงเป็นเสาคอนกรีตต้นส่วนเสาคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งของเหล็กเส้นลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 1, 1.5, 2, 2.5, 2.8 และ 3.5 เซนติเมตร ขนาดของเหล็กเส้นที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร โดยเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งใช้เวลาในการนับรังสี 600 วินาที



รูปที่ 3.17 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ

### 3.3.3 ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างกัน

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะหล่อเป็นเสาคอนกรีตที่มีรูไว้สำหรับใส่แท่งเหล็กที่มีสภาพของเหล็กเส้นต่างกันอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 เซนติเมตร ขนาดของเหล็กเส้นที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร การทำให้สภาพของเหล็กเปลี่ยนไปทำได้โดยการทำให้เหล็กเกิดการกัดกร่อน เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นโลหะที่ไม่มีคุณสมบัติของโลหะเหลืออยู่



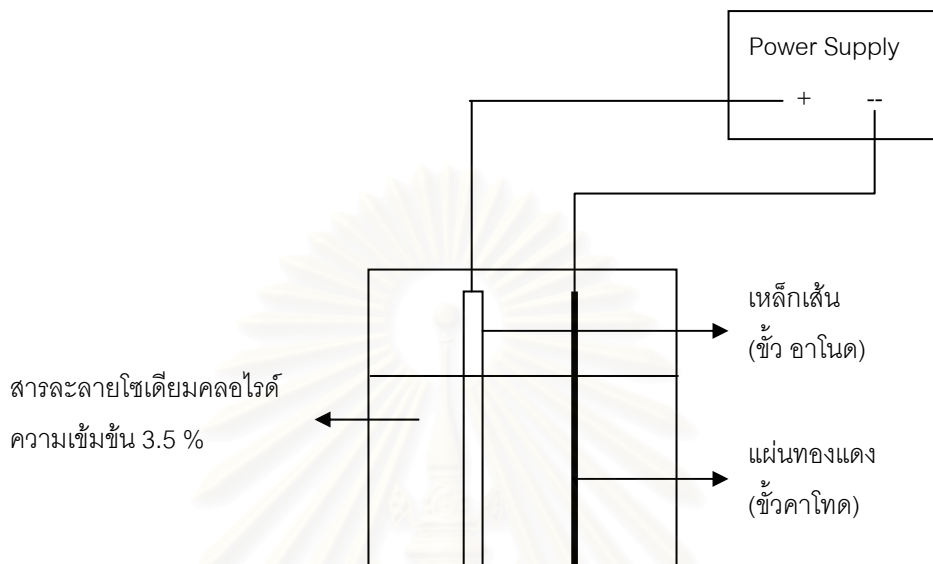
รูปที่ 3.18 แผนภาพตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างกัน

#### 3.3.3.1 การทำให้เหล็กเกิดการกัดกร่อน

ศึกษาเทคนิคที่ใช้ในการเร่งให้เกิดการกัดกร่อน คือเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่า เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) ดังรูป 3.19 ปริมาณการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับกระแสไฟที่จ่ายจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) และระยะเวลาที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระแสที่จ่ายให้กับวงจร 1.4 แอมแปร์ (A) หรือความเข้มกระแส (current density)  $10 \text{ mA/cm}^2$  เมื่อเวลาผ่านไป 7 ชั่วโมง น้ำหนักเหล็กจะลดลงประมาณ 10 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไปจะได้ค่าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะได้ออกมาจากการนำสเปกตรัมของเหล็กเส้นอ้างอิงลบออกจากสเปกตรัมของเหล็กเส้นที่เร่งให้เกิดการกัดกร่อน ผลที่ได้คือสภาพของเหล็กเส้นที่

เปลี่ยนไป ในการตรวจสอบสภาพของเหล็กเส้นนี้กำหนดให้เลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งใช้เวลาในการนับรังสี 2000 วินาที



รูปที่ 3.19 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อเร่งการกีดก่อน

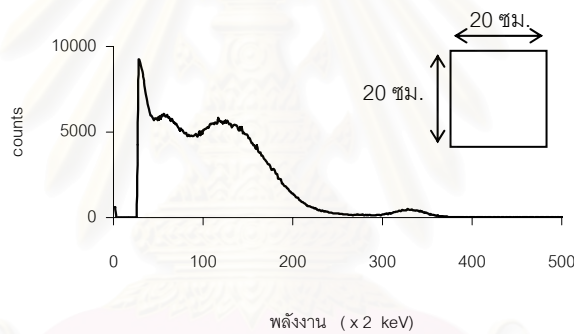
### 3.3.3.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสี

เนื่องจากตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีต่างกันดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้จะต่างกัน เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพเหล็กจึงได้ทดลองวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีต่างกันด้วย เพื่อพิจารณาตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีที่เหมาะสมที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของสภาพเหล็กได้ดี

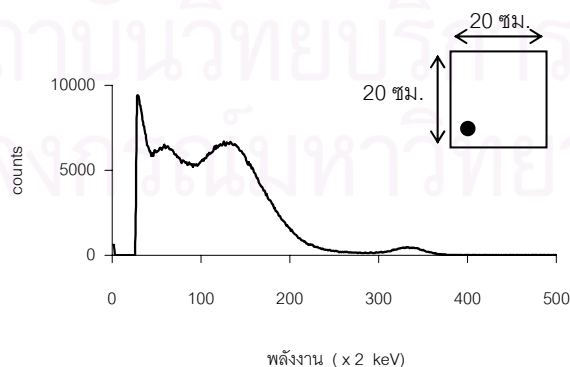
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากระบบวัดรังสีที่จัดขึ้นสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าสู่หัววัดรังสี โดยต้นกำเนิดรังสีแกมมา  $^{137}\text{Cs}$  ทำมุม 90 องศา กับหัววัดรังสี BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ในการศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมครั้งนี้จะศึกษาความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตอ้างอิงซึ่งเป็นเสาคอนกรีตต้นในการศึกษาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นภายในและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐานในการศึกษาสภาพของเหล็กเส้น และสเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงที่กระเจิงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีขนาด ตำแหน่งและสภาพของเหล็กเส้นภายในต่างกัน ลักษณะสเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงที่ได้จะมีลักษณะดังรูป 4.1 และ 4.2

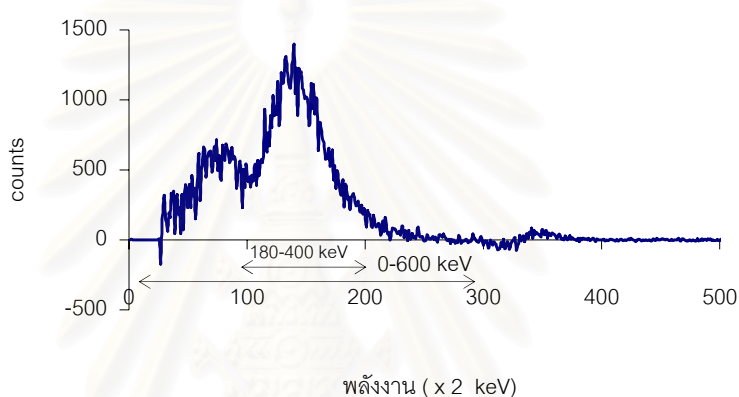


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตต้นขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม.



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของคอมป์ตันสแกตเทอริงจากตัวอย่างเสาคอนกรีตมาตรฐานขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม.

ในการหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะศึกษาค่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้สัมพันธ์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี โดยการเลือกช่วงพลังงานที่นำมาศึกษานั้นได้เลือกช่วงพลังงานมาศึกษาเปรียบเทียบกัน 2 ช่วงคือ ช่วงพลังงาน 0-600 keV และช่วงพลังงาน 180-400 keV จากรูป 4.4 และ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี จะเห็นว่าความไวต่อตำแหน่งและขนาดของเหล็กเส้นภายในนั้นไม่ต่างกัน ส่วนที่แตกต่างคือค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่มากขึ้นเมื่อช่วงพลังงานกว้างขึ้น ซึ่งทำให้เห็นความแตกต่างภายในได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นจึงเลือกช่วงพลังงาน 0-600 keV มาใช้ในการวิจัยนี้



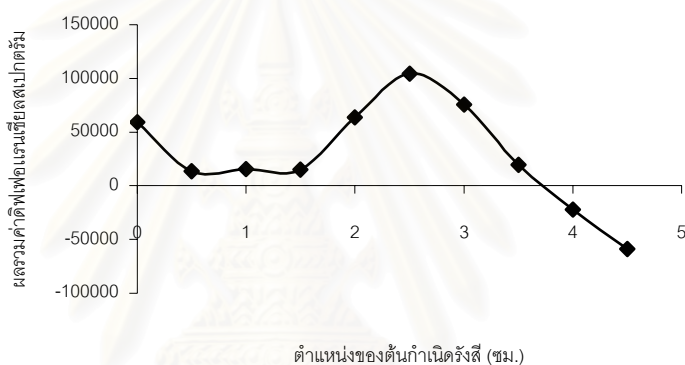
รูปที่ 4.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างเสาคอนกรีตต้นและเสาคอนกรีตมาตรฐานที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสี 2.5 ซม.

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 0-600 keV และในช่วงพลังงาน 180-400 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี

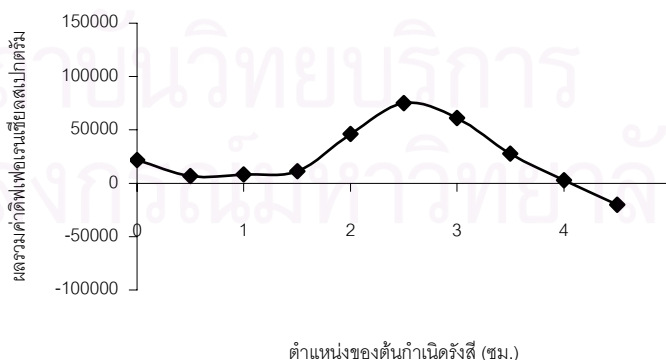
ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (0-600 keV)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (180-400 keV)
0	59071	21654
0.5	13730	6726
1	15628	8525
1.5	14846	11391
2	63921	46122
2.5	104520	75394

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 0-600 keV และในช่วงพลังงาน 180-400 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ต่อ)

ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี (ชม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (0-600 keV)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม (180-400 keV)
3	75359	61387
3.5	19351	27522
4	-22322	2613
4.5	-58791	-20223



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 0-600 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี



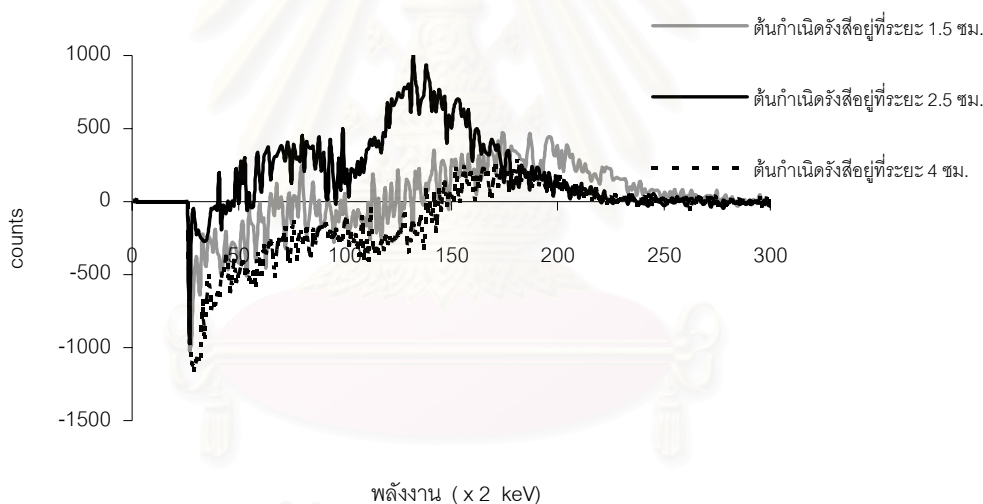
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในช่วงพลังงาน 180-400 keV กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี





#### 4.1 การศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อขนาดของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมได้จากการนำสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดของเหล็กเส้น 0.9, 1.2 และ 1.5 เซนติเมตร ลบด้วยสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตตัน โดยเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร ใช้เวลานับรังสีในแต่ละตำแหน่ง 600 วินาที ลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดต่างกันจะมีค่าทั้งลบและบวกขึ้นอยู่กับขนาดของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในและตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี เมื่อนำค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลมาสร้างกราฟสัมพันธ์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี จะทำให้ทราบขนาดของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในได้ ผลงานวิจัยมีดังต่อไปนี้



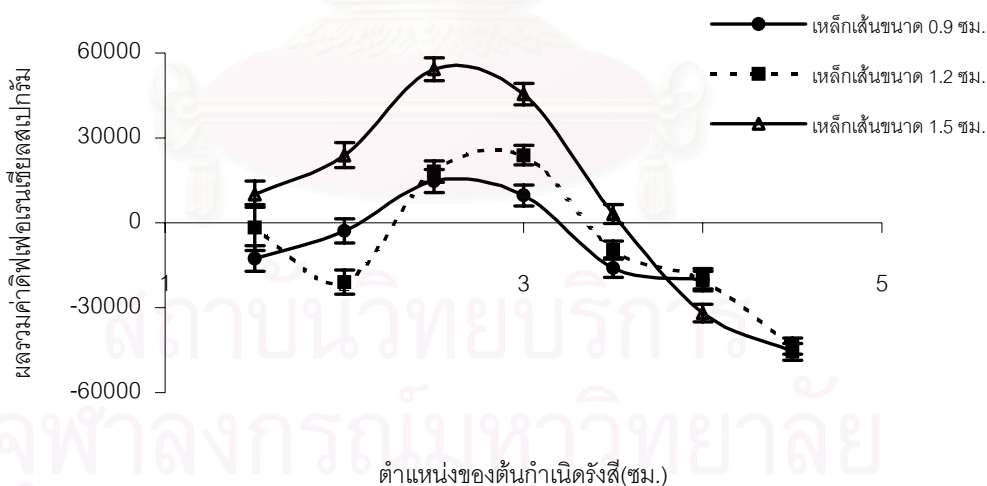
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

จากรูป 4.7 เมื่อเหล็กภายในมีขนาดใหญ่ขึ้นโอกาสในการเกิดการกระเจิงคอมป์ตันจะมากขึ้นตามลำดับ ส่วนขนาดของเหล็กเส้นภายในนั้นพิจารณาได้จากความกว้างของพีคจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมและระยะที่ต้นกำเนิดรังสีเคลื่อนที่ห่างจากขอบตัวอย่าง จะเห็นว่าเมื่อเหล็กมีขนาดใหญ่ความกว้างของพีคก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 และ 1.5 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม		
	เหล็กเส้นขนาด 0.9 ซม.	เหล็กเส้นขนาด 1.2 ซม.	เหล็กเส้นขนาด 1.5 ซม.
1.5	-12665 ± 4557	-1757 ± 8120	10091 ± 4580
2	-2832 ± 4261	-20940 ± 4242	23927 ± 4290
2.5	14703 ± 4004	18091 ± 3732	54217 ± 4048
3	9698 ± 3721	23876 ± 3450	45538 ± 3765
3.5	-15867 ± 3398	-9622 ± 3179	3082 ± 3423
4	-20192 ± 3164	-20170 ± 3965	-31971 ± 3147
4.5		-43566 ± 2960	-45498 ± 2957

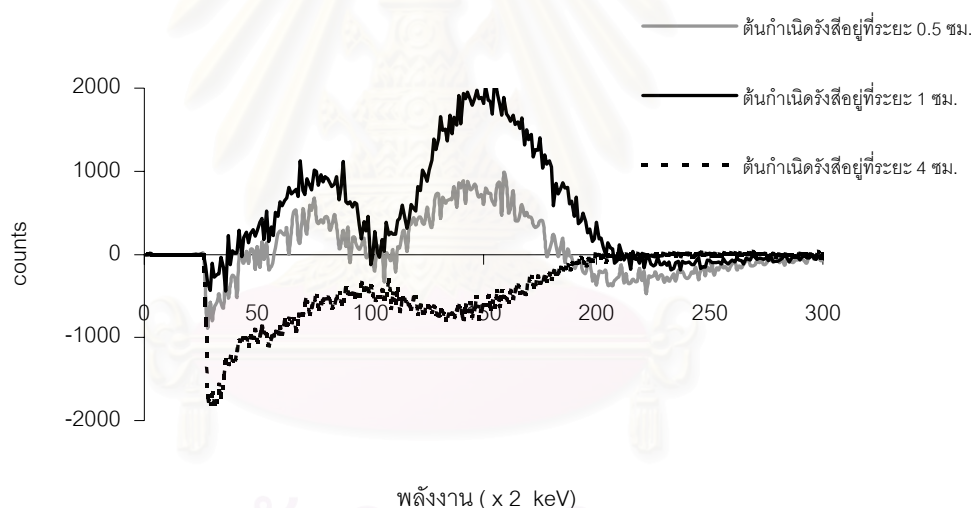
ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดีฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 และ 1.5 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

## 4.2 การศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกัน

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมได้จากการนำสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1, 1.5, 2, 2.5, 2.8 และ 3.5 เซนติเมตร ลบด้วยสเปกตรัมที่ได้จากเสาคอนกรีตตัน โดยเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร ใช้เวลานับรังสีในแต่ละตำแหน่ง 600 วินาที ลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งต่างกันจะมีค่าทั้งลบและบวกขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในและตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี เมื่อนำค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลมาสร้างกราฟสัมพันธ์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งทำให้เห็นตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในได้ ผลงานวิจัยมีดังต่อไปนี้



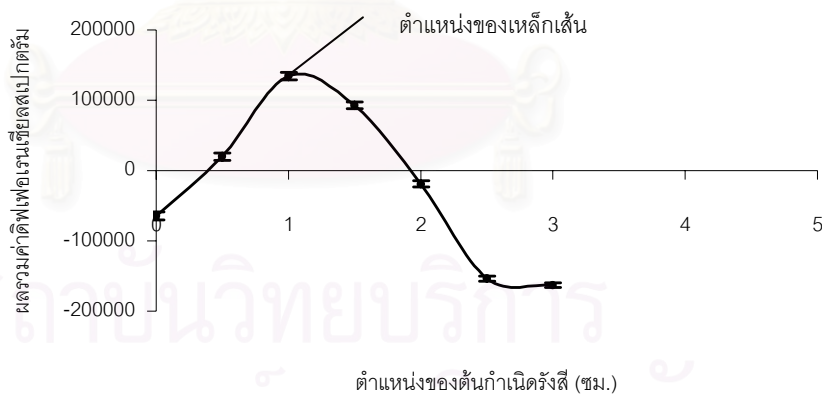
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม.

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม.

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
0	-64271 ± 5548
0.5	19976 ± 5322
1	134392 ± 5067
1.5	92599 ± 4660
2	-19081 ± 4243
2.5	-153425 ± 3811
3	-163001 ± 3508

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



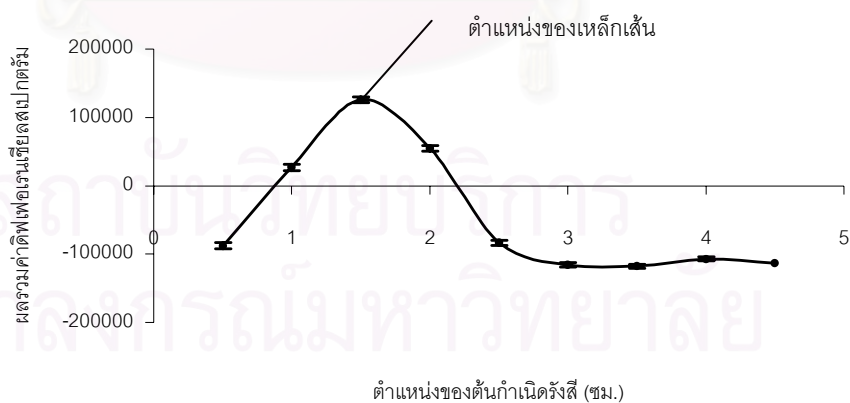
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม.

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1.5 ซม.

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1.5 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
0.5	-87715 ± 5230
1	26927 ± 4971
1.5	125482 ± 4692
2	54664 ± 4322
2.5	-83329 ± 3893
3	-115915 ± 3567
3.5	-117719 ± 3261
4	-107235 ± 3039
4.5	-113170 ± 2854

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



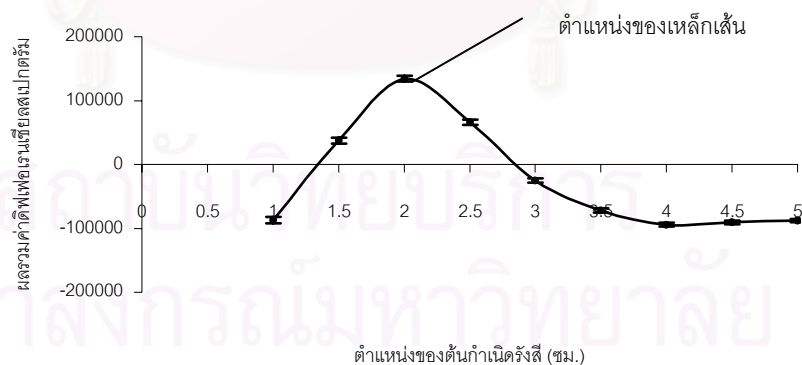
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1.5 ซม.

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2 ซม.

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
1	-87198 ± 4820
1.5	37345 ± 4513
2	134202 ± 4313
2.5	66106 ± 3965
3	-25245 ± 3604
3.5	-71607 ± 3291
4	-94356 ± 3060
4.5	-90625 ± 2842
5	-88061 ± 2667

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2 ซม.



เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
0.5	13730 ± 5317
1	15628 ± 4960
1.5	14846 ± 4584
2	63921 ± 4332
2.5	104520 ± 4105
3	75359 ± 3801
3.5	19351 ± 3445
4	-22322 ± 3163
4.5	-58791 ± 2939

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



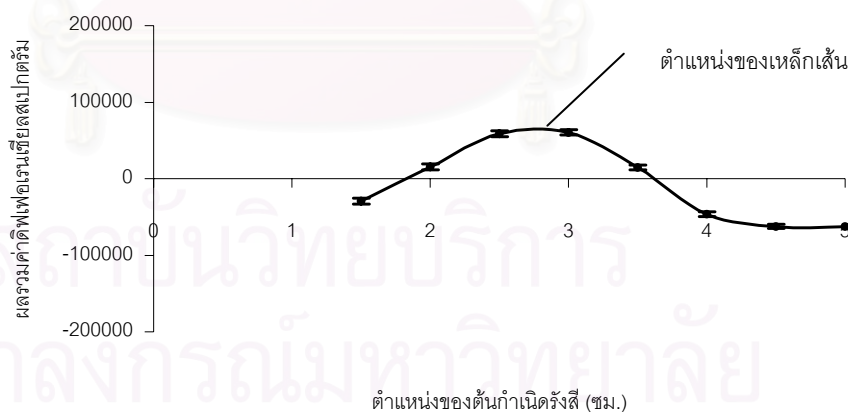
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.8 ซม.

