

การพัฒนาวิธีสำหรับการตรวจหาภัยระเบิดโดยใช้เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริง



นาย เฉลิมพงษ์ โพธิ์ดี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

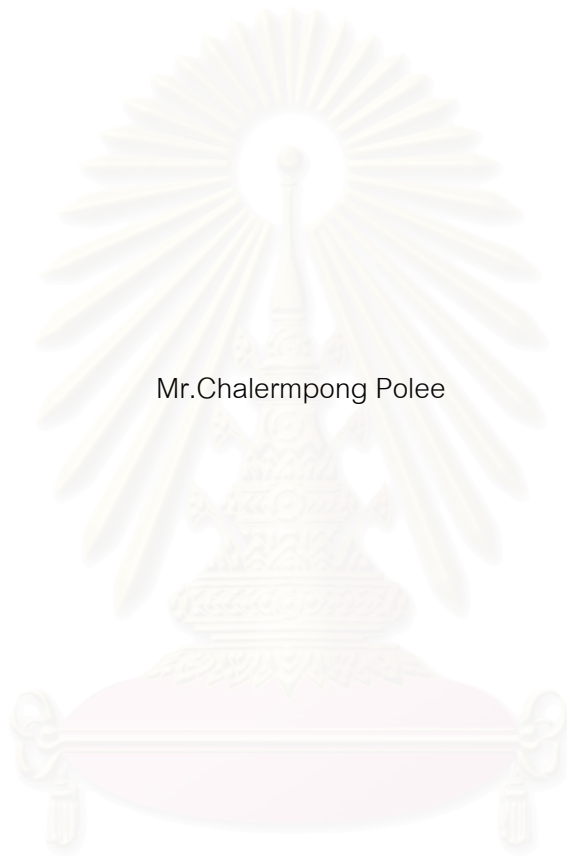
สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR LANDMINE INSPECTION USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY
SCATTERING TECHNIQUE



Mr.Chalermpong Polee

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of [Engineering]

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

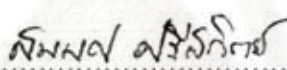
Copyright of Chulalongkorn University

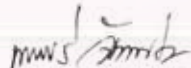
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวิธีสำหรับการตรวจหาภัยระเบิดโดยใช้เทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง
โดย	นายเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ตีรอก ลาวันวิศิรี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

เฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี : การพัฒนาวิธีสำหรับตรวจหากระเบิดโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง. (DEVELOPMENT OF A METHOD FOR LANDMINE INSPECTION USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING TECHNIQUE)
 อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.อรรถพร ภัทรสมันต์, 80 หน้า.

เทคนิคการกระเจิงของนิวตรอนและรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่มีผู้วิจัยจำนวนมากศึกษาวิจัยเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบกับระเบิด งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่สำหรับการตรวจหาวัตถุระเบิด ระบบที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย ดันกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV และหัววัดโซเดียมไอโอไดด์(ทกเลียม) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว โดยจัดให้ลำรังสีแกมมาตกกระทบผิวหน้าดินในแนวตั้งฉาก ในขณะที่วางหัววัดรังสีแกมมาทำมุม 45° เพื่อวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับที่มุม 135° การวิจัยขั้นแรกได้ทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ยูเรียเป็นวัสดุเสมือนวัตถุระเบิดอัดไว้ในภาชนะพลาสติกขนาดต่าง ๆ กัน และฝังไว้ที่ระดับลึกต่าง ๆ กัน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าความเข้ม และลักษณะสเปกตรัมของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์ขึ้นอยู่กับขนาดของภาชนะ และความลึก ในขั้นสุดท้ายได้ทดสอบระบบในภาคสนามในลักษณะทำนองเดียวกันกับในห้องปฏิบัติการ ซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามยังต้องทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมก่อนการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการตรวจหากระเบิด

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
 สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
 ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....*เฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี*
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*นเรศร์ จันทน์ขาว*
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*อรรถพร ภัทรสมันต์*

##4770255021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: GAMMA-RAY SCATTERING / LANDMINE INSPECTION

CHALERMPOONG POLEE : DEVELOPMENT OF A METHOD FOR LANDMINE
INSPECTION USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING TECHNIQUE.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.NARES CHANKOW ,THESIS COADVISOR :
ASST.PROF. ATTAPORN PATTARASUMUNT, 80 PP.

Neutron and x-ray techniques have been investigated by a number of researchers for detection of landmines. This research introduces a new nuclear technique, the Differential Gamma-ray Scattering technique (DGST). The system consists of a Cs-137 gamma source which emits 662 keV gamma-rays and a 2" x 2" NaI(Tl) scintillation detector. The gamma-ray beam is directed to the soil surface at right angle while the detector is positioned at 45° to detect 135° backscattered gamma-rays. The system is first tested in laboratory using urea as an explosive-like material packed in plastic containers of different sizes and buried in soil at different depths. The results indicated that the differential gamma-ray intensities and patterns depend upon sizes of the container and depth. The system is finally tested in the field in the same manners as in the laboratory and the results are satisfactory. However, further investigation is needed before the DGST is actually applied in landmine detection.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology
Field of study Nuclear Technology
Academic year 2007

Student's signature... Chalermpong Poley

Advisor's signature... Nares Chanlow

Co-advisor's signature... Attaporn Pattarassumunt

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่เป็นผู้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ในทุกๆ ด้าน รวมทั้งขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาที่คอยช่วยเหลืออย่างดีตลอดเวลา

ทำยนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณ ที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และส่งเสริมด้านการศึกษาดำเนินดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กั๊บระเบิด.....	5
2.2 ริงส์แกมมา.....	10
2.3 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	24
3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	28
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	39
4.1 ผลของการศึกษาระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นดิน.....	39
4.2 ผลของการศึกษาของชนิดของวัสดุที่มีผลต่อดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์ สแกตเทอริง.....	45

4.3 ผลของการศึกษาของปริมาณไนโตรเจนที่มีผลต่อแกมมาเรย์	51
สแกตเทอร์ริง.....	53
4.4 ผลของการศึกษาของขนาด ความลึกและตำแหน่งของวัสดุที่ฝังอยู่ในดิน.....	
4.5 ผลของการศึกษาของความชื้นที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอร์ริง	68
สเปกตรัม.....	
4.6 ผลการทดลองวัดกัมมะเบต ณ พื้นที่จริงเพื่อศึกษาผลของวัตถุแปลกปลอมที่ฝังอยู่	71
ในดิน.....	74
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดและคุณสมบัติบางประการของกำมะถัน.....	5
2.2 ชื่อและสูตรทางเคมีของกำมะถันบางชนิด.....	6
4.1 ค่าความสัมพันธ์ของความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีคกับระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นผิวดิน.....	41
4.2 ค่าความสัมพันธ์ของความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีคกับระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นผิวดิน.....	42
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีค ความหนาแน่นของวัสดุ และค่าเลขอะตอมประสิทธิภาพกับวัสดุชนิดต่างๆ.....	46
4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อผสมกับโพสิเทคที่ล้นกับค่าพื้นที่ใต้พีคของแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	51
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อนำสารยูเรียเจือจางในน้ำกับค่าพื้นที่ใต้พีคของแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร กับความสูงพีค.....	54
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรกับพื้นที่ใต้พีค.....	55
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรกับความสูงพีค.....	57
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรกับพื้นที่ใต้พีค.....	59
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติกกับพื้นที่ใต้พีค.....	61
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อกับความสูงพีค.....	63
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อกับพื้นที่ใต้พีคและความกว้างของพีค.....	64
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติกกับความสูงพีคและขนาดความกว้างพีค.....	67
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดินกับความสูงของพีคในแต่ละด้าน....	68
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดินกับพื้นที่ใต้พีคในแต่ละด้าน.....	69

สารบัญภาพ

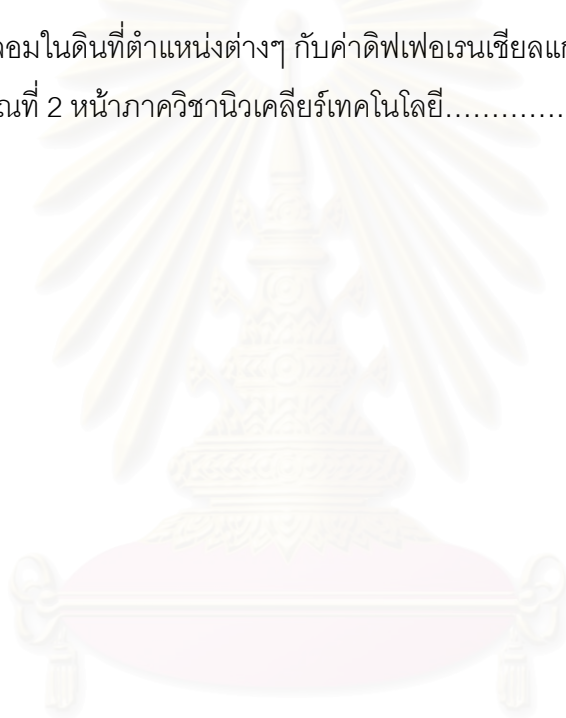
รูปที่	หน้า
2.1 สัดส่วนอะตอมของธาตุไฮโดรเจน, คาร์บอน, ไนโตรเจน, และออกซิเจน ในระเบิด, ยาเสพติด, และวัสดุบางชนิด.....	7
2.2 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์	11
2.3 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่ว ที่พลังงานต่างกัน.....	12
2.4 ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่าง ๆ.....	14
2.5 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	14
2.6 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่าง ๆ.....	18
2.7 ค่า σ_c ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ.....	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน.....	21
2.9 การเกิดแฟรโฟรดักชัน.....	22
2.10 ภาคตัดขวางของการเกิดแฟรโฟรดักชัน (σ_{pp}) ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ.....	23
2.11 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง.....	23
2.12 การกระเจิงของรังสีแกมมาที่ตกกระทบกับแต่ละตำแหน่งในชิ้นงานวัสดุแล้วเข้าสู่หัววัดรังสีด้วยมุม θ ต่ำสุดถึงมุม θ สูงสุด.....	24
3.1 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ.....	28
3.2 กระดาษดินสำหรับฝังตัวอย่าง.....	28
3.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบดิจิทัล Canberra Model DSA2000.....	28
3.4 แผนผังการจัดระบบวัดรังสีแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	29
3.5 การจัดวางต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี.....	29
3.6 แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีในการทดสอบการกรองรังสีเอกซ์เรย์พลังงานต่ำ.....	31
3.7 แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบระยะห่างของระบบวัดกับพื้นผิวดิน.....	32
3.8 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของชนิดของวัสดุในอากาศ.....	33

รูปที่	หน้า
3.9 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่ฝังอยู่ในดิน.....	33
3.10 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไนโตรเจนในวัตถุตัวอย่าง.....	34
3.11 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความลึกของวัตถุตัวอย่างที่เป็นท่อ.....	35
3.12 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความลึกวัตถุตัวอย่างที่เป็นกล่อง.....	35
3.13 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของขนาดวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียที่ฝังอยู่ในดิน.	36
3.14 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของขนาดวัตถุที่เป็นกล่องบรรจุยูเรียที่ฝังอยู่ใน ดิน.....	36
3.15 แผนภาพการจักระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความชื้นในดิน.....	37
3.16 แผนภาพการจักระบบวัดในการตรวจหาตัวอย่างเสมือนกับระเบิด ณ พื้นที่จริงที่ 1.....	38
3.17 แผนภาพการจักระบบวัดในการตรวจหาตัวอย่างเสมือนกับระเบิด ณ พื้นที่จริงที่ 2.....	38
4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับที่มีพีคของรังสีเอกซ์ของตะกั่ว.....	39
4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมากระเจิงกลับเมื่อใช้แผ่นแคดเมียมคูดกลืนรังสีเอกซ์ของตะกั่ว.....	39
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับระยะห่างของ ระบบวัดกับพื้นดิน โดยฝังวัตถุตัวอย่างไว้บริเวณผิวดิน.....	41
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงของระบบวัดจากพื้นดินกับค่าความสูงของพีคและ ค่าพื้นที่ใต้พีคที่ความลึกของวัตถุตัวอย่างที่ผิวดิน.....	42
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับระยะห่างของ ระบบวัดกับพื้นดิน โดยฝังวัตถุตัวอย่างไว้ลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร.....	42
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงของระบบวัดจากพื้นดินกับค่าความสูงของพีคและ ค่าพื้นที่ใต้พีคที่ความลึกของวัตถุจากพื้นผิวดิน 4 เซนติเมตร.....	43
4.7 สเปกตรัมแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่เกิดจากวัสดุชนิดต่างๆ.....	44
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ใต้พีคเมื่อเทียบกับดิน กับค่าความหนาแน่น ของวัสดุ.....	46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ใต้พีคเมื่อเทียบกับดินกับค่าเลขอะตอม ประสิทธิผล.....	46
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ใต้พีคส่วนด้วยความหนาแน่นของวัสดุแต่ละ ชนิด กับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล.....	47
4.11 การตกกระทบและการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่กระทำต่อวัตถุในกรณีต่างๆ.....	48

รูปที่	หน้า
4.12 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง แต่ละตำแหน่งที่สแกนเมื่อวัตถุเป็นกล่อง อะคริลิกเปล่า.....	48
4.13 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง แต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัตถุตัวอย่างเป็น ยูเรียบรจอยู่ภายในกล่องอะคริลิก.....	49
4.14 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงแต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัตถุตัวอย่างที่เป็น น้ำบรจอยู่ภายในกล่องอะคริลิก.....	49
4.15 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงแต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัตถุตัวอย่างที่เป็น ตะกั่วบรจอยู่ภายในกล่องอะคริลิก.....	50
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคกับเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อผสมกับโพลีเอททีลีน...	51
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคกับเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อเจือจางในน้ำ.....	51
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกน ผ่านวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรแต่ละตำแหน่งเมื่อ วัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน.....	52
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร กับความสูงพีคด้านซ้าย.....	53
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร กับความสูงพีคด้านขวา.....	54
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็น ท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรกับพื้นที่ใต้พีคด้านซ้าย.....	55
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรกับพื้นที่ใต้พีคขวา.....	55
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกน ผ่านวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรแต่ละตำแหน่งเมื่อ วัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน.....	56
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคซ้ายกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร.....	57
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคขวากับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรจยูเรียขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร.....	57

รูปที่	หน้า
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พิศขายกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร.....	58
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พิศขายกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร.....	59
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกนผ่านวัตถุที่เป็นกล่องบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตรสูง 3 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งเมื่อวัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน.....	59
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของกล่องอะคริลิกกับตำแหน่งของดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	60
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับขนาดของวัตถุเมื่อวัตถุตัวอย่างเป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดต่างๆ.....	61
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงพีคขายกับขนาดท่อ.....	62
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงพีคขายกับขนาดท่อ.....	62
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พิศขายกับขนาดท่อ.....	63
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พิศขายกับขนาดท่อ.....	63
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างพีคกับขนาดท่อ.....	64
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับขนาดของวัตถุเมื่อวัตถุตัวอย่างเป็นกล่องอะคริลิกบรรจุยูเรีย.....	64
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของพีคกับขนาดของวัตถุที่เป็นกล่องอะคริลิก.....	65
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมแต่ละตำแหน่งการสแกน กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน.....	66
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของพีคทางด้านขวา กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน	67
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของพีคทางด้านซ้ายกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน	67
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พิคทางด้านขวา กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน.....	68
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พิคทางด้านซ้ายกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน.....	68
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 1 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	69

รูปที่	หน้า
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์ สแกตเทอริงเมื่อฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดไว้ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ณ พื้นที่บริเวณที่ 1 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	70
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์ สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 2 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	71
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบเมื่อฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดและ วัตถุแปลกปลอมในดินที่ตำแหน่งต่างๆ กับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 2 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	71



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีนิวเคลียร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านไม่ว่าทางด้านอุตสาหกรรม ทางด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร รวมถึงด้านการรักษาความปลอดภัยทั้งด้านกิจกรรมทางทหารและพลเรือน ในด้านกิจกรรมทางทหารรวมถึงการสำรวจและค้นหาภัยระเบิดที่ฝังอยู่ในดินหรือวัตถุต้องสงสัย ในปัจจุบันมีวิธีต่าง ๆ หลายวิธีในการตรวจหาวัตถุระเบิด เช่น วิธีทางชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรียชนิดหนึ่งที่อาศัยอยู่บนดินซึ่งตัวมันเองสามารถเรืองแสงได้ในเวลากลางคืนซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้จะอาศัยไฮโดรเจนของ TNT ที่ปลดปล่อยออกมาจากกับระเบิดเป็นอาหาร, การปลูกพืชบางชนิดที่จะเปลี่ยนสีไปเมื่อพื้นดินบริเวณนั้นมีไนโตรเจนไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบที่ใช้ทำกับระเบิด, การใช้สุนัขดมกลิ่น การใช้ผึ้ง การตรวจสอบทางกายภาพ โดยการใช้เครื่องตรวจโลหะ การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคทางด้านนิวเคลียร์ก็มีหลายวิธี เช่น วิธีการใช้เทคนิคนิวตรอนสแกตเทอริงหรือการกระเจิงของนิวตรอน การส่งผ่านนิวตรอน การวัดรังสีพรอมต์แกมมา เป็นต้น แต่ยังไม่มียางานการใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง (Differential Gamma-Ray Scattering Technique, DGST) ในการตรวจหาวัตถุระเบิดหรือกับระเบิด แต่มีรายงานการวิจัยที่ใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบรอยบกดพ่วงในแท่งอะลูมิเนียม [1], [2] การตรวจหาตำแหน่งและสภาพการสึกกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีต [3] และการตรวจหาตำแหน่งและขนาดของเหล็กเส้นในพื้นที่คอนกรีต [4] ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคนี้มีความไวสูงต่อการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในวัตถุตัวอย่าง จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ตรวจหาภัยระเบิด

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง เป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่มีหลักการทดสอบโดยอาศัยผลต่างของคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมที่ได้จากพื้นดินที่ไม่มีวัตถุฝังอยู่ กับพื้นดินที่มีวัตถุฝังอยู่ ซึ่งผลรวมของค่าคอมป์ตันสแกตเทอริงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้ในช่วงพลังงานที่สนใจจะมากหรือน้อยเป็นค่าบวกหรือค่าลบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาด รูปร่าง ชนิดและตำแหน่งของวัตถุ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบการตรวจสอบค้นหาวัตถุระเบิดที่ฝังอยู่ในดินโดยการจำลองลักษณะของระเบิดและจำลองถึงสิ่งแวดล้อมที่ต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อการตรวจสอบด้วยเทคนิค

ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปเป็นเครื่องตรวจหากับระเบิดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงในการตรวจหากับระเบิดที่ฝังอยู่ในดิน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทดลองหาความสัมพันธ์ของขนาด ตำแหน่งความลึกและปริมาณไนโตรเจนของกับระเบิด ที่มีต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม

1.3.2 ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจหากับระเบิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง เช่น ความชื้น วัตถุแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ในพื้นดิน

1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทดลองการจัดระบบวัดโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับวัตถุที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

1.4.3 ศึกษาทดลองหาความสัมพันธ์ของขนาด ตำแหน่งความลึกและปริมาณไนโตรเจนของกับระเบิด ที่มีต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม

1.4.4 ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจหากับระเบิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง เช่น ความชื้น วัตถุแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ในพื้นดิน