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.8 ซม.

ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
1.5	-29397 ± 4446
2	15685 ± 4187
2.5	58612 ± 3957
3	60602 ± 3709
3.5	14757 ± 3407
4	-46425 ± 3130
4.5	-62263 ± 2887
5	-62379 ± 2710

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



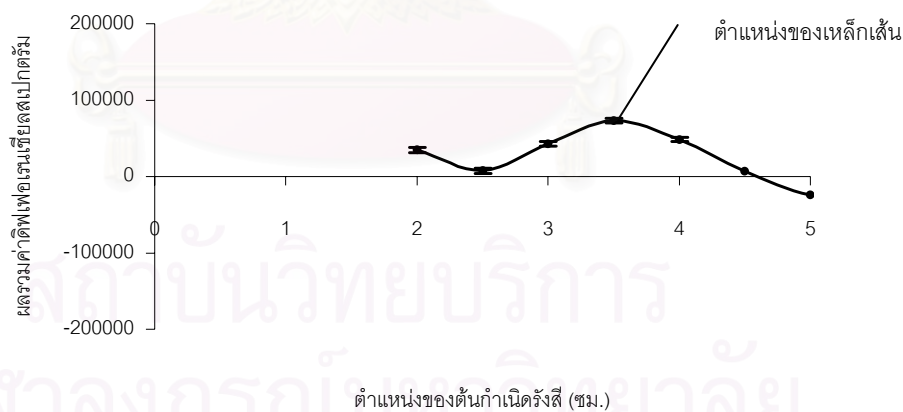
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.8 ซม.

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งของเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 3.5 ซม.

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 3.5 ซม.

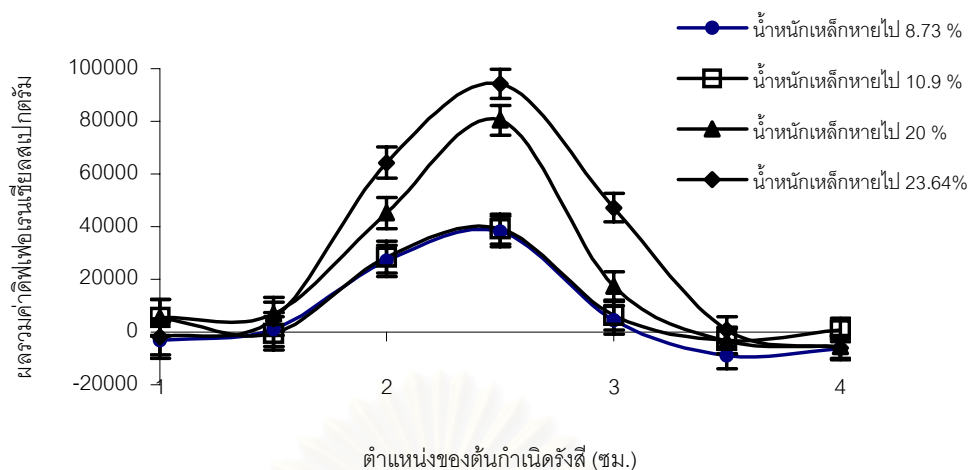
ระยะ s (ซม.)	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม
2	34827 ± 4208
2.5	7400 ± 3898
3	42674 ± 3688
3.5	73394 ± 3484
4	48473 ± 3263
4.5	7329 ± 2994
5	-24495 ± 2772

ระยะ s คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



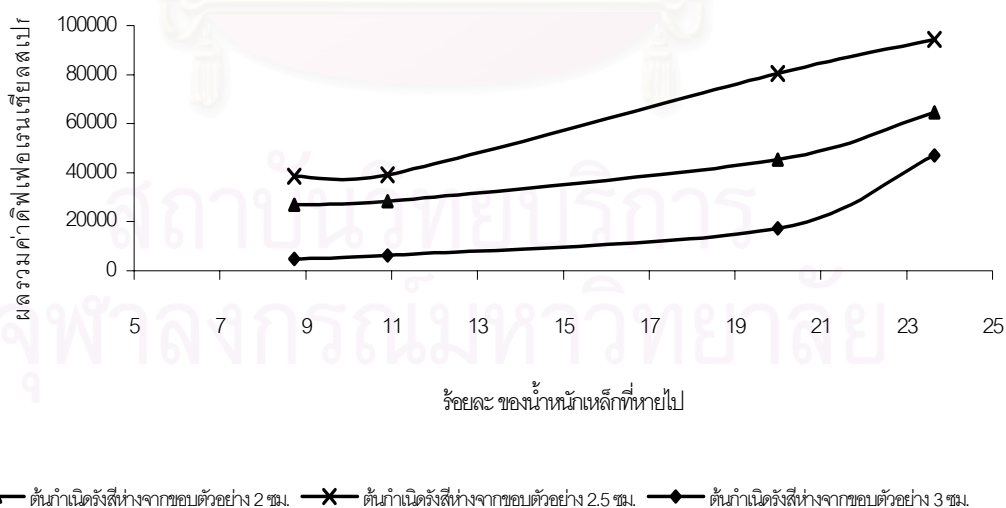
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 3.5 ซม.





รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม. ที่น้ำหนักของเหล็กเส้นหายไป 8.73, 10.9, 20 และ 23.64 %

นำค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมมาสร้างกราฟสัมพันธ์กับร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไปโดยเลือกตำแหน่งต้นกำเนิดรังสีที่ 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นระยะที่เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ดี ดังรูป 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2, 2.5 และ 3 ซม.

เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวิจัยจึงเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีที่ 2.5 และ 3 เซนติเมตร มาศึกษาโดยเพิ่มความละเอียดของร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไปดังตาราง 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป*
7	1.87
14	3.36
21	5.05
28	5.98
35	6.92
42	8.97
49	9.9
59	11.2
79	15.51
114	22.43

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 ซม.

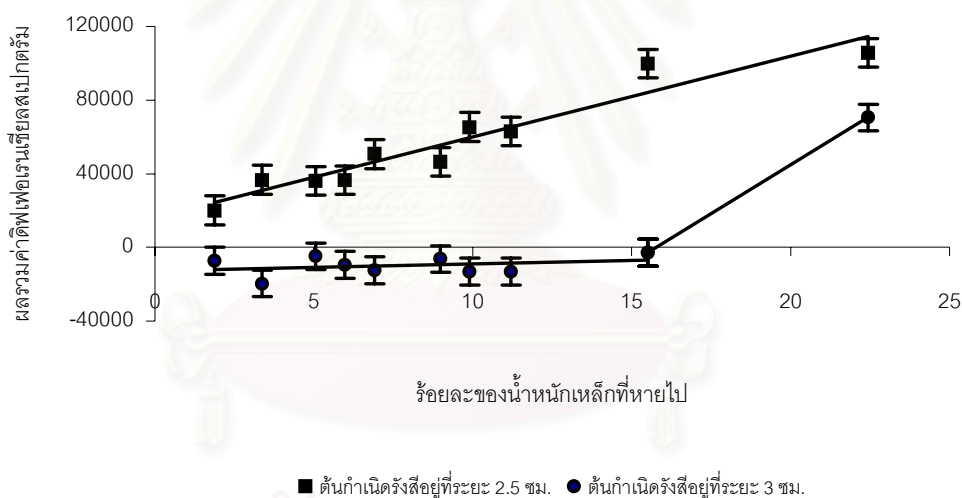
ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป*	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม เมื่อ $s = 2.5$ ซม.	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม เมื่อ $s = 3$ ซม.
1.87	$20100 \pm 7812$	$-7399 \pm 7357$
3.36	$36687 \pm 7807$	$-19622 \pm 7300$
5.05	$36057 \pm 7805$	$-4855 \pm 7289$
5.98	$36513 \pm 7796$	$-9406 \pm 7267$
6.92	$50672 \pm 7763$	$-12445 \pm 7270$
8.97	$46295 \pm 7761$	$-6325 \pm 7258$

\* ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไปคิดจากการนำน้ำหนักเหล็กก่อนเกิดการกัดกร่อนลบด้วยน้ำหนักเหล็กหลังเกิดการกัดกร่อนแล้วหารด้วยน้ำหนักเหล็กก่อนเกิดการกัดกร่อนทั้งหมดคูณด้วย 100

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 ซม.(ต่อ)

% ของน้ำหนักเหล็กที่หายไป	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม เมื่อ $s = 2.5$ ซม.	ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม เมื่อ $s = 3$ ซม.
9.9	$65355 \pm 7816$	$-13214 \pm 7257$
11.2	$62972 \pm 7815$	$-13064 \pm 7288$
15.51	$99804 \pm 7813$	$-2815 \pm 7315$
22.43	$105709 \pm 7735$	$70549 \pm 7273$

เมื่อ  $s$  คือ ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไป ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 ซม.



## บทที่ 5

### สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี ระบบวัดรังสีประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมา  $^{137}\text{Cs}$  หัววัดรังสีชนิด BGO และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) การบังคับลำรังสีจากต้นกำเนิดรังสีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร หัววัดรังสีทำมุม 90 องศากับต้นกำเนิดรังสี โดยกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนให้กับหัววัดรังสี ส่วนต้นกำเนิดรังสีนั้นมีการเคลื่อนที่ได้ในแนวขนานกับตัวอย่างเพื่อศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของตัวอย่างเมื่อตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเปลี่ยนไป ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำมาศึกษามีขนาด 20 ซม. x 20 ซม. x 20 ซม. ช่วงพลังงานของคอมป์ตันสแกตเทอริงที่ระเจิงจากตัวอย่างอยู่ในช่วงประมาณ 0-400 keV ส่วนช่วงที่เกิน 400 keV ไปมีผลรวมใกล้เคียงศูนย์ จึงมีผลกระทบต่อค่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมน้อยมาก

5.1.1 ขนาดของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้เป็นบวกเมื่อตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีใกล้กับตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในและสูงสุดเมื่ออยู่ตรงกับตำแหน่งของเหล็กเส้น ส่วนความกว้างของพีคที่ได้จะสัมพันธ์กับขนาดของเหล็กเส้นภายใน สำหรับขนาดของเหล็กเส้นที่นำมาศึกษาได้แก่ เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 และ 1.5 เซนติเมตร พบว่าเมื่อใช้เวลาในการนับรังสี 600 วินาทีและเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร ความกว้างของพีคลดลงเมื่อขนาดของเหล็กเส้นลดลงดังรูป 4.7 เมื่อพิจารณาความกว้างของพีคพบว่า เมื่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9, 1.2 และ 1.5 เซนติเมตร ความกว้างของพีคมีค่าเท่ากับ 1.2, 1.1 และ 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก 0.9 เซนติเมตรค่าความกว้างของพีคมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเนื่องจากขนาดของเหล็กเส้นมีขนาดใกล้เคียงกับการขนาดของลำรังสีจากต้นกำเนิดรังสีคือ 0.8 เซนติเมตรและการเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร ทำให้ความไวในการตรวจสอบขนาดของเหล็กเส้นไม่ดีพอสำหรับเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก

5.1.2 ตำแหน่งของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมกับตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งที่ตำแหน่งของเหล็กเส้นภายในนั้นจะตรงกับตำแหน่งที่ให้ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมสูงสุด ดังรูป 4.8 ลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้มีค่าเป็นบวกและมีค่าสูงสุดเมื่อตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีตรงกับตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ภายในพอดี ดังรูป 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมและตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเมื่อเหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 1 เซนติเมตร จะเห็นว่าผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 1 เซนติเมตรมีค่าสูงสุด จากระบบวัดที่ได้มีความสามารถในการตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กเส้นได้ดี ตำแหน่งของเหล็กเส้นที่นำมาศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ตำแหน่งที่เหล็กเส้นอยู่ลึกจากผิวคอนกรีตเป็นระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, 2.8 และ 3.5 เซนติเมตร ค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของเหล็กอยู่ลึกจากผิวมากขึ้น เนื่องจากความเข้มรังสีที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสีมีค่าลดลง

5.1.3 การตรวจสอบสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เปลี่ยนไป ได้พิจารณา ค่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเส้นภายในสภาพต่างกัน โดยเลือกศึกษาที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 เซนติเมตร เนื่องจากได้ทำการทดลองศึกษาตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีในระยะต่างๆแล้วพบว่าที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสี 2.5 และ 3 เซนติเมตร เป็นตำแหน่งที่ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมมีค่าสูง และมีความไวเมื่อสภาพของเหล็กภายในเปลี่ยนไปดังรูป 4.15 และ 4.16 สภาพของเหล็กที่เปลี่ยนไปจะแสดงด้วยค่าร้อยละโดยน้ำหนักเหล็กที่หายไป จากรูป 4.17 เมื่อใช้เวลาในการนับรังสี 2000 วินาทีและเลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีที่ละ 0.5 เซนติเมตร พบว่าที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี 2.5 เซนติเมตร จะเริ่มเห็นความแตกต่างของสภาพเหล็กเมื่อร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่หายไปมีค่ามากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์และที่ตำแหน่งต้นกำเนิดรังสี 3 เซนติเมตร จะเริ่มเห็นความแตกต่างของสภาพเหล็กเมื่อร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่หายไปมีค่ามากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

ในการศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในระบบวัดรังสีที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นการตรวจสอบแบบเปรียบเทียบชิ้นงาน 2 ชิ้นงานว่าแตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีจึงต้องคงที่ เพื่อผลจากดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้จะได้แสดงถึงความแตกต่างของชิ้นงานเท่านั้น ในการวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

ลักษณะแรกเป็นการตรวจสอบชิ้นงานว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ การตรวจสอบลักษณะนี้หัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสีจะอยู่กับที่คือ การตรวจสอบสภาพการกัดกร่อนของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นการตรวจสอบแบบต่อเนื่องเพราะเป็นการตรวจสอบเมื่อเวลาผ่านไปแล้วเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร การทำให้สภาพของเหล็กเปลี่ยนไปในกรวิจัยนี้ทำโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี (เซลล์ควานิก) ในการเร่งให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากข้อจำกัดในการวัดรังสีจึงต้องศึกษาโดยใช้เสาคอนกรีตที่หล่อให้มีรูไว้สำหรับใส่เหล็กที่สภาพต่างกันเพื่อลดปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่น ความชื้น ซึ่งมีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมอย่างมาก จากผลการวิจัยจะเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงสภาพของเหล็กได้เมื่อน้ำหนักของเหล็กหายไป 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นควรจะเพิ่มความละเอียดให้กับระบบวัดรังสีที่ใช้และควรใช้เวลาในการนับรังสีให้มากขึ้นเพื่อจะได้เห็นการเปลี่ยนแปลงสภาพของเหล็กได้ดียิ่งขึ้น

ลักษณะที่สองเป็นการตรวจสอบขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะของการตรวจสอบในแบบนี้หัววัดรังสีจะอยู่กับที่แล้วเลื่อนที่ต้นกำเนิดรังสีไปที่ระยะต่างๆ ของตัวอย่าง จากผลการทดลองในเรื่องของขนาดของเหล็กนั้นจะเห็นว่าเมื่อเหล็กมีขนาดเล็กความแม่นยำในการตรวจสอบจะลดลง เพื่อเพิ่มความแม่นยำสามารถทำได้โดยบังคับลำรังสีของต้นกำเนิดรังสีให้มีขนาดเล็กและเลื่อนต้นกำเนิดรังสีให้มีระยะสั้นลงจะทำให้เห็นรายละเอียดของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมได้ดีขึ้น ส่วนการตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กนั้นผลการวิจัยออกมาตรงตามตำแหน่งของเหล็กในทุกระยะที่นำมาศึกษาแต่ผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อเหล็กอยู่ลึกจากผิวคอนกรีตมากขึ้นจะมีค่าลดลงเพื่อให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนควรจะเพิ่มเวลาที่ใช้ในการนับรังสี ในการตรวจสอบตำแหน่งนั้นมีข้อจำกัดคือ พลังงานของรังสีแต่ละค่าจะมีความสามารถในการทะลุผ่านตัวกลางได้มากน้อยต่างกัน โดยที่รังสีพลังงานสูงจะมีอำนาจในการทะลุผ่านตัวกลางได้มากกว่ารังสีที่มีพลังงานต่ำ ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี  $^{137}\text{Cs}$  ซึ่งมีพลังงาน 662 keV จากการคำนวณได้ระยะที่สามารถทะลุผ่านตัวกลางที่เป็นคอนกรีตได้ประมาณ 7 เซนติเมตร

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้ข้อสรุปว่าเทคนิคนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงภายใน ชิ้นงานมาก การจัดวางชิ้นงาน ต้นกำเนิดรังสี และ หัววัดรังสี จำเป็นต้องมีความละเอียดสูงเป็นพิเศษ เนื่องจากตำแหน่งที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมผิดเพี้ยนไปจากที่ควรเป็น ซึ่งเป็นปัญหาที่ประสบในงานวิจัยนี้ในระยะแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่ต้องทำการวัดสเปกตรัมของรังสีที่กระเจิงจากชิ้นงานอ้างอิงกับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบสลับกัน ต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก รวมทั้งการเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีไปที่ระยะต่างๆ ต้องควบคุมให้ระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีกับผิวหน้าของชิ้นงานคงที่เท่ากันโดยตลอด อย่างไรก็ตามการที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ชิ้นงานที่เป็นเสาคอนกรีต ถือได้ว่าเป็นงานที่ยุ่ยากสำหรับการเริ่มต้น เนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อซึ่งไม่สม่ำเสมอเท่ากันโดยตลอด ดังนั้นการทำการหล่อซ้ำในลักษณะเดียวกันแต่ละคราวจะไม่ได้เนื้อคอนกรีตที่เหมือนกันทุกประการ ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาโดยการไม่ผสมหินในเนื้อคอนกรีตที่ทำการหล่อก็ตาม

การวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อสรุปที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเทคนิคนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของวัสดุไปจากเดิม โดยการติดตั้งหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสีไว้ประจำที่โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายแล้วทำการตรวจสอบสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภายในวัสดุ ประการที่สองเทคนิคนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องเพื่อดูดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม แต่สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว (Single channel analyzer, SCA) ในการวัดรังสีในช่วงพลังงานที่ต้องการแล้วนำมาลบกัน ซึ่งได้ทดลองใช้ในงานวิจัยนี้บ้างแล้วพบว่าได้ผลเช่นเดียวกัน ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น และได้มีการพัฒนาต่อในส่วนนี้แล้ว

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระบบวัดรังสีที่นำมาใช้ร่วมกับเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกดเทออริงสเปกโทรสโคปีในการวิจัยครั้งนี้ยังใหม่ จึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมากเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบวัสดุต่างๆ โดยเฉพาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 ใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงรังสีสูงขึ้น เพราะจะทำให้สามารถบังคับลำรังสีให้เล็กทำให้เห็นรายละเอียดของชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น และยังทำให้ความเข้มรังสีที่กระเจิงจากชิ้นงานเข้าสู่หัววัดรังสีเพิ่มขึ้นดังนั้นดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย

5.3.2 ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบเหล็กเส้นที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีตมากๆ หรือตรวจสอบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ควรจะเลือกใช้ใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีพลังงานสูงขึ้นเพราะจะทำให้มีอำนาจในการทะลุผ่านชิ้นงานได้สูงขึ้น แต่ก็ยังขึ้นกับวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ

5.3.3 ใช้เวลาในการนับรังสีให้มากขึ้นเพราะยังใช้เวลาในการนับรังสีนานก็จะได้รายละเอียดของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมดียิ่งขึ้น

5.3.4 เปลี่ยนจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (MCA) เป็นเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียว (SCA) เนื่องจากได้ลองใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียวในการตรวจสอบแล้วพบว่าความแม่นยำในการตรวจสอบนั้นไม่ต่างจากค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง จึงช่วยลดขนาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบได้ทางหนึ่ง

5.3.5 ทำการหล่อตะกั่วในการกำบังรังสีและบังคัมบังรังสีเพื่อลดขนาดของระบบวัดรังสีและลดการรบกวนจากรังสีที่ไม่ต้องการ

5.3.6 จัดทำเป็นเครื่องตรวจสอบวัสดุด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสเปกโตรสโกปีเพราะจะทำให้ตำแหน่งของหัววัดรังสีแน่นนอนและการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะที่เท่ากัน ทำให้ความแม่นยำในการตรวจสอบเพิ่มขึ้น

5.3.7 การใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ให้รังสีแกมมาหลายพลังงาน เช่น อิริเดียม-192 (<sup>192</sup>Ir) อาจทำให้มีความไวสูงกว่าในบางช่วงพลังงาน จึงควรศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป



## รายการอ้างอิง

1. อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา. การตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโทรสโคปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
2. S.K. Mullin, and E.M.A. Hussein. A compton-scatter spectrometry technique for flaw detection. Nuclear instruments and methods in physics research Vol.44 No.10/11 (1993): 1279-1284.
3. Samin, Anghate, et al. Material characterization and flaw detection sizing and location by the differential gamma-ray scattering spectroscopy technique. Nuclear technology 91 (September 1990): 361-387.
4. Shiro Tuzi, and Otomura sato. Locating the positions of reinforcing bars in reinforced concrete using backscattered gamma rays. Applied radiation and isotopes Vol.41 No.10/11 (1990): 1013-1018.
5. Theodor Shoulikidis, Dimitrios Marinakis, and Georg Batis. X-ray permeability of corrosion products as a measure of the rate of corrosion of rebars and of prediction of concrete cracking. American society for testing and materials (1986): 108-117.
6. John R. Lamarsh. Introduction to nuclear engineering. 2<sup>nd</sup> ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983.
7. Glenn F. Knoll. Radiation detection and measurement. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & sons, 1999.
8. Gilmore Gordon and John D. Hemingway. Practical gamma-ray spectrometry. Chichester: John Wiley & sons, 1995.
9. จรัญ พรมสุวรรณ. ปฏิบัติการนิวเคลียร์เชิงทฤษฎี. พิษณุโลก : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2540.
10. ศิริลักษณ์ นิรัฐจรรยาพงศ์. การกัดกร่อน. การประลัยและการเสื่อมสภาพของวัสดุ 1 (มกราคม 2542): 1-2.
11. P.S. Mangat, and M.S. Elgarf. Strength and serviceability of repaired reinforced concrete beams undergoing reinforcement corrosion. Magazine of concrete research Vol.51 No.2 (April 1999): 97-112.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