1.4.5 ทดลองใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงในการตรวจหาวัตถุเสมือนกับระเบิดที่ฝังอยู่ในดินโดยการเปรียบเทียบผลกับเทคนิคนิวเคลียร์อื่น

1.4.6 สรุป วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้แนวทางในการพัฒนาและสร้างเครื่องตรวจหากับระเบิดที่ฝังอยู่ในดินด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงต่อไป

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 สราพรรณ พจน์ชนะชัย [3] ได้ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาและพัฒนาเทคนิคสำหรับการตรวจสอบ เหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง สเปกโทรสโคปี ระบบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรง 5.5 มิลลิคูรี ซึ่งวางท่ามุมฉากกับหัววัดรังสี BGO ลำรังสีตกกระทบถูกบังคับให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ส่วนหัววัดรังสีถูกกำบังรังสีเฉพาะด้านข้าง เพื่อให้รังสีแกมมากระเจิงจากชิ้นงานสามารถเข้าสู่ด้านหน้าของหัววัดรังสีจากมุมต่าง ๆ กัน ผลการวิจัยพบว่า ผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงตามขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี นอกจากนี้ยังพบว่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักของเหล็กที่หายไป

1.6.2 ศิโรจน์ พยัคฆวงษ์ [4] ได้ทำการวิจัยเรื่องการสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้ในการตรวจสอบพื้นคอนกรีต โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรง 5.5 มิลลิคูรี และหัววัดรังสีบีสมัทเจอมาเนตขนาด 5 ซม. x 5 ซม. ลำรังสีแกมมาจะถูกบังคับด้วยตะกั่วกำบังรังสีที่มีความหนา 5 ซม. ทำให้ลำรังสีออกมามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ตกกระทบกับผิวหน้าชิ้นงานเป็นมุมฉาก หัววัดจะถูกหุ้มด้วยตะกั่วกำบังรังสีและวางท่ามุม 45 องศากับลำรังสีแกมมา จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อทำการทดลองกับคอนกรีตขนาด 40 ซม. x 20 ซม. x 10 ซม. ที่มีขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นต่างกันพบว่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้น และเมื่อทดสอบกับคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นคอนกรีตพบว่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมไวต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วยซึ่งทำให้รบกวนค่าที่วัดได้

1.6.3 Cor P. Datema, Victor R. Bom and Carel W.E. Van Eijk [5] ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์ในการตรวจหาที่ระเบิดด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cf-252 ความแรง 1.1 MBq หัววัดรังสีนิวตรอนชนิดบรรจุก๊าซ He-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 ซม. ยาว 50 ซม. จำนวน 8 หัววัด โดยแบ่งออกเป็นข้างละ 4 หัววัด วางต้นกำเนิดไว้ตรงกลาง และทำการสแกนที่ระดับห่างจากพื้นดิน 5 ซม. ตัวอย่างกับระเบิดที่ใช้เป็นชนิด ทำลายบุคคล (AP) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. หนา 4 ซม. และ กับระเบิดชนิดทำลายรถถัง(AT) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. หนา 4 ซม. ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางกับระเบิดแล้วค่อยๆ เลื่อนตำแหน่งหัววัดออกจากจุดกึ่งกลาง พบว่าค่านับวัด

รังสีนิวตรอนสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และจะค่อยๆลดลง ขนาดของกัมมะเบตที่ใหญ่ขึ้น มีผลให้ค่า นับวัดรังสีที่สูงขึ้น ระดับที่ลดลงไปจากพื้นดินมากขึ้น ค่านับวัดรังสี ก็จะลดลงตามลำดับ โดยที่ ตัวอย่าง AP ตรวจวัดได้จนถึงระดับลึกถึง 5 ซม. จากพื้นดิน ตัวอย่าง AT ตรวจวัดได้จนถึงระดับ 15 ซม. เมื่อกำหนดค่านับวัดรังสีนิวตรอนที่กระเจิงกลับเมื่อมีตัวอย่าง ต่อ ค่านับวัด Background ที่ 10%

1.6.4 Shiro Tuzi, Otomura Sato [6] ได้ทำการวิจัยเรื่องการหาตำแหน่ง ขนาด ความลึกและระยะห่างของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Ba-133 และ Cs-137 ระบบที่ใช้เป็นลำรังสีแคบและจำกัดลำรังสีที่เข้าสู่ หัววัดรังสี โดยระบบวัดรังสีแกมมาจะบรรจุทุกบนรถเลื่อนแล้วสแกนไปบนผิวของคอนกรีตเสริมเหล็กทำการวัดอัตราการนับรังสีที่กระเจิงจากคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อระบบวัดเคลื่อนที่ผ่าน บริเวณคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมอัตรานับที่ได้จะตกลง จึงสามารถหาตำแหน่ง ขนาด ความลึกและ ระยะห่างของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็กได้

1.6.5 R. Doczi , B. Kiraly and J. Csikai [7] ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาเทคนิคในการตรวจหากัมมะเบตด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน ต้นกำเนิดรังสี Cf-252 ความแรง 10^5 Bq หัววัดรังสีนิวตรอน BF₃ โดยทดลองกับตัวอย่างต่างๆ เช่น NH₄NO₃ เมลามีน และ น้ำ โดยใส่ภาชนะพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม. หนา 5 ซม. นำตัวอย่างเตรียมไว้ฝังในทรายแห้งที่ระดับความลึกต่างๆกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางกัมมะเบตแล้วค่อยๆเลื่อนตำแหน่งหัววัดออกจากจุดกึ่งกลาง พบว่าค่านับวัดรังสีนิวตรอนสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และจะค่อยๆลดลง ระยะห่างระหว่างหัววัดกับตัวอย่างยิ่งมาก ค่านับวัดรังสียิ่งลดลง เมื่อความหนาแน่นของไฮโดรเจนในตัวอย่างมากขึ้น ค่านับวัดรังสีก็สูงขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อนำน้ำมาทดสอบวัดความเข้มของนิวตรอนที่กระเจิงกลับ พบว่าน้ำให้ค่านับวัดรังสีมากกว่าการนำตัวอย่าง TNT ฝังในทรายลึก 4 ซม. ถึง 4 เท่า และเมื่อปริมาณความชื้นในทรายมากกว่า 20% จะไม่สามารถตรวจหาตัวอย่างได้ จึงแสดงให้เห็นว่าน้ำ หรือความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง ต่อการรบกวนค่านับวัดรังสีนิวตรอนจากตัวอย่าง ซึ่งอาจมีผลให้การตรวจหาทุ่นระเบิดมีความผิดพลาดได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กักระเบิด [8], [9]

กักระเบิดที่พบโดยทั่วไป มีขนาด รูปร่าง และวัสดุที่ใช้ทำตัวถังของกักระเบิดมีหลายชนิด อาทิเช่น โลหะ พลาสติก ไม้ รวมทั้งกลไกในการจุดระเบิดก็มีหลายวิธีเช่นกัน ตั้งแต่การใช้แรงกด ใช้ลวด คลื่นเสียง คลื่นสะท้อน ไปจนกระทั่ง แสงหรืออิทธิพลของสนามแม่เหล็ก วัตถุประสงค์โดยส่วนใหญ่จะเป็น TNT ($C_7H_5N_3O_6$) และ RDX ($C_3H_6N_6O_6$) ประกอบไปด้วย 4 ธาตุหลัก คือ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คาร์บอนและออกซิเจน กักระเบิดสามารถแบ่งตามจุดประสงค์ในการใช้งาน ได้ 2 ชนิดคือ กักระเบิดทำลายรถถัง (Anti-Tank, AT) และกักระเบิดทำลายบุคคล (Anti-personal, AP) ซึ่งแตกต่างกันที่ขนาด ลักษณะและส่วนประกอบที่ใช้ทำกักระเบิด

2.1.1 กักระเบิดทำลายรถถัง (AT)

รูปร่างภายนอกโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบทรงกระบอก หรือเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 150 ถึง 300 มิลลิเมตร หน้า 90 ถึง 120 มิลลิเมตร วัตถุประสงค์ส่วนใหญ่จะเป็นชนิด TNT, RDX หรือ Comp B ความลึกมากที่สุดที่ฝังอยู่ในดินประมาณ 150 มิลลิเมตร

2.1.2 กักระเบิดทำลายบุคคล (AP)

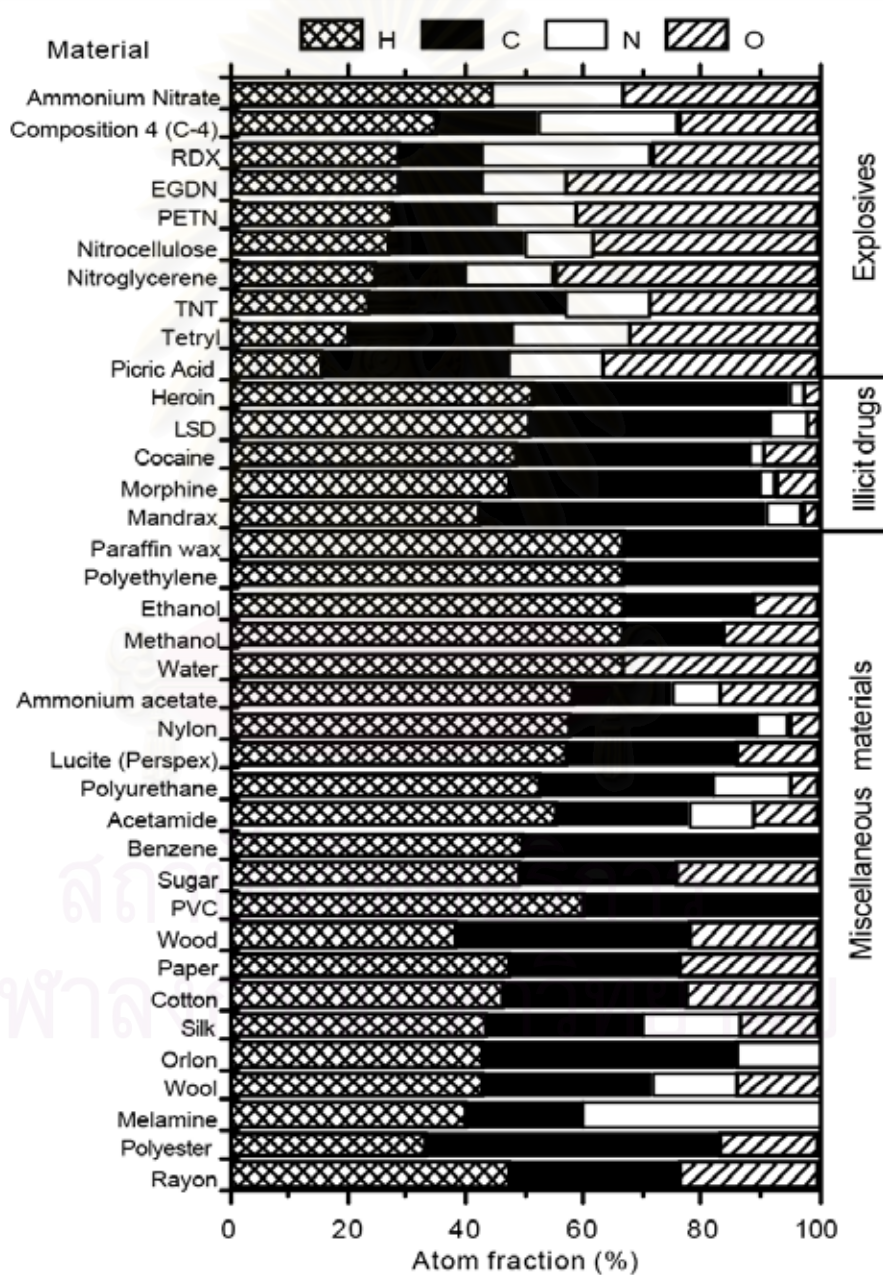
รูปร่างภายนอกจะเป็นแบบจาน หรือทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 90 ถึง 120 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่ทำจากวัตถุระเบิดชนิด TNT, Tetryl หรือ Comp B ความลึกมากที่สุดที่ฝังอยู่ในดินประมาณ 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.1 ชนิดและคุณสมบัติบางประการของกักระเบิด [10]

Type	Manufacturing country	Weight [kg]	Mine-case material	Mine-case color	Mine fuse	Explosive charge	Explosive weight [g]
Type 69	China	1.35	Cast iron	Olive drab	Pressure or tripwire	TNT	105
Type 72	China, S. Africa	0.125	Plastic	Green	Pressure	TNT/RDX (50/50)	75 or 100
M14	USA, India	0.158	Plastic	Olive drab	Pressure	Tetryl	29
M16A1	USA	3.57	Steel	Green	Trip wire, pressure	TNT	513
M18A1	USA, Chile, South Korea	1.58	Plastic	Olive drab	Command detonation	C-4	682
Valmara 69	Italy	3.3	Plastic	Green, sand	Trip wire, pressure	Comp. B	597
VS-50	Egypt, Italy, Singapore	0.185	Plastic	Olive drab, sand	Pressure	RDX	43
PP-MI-SR	Czech Republic	3.2	Steel, plastic	Olive drab	Trip wire, pressure	TNT	362
MON-200	Russia	25	Metal	Olive drab	Trip wire, command detonation	TNT	12 kg
PMN	Russia, Iraq	0.55	Bakelite	Black	Delay-armed, pressure	TNT/Tetryl	200
POMZ-2	Russia, North Korea, Germany, China	2.3	Metal	Olive drab	Trip wire	TNT	75
PMD-6	Russia	0.4	Wood	Natural wood	Pressure	TNT	200

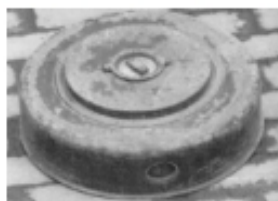
ตารางที่ 2.2 ชื่อและสูตรทางเคมีของระเบิดบางชนิด [10]

Trade name or abbreviation	Chemical name	Major ingredients	Vapor pressure at ambient temperature [torr]
TNT	2,4,6-Trinitrotoluene		5.8×10^{-6}
Tetryl	2,4,6,N-Tetranitro-N-methylaniline		5.7×10^{-9}
RDX	1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazacyclohexane		4.4×10^{-9}
HMX	1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane		3×10^{-9} (at 100°C)
PETN	Pentaerythritol tetranitrate		1.4×10^{-8}
NG	Glycerol trinitrate (Nitroglycerin)		3.1×10^{-4}
EGDN	Ethylene glycol dinitrate		0.07
Composition C-4		RDX + plasticizer	
Composition B		RDX + TNT + wax	
Semtex-H		RDX + PETN + plasticizer	
Detasheet		PETN + plasticizer	



รูปที่ 2.1 สัดส่วนอะตอมของธาตุไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ในระเบิด ยาเสพติด และวัสดุบางชนิด [11]

Anti-Tank Mines: buried 1 to 6 inches deep, metal and plastic



M15 (metal)



M19 (plastic)



VS1.6 (plastic)

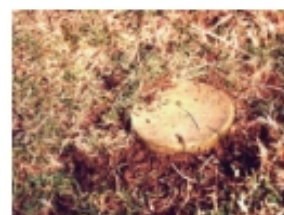
Anti-Personnel Mines: buried 1 to 3 inches deep, mostly plastic



M14



PMA3

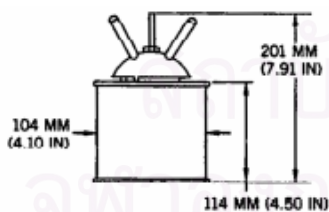


PMN

FOR OFFICIAL USE ONLY



- U.S.S.R. LANDMINES, APERS, PMD-8 AND PMD-8M
 - H-35-2-19
- Ordnance used with:
U.S.S.R. MINE FUZE: MUV-4



- ITALIAN LANDMINES, APERS, VALMARA AND VALMARA 59
 - H-9-2-15
- Ordnance used with:
ANTILIFT DEVICE: VS-AR4

รูปที่ 2.2 ลักษณะและรูปร่างของกับระเบิดชนิดต่าง ๆ

2.1.3 เทคนิคการตรวจหาคับระเบิด

วิธีตรวจวัดทั่วไป

เทคนิคที่ใช้กันส่วนมากในปัจจุบันยังคงเป็นวิธีดั้งเดิมซึ่งมี 4 วิธี ดังนี้

- ตรวจสอบด้วยการมอง วิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งและชนิดของกัระเบิดได้ชัดเจน แต่มีข้อจำกัดคือจะตรวจหาได้เฉพาะกัระเบิดที่ฝังใกล้กับผิวน้ำดิน หรือที่ตื้นๆ เท่านั้น
- เครื่องตรวจโลหะ โดยอาศัยหลักการส่งผ่านสนามแม่เหล็กเพื่อไปชักนำ ให้เกิดกระแสเอ็ดดี (eddy current) ในวัตถุที่เป็นโลหะ ซึ่งกระแสเอ็ดดีนี้จะชักนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในตัววัตถุจึงสามารถตรวจวัดได้ แต่อย่างไรก็ตามกัระเบิดส่วนมากจะไม่มีองค์ประกอบของโลหะ ยกเว้นระเบิดตะปู ดังนั้นวิธีจึงเป็นเพียงการบอกได้ว่ามีสิ่งผิดปกติฝังอยู่ใต้ดินแต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นวัตถุระเบิดหรือไม่
- ตรวจสอบโดยใช้มีดปลายปืน ยาวประมาณ 25 เซนติเมตร บักลงในพื้นดินซึ่งจะตรวจหาสิ่งผิดปกติที่เป็นของแข็งได้ แต่จะไม่สามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะของวัตถุระเบิด นอกจากนี้ในการตรวจสอบไม่สามารถบักลงในดินได้ตรงๆ เนื่องจากกัระเบิดจะถูกกดจากด้านบน ดังนั้นในการบักต้องทำมุมกับผิวดิน ซึ่งถือว่าวิธีเป็นวิธีที่อันตราย
- สุนัขดมกลิ่น เนื่องจากสุนัขมีประสาทสัมผัสด้านการรับกลิ่นได้ดีกว่ามนุษย์มาก จึงถูกนำมาใช้ในการค้นหาคับระเบิดได้ โดยการดมไอที่ระเหยจากสารที่ทำวัตถุระเบิด ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยการฝึกสุนัข และข้อจำกัดของสุนัขคือไม่สามารถปฏิบัติงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกลิ่น แต่ความสามารถในการแยกกลิ่นไม่ดีเท่ากับสุนัข นอกจากนี้ในสถานที่ปฏิบัติงานจะเต็มไปด้วยไอระเบิดที่ถูกฝังก่อนหน้านี้อาจทำให้สุนัขสับสนได้

วิธีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นต้องอาศัย ผู้ที่มีระเบียบวินัยในการทำงาน และผ่านการฝึกฝนจนมีความเชี่ยวชาญในการตรวจสอบ

เทคนิคสร้างภาพ

- กล้องอินฟราเรด อาศัยความแตกต่างของค่าความจุความร้อนในดินและวัตถุระเบิด ดังนั้นแสงอินฟราเรดที่ปลดปล่อยออกมาจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการรับ หรือคายความร้อน จึงมีการตรวจสอบโดยการถ่ายภาพจากรูปแบบของการปลดปล่อยความร้อนจากพื้นดิน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถระบุตำแหน่งของสิ่งผิดปกติได้ แต่ไม่สามารถให้ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของวัตถุได้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถตรวจสอบได้ทางอากาศ ควบคุมได้จากระยะไกล และครอบคลุมพื้นที่กว้างในระยะเวลาสั้น ๆ แต่