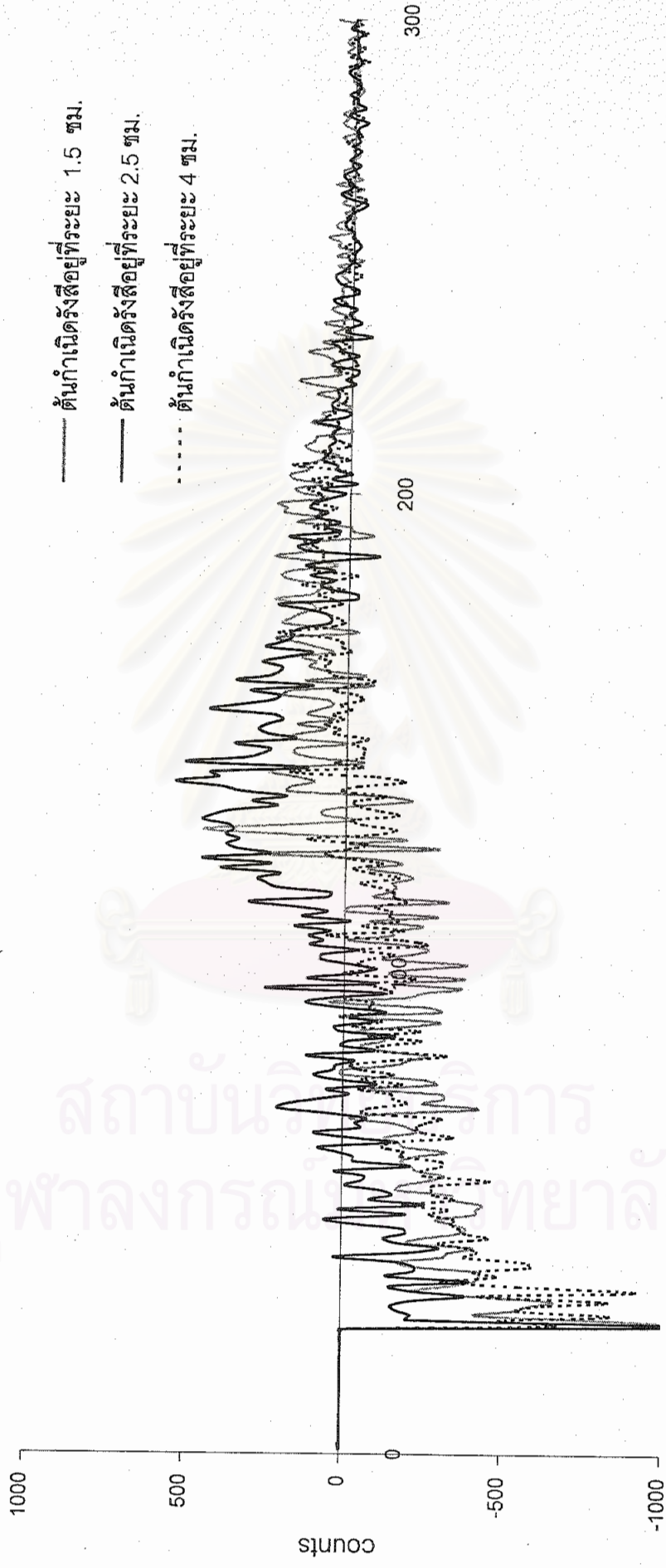
แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในการหาขนาดของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้มาจากการนำคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตที่มีขนาดเหล็กเส้นเป็น 0.9, 1.2 และ 1.5 เซนติเมตร อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 เซนติเมตร ลบด้วยคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตตัน ใช้เวลาในการนับรังสี 600 วินาที เลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร

แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในการหาตำแหน่งของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้มาจากการนำคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 1.9 เซนติเมตร ตำแหน่งเหล็กเส้นลึกจากผิวคอนกรีตเป็น 1, 1.5, 2, 2.5, 2.8 และ 3.5 เซนติเมตร ลบด้วยคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตตัน ใช้เวลาในการนับรังสี 600 วินาที เลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร

แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อสภาพการกักความร้อนของเหล็กเส้นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่างกัน ซึ่งได้มาจากการนำคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตจากเหล็กเส้นอ้างอิง ลบด้วยคอมปีตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของเสาคอนกรีตที่เหล็กเกิดการกักความร้อนต่างกัน โดยคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่หายไปจากการกักความร้อน ใช้เวลาในการนับรังสี 2000 วินาที เลื่อนตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีทีละ 0.5 เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

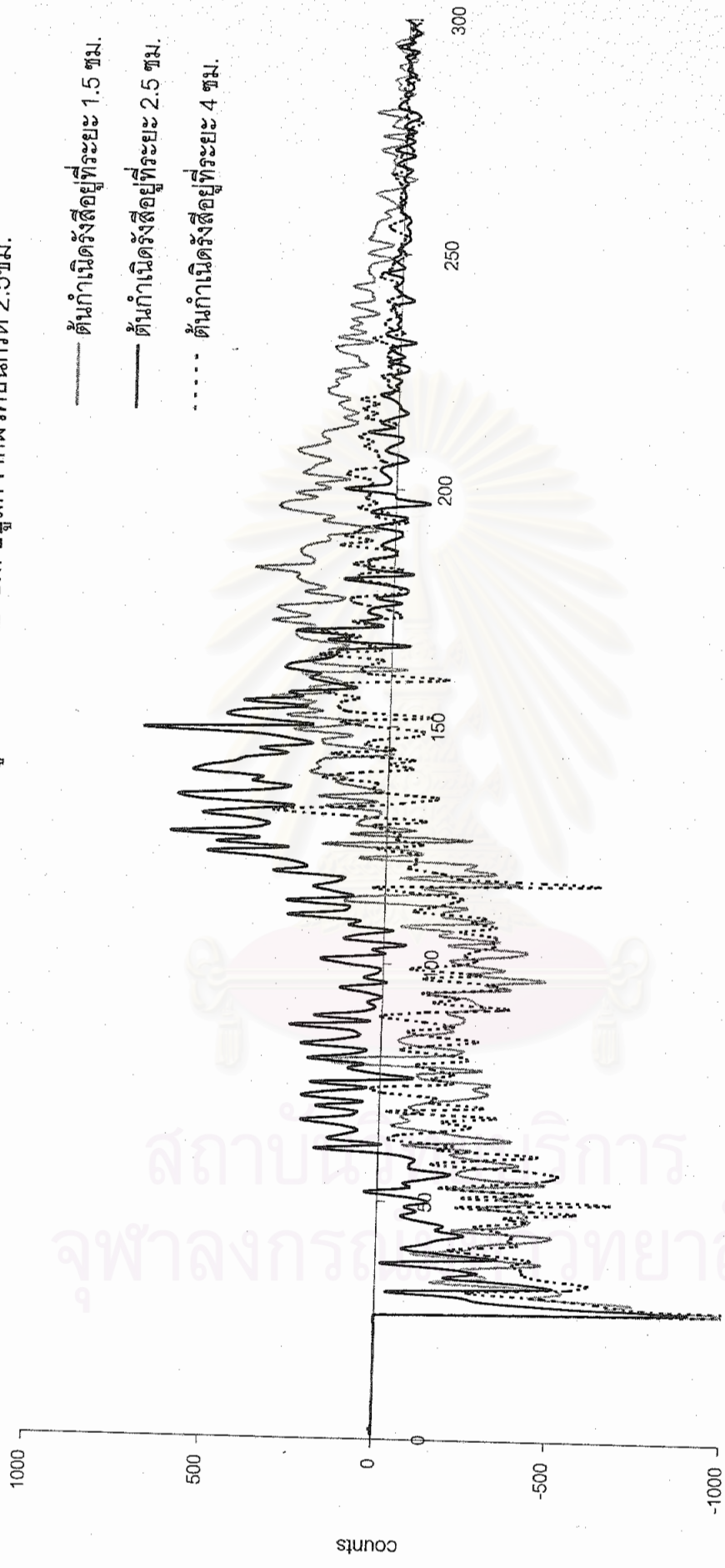
ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.



- ต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 1.5 ซม.
- ต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 2.5 ซม.
- - - ต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 4 ซม.

พลังงาน ( x 2 keV)

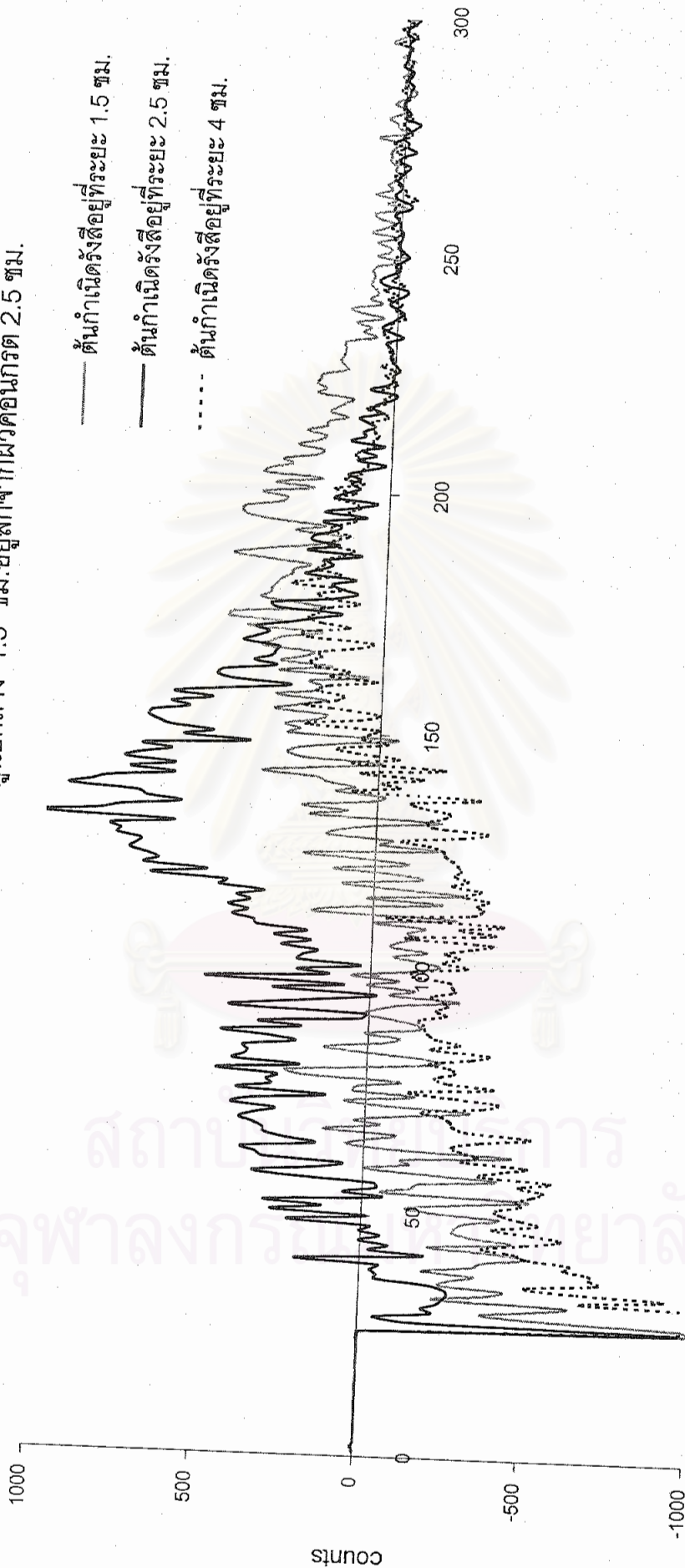
ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. อดีจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

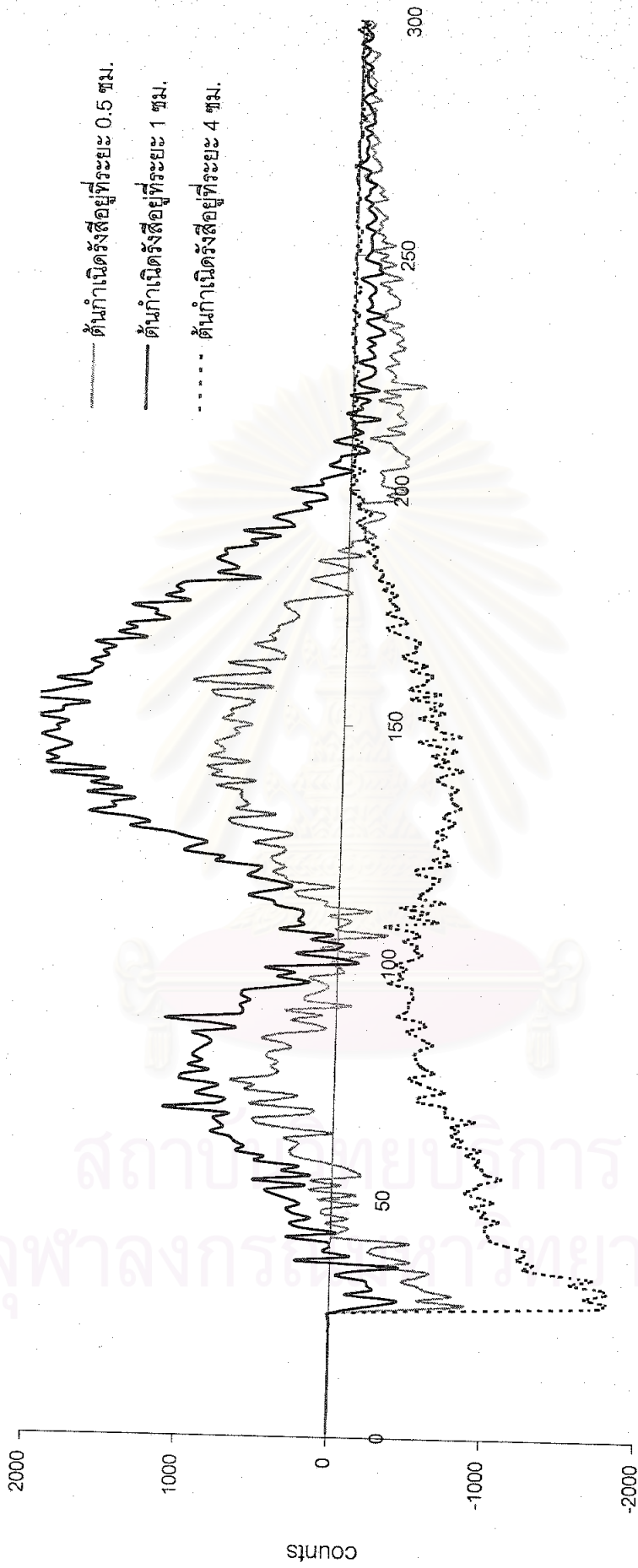
สถาบันบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม.

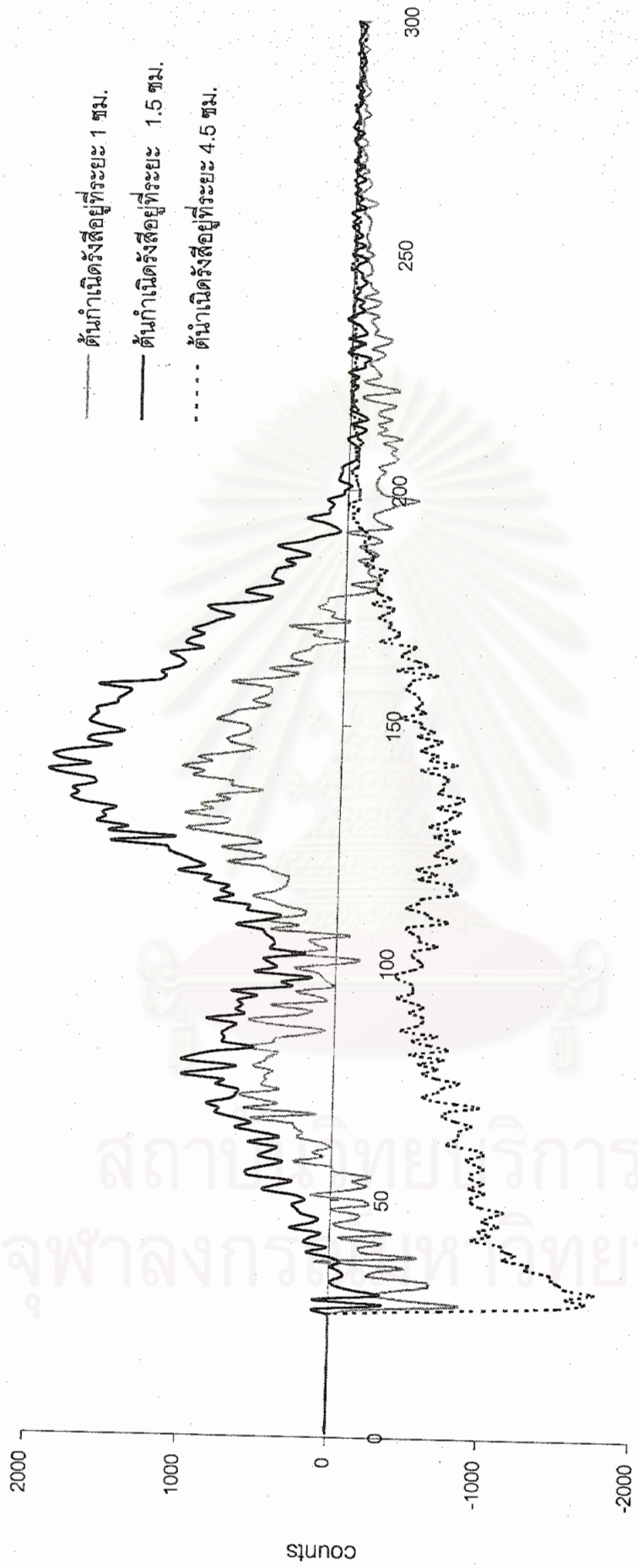


- ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 0.5 ซม.
- ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 1 ซม.
- - - - - ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 4 ซม.

พลังงาน ( x 2 keV)



ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 1.5 ซม.

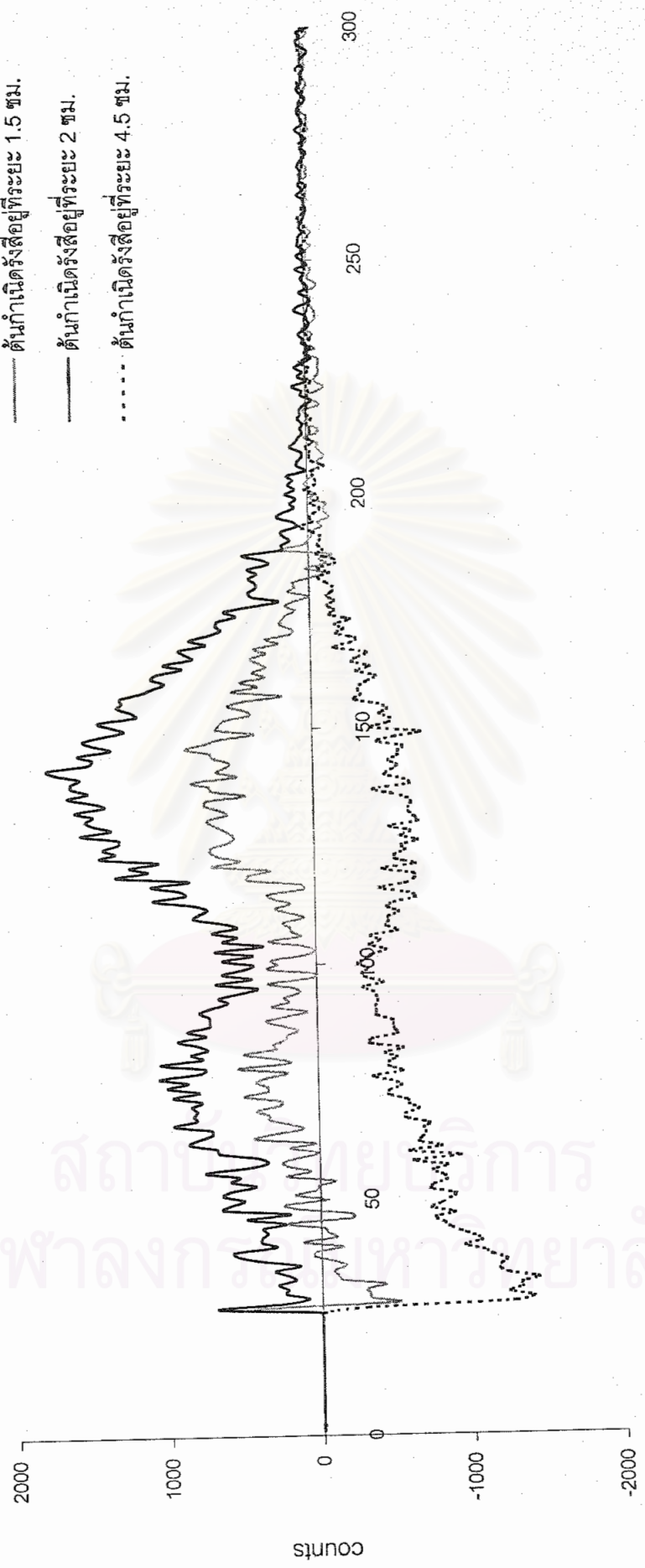


พลังงาน ( x 2 keV)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2 ซม.