จะไม่สามารถตรวจสอบได้ถ้า ดินและวัตถุระเบิดมีอุณหภูมิเข้าสู่สมดุล รวมทั้งในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวดิน เช่น เวลาพระอาทิตย์ขึ้น หรือ พระอาทิตย์ตก

- การใช้เลเซอร์ในการตรวจวัด อาศัยคุณสมบัติในการสะท้อนและ การโฟกัสที่ แตกต่างกัน เมื่อวัตถุถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งสามารถระบุสิ่งผิดปกติที่ฝังอยู่ได้ ซึ่งวิธีนี้ต้องการแสงเลเซอร์พลังงานสูง การแปรผลข้อมูลที่ค่อนข้างซับซ้อน และวิธีนี้ ไม่สามารถให้ข้อมูลลักษณะเฉพาะของวัตถุได้
- การส่งผ่านคลื่นเรดาร์ อาศัยการตรวจวัดกระแสเอ็ดดี้ที่เกิดขึ้นในวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ เช่น โลหะ และวัตถุคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับหมดบนผิวที่เป็นโลหะ ด้วยเทคนิคนี้จะสามารถตรวจหาวัตถุระเบิดที่บรรจุในวัสดุที่เป็นโลหะเท่านั้น อย่างไรก็ตามรูปแบบการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเฉพาะตามชนิดของวัสดุ ทำให้ระบุตำแหน่งของสิ่งผิดปกติได้ แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากดินและวัสดุเป้าหมายมีความแตกต่างกันน้อย ถูกรบกวนจากความไม่เรียบของผิวดิน หรือ วัสดุอื่นๆ เช่น หิน รากไม้ นอกจากนี้ วิธีไม่สามารถใช้งานในพื้นที่ที่มีความชื้นสูง หรือมีน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี

แม้ว่าวิธีที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถระบุตำแหน่งของสิ่งผิดปกติใต้ผิวดินได้อย่างชัดเจน แต่ยังคงไม่สามารถระบุลักษณะเฉพาะหรือชนิดของวัสดุนั้นได้ ส่งผลให้ในการเก็บกวาดวัตถุระเบิดยังคงเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

การตรวจวัดโดยวิธีทางนิวเคลียร์

เป็นการตรวจวัดโดยอาศัยการส่งผ่านรังสีนิวตรอน หรือ รังสีแกมมา แล้วตรวจวัดรังสีทุติยภูมิที่เกิดจากการกระตุ้น หรือ วัตถุรังสีกระตุ้น วิธีนี้จะทำให้ได้ลักษณะเฉพาะของวัตถุ เนื่องจากวัตถุระเบิดจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจน (สารเชื่อม) และออกซิเจน (สารออกซิไดซ์) ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการบ่งชี้ว่าเป็นวัตถุระเบิดหรือไม่ จะได้จากองค์ประกอบของไนโตรเจนและออกซิเจน

สำหรับองค์ประกอบของดินที่มีกับระเบิดฝังอยู่นั้นมีทั้งทรายแห้งไปจนถึงดินที่มีความอุดมสมบูรณ์และมีความชื้นสูง อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบหลักของชั้นเปลือกโลก มีธาตุที่เป็นพื้นฐาน 8 ชนิด คือ ออกซิเจน (49.52%) ซิลิกอน (25.75%) อะลูมิเนียม (7.51%) เหล็ก (4.7%) แคลเซียม (3.39%) โซเดียม (2.64%) โพแทสเซียม (2.40%) และ แมกนีเซียม (1.94%) นอกจากนี้ประกอบด้วยธาตุอื่น 2.15% โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า องค์ประกอบที่เหมือนกับวัสดุระเบิดมีเพียงออกซิเจนเท่านั้น แต่ในดินยังคงมีวัสดุอย่างอื่น เช่น รากไม้ เศษพลาสติก ฝังอยู่ ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนนี้ประกอบด้วยธาตุชนิดเดียวกับวัตถุระเบิด อาจทำให้เกิดความสับสนในการ

ตรวจวัด ซึ่งอาจแก้ไขได้โดย การตรวจสอบความหนาแน่น เนื่องจากวัดทะลุเบ็ดมีความหนาแน่นสูง กว่าวัสดุอินทรีย์สารทั่วไป แต่มีความหนาแน่นต่ำกว่าโลหะ และดินอีกหลายชนิด ดังนั้นการนำใช้ ข้อมูลด้านองค์ประกอบรวมกับความหนาแน่นจึงมีประโยชน์มากในการระบุชนิดและตำแหน่งของ สิ่งผิดปกติ ที่บรรจุวัดทะลุเบ็ด เทคนิคนิวเคลียร์ที่ใช้ตรวจวัดทะลุเบ็ดแบ่งได้ตามชนิดของรังสี ดังนี้

- โฟตอน (รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา) อาศัยหลักการตรวจวัดรังสีกระเจิง หรือ รังสี คอมป์ตัน ซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลักที่เกิดในวัสดุ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาจะขึ้นกับ ความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง วิธีนี้จะ นำไปใช้ในการสร้างแผนภาพความหนาแน่น และสามารถหาสิ่งผิดปกติที่มีค่าความ หนาแน่นอยู่ในช่วงเดียวกับวัดทะลุเบ็ด อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่สามารถบ่งบอกได้ถึง ลักษณะเฉพาะของวัตถุได้
- นิวตรอน อาศัยการวัดรังสีแกมมาเฉพาะตัวที่ปลดปล่อยออกมา เมื่ออะตอมถูก กระตุ้นด้วยนิวตรอน โดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนแบ่งได้ตามพลังงานของ นิวตรอนดังนี้
 - การกระตุ้นด้วยนิวตรอนพลังงานต่ำ จะทำการวัดรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา การจับนิวตรอน พลังงาน 10.8 MeV จากไนโตรเจน, 2.22 MeV จาก ไฮโดรเจน ซึ่ง ธาตุทั้งสองชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหลักในวัดทะลุเบ็ด ส่วน คาร์บอนกับออกซิเจนตรวจวัดได้ยากเนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางการจับ นิวตรอนต่ำ นอกจากนี้ การวัดไฮโดรเจน กับซิลิกอน (รังสีแกมมาพลังงาน 3.54 MeV) สามารถบอกได้ว่าสิ่งผิดปกติที่พบไม่ใช่วัดทะลุเบ็ด เนื่องจาก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในระเบิดค่อนข้างคงที่ คือ ประมาณ 2-3% ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนในพื้นที่แปรผันตามปริมาณน้ำ ส่วนซิลิกอนจะไม่ พบในวัดทะลุเบ็ด
 - การกระตุ้นด้วยนิวตรอนพลังงานสูง จะวัดรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการ ชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งค่าภาคตัดขวางการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของไนโตรเจน และออกซิเจน ค่อนข้างสูง และให้รังสีแกมมาดังนี้ 1.116, 1.184, 1.593, 1.783 MeV ของไนโตรเจน และ 1.312, 1.651, 1.832, 1.907 MeV ของ ออกซิเจน

โดยสรุปแล้วเทคนิคทางนิวเคลียร์เป็นวิธีการที่สามารถระบุได้ว่าสิ่งผิดปกติที่พบนั้น เป็น วัดทะลุเบ็ดหรือไม่ ดีกว่าวิธีอื่น ๆ แต่ในการปฏิบัติงานจริงถ้าไม่มีข้อมูลของชนิดวัดทะลุเบ็ด ลักษณะพื้นที่ การใช้วิธีตรวจเพียงวิธีเดียวทำให้ยาก อาจต้องใช้วิธีการวัดรวมกันหลายวิธี ดังนั้น พัฒนาระบบตรวจให้เหมาะสม และคุ้มค่าที่สุด

2.2 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีประจุ ไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า มีความเร็วเท่ากับแสง พลังงานของรังสีแกมมาจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ ดังต่อไปนี้

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

$$E = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{\lambda} \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 4.135×10^{-15} eV.s)

ν คือ ความถี่ของคลื่น (s^{-1})

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

เมื่อนิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนแปลง หลังจากการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวเคลียสจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) การลดระดับพลังงานลงมาอยู่ในสถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปรังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้น นิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i (สถานะกระตุ้น) และ E_f เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

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

2.2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

2.2.1.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) [12], [13], [14]

ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ เกิดจากรังสีแกมมาพลังงานต่ำแต่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนเข้าชนอะตอมจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวจำนวนหนึ่ง ดังนั้น พลังงานจลน์ของ

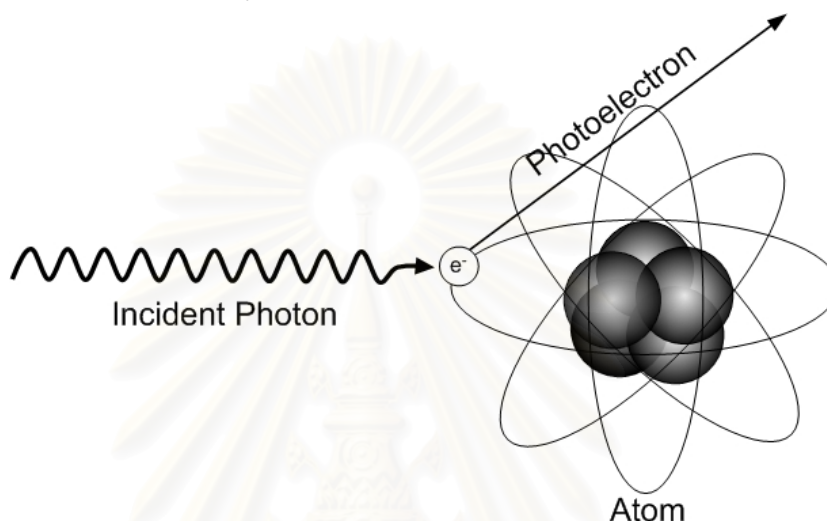
อิเล็กตรอน ที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.4)

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

E_γ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่เคลื่อนเข้าชนอะตอม

E_b คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



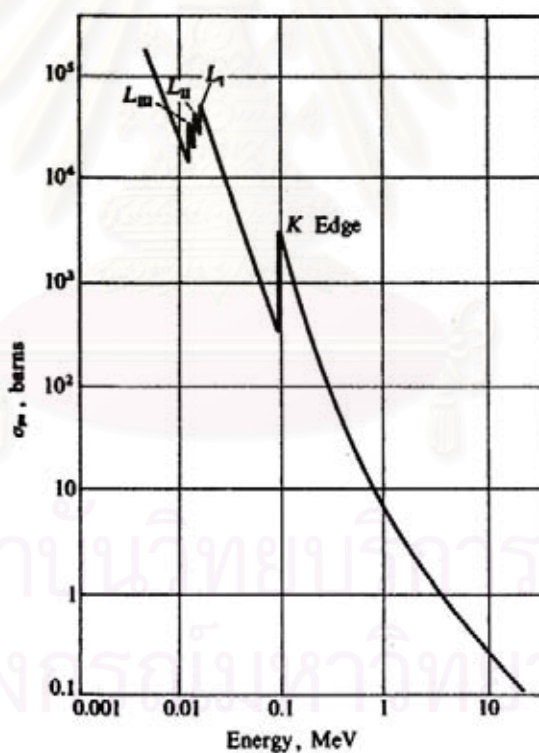
รูปที่ 2.3 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ [15]

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนแล้วโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวเมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสาร และเมื่อมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดช่องว่างในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะเลื่อนเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่างพร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) ออกมา และอาจจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรอบนอกแล้วทำให้เกิดไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้าในแนวเดียวกับทิศของรังสีแกมมา ส่วนรังสีแกมมาที่มาตกกระทบมีพลังงานต่ำมักจะส่งอิเล็กตรอนในแนวทำมุมฉาก

ถ้าให้ σ_{pe} เป็นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I (γ - photon /cm².s) ตกกระทบเป้าซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ต่อปริมาตรของเป้า, F_{pe} (cm⁻³ s⁻¹) จะแสดงได้ดังนี้

$$F_{pe} = I N \sigma_{pe} \quad \dots(2.5)$$

ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา σ_{pe} จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น และ σ_{pe} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง รูปที่ 2.3 แสดงค่า σ_{pe} ของตะกั่วที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า σ_{pe} ของตะกั่วมีค่าสูงและจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง นั่นก็หมายความว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทะลุผ่านตะกั่วได้ยาก



รูปที่ 2.4 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่ว ที่พลังงานต่างกัน[12]

จากรูปที่ 2.3 ค่า σ_{pe} มีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities) ในบางพลังงานแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่า σ_{pe} อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์ฟชันเอดจ์” (absorption edge) ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้นระดับพลังงานต่าง ๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอบซอร์ฟชันเอดจ์ ต่างกันคือ K_{edge} , L_{edge} , M_{edge} เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่า อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่าสันขอบการดูดกลืนของชั้น K จึงมีพลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียวเนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วนชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมียอดสันขอบการดูดกลืน 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

K_{edge} เป็นค่าพลังงานที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K- electron)พอดี อะตอมจะมีค่า σ_{pe} สูงชันขึ้น เพราะฉะนั้นอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานเท่ากับ K_{edge} ได้ดีกว่าในช่วงพลังงานใกล้เคียงกันในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า K_{edge} ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคท์กับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K-electron) ได้

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

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

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

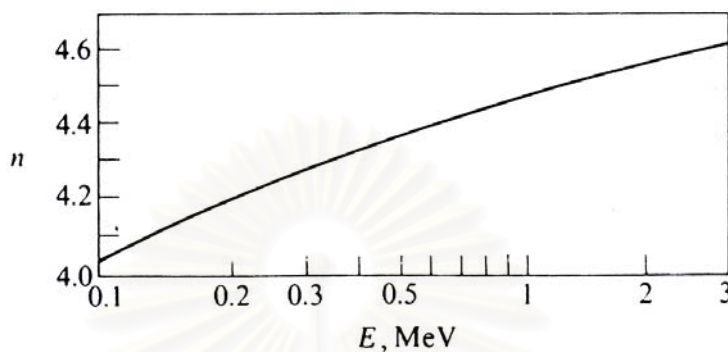
นอกจากนี้ค่า σ_{pe} ยังขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก คือ

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

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่จะมีค่าประมาณ 4 กราฟของค่า n แสดง ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคท์จึงเกิดกับธาตุที่เลขอะตอมสูง

เช่น ตะกั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ จะมีค่าประมาณดังสมการ

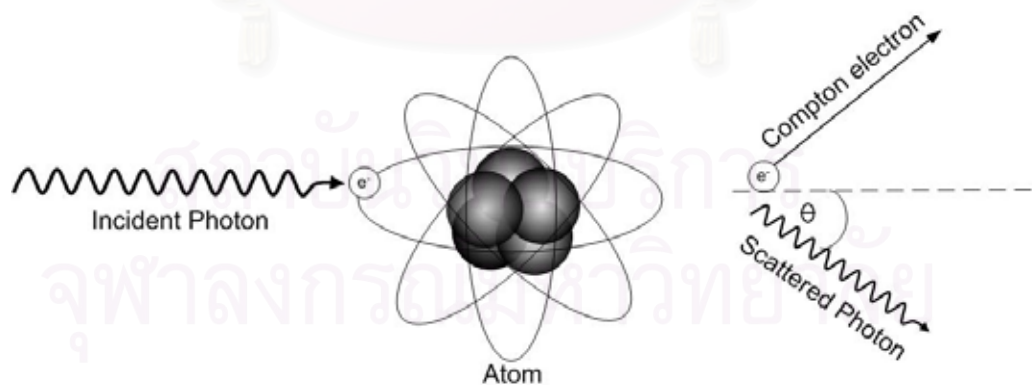
$$\sigma_{pe} \approx \frac{Z^n}{E^3} \times const \quad \dots(2.8)$$



รูปที่ 2.5 ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ [12]

2.2.1.2 ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน(The Compton Effect) [5], [6],[7], [9]

ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาเข้าชนกับอะตอมของตัวกลาง แล้วถ่ายเทพลังงานเพียงบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ส่วนรังสีแกมมาจะกระเจิงทำมุม θ กับแนวการเคลื่อนที่เดิม โดยมีพลังงานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน [14]

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

$$\begin{aligned} E_k &= mc^2 - m_0c^2 \\ &= m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots(2.9)$$

เมื่อ $\beta = v/c$ โดย v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนถอยกลับและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน (p_e) จะมีค่า

$$\begin{aligned} p_e &= m\beta c \\ &= \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned} \quad \dots(2.10)$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน x และ y และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

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

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

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu' + E_k \\ &= h\nu' + m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots(2.13)$$

เมื่อให้ค่าของมุม ϕ คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$p_e c \cos \phi = h\nu - h\nu' \cos \theta \quad \dots(2.14)$$

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

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu')\cos\theta + (h\nu')^2 \quad \dots(2.16)$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0 c^2 \quad \dots(2.17)$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{(p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4)} \quad \dots(2.18)$$

แทนค่าลงในสมการ (2.17) ได้

$$p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (E_k + m_0 c^2)^2 \quad \dots(2.19)$$

และแทนค่า $E_k = h\nu - h\nu'$ จากสมการ (2.12) ได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu - h\nu')^2 + 2(h\nu - h\nu') m_0 c^2 \quad \dots(2.20)$$

สมการ (2.16) และสมการ (2.20) เท่ากันดังนั้น

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

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

ทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของพลังงานจลน์ได้

$$\begin{aligned} E_k &= h\nu - h\nu' \\ &= h\nu \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \\ &= h\nu \left(\frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \end{aligned} \quad \dots(2.22)$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{2}{(1 + \alpha)^2 \tan^2\phi + 1} \quad \dots(2.23)$$

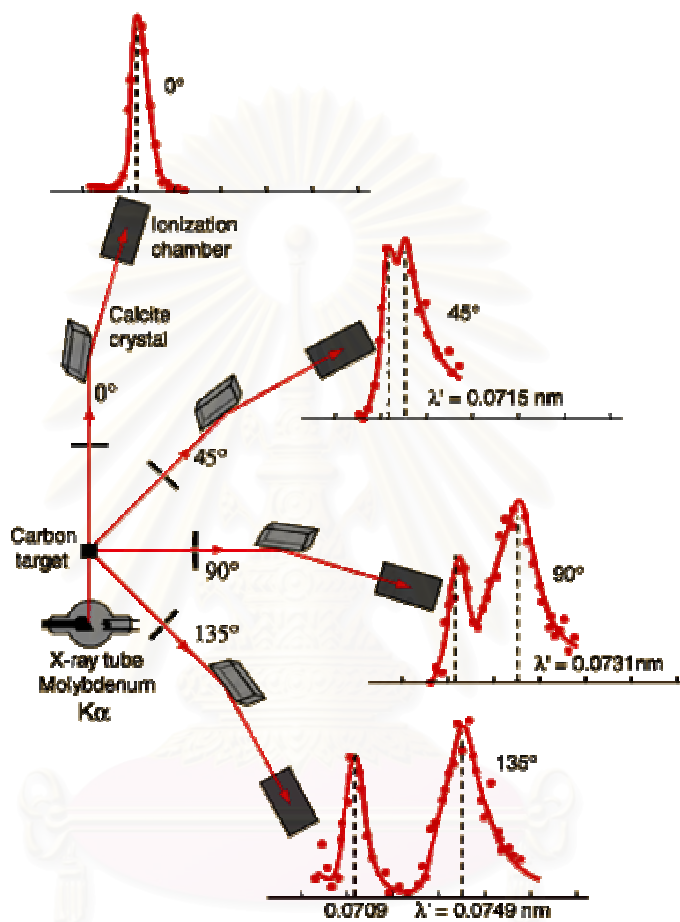
จากสมการ (2.21) เมื่อเปลี่ยนความถี่คลื่นให้อยู่ในรูปความยาวคลื่นจะได้เป็น

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad \dots(2.24)$$

โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นมากกว่าโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอน และความยาวคลื่นที่เปลี่ยน ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบอิเล็กตรอน แต่จะขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง θ และมวลของอิเล็กตรอน m_0 สำหรับค่า h/m_0c มีหน่วยเป็นความยาวเรียกว่า ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength) เมื่อแทนค่า m_0 , h และ c แล้วจะได้ $h/m_0c = 0.02426 \text{ \AA}$ ดังนั้นจากสมการ (2.24) ได้

$$\Delta\lambda = 0.02426(1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad \dots(2.25)$$

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 2.7 จากรูปจะเห็นว่าความเข้มของรังสีและความยาวคลื่นของรังสีเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมกระเจิงต่างๆ [16]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถคำนวณหาค่าพลังงาน $h\nu$ ของโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนได้ โดยใช้สมการ (2.22) จากการวัดพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมกระเจิง 180° จาก

$$E_k = h\nu \left(\frac{2\alpha}{1+2\alpha} \right)$$

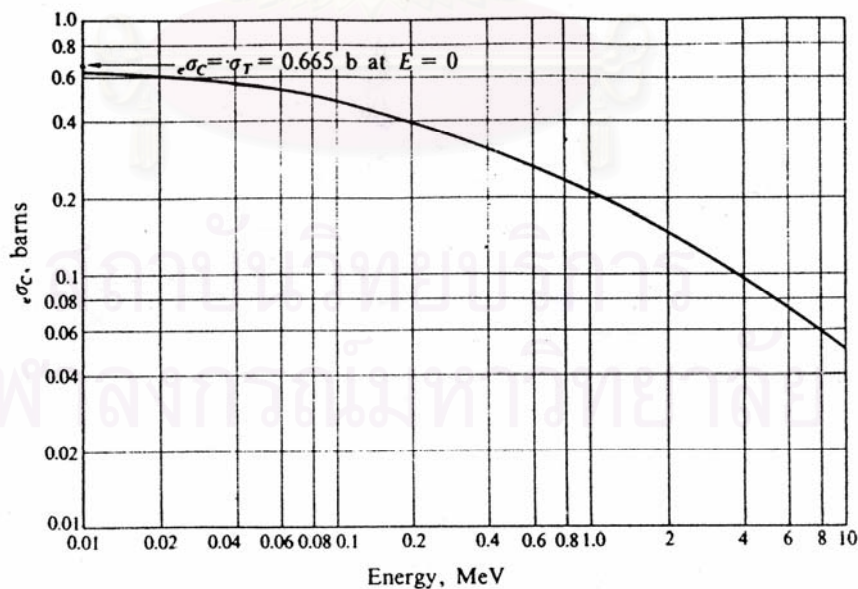
$$= h\nu \left(\frac{2h\nu/m_0c^2}{1+2h\nu/m_0c^2} \right) \quad \dots(2.26)$$

เนื่องจากปรากฏการณ์คอมป์ตันเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมา กับอิเล็กตรอนในอะตอม ดังนั้นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จึงเป็นค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน (${}_e\sigma_c$) ซึ่ง

$${}_e\sigma_c = {}_e\sigma_s + {}_e\sigma_a \quad \dots(2.27)$$

เมื่อ ${}_e\sigma_s$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการกระเจิงพลังงานของ รังสีแกมมา

${}_e\sigma_a$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการดูดกลืนพลังงานโดย อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.8 ค่า ${}_e\sigma_c$ ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ [12]

ค่าภาคตัดขวางนี้จะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นจากที่สูงที่สุด 0.655 บาร์น (barns) ที่พลังงาน 0 MeV ซึ่งเรียกว่าภาคตัดขวางทอมสัน (Thomson cross section, σ_T) ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นจน $E_\gamma \gg E_e$ ค่า σ_c จะแปรผันตรงตามค่า E^{-1} และค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัว ดูดกลืน ดังสมการ

$$\sigma_c = Z \sigma_e \quad \dots(2.28)$$

$$\sigma_c \propto E_\gamma^{-1} \quad \dots(2.29)$$

ดังนั้นโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของตัวดูดกลืน และจะเกิดได้ดีกับสารที่มีเลขอะตอม, Z สูง และจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมา, E_γ สูงขึ้นจึงประมาณโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันได้ว่า

$$\sigma_c \approx \frac{Z}{E_\gamma} \quad \dots(2.30)$$

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง ที่กระเจิงเป็นมุมต่าง ๆ สามารถคำนวณหาได้จากสูตรของ Klein-Nishina ดังสมการ

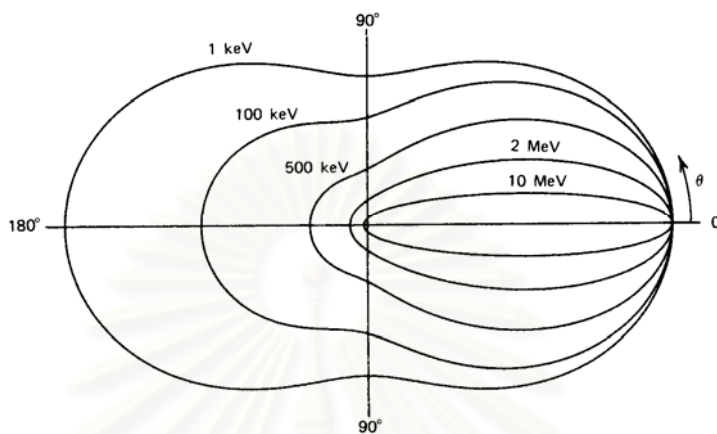
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \dots(2.31)$$

เมื่อ r_0 คือ classical electron radius = 2.82×10^{-13} cm

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

θ คือ มุมกระเจิง

ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงจากโฟตอนระดับพลังงานต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 จากสมการของ Klein-Nishina เมื่อพลังงานของรังสีตกกระทบยิ่งสูงมาก การกระเจิงส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) และที่พลังงานต่ำ ๆ $E \approx E_0$ สมการ (2.34) จะลดรูปเหลือเป็น $(1 + \cos^2\theta)$ ซึ่งจะสมมาตรที่มุม 90°



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน [13]

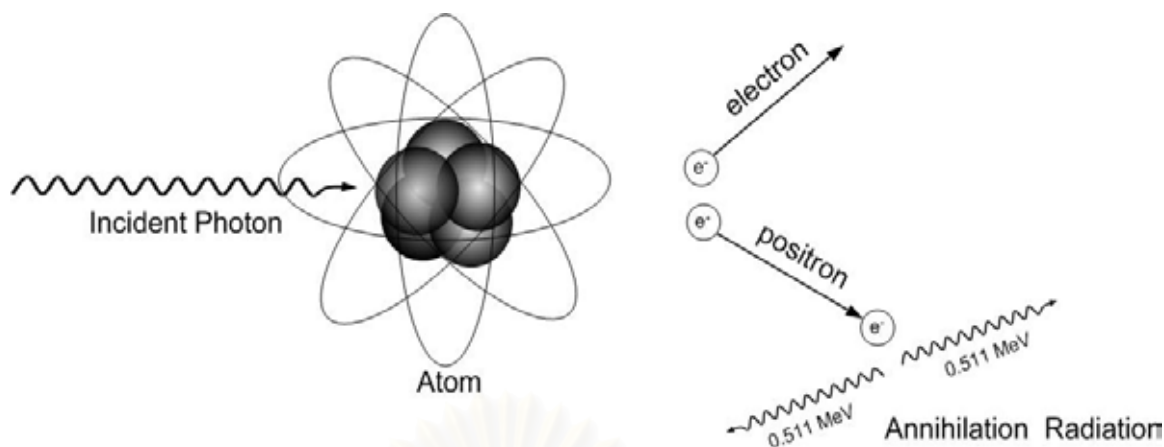
ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์และปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ก็คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอน แต่ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์นั้นเพียงแต่ลดขนาดพลังงานเดิมของโฟตอน เกิดโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลงและอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง หลังจากการเกิดคอมป์ตันแล้วโฟตอนที่มีพลังงานต่ำลงก็อาจจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์ได้อีก

2.2.1.3 แพร่โพดำกชัน (pair production) [12] , [13] , [14]

ปรากฏการณ์นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อ รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า 1.022 MeV เคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในอะตอม รังสีแกมมาจะหายไปกลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอนวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม อันตรกิริยานี้เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ดังนั้นพลังงานเริ่มต้นจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับมวลหนึ่ง (rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน นั่นคือ 1.022 MeV

$$h\nu = e^+ + e^- + 2E_k \quad \dots(2.32)$$

เมื่อ $2E_k$ คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน



รูปที่ 2.10 แผนภาพการเกิดเพอร์โพรดักชัน [14]

ถ้าพลังงานของรังสีแกมมาทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบโพรดักชันมีค่ามากกว่า 1.02 MeV พลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน โพสิตรอนที่เกิดขึ้นก็สามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดโฟตอน 2 ตัวที่มีพลังงานแต่ละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ปฏิกิริยาการอันนิฮิเลชัน (annihilation) ได้เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงมวลไปเป็นพลังงาน ตรงข้ามกับอันตรกิริยาแบบเพอร์โพรดักชัน

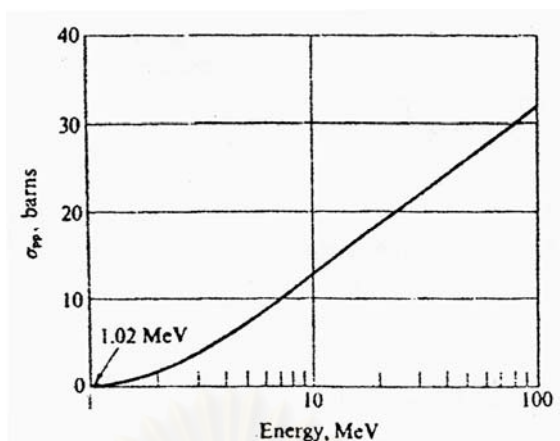
$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu \quad \dots(2.33)$$

ค่าภาคตัดขวางของการเกิดเพอร์โพรดักชัน (σ_{pp}) จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงค่าภาคตัดขวางของการเกิดเพอร์โพรดักชันของตะกั่ว และจะเกิดได้มากเมื่ออะตอมของตัวกลางมีค่าสูงขึ้น

$$\sigma_{pp} \cong Z^2$$

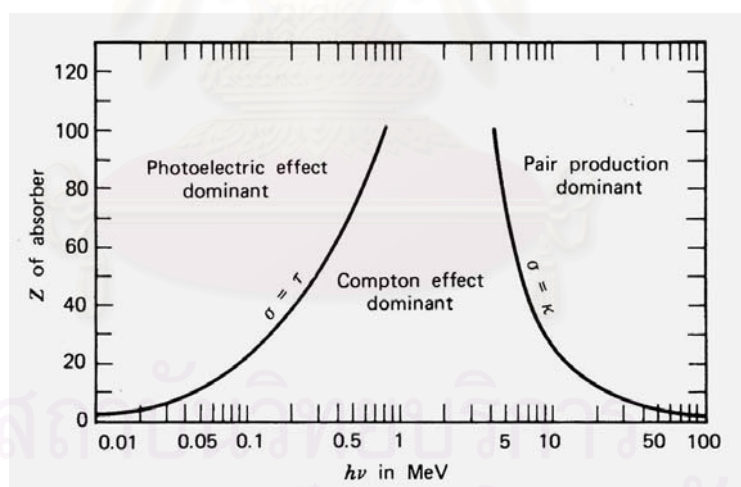
โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาแบบเพอร์โพรดักชันจะประมาณได้ว่า

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



รูปที่ 2.11 ภาคตัดขวางของการเกิดแฟร์ไพร์ดักชัน (σ_{pp}) ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ [12]

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละแบบนั้นจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมาและตัวกลางที่รังสีแกมมาไปทำอันตรกิริยาดังรูปที่ 2.12



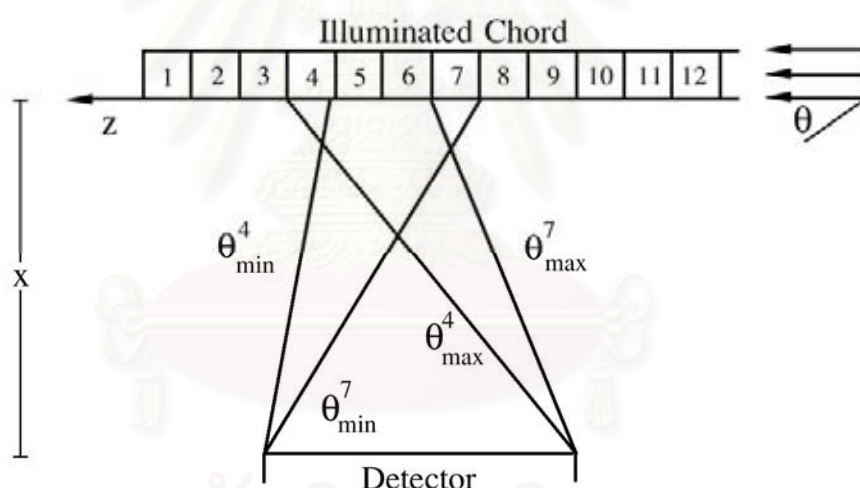
รูปที่ 2.12 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง [14]

2.3 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง [1]

หลักการของเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเป็นการประยุกต์ใช้การกระเจิงคอมป์ตันมาใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยอาศัยการวัดสเปกตรัมการกระจายพลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีแล้วนำสเปกตรัมของชิ้นงานตัวอย่างไปลบกับสเปกตรัมของตัวอย่างมาตรฐานจะได้ดิฟเฟอเรนเชียลของสเปกตรัม (differential spectrum)

เมื่อ θ คือมุมที่รังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัด และพลังงานของรังสีแกมมาที่ตกกระทบตัวอย่างเท่ากับ E (keV) ดังสมการ (2.34)

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{511}(1 - \cos\theta)} \quad \dots(2.34)$$



รูปที่ 2.13 การกระเจิงของรังสีแกมมาที่ตกกระทบกับแต่ละตำแหน่งในชิ้นงานวัสดุแล้วเข้าสู่หัววัดรังสีด้วยมุม θ ต่ำสุดถึงมุม θ สูงสุด [1]

พิจารณาจากรูปที่ 2.12 หัววัดรังสีวางห่างเป็นระยะทางเท่ากับ x จากลำรังสีแคบของต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานเดียว ถ้าตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันมีความยาว dz วางอยู่ในแนวรังสี รังสีแกมมาจะกระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี ถ้ารังสีแกมมาที่เข้าสู่หัววัดรังสีมีการกระเจิงเพียงครั้งเดียว จำนวนโฟตอนที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสี ได้จากสมการ (2.35)

$$N(\theta)d\theta = I_0 A_0 \frac{\rho N_0 Z_n}{M} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta \delta\phi dz \quad \dots(2.35)$$

- เมื่อ θ คือ มุมที่รังสีแกมมากระเจิงจากตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสี
 I_0 คือ จำนวนโฟตอนในลำรังสี (photon/cm-s)
 A_0 คือ พื้นที่ของลำรังสี (cm^2)
 Z_n คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่ออะตอม ในตัวอย่าง
 N_0 คือ เลขอะโวคาโด
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่าง (g/mol)
 ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (g/cm^3)
 $\sigma(\theta)$ คือ ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิงที่มุม θ ต่ออิเล็กตรอน (cm^2)
 $\delta\phi$ คือ มุมอะซิมุท

จากรูปที่ 2.13 ถ้าแบ่งชิ้นงานในวัสดุตัวอย่างเป็นส่วนเล็ก ๆ เท่า ๆ กันในแนวที่รังสีผ่าน รังสีที่ผ่านเข้ามาตกกระทบแต่ละตำแหน่งในชิ้นงานวัสดุด้วยมุมที่ไม่เท่ากันตั้งแต่มุมต่ำสุด (θ_{\min}) ถึงมุมสูงสุด (θ_{\max}) ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง $\sigma(\theta)$ สามารถหาได้จากสมการ Klein – Nishina

คอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมที่ได้จากตำแหน่งที่ 4 และตำแหน่งที่ 7 จะแตกต่างกัน เนื่องจากช่วงของมุมที่กระเจิงไม่เท่ากัน ทำให้พลังงานของสเปกตรัมที่ได้ไม่เท่ากัน ดังสมการ (2.34) โดยที่คอมป์ตันสแกตเทอริงที่ตำแหน่งที่ 4 จะมีพลังงานสูงกว่าตำแหน่งที่ 7 เพราะมีช่วงมุม θ ต่ำสุดถึงมุมสูงสุดต่ำกว่า

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเป็นวิธีการตรวจสอบความแตกต่างภายในวัสดุ เมื่อนำคอมป์ตันสแกตเทอริงสเปกตรัมของชิ้นงานตัวอย่างและชิ้นงานอ้างอิงมาลบกับ สเปกตรัมที่ได้ก็คือดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมซึ่งแสดงถึงความแตกต่างภายในชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้น แต่ถ้าหากชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นเหมือนกันทุกประการ ดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จำนวนโฟตอนที่กระเจิงจากชิ้นงานตัวอย่างเข้าสู่หัววัดรังสีที่มุม θ ได้จากสมการ

$$N_1(\theta) d\theta = \frac{I_0 A_0 N_0 Z_n}{M} \int_0^D [\rho_1(Z) \exp(-\mu_1 z) \times \exp(-\mu'_1 z') \sigma(\theta) d\Omega] dz \quad \dots(2.36)$$

เมื่อ D คือ ความยาวของลำรังสีที่มาตกกระทบในชิ้นงานอ้างอิงและชิ้นงานตัวอย่าง

μ, z คือ สัมประสิทธิ์ลดทอนและระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางก่อนการกระเจิง

μ', z' คือ สัมประสิทธิ์ลดทอนและระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางหลังการกระเจิง

และจำนวนโฟตอนที่กระเจิงจากชิ้นงานอ้างอิงเข้าสู่หัววัดรังสีที่มุม θ ได้จากสมการ

$$N_2(\theta) d\theta = \frac{I_0 A_0 N_0 Z_n}{M} \int_0^D [\rho_2(Z) \exp(-\mu_2 z) \times \exp(-\mu'_2 z') \sigma(\theta) d\Omega] dz \quad \dots(2.37)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมระหว่างชิ้นงานตัวอย่างและชิ้นงานอ้างอิง คือ

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

ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้เปรียบเสมือนเป็นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากการกระเจิงของรังสีแกมมาภายในรอยบกพร่องหรือวัสดุแปลกปลอม เมื่อขนาดและตำแหน่งของรอยบกพร่องหรือวัสดุแปลกปลอม แตกต่างกัน จะทำให้ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมที่ได้แตกต่างกันออกไป

เมื่อพิจารณาเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงพบว่า น่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบได้หลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะและตำแหน่งของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ

บทที่ 3

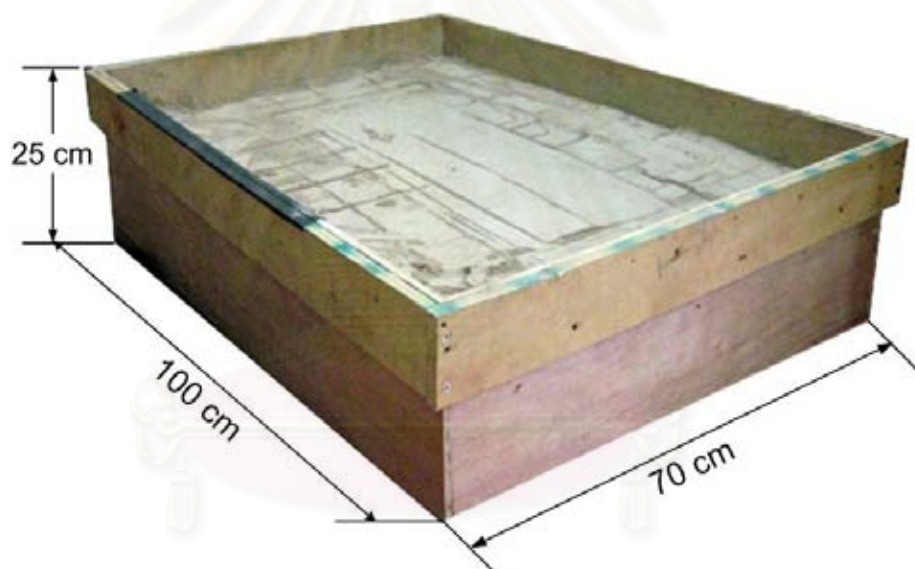
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1 กระดาษบรรจุดิน ขนาด ความกว้าง 70 เซนติเมตร. ความยาว 100 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
- 3.1.2 วัสดุตัวอย่างที่ใช้ทำการทดลอง
 - ปุ๋ยยูเรีย (Urea fertilizer) $(\text{NH})_2\text{CO}$
 - ผงตะกั่ว
 - ดินบดละเอียด
 - กล้องไม้
 - น้ำ
 - โพลีเอททิลีน (PE) $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$
- 3.1.3 วัสดุบรรจุตัวอย่าง
 - ท่อ PVC
 - กล่องพลาสติกทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร
- 3.1.4 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ความแรงแรังสี 5.5 มิลลิวูรี
- 3.1.5 หัววัดรังสีแกมมา โซเดียมไอโอดัด (ทาลเลียม) (NaI(Tl) crystal scintillation detector) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว
- 3.1.6 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบดิจิทัล CANBERRA Model DSA 2000
- 3.1.7 ไมโครคอมพิวเตอร์
- 3.1.8 ตะกั่วบงคับลํารังสีแกมมา และกำบังรังสีแกมมา



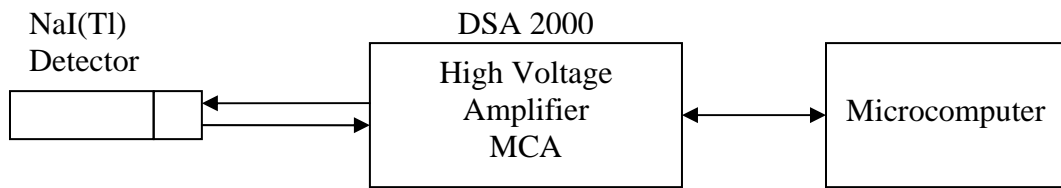
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ



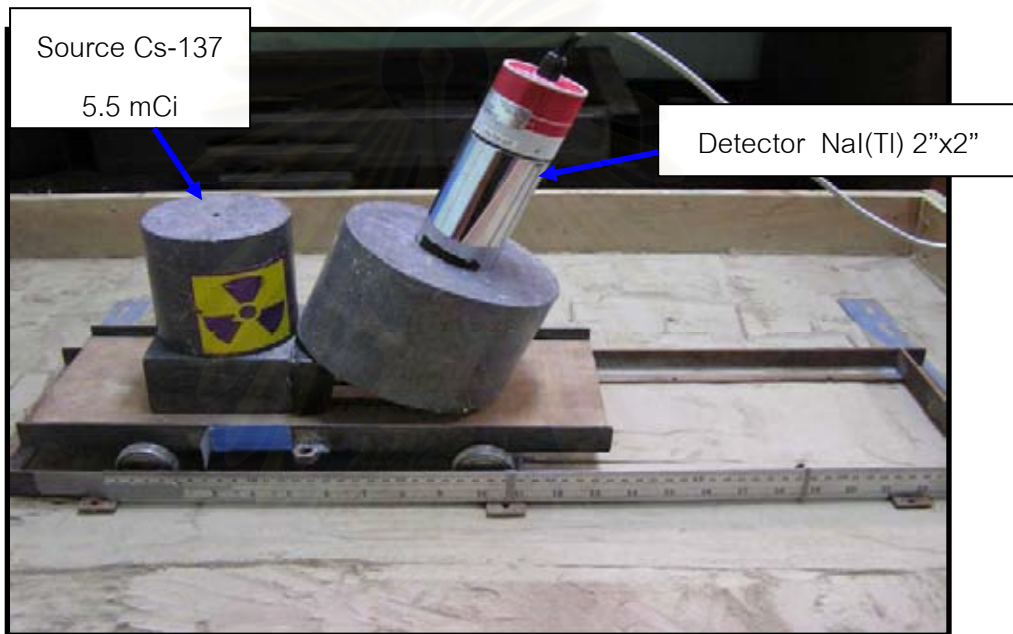
รูปที่ 3.2 กระบะดินสำหรับฝังตัวอย่าง



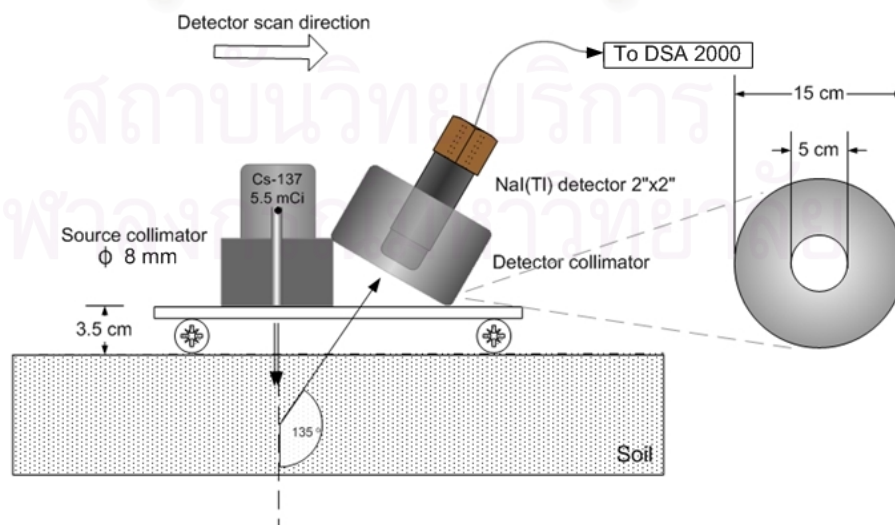
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบดิจิทัล Canberra Model DSA2000



รูปที่ 3.4 แผนผังการจักระบบวัดรังสีแกมมาเรย์สแกตเทอริง



รูปที่ 3.5 ลักษณะการจักระบบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.6 การจัดวางต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการตรวจหากับระเบิดที่ฝังอยู่ในดินด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเตอริงสเปกโตรสโคปี โดยจะทำการศึกษาลักษณะของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของการกระเจิงคอมพ์ตัน ที่กระเจิงจากวัสดุที่มี ขนาด รูปร่าง หรือความหนาแน่นของอะตอมที่แตกต่างกันและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลในการกระเจิงของคอมพ์ตัน

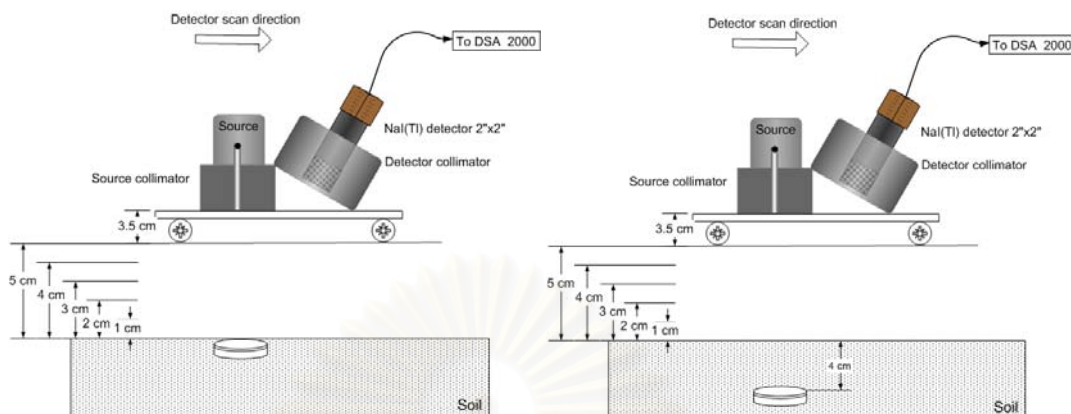
3.2.1 การออกแบบระบบวัดรังสี

ในการทำวิจัยนี้ได้ออกแบบวิธีการทดลองโดยการจำลองพื้นที่ เพื่อควบคุมตัวแปรต่างๆ โดยการใช้กระบะไม้ที่มีขนาด ความกว้าง 70 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร และขั้นตอนการเตรียมดิน จะนำดินที่ได้จากธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อลดความชื้นในดิน และนำไปบดละเอียดให้ขนาดของเม็ดดินมีขนาดเดียวกันเพื่อลดสิ่งแปลกปลอมภายในเนื้อดินที่จะทำให้มีผลต่อการกระเจิงแกมมาเรย์ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมทำการสแกนโดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงแรังสี 5.5 มิลลิคูรี ที่บรรจุอยู่ภายในตะกั่วทรงกระบอกโดยมีช่องบังคัมบังรังสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตรในทิศทางทำมุม 90 องศา กับพื้นดิน วัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากวัสดุตัวอย่างที่ฝังอยู่ในพื้นดิน หัววัดรังสีเป็นแบบซิลทิลเลชั่น ชนิดโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม)ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว บรรจุอยู่ภายในตะกั่วกำบังรังสีทรงกระบอกที่มีรูตรงกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร วางทำมุมกับพื้นดิน 45 องศา มุมกระเจิง 135 องศา ระบบสแกนจะวางอยู่บนแผ่นไม้ที่ติดล้อและวางอยู่ในรางเลื่อน ซึ่งระบบสแกนจะอยู่สูงจากพื้นดิน 3.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6

3.2.1.1 ศึกษาผลที่เกิดจากระยะห่างของระบบกับพื้นดิน

ในการทดลองการศึกษาค่าผลของระยะห่างระหว่างระบบที่ใช้ทำการตรวจวัด กับพื้นดิน ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.7 ซึ่งระยะห่างต่ำสุดระหว่างระบบวัดกับพื้นดินคือ 3.5 เซนติเมตร และปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นดินขึ้นครั้งละ 1 เซนติเมตรจนถึง 5 เซนติเมตร และในแต่ละครั้งได้ทำการสแกนตัวอย่างจากตำแหน่ง -13 เซนติเมตรถึงตำแหน่ง 13 เซนติเมตร โดยได้ทำการฝังวัตถุที่ทำจากกล่องอะคลิลิก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ภายในบรรจุสารยูเรเนียม โดยทำการฝังวัตถุที่ระดับความลึกจากผิวดิน 2 ระดับ คือ ระดับ

ความลึกที่ 1 จะฝังวัตถุไว้ที่ผิวดินดังรูปที่ 3.7 ก. และระดับที่ 2 จะฝังตัวอย่างไว้ที่ความลึกจากผิวดินถึงผิวด้านบนของวัสดุตัวอย่างที่ระยะ 4 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.7 ข.



ก) ฝังวัตถุที่ระยะผิวดิน
ข) ฝังวัตถุที่ระยะความลึก 4 เซนติเมตร
รูปที่ 3.7 แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบระยะห่างของระบบวัดกับพื้นผิวดิน

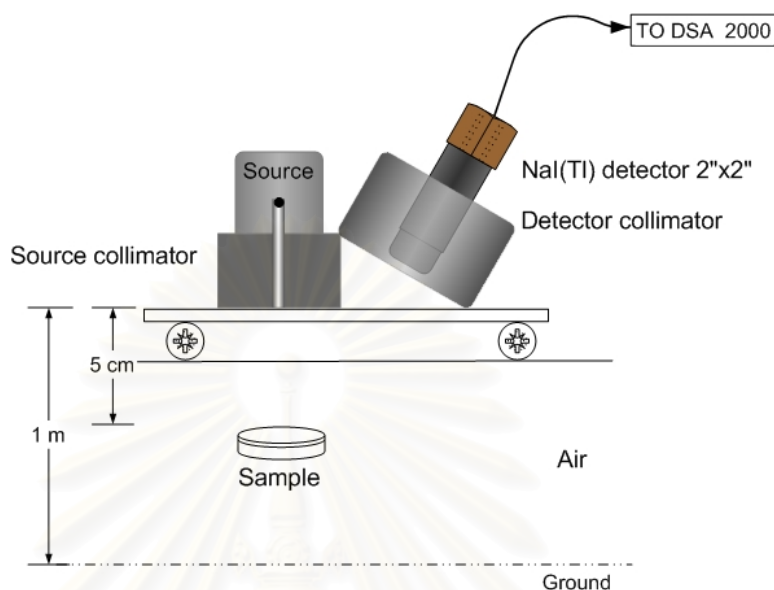
3.2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุระเบิดที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม

เนื่องจากสารประกอบที่ใช้ทำวัตถุระเบิดส่วนใหญ่จะมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในการวิจัยนี้ได้ใช้สารยูเรีย $[(NH_2)_2CO]$ ซึ่งมีองค์ประกอบของไนโตรเจนถึง 46.66% เป็นตัวแทนของสารที่ใช้ทำวัตถุระเบิด เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ

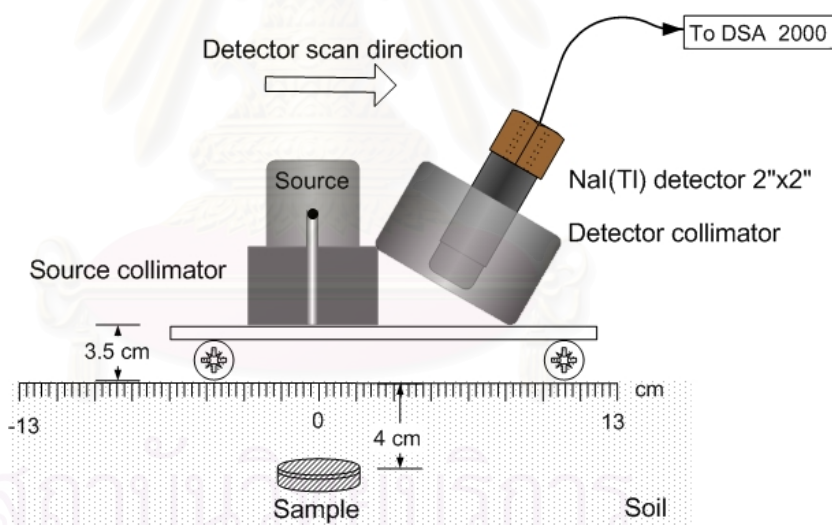
3.2.2.1 ศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลการกระเจิงแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับวัสดุชนิดต่างๆ ได้ทำการออกแบบการทดลองเป็น 2 วิธีการ วิธีแรก ทำการวัดการกระเจิงจากวัสดุของแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม ในอากาศโดยจัดระบบวัดไว้ในอากาศสูงจากพื้น 1 เมตร แล้ววางวัสดุตัวอย่างที่ทำกรวัดไว้ใต้ระบบวัดห่างจากระบบวัด 5 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ดิน น้ำ ยูเรีย ผงเหล็ก ผงตะกั่ว ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8 วิธีที่สอง วัดการกระเจิงจากวัสดุของแกมมาเรย์ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมในดิน จัดระบบวัดวางอยู่เหนือพื้นดิน 3.5 เซนติเมตร ฝังตัวอย่างวัสดุได้แก่ กล่องพลาสติกเปล่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร น้ำ ยูเรีย ผงตะกั่ว และวัสดุตัวอย่างแต่ละชนิดจะบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก ซึ่งจะถูกฝังไว้ที่ความ

ลึกจากผิวดินถึงผิวด้านบนของตัวอย่างที่ระยะ 4 เซนติเมตรที่ในตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตรแล้วทำการสแกนจากตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตรถึง 13 เซนติเมตรดังรูป 3.9



รูปที่ 3.8 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของชนิดของวัสดุในอากาศ

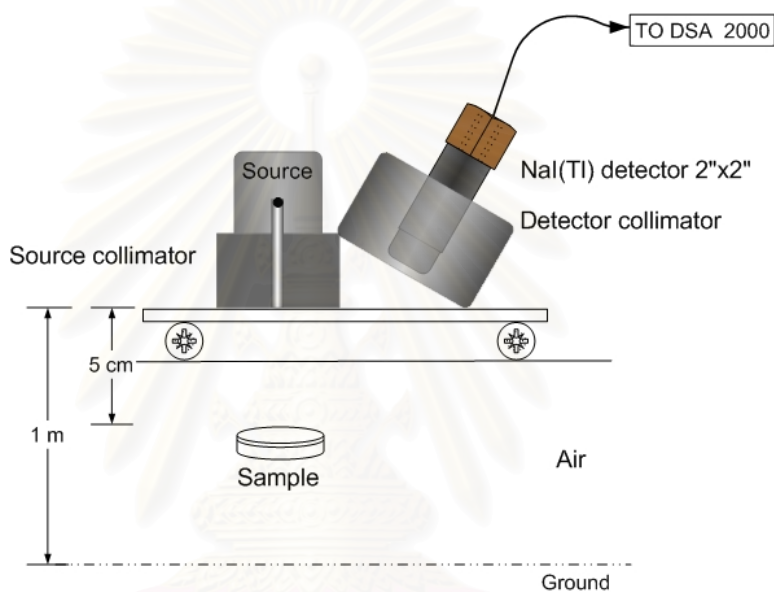


รูปที่ 3.9 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่ฝังอยู่ในดิน

3.2.2.2 ศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนที่มีผลต่อแกมมาเรย์สแกตเทอริง

เนื่องจากสารประกอบที่ใช้ทำกับระเบิดจะมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ แต่สัดส่วนความเข้มข้นของไนโตรเจนของวัตถุที่ประกอบเป็นกับระเบิดแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน และความเข้มข้นของไนโตรเจนก็จะแตกต่างกันกับวัสดุที่ใช้ในชีวิตประจำวันที่ไม่ใช้วัตถุที่ใช้ทำกับระเบิดด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการหาสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนโตรเจนกับผลของแกมมาเรย์สแกตเทอริง ในการทดลองนี้จะนำสารยูเรียซึ่งมีความเข้มข้น

ของไนโตรเจน 46.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาเจือจางในวัสดุ 2 ชนิดคือ 1 นำสารยูเรียมาละลายในน้ำเพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนต่างๆ ดังนี้ ความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ 23.325, 15.55, 7.775 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 0 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจน (น้ำ) ซึ่งสารละลายนี้จะบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร 2 นำสารยูเรียมาผสมกับโพลีเอททีลีน (PE) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ 46.66, 23.325, 10 และ 0 (โพลีเอททีลีน) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ทำการวัดค่าแกมมาเรย์สแกตเตอร์ริงโดยจัดระบบวัดให้อยู่สูงจากพื้น 1 เมตร และวางตัวอย่างไว้ใต้ระบบวัดในอากาศโดยให้ห่างจากระบบวัด 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10

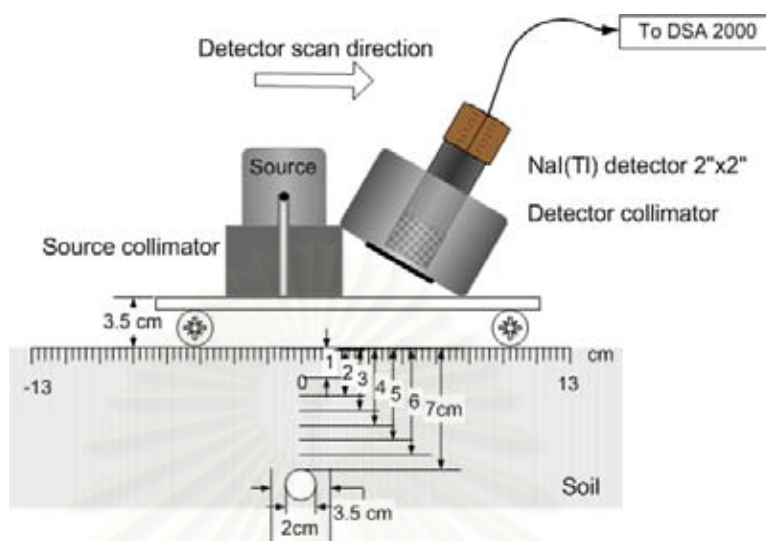


รูปที่ 3.10 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไนโตรเจนในวัสดุตัวอย่าง

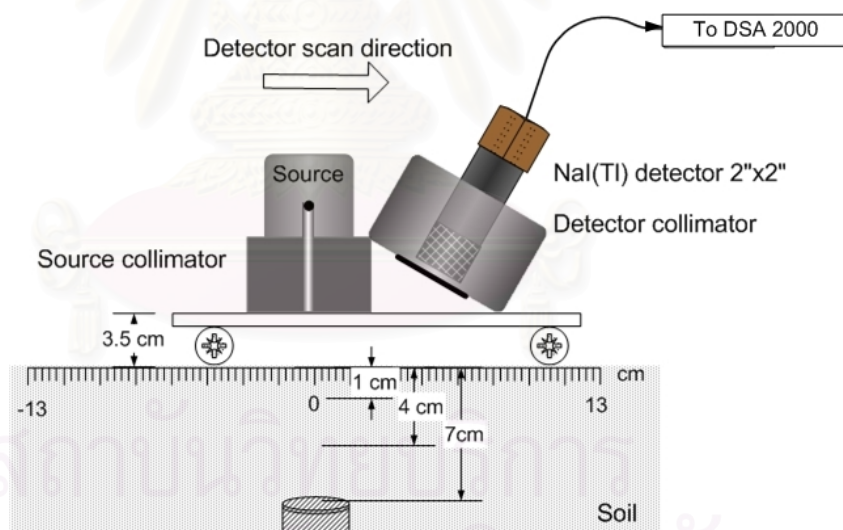
3.2.2.3 ศึกษาผลของขนาด ความลึกและตำแหน่งของวัสดุที่ฝังอยู่ในดิน

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของวัสดุกับผลของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเตอร์ริงในการทดลองใช้วัสดุตัวอย่างเป็นท่อพีวีซีที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 และ 2.0 เซนติเมตร โดยบรรจุสารยูเรียไว้ในท่อ จัดระบบวัดใกล้กับพื้นดินมากที่สุดที่ 3.5 เซนติเมตรจากพื้นดิน นำตัวอย่างท่อแต่ละขนาดฝังในดินที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตรโดยเริ่มจากความลึกที่ ผิวดิน (0 เซนติเมตร) จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนความลึกของท่อที่ระยะ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งระยะความลึกจะวัดจากผิวดินถึงผิวของท่อตัวอย่าง ทำการสแกนจากตำแหน่งที่ -13 ถึง ตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.11 จากนั้นเปลี่ยนตัวอย่างเป็นกล่องพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ภายในกล่องพลาสติกจะบรรจุสารยูเรียไว้ในกล่อง และทำการฝังตัวอย่างที่ระยะความลึก 0, 4 และ 7 เซนติเมตร โดยวัดจาก

ผิวดินถึงผิวนบนของตัวอย่าง ที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตรที่กึ่งกลางของวัตถุ และทำการสแกนจากตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตร ถึงตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.12



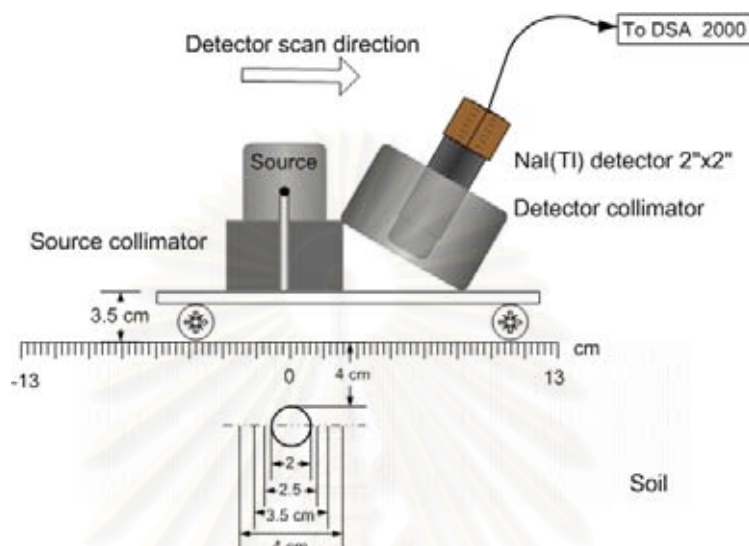
รูปที่ 3.11 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความลึกของวัตถุตัวอย่างที่เป็นท่อ



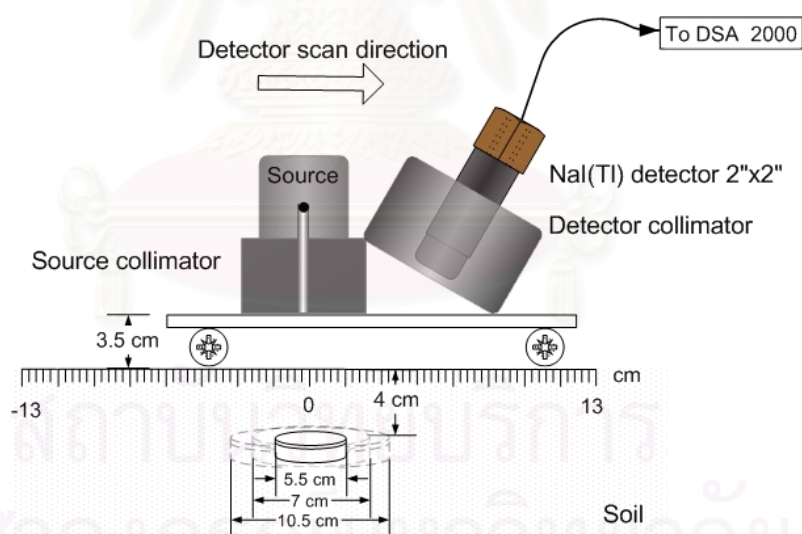
รูปที่ 3.12 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความลึกวัตถุของตัวอย่างที่เป็นกล่อง

หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัตถุกับผลของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริงในการทดลองใช้วัตถุตัวอย่างที่เป็นท่อพีวีซี ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0, 3.5, 2.5, และ 2.0 เซนติเมตรตามลำดับ โดยท่อแต่ละขนาดจะฝังไว้ที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร และลึกจากพื้นผิวดินถึงผิวนบนของท่อที่ระยะ 3 เซนติเมตร ทำการสแกนหาขนาดของวัตถุตัวอย่างจากตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตรถึงตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.13 จากนั้นทำการเปลี่ยนตัวอย่างเป็นกล่อง

พลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5, 7 และ 5.5 เซนติเมตรตามลำดับ โดยจะบรรจุสารยูเรเนียมไว้ในกล่องพลาสติก ทำการฝังตัวอย่างแต่ละขนาดที่ความลึก 4 เซนติเมตร จากระยะผิวดินถึงผิวบนของวัตถุตัวอย่าง และจะฝังไว้ที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร ทำการสแกนจากตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตรถึงตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษามลของขนาดวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรเนียมที่ฝังอยู่ในดิน

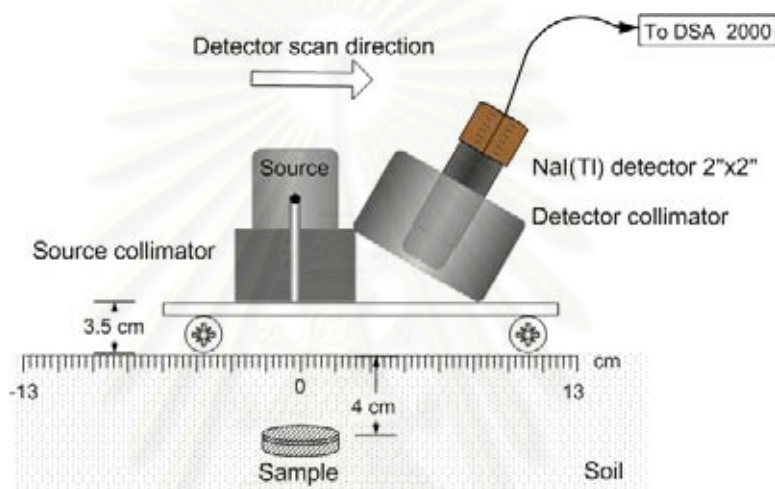


รูปที่ 3.14 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษามลของขนาดวัตถุที่เป็นกล่องบรรจุยูเรเนียมที่ฝังอยู่ในดิน

3.2.2.4 ศึกษาผลของความชื้นที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริงสเปกตรัม

ในพื้นที่จริงความชื้นภายในดินที่จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองฝังกับระเบิด ณ พื้นที่จริง ซึ่งได้เลือกพื้นดินบริเวณหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาในโดยี

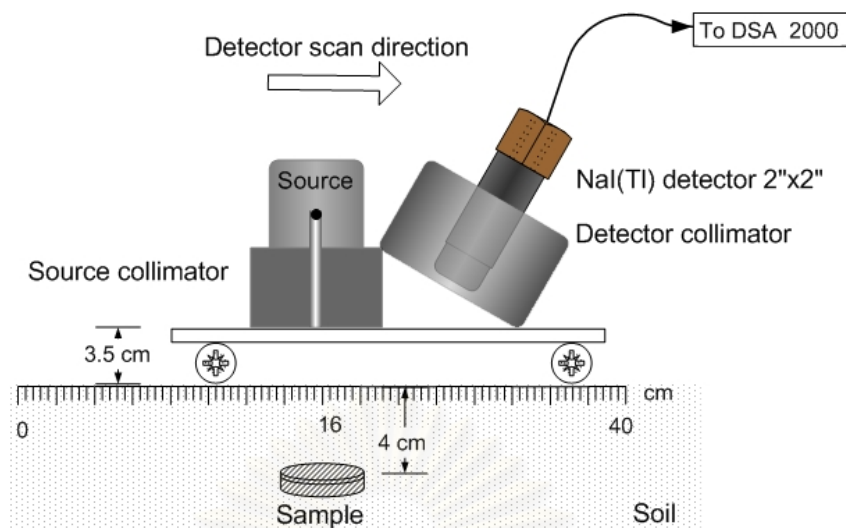
เป็นพื้นที่ทดลอง โดยทำการวัดพื้นดินในธรรมชาติตามแนวสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร จนถึงตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตรซึ่งแต่ละตำแหน่งห่างกัน 1 เซนติเมตรและจะใช้เวลาในการวัด ตำแหน่งละ 100 วินาที จากนั้นฝังตัวอย่างที่เป็นยูเรเนียมบรรจุอยู่ในกล่องอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ตำแหน่งกึ่งกลางของกล่องจะฝังอยู่ที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร และลึกจากพื้นผิวดินถึงพื้นผิวของกล่องเป็นระยะ 4 เซนติเมตร ทำการสแกนจาก ตำแหน่งที่ 0 ถึงตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.15 แล้วทำการเก็บตัวอย่างดิน ณ บริเวณพื้นที่ นั้นมาหาความชื้น ซึ่งจะมีความชื้นของดินอยู่ที่ 10.88 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และทำการ สแกนที่ความชื้นของดินที่ 12.96, 14.89 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ



รูปที่ 3.15 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อศึกษาผลของความชื้นในดิน

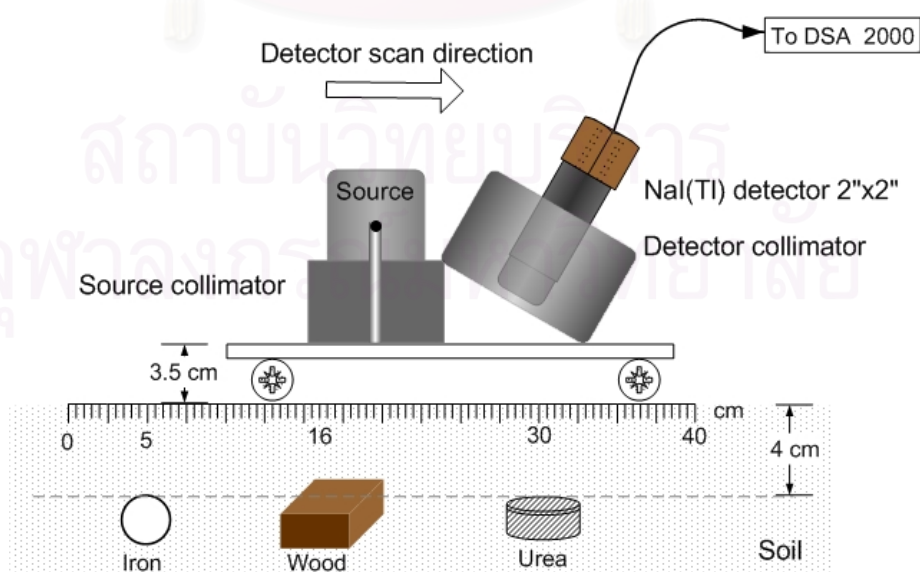
3.2.3 การทดลองวัดกับระเบิด ณ พื้นที่จริงเพื่อศึกษาผลของวัตถุแปลกปลอมที่ฝังอยู่ในดิน

ในการวิจัยขั้นตอนได้ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผล ต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบในสถานที่จริง และศึกษาถึงผลของวัตถุแปลกปลอมที่ฝังอยู่ในดิน โดยใช้พื้นดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา โดยี จำนวน 2 บริเวณเพื่อใช้ในการทดลอง ทำการสแกน ณ บริเวณที่ 1 โดยจัดระบบวัดให้สูงจาก พื้นผิวดินเป็นระยะ 4.5 เซนติเมตร และทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร ถึงตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตรตำแหน่งละ 1 เซนติเมตร จากนั้นฝังวัตถุเสมือนกับระเบิด โดยใช้ยูเรเนียมบรรจุในกล่อง พลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ฝังที่ความลึก 4 เซนติเมตรจากผิวดินถึงผิวของบนของวัตถุตัวอย่าง และทำการฝังไว้ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตรที่ กึ่งกลางของวัตถุและทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตรถึงตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตรอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนภาพการจัดระบบวัดในการตรวจหาตัวอย่างเสมือนกับระเบิด ณ พื้นที่จริงที่ 1

ทำการสแกนในบริเวณที่ 2 โดยทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร ถึงตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตร จากนั้นทำการฝังวัตถุเสมือนกับระเบิด โดยใช้ยูเรียซึ่งบรรจุในกล่องพลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ฝังที่ความลึก 4 เซนติเมตร จากผิวดินถึงผิวขอบบนของวัตถุตัวอย่าง ฝังไว้ที่ตำแหน่ง 30 เซนติเมตร แล้วฝังวัตถุแปลกปลอมซึ่งใช้เหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร โดยฝังไว้ในแนวขวางกับแนวสแกนที่ตำแหน่ง 5 เซนติเมตรและลึก 4 เซนติเมตรจากผิวดิน และฝังวัตถุแปลกปลอมที่เป็นไม้ขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ในแนวขนานกับแนวสแกนไว้ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร และทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร ถึง ตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.17



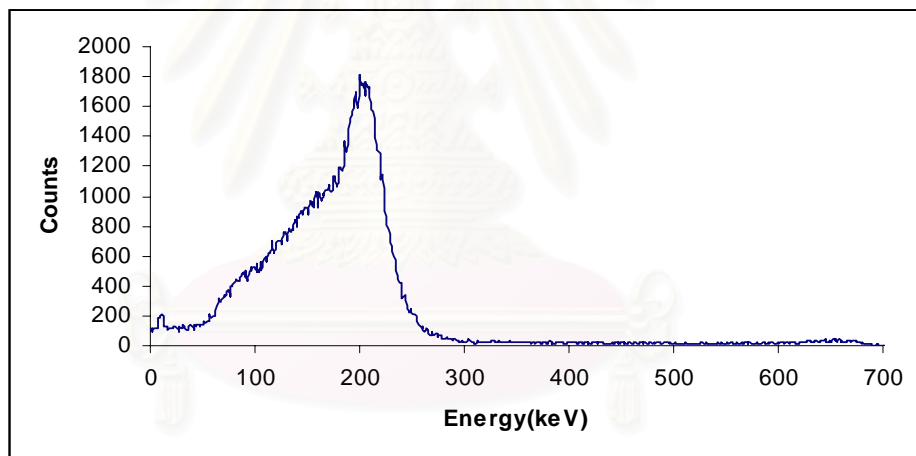
รูปที่ 3.17 แผนภาพการจัดระบบวัดในการตรวจหาตัวอย่างเสมือนกับระเบิด ณ พื้นที่จริงที่ 2

บทที่ 4

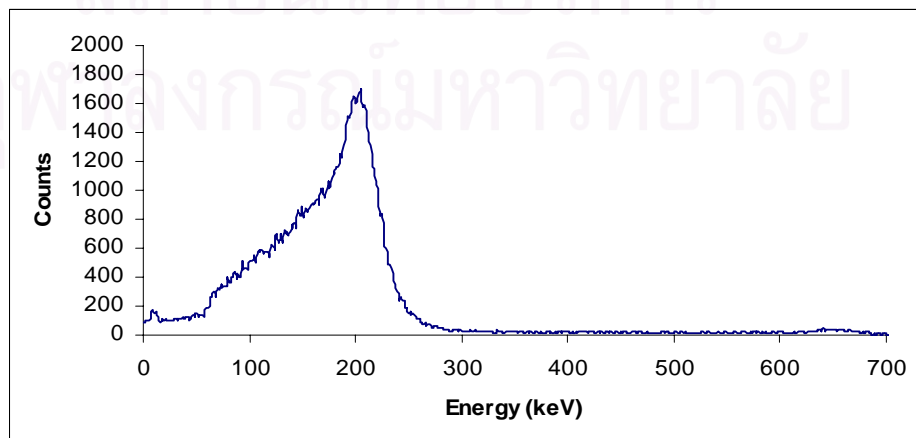
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลของการศึกษาระยะห่างระหว่างระบบวัดกับผิวดิน

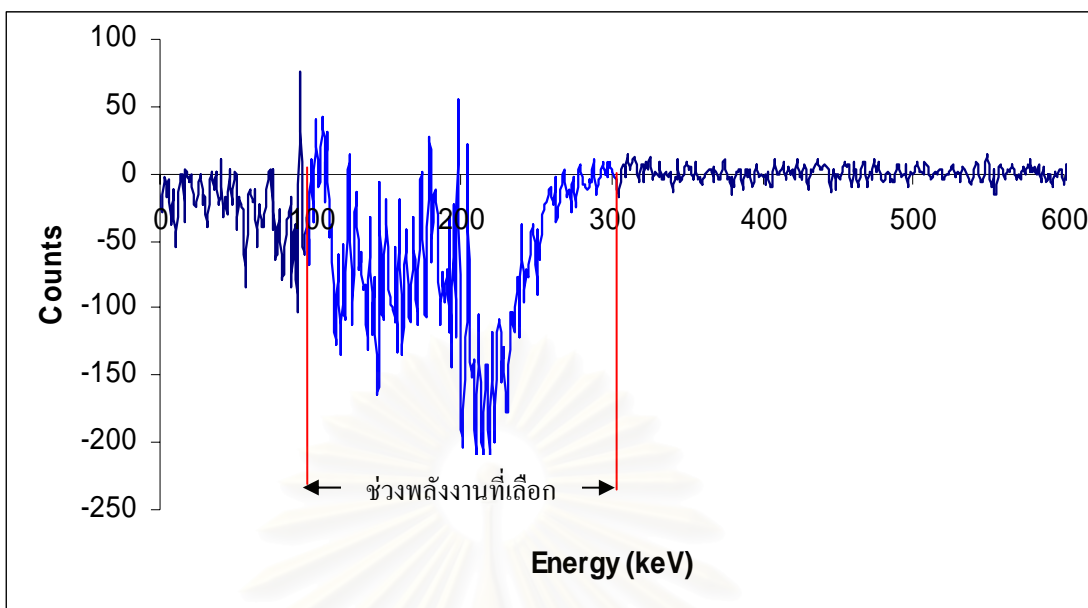
ในการหาค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงในแต่ละตำแหน่งตามแนวสแกนสามารถหาได้จากการนำค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมในตำแหน่งที่ต้องการหาดังรูปที่ 4.1 จะเป็นค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมในตำแหน่งที่ 0 ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางวัตถุ มาลบด้วยค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมในตำแหน่งอ้างอิงโดยกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งดินเปล่า ดังรูปที่ 4.2 ทำให้ค่าได้ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมในตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองนี้ได้เลือกพิจารณาผลรวมจำนวนนับในช่วงพลังงานที่ 100 keV ถึงพลังงานที่ 300 keV ซึ่งเป็นช่วงที่มีความแตกต่างกันของสเปกตรัมมากที่สุดในการหาค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงในตำแหน่งที่ 0



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งที่ -13 เซนติเมตร (ตำแหน่งดินเปล่า)



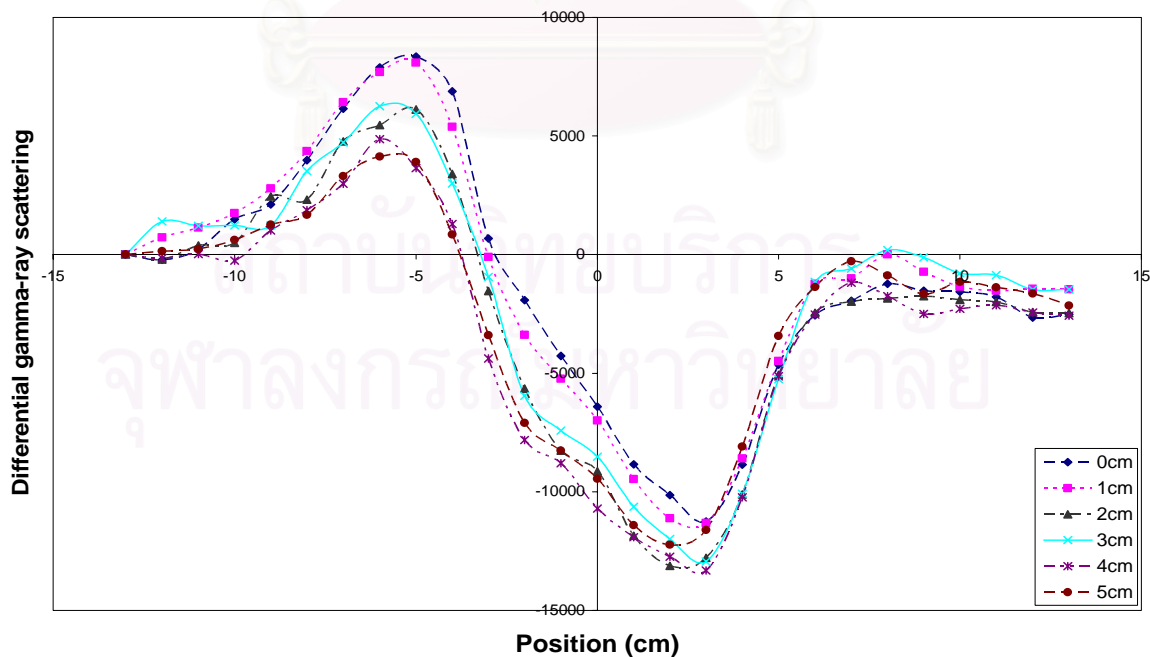
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร (ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง)



รูปที่ 4.3 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรียสแกตเทอริงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร

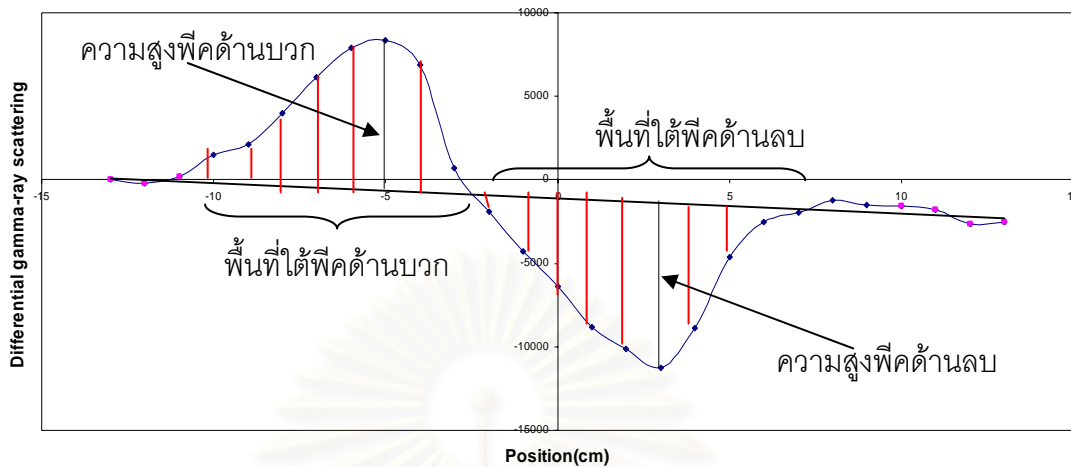
4.1.1 เมื่อฝังวัตถุไว้ที่ผิวดิน

เมื่อนำค่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรียสแกตเทอริงที่ได้ในแต่ละตำแหน่งตามแนวสแกนแล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรียสแกตเทอริงกับระยะความสูงของระบบวัด จากระยะ 0 เซนติเมตร ถึง 5 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรียสแกตเทอริงกับระยะห่างของระบบวัดกับพื้นดิน ในแต่ละตำแหน่งตามแนวสแกน โดยฝังวัตถุตัวอย่างไว้บริเวณผิวดิน

ในการวิจัยนี้ ได้กำหนดค่าด้านที่อยู่สูงกว่าเส้นฐานเป็นพีคด้านบวกและกำหนดค่าที่น้อยกว่าเส้นฐานว่าเป็นพีคด้านลบดังรูปที่ 4.5

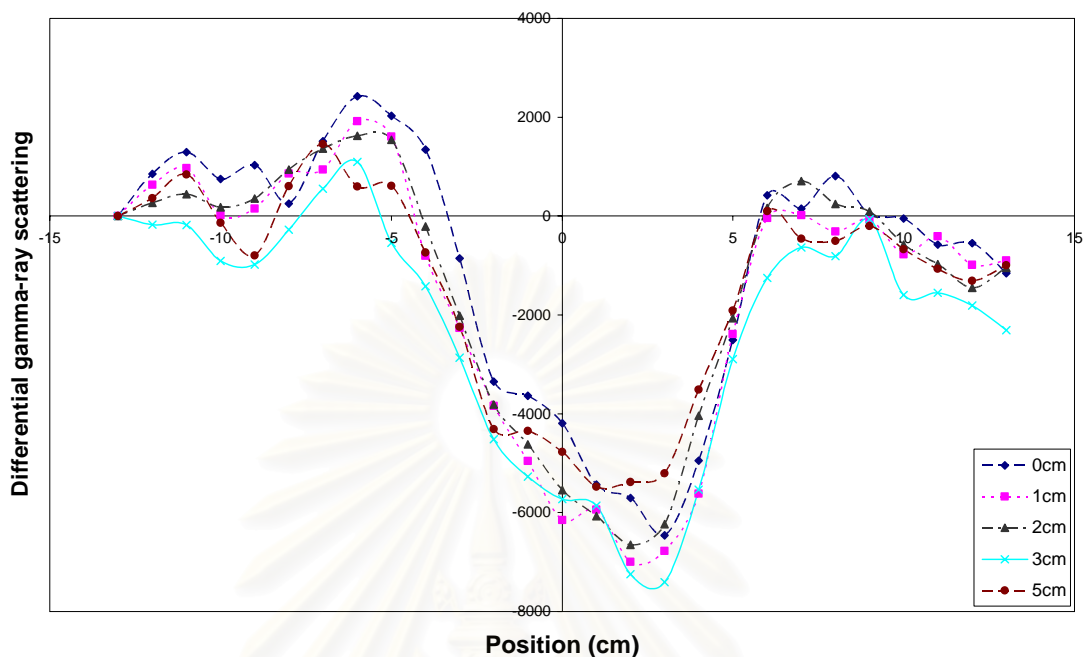


รูปที่ 4.5 แผนภาพความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีคในแต่ละด้าน

ตารางที่ 4.1 ค่าความสัมพันธ์ของความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีคกับระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นผิวดิน

ระยะห่าง (cm)	ความสูงพีคบวก	ความสูงพีคลบ	พื้นที่ใต้พีคบวก	พื้นที่ใต้พีคลบ
0	8985.7	-9887.8	41488.8	-47454
1	8093.88	-10625	35393.9	-56381
2	6731.39	-11404	27983	-67592
3	5675.53	-12519	22858.4	-71979
4	4377.08	-11802	19194.2	-73805
5	4277.02	-10645	17332.3	-67835

4.1.2 ผังวัตถุไว้ที่ระยะความลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร

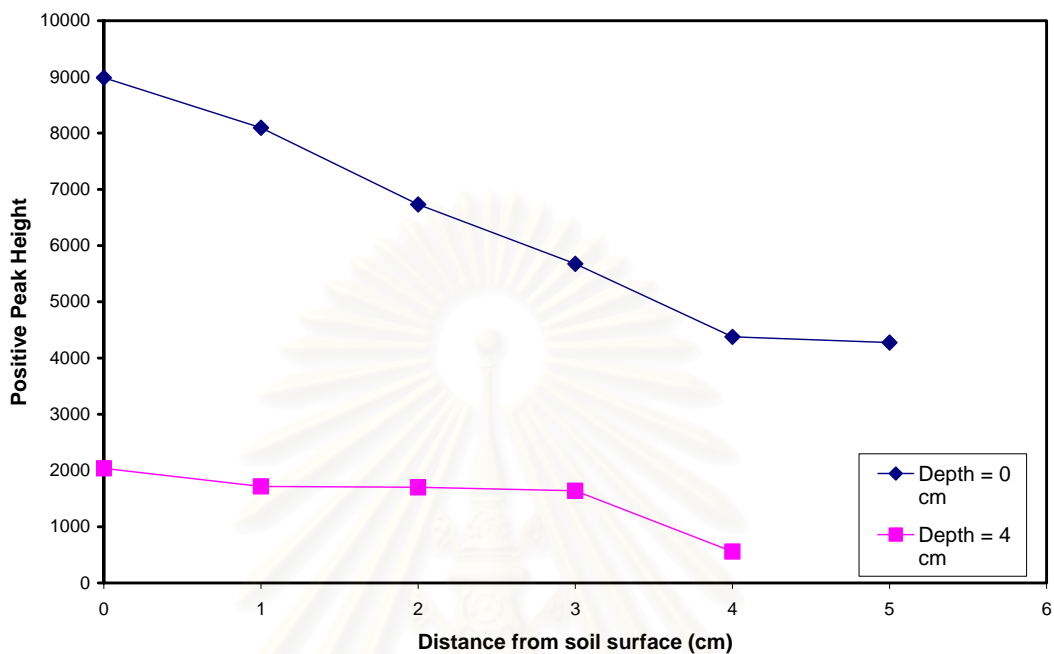


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับระยะห่างของระบบวัดกับพื้นดิน โดยผังวัตถุตัวอย่างไว้ลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร

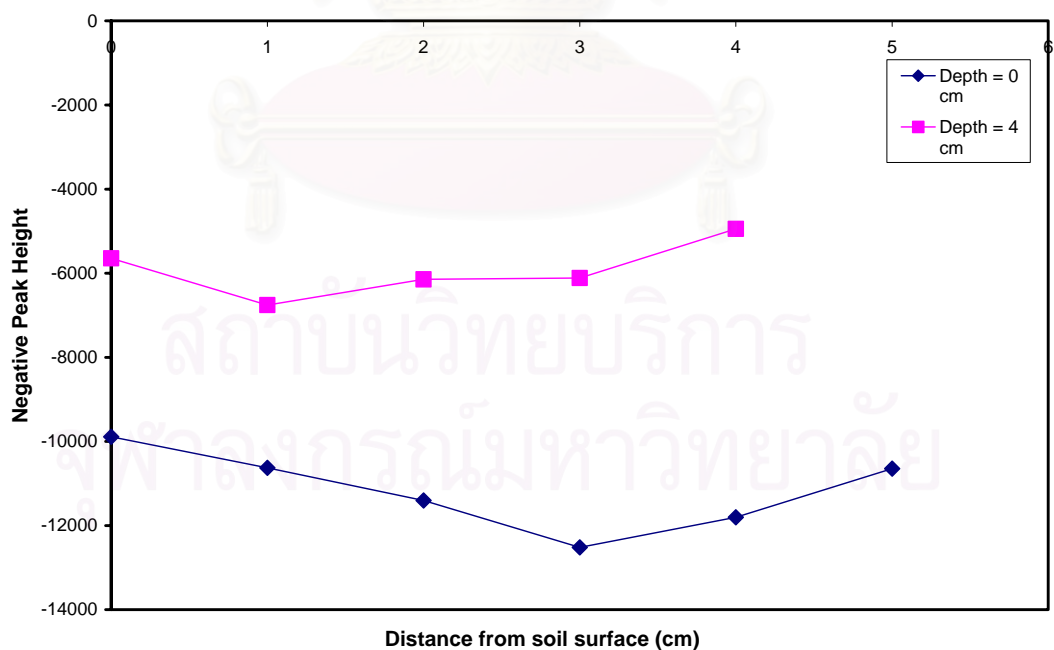
ตารางที่ 4.2 ค่าความสัมพันธ์ของความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีคกับระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นผิวดิน

ระยะห่าง(cm)	ความสูงพีคบวก	ความสูงพีคลบ	พื้นที่ใต้พีคบวก	พื้นที่ใต้พีคลบ
0	2039.04	-5645.6	5892.49	-37064
1	1717.62	-6756.4	5696.93	-44146
2	1702.32	-6144.3	5971.74	-36980
3	1639.13	-6112.2	2865.1	-38534
5	558.958	-4944.4	2556.87	-34393

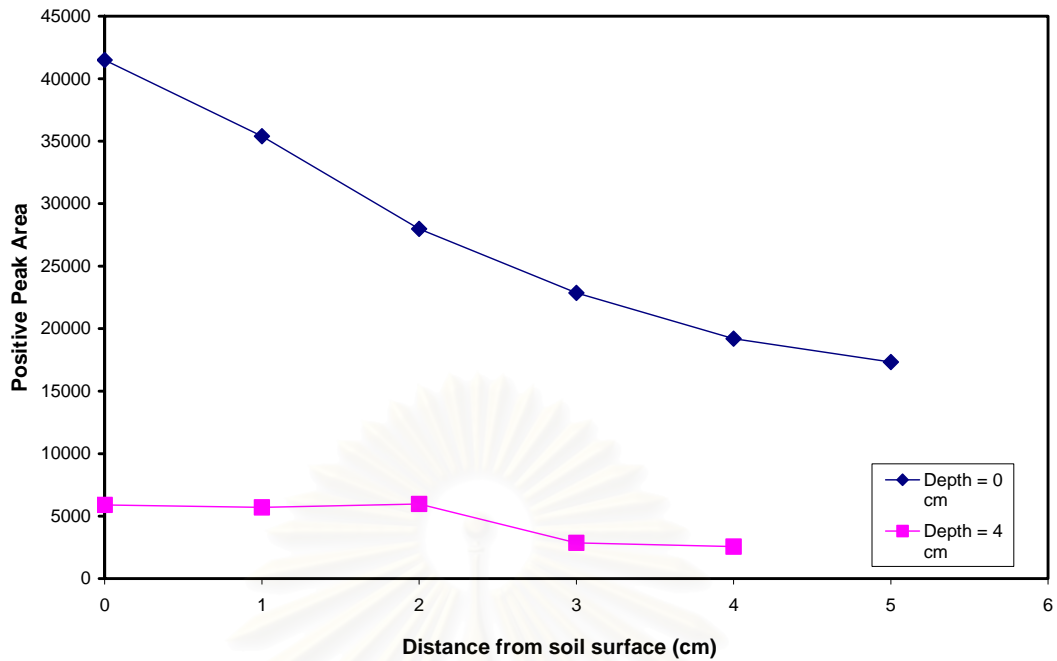
ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคและความสูงพีคกับค่าระยะความสูงของระบบวัดถึงผิวดิน ที่ความลึกของวัตถุซึ่งฝังอยู่ในดินระดับความลึก 0 เซนติเมตร (ผิวดิน) และระดับความลึก 4 เซนติเมตรจากผิวดิน ดังรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9, 4.10



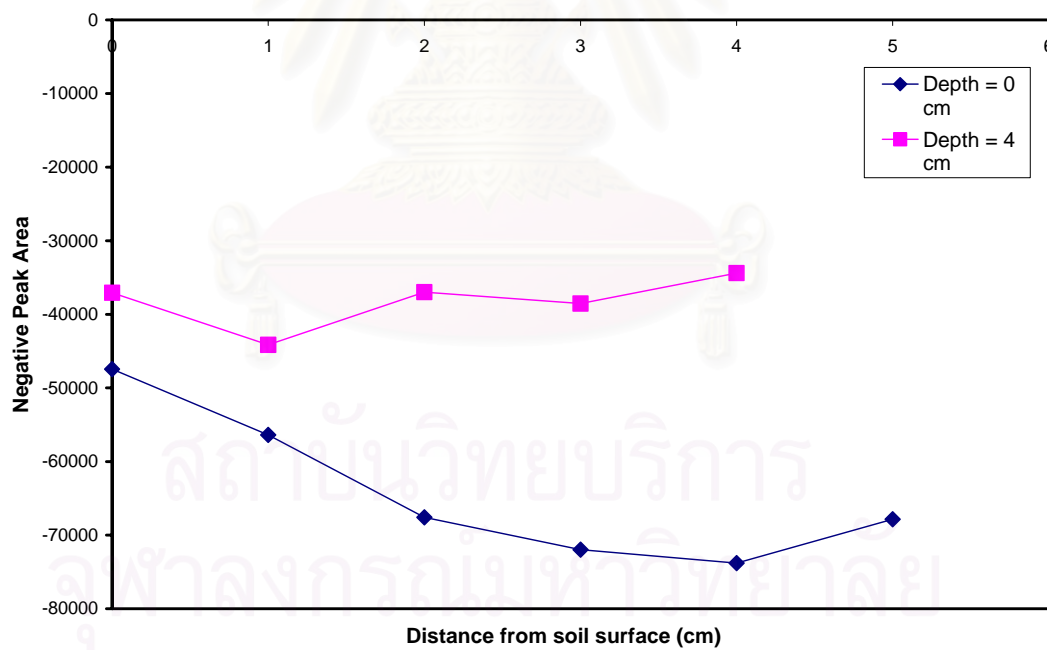
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงพีคทางด้านบวกกับค่าความสูงของระบบวัดถึงพื้นดิน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงพีคทางด้านลบกับค่าความสูงของระบบวัดถึงพื้นดิน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคทางด้านบวกกับค่าความสูงของระบบวัดถึงพื้นดิน

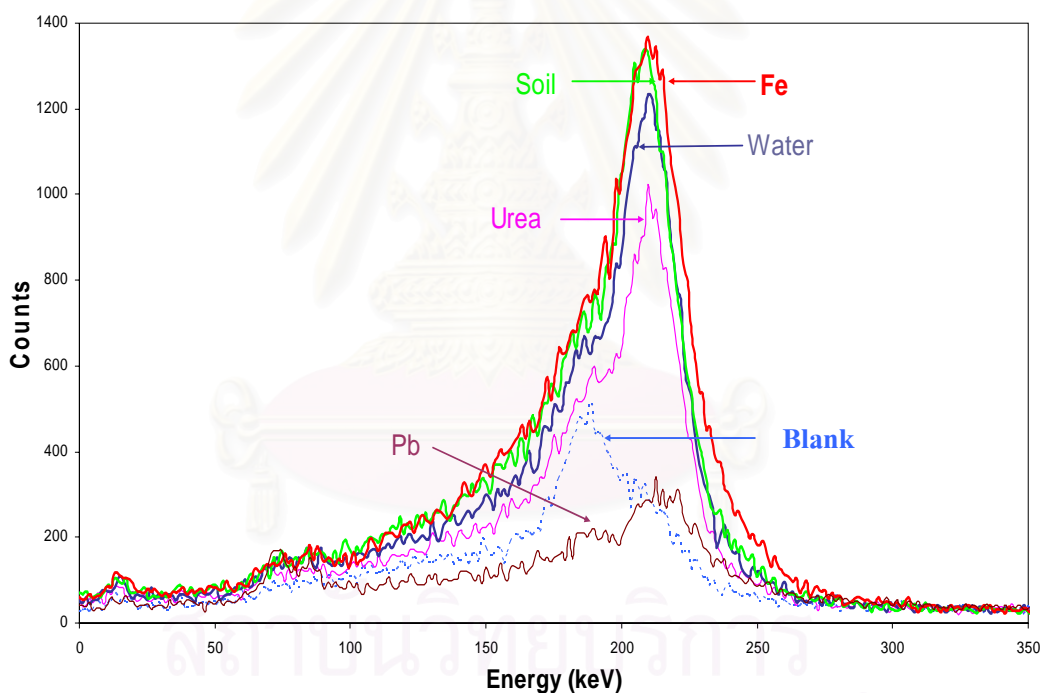


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคทางด้านลบกับค่าความสูงของระบบวัดถึงพื้นดิน

4.2 ผลของการศึกษาชนิดของวัสดุที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริง

4.2.1 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุที่มีผลต่อแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงเมื่อวัดในอากาศ

ผลของการวัดสเปกตรัมแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงเมื่อนำวัสดุแต่ละชนิดซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะพลาสติกมาทำการวัดในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่าผลของสเปกตรัมแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงมีความแตกต่างกันในแต่ละวัสดุ จึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีค ความหนาแน่น และค่าเลขอะตอมประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งการหาค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีคนั้น เริ่มจากตำแหน่งที่พลังงาน 100 keV ถึง 300 keV สำหรับกล่องพลาสติกเปล่านั้น จะไม่นำมาคิดหาค่าพื้นที่ใต้พีคเนื่องจากสเปกตรัมแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงที่ได้จะเป็นการกระเจิงจากส่วนด้านล่างของกล่องทำให้พลังงานที่ได้ไม่ตรงกับค่ามุมที่เกิดการกระเจิงเนื่องจากเนื้อวัสดุ ดังรูปที่ 4.11

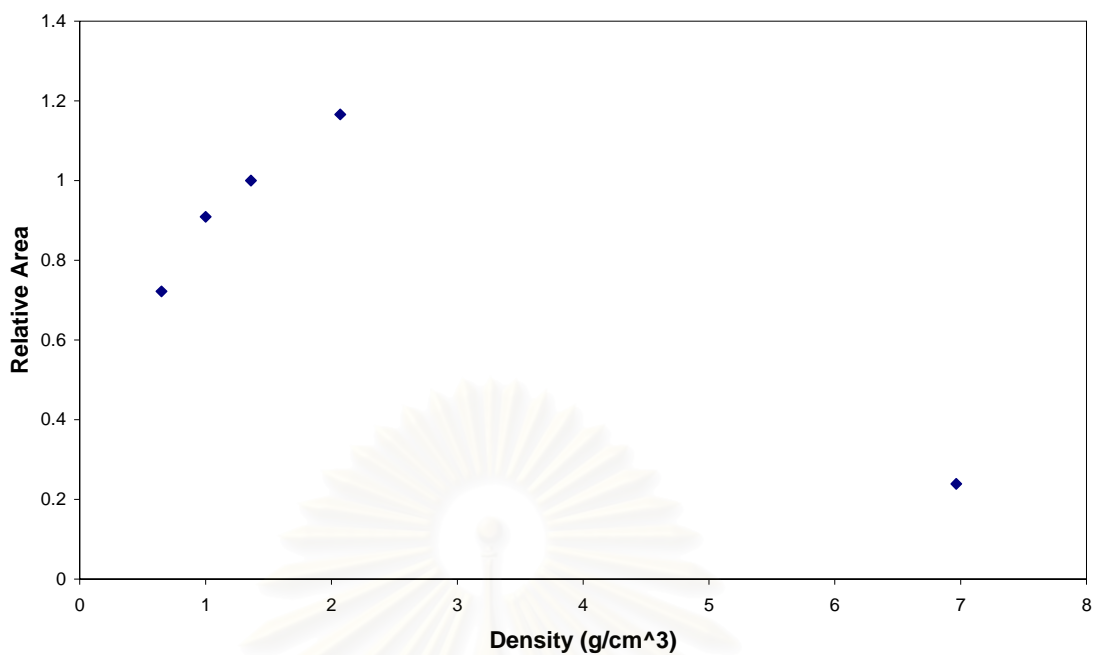


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงที่เกิดจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

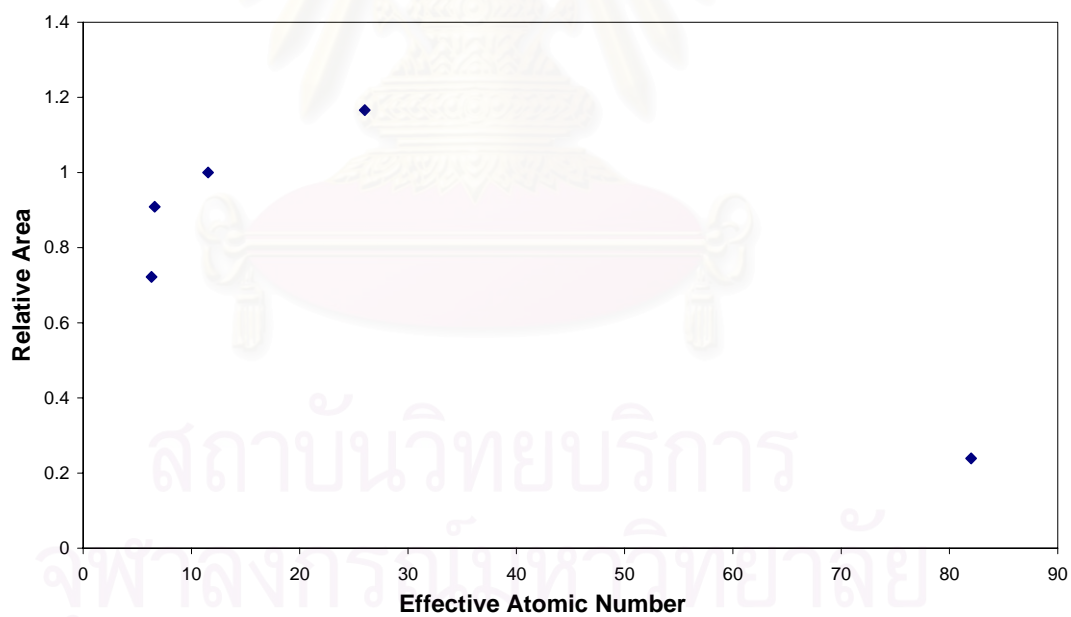
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีด ความหนาแน่นของวัสดุ และค่าเลขอะตอมประสิทธิผลกับวัสดุชนิดต่างๆ

	เม็ดตะกั่ว	ยูเรเนียม	น้ำ	ดิน	ผงตะไบเหล็ก
ค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีด	10105	30523	38406	42252	49282
สัดส่วนของพื้นที่ได้ฟีดเมื่อเทียบกับดิน	0.239	0.722	0.909	1	1.166
ความหนาแน่น (g/cm ³)	6.965	0.649	1	1.36	2.07
เลขอะตอมประสิทธิผล(effective atomic number)	82	6.313	6.608	11.536	26
อัตราส่วนระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดกับความหนาแน่นของวัสดุ	1450	47030	38406	31067	23807

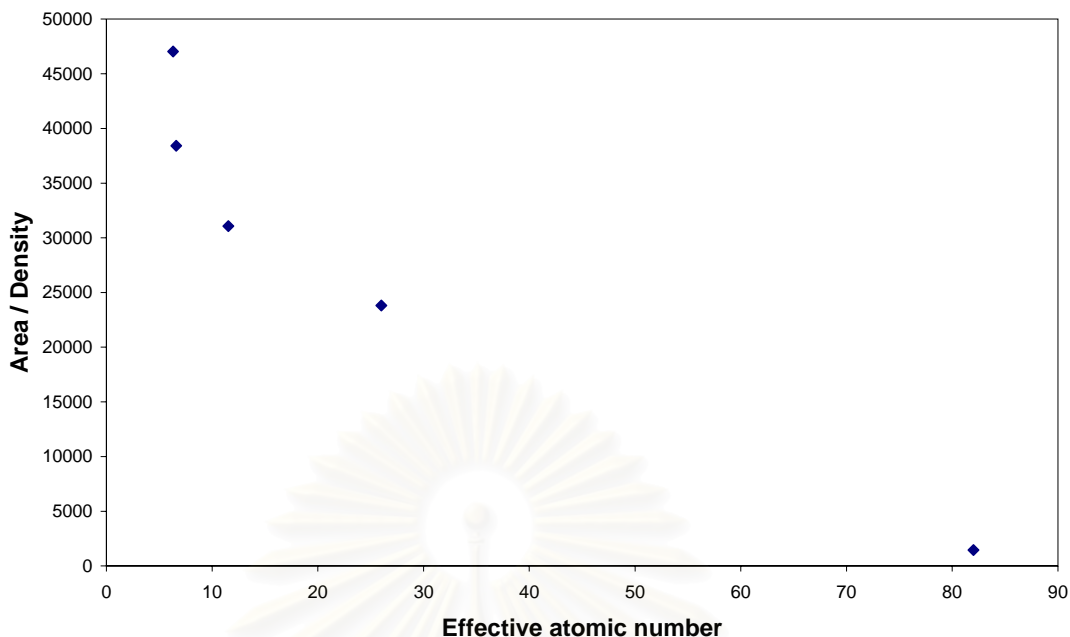
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดจากแกมมาเรย์สแกดเทอริงของผงตะไบเหล็กมีค่ามากกว่าดิน ส่วนตะกั่วจะมีค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดจากแกมมาเรย์สแกดเทอริงน้อยที่สุด ยูเรเนียมและน้ำจะมีค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดมากขึ้นตามลำดับ แต่ทั้งสามวัสดุจะมีค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดน้อยกว่าดิน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดจากแกมมาเรย์สแกดเทอริงของแต่ละวัสดุนั้น ขึ้นกับความหนาแน่นและเลขอะตอมประสิทธิผลของแต่ละวัสดุ เพราะโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาคอมป์ตันสแกดเทอริงจะขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของตัวกลาง เมื่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มมากขึ้นค่าจำนวนนับพื้นที่ได้ฟีดจากการกระเจิงของรังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้นด้วยและจะลดลงเมื่อวัสดุมีค่าเลขอะตอมมากขึ้นดังรูปที่ 4.12 ซึ่งเมื่อวัสดุมีเลขอะตอมมากขึ้นจะทำให้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคได้มากดังสมการที่ 2.8 ซึ่งโอกาสที่จะเกิดจะมีค่าประมาณเลขอะตอมประสิทธิผลของวัสดุ ยกกำลัง 4 ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ได้ฟิคเมื่อเทียบกับดิน กับค่าความหนาแน่นของวัสดุ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ได้ฟิคเมื่อเทียบกับดินกับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับของพื้นที่ที่ได้พีคส์ด้วยความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชนิด กับค่าเลขอะตอมประสิทธิผล

4.2.2 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุที่มีผลต่อเกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อฝังวัตถุตัวอย่างในดิน

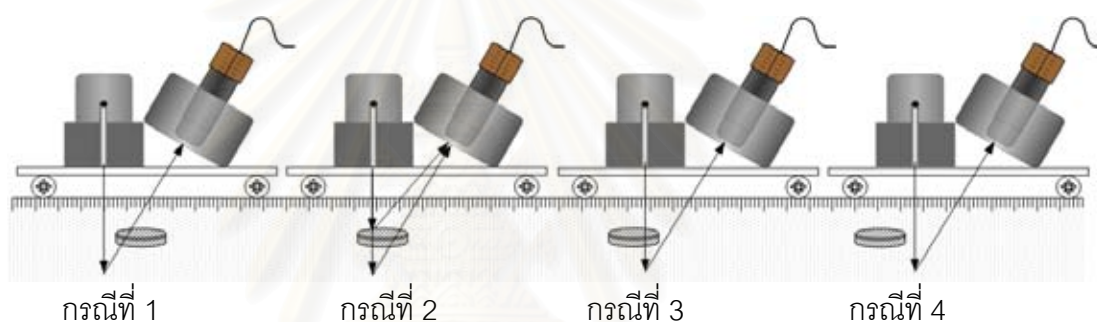
เมื่อทำการสแกนวัตถุตัวอย่างที่ฝังไว้ในดิน โปรไฟล์ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงของวัตถุตัวอย่างแต่ละชนิดแสดงดังในรูปที่ 4.12 – 4.15 ซึ่งลักษณะของโปรไฟล์ที่ได้ขึ้นกับชนิดของเนื้อวัสดุที่รังสีแกมมาตกกระทบและเนื้อวัสดุที่รังสีแกมมากระเจิงกลับผ่าน โดยแบ่งพิจารณาได้ 4 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 4.15

กรณีที่ 1 เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบดินแล้วกระเจิงกลับ โดยรังสีที่กระเจิงกลับเข้าสู่หัววัดผ่านวัตถุตัวอย่าง ทำให้ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดของวัตถุตัวอย่าง ถ้าวัตถุตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านน้อยกว่าดิน (กล่องพลาสติกเปล่า, ยูเรีย) รังสีแกมมาที่กระเจิงกลับจะเข้าสู่หัววัดได้มากกว่าเดิม ดังนั้นค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงจึงมีค่ามากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าวัตถุตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านมากกว่าดิน (ตะกั่ว) รังสีแกมมากระเจิงกลับที่ผ่านวัตถุตัวอย่างจึงถูกดูดกลืน ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงจึงมีค่าลดลง

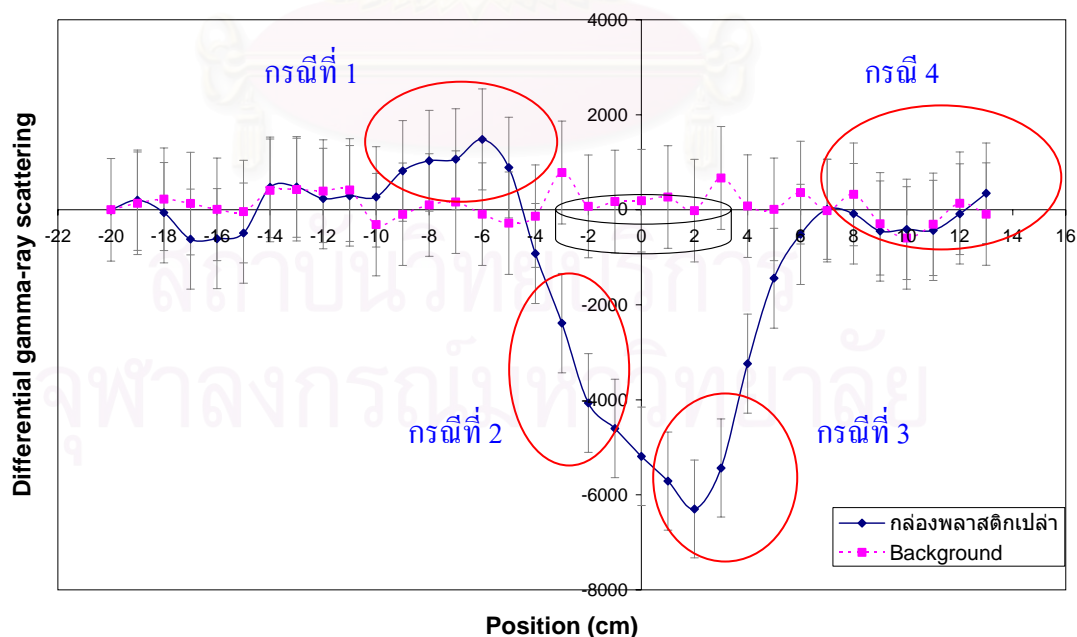
กรณีที่ 2 เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบบนวัตถุตัวอย่างแล้วกระเจิงเข้าสู่หัววัด ถ้าวัตถุตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยกว่าดิน หรือมีค่าโอกาสในการกระเจิงคอมป์ตันน้อยกว่าดิน ดังนั้น ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงจึงมีค่าลดลง ในกรณีของตะกั่ว พบว่าวัตถุมีความหนาแน่นมากกว่าดิน แต่ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริงลดลง เนื่องจากวัตถุตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมาก และเมื่อรังสีแกมมาทะลุผ่านวัตถุตัวอย่างแล้วไปกระเจิงกับดิน รังสีแกมมาที่กระเจิงกลับจะถูกดูดกลืนมากหรือน้อย ขึ้นกับชนิดของวัสดุตัวอย่างเช่นกัน

กรณีที่ 3 เมื่อแนวรังสีตกกระทบบนขอบขวาของวัตถุตัวอย่าง แล้วทะลุผ่านไปกระเจิงกับดิน รังสีที่กระเจิงกลับจะผ่านดิน ถ้าดินมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านมากกว่าวัตถุ รังสีที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดจะทะลุผ่านได้น้อยกว่าเดิม ดังนั้นค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริง จะลดลง