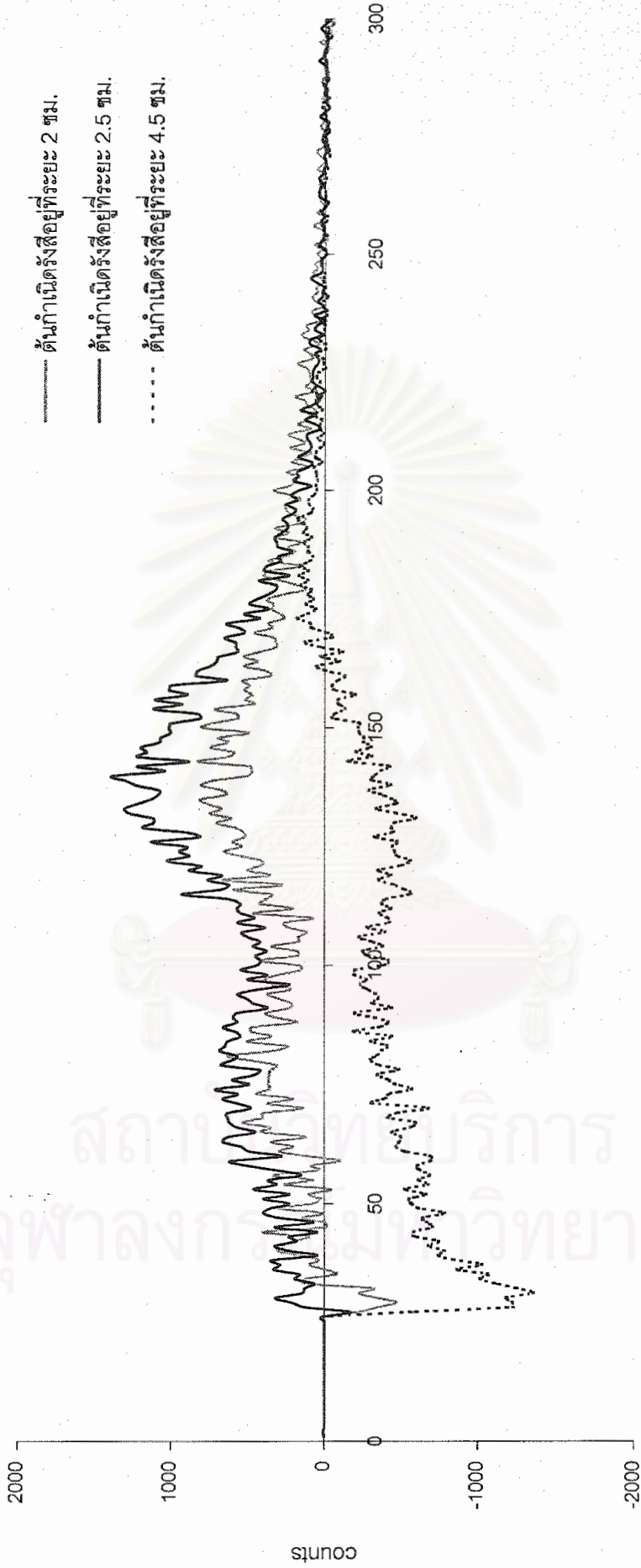
- ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 1.5 ซม.
- ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 2 ซม.
- ..... ดัชนีกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 4.5 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

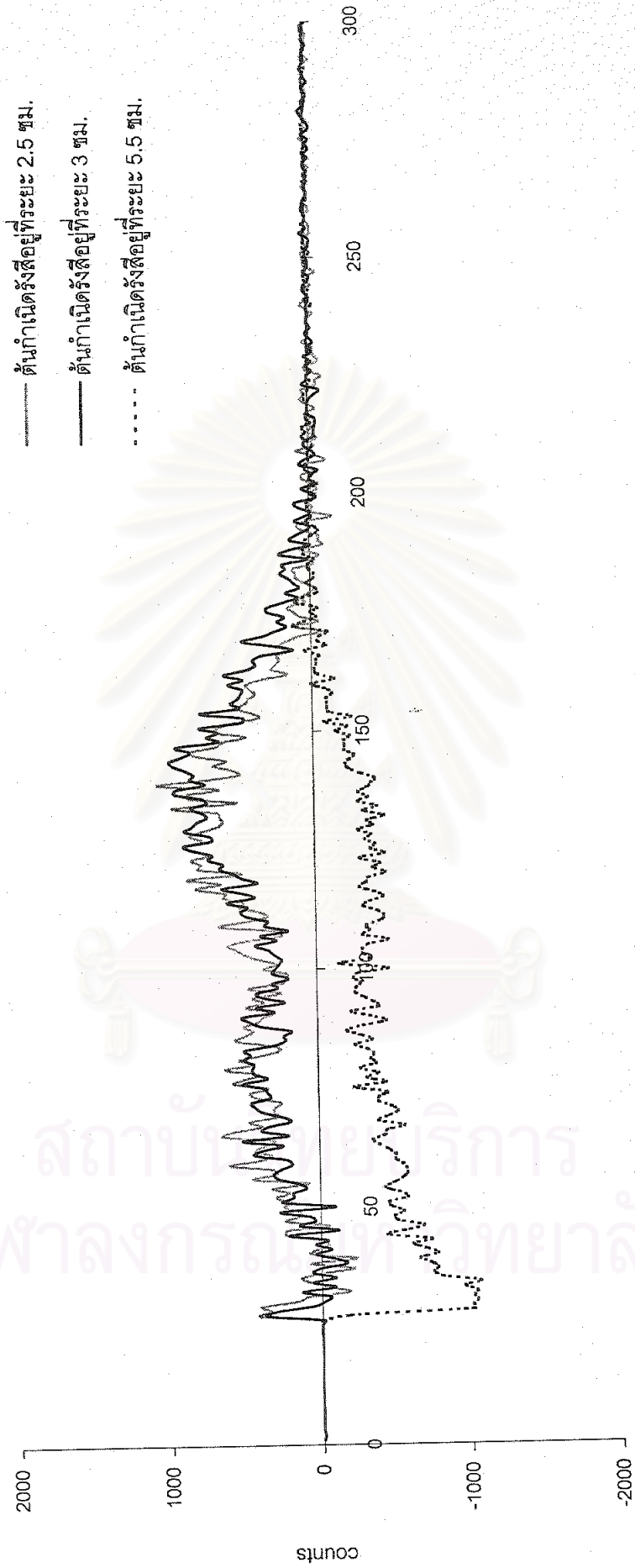


ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.5 ซม.

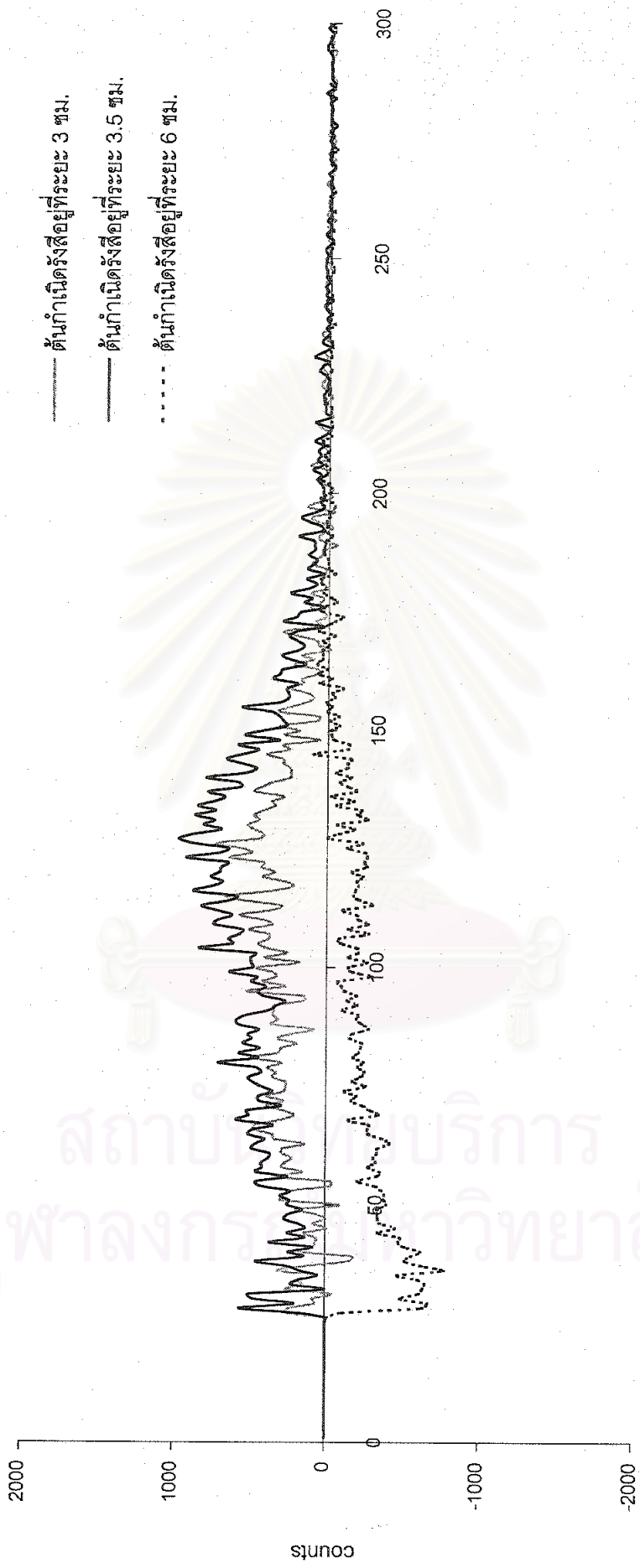


พลังงาน (x 2 keV)

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.8 ซม.



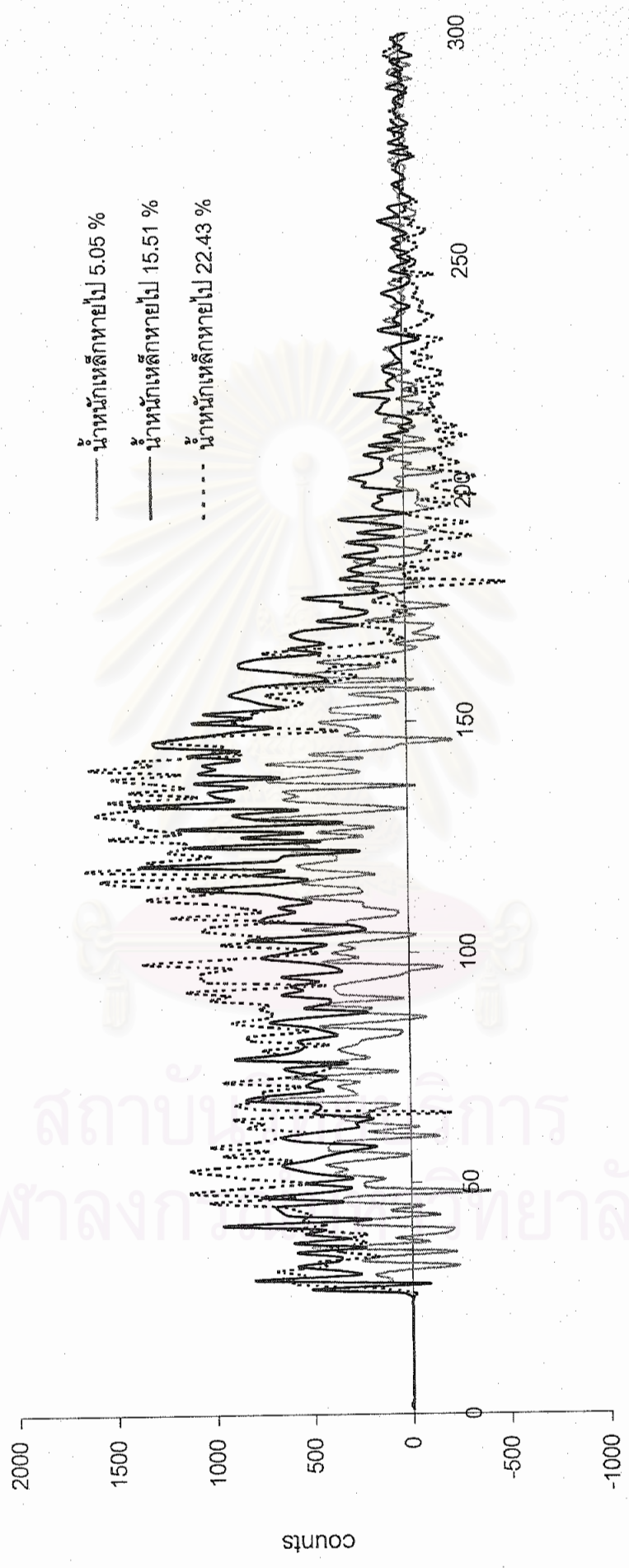
ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 3.5 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

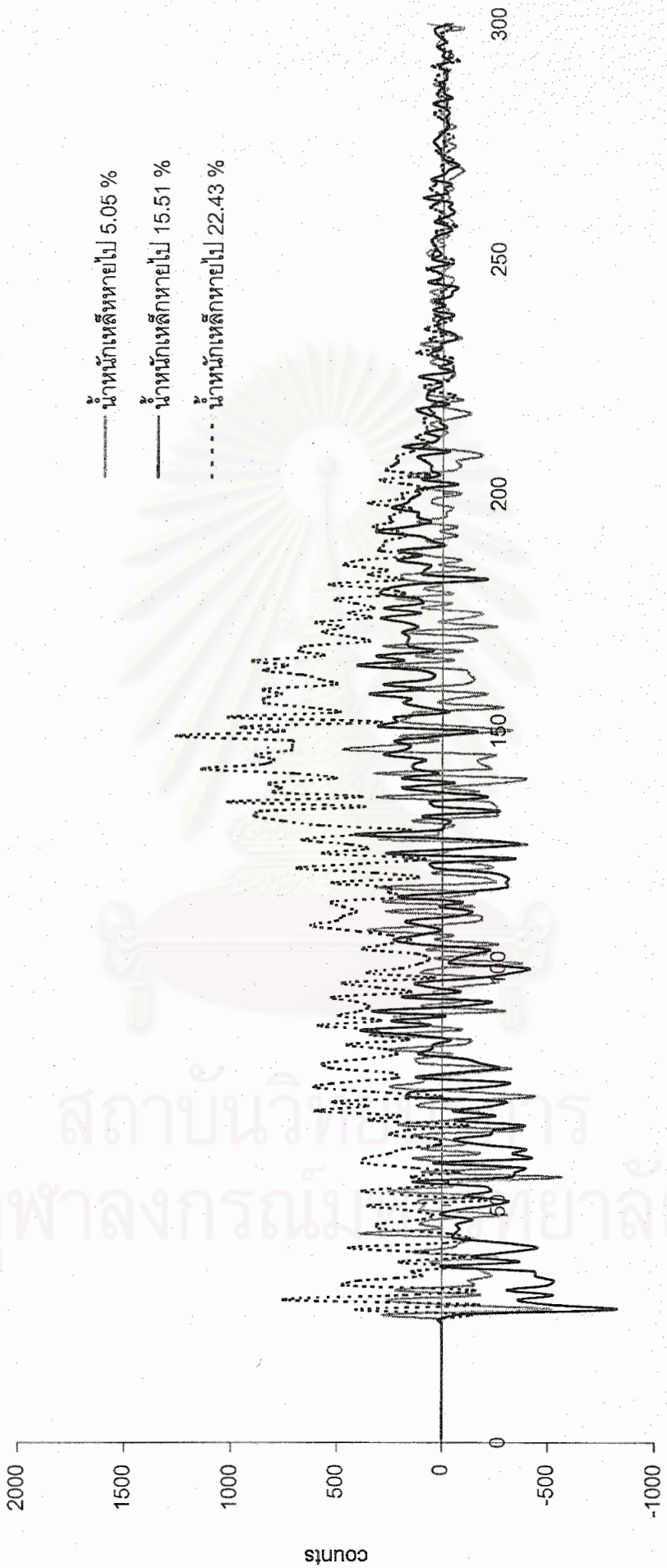
สถาบันบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 2.5 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ 3 ซม.



พลังงาน ( x 2 keV)

## ภาคผนวก ข

### การกัดกร่อน (corrosion) <sup>[10],[11]</sup>

การกัดกร่อนเป็นการเสื่อมสภาพของโลหะเพราะเกิดปฏิกิริยากับสิ่งที่แวดล้อมโลหะนั้นอยู่ การกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดังนี้



เมื่อไรก็ตามที่มีตัวรับอิเล็กตรอนก็จะเชื้อให้โลหะเกิดปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนหรือเกิดการกัดกร่อนได้ บางครั้งอาจเร่งให้เกิดการกัดกร่อนได้เร็วมากได้ด้วย ปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนของโลหะหรือการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) หรือเรียกว่าขั้วแอโนด (anode) ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนของสิ่งแวดล้อมโลหะจัดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) หรือเรียกว่าขั้วคาโทด (cathode) ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี การกัดกร่อนจะเกิดเมื่อครบเซลล์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical cell) มีองค์ประกอบดังนี้คือ 1.ขั้วแอโนด 2.ขั้วคาโทด 3.ทางเดินไอออนให้ครบวงจร ได้แก่ สารละลาย และ 4.ทางเดินอิเล็กตรอนให้ครบวงจร ได้แก่ ตัวนำ เมื่อไรที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีโลหะของเราเป็นขั้วแอโนด ครบเซลล์และปฏิกิริยาดำเนินไปได้ นั่นคือโลหะของเราได้เกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว เซลล์ไฟฟ้าเคมีนี้ก็คือ เซลล์การกัดกร่อน (corrosion cell) หรือเรียกว่า เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) นั่นเอง

เหล็กเส้นที่ต้องการเร่งให้เกิดการกัดกร่อนจะวางอยู่ในเซลล์กัลวานิกดังรูป 3.18 โดยเหล็กจะเป็นขั้วแอโนด แผ่นทองแดงเป็นขั้วคาโทด สารละลายที่ใช้คือสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 % ระดับของสารละลายควรให้สูงเท่ากับความสูงของเหล็กที่เราต้องการเร่งให้เกิดการกัดกร่อน กระแสที่ป้อนให้กับวงจรและเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการกัดกร่อนที่เราต้องการ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกระแสที่ใช้และน้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อนสามารถหาได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

$$\Delta W = \frac{A I t}{Z F} \dots\dots\dots(1)$$



เมื่อ  $\Delta W$  คือ น้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อน

A คือ เลขอะตอมของเหล็ก (56)

I คือ กระแสที่ป้อนให้กับวงจร (A)

Z คือ valency of the reacting electrode (ของเหล็กมีค่า = 2)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96500 A.s)

น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อนยังสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$\Delta W = a \delta \gamma \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่ผิวของเหล็กก่อนเกิดการกัดกร่อน ( $\text{cm}^2$ )

$\delta$  คือ เหล็กที่หายไป (cm)

$\gamma$  คือ ความหนาแน่นของเหล็ก ( $\text{g} / \text{cm}^3$ )

กระแสที่ป้อนให้กับวงจร, I คือ

$$I = i a \quad \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ i คือ ความเข้มกระแส ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

แทนค่า a จากสมการ (3) ลงใน สมการ (2) แล้วเทียบกับสมการ (1) จะได้

$$\delta = \frac{A i t}{\gamma Z F} \quad \dots\dots\dots(4)$$

แทนค่า A,  $\gamma$ , Z และ F ลงในสมการ (4) ถ้า R แทนเหล็กที่หายไปต่อปี แทนค่า t ในสมการ (4) ด้วย  $t = 1$  ปี จะได้

$$R = 1156 i \left( \frac{\text{cm}}{\text{year}} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

พิจารณาเมื่อเวลาผ่านไป T ปี

$$\text{เหล็กที่หายไปเวลา T ปี} = RT \quad (\text{cm})$$



ดังนั้น

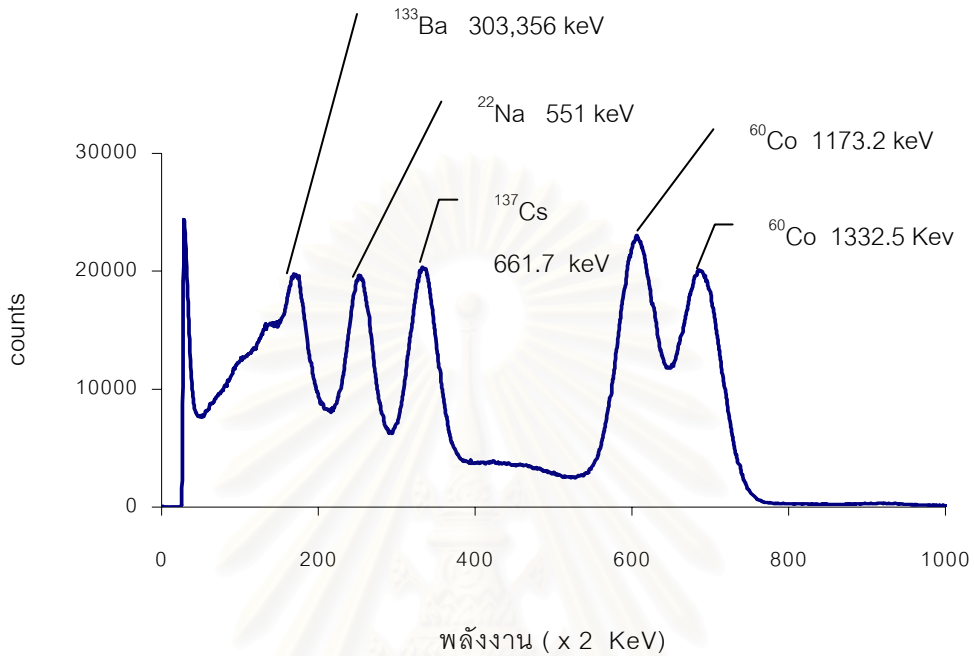
$$\% \text{ การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กใน } T \text{ ปี} = \frac{2RT}{D} \times 100 \quad \dots\dots(6)$$

แทนค่า R จากสมการ (5) ลงในสมการ (6) จะได้

$$\% \text{ การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก} \left( \frac{2RT}{D} \right) \% = 2312 i \frac{T}{D} \quad \dots\dots(7)$$

จากสมการ (1) และสมการ (7) ทำให้เราสามารถทำนายน้ำหนักของเหล็กที่หายไปและการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กได้ ในการเร่งให้เกิดการกัดกร่อนครั้งนี้ใช้ ความเข้มข้นกระแส (i) = 10 mA/cm<sup>2</sup> พื้นที่ผิวของเหล็ก (a) = 2 π r h = 120 cm<sup>2</sup> จากสมการ (3) กระแสที่ใช้ป้อนจึงใช้ประมาณ 1.2 A และจากสมการ (1) จะได้ว่า น้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้นั่นเอง พิจารณากระแสที่ป้อนให้กับวงจรกระแสไฟที่ใช้จึงต้องเป็นกระแสที่มีค่าคงที่ จึงได้เพิ่มวงจรคงที่กระแส (constant current) ขึ้น

### ภาคผนวก ค



สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  และ  $^{60}\text{Co}$   
เมื่อใช้หัววัดรังสีชนิด BGO ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว เป็นเวลา 1000 วินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สราพรรณ พจน์ชนะชัย เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับอุดมศึกษาจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้รับปริญญาวิทยา  
ศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) ในปี พ.ศ. 2541 และเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิทยา  
ศาสตรมหาบัณฑิต (นิวเคลียร์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย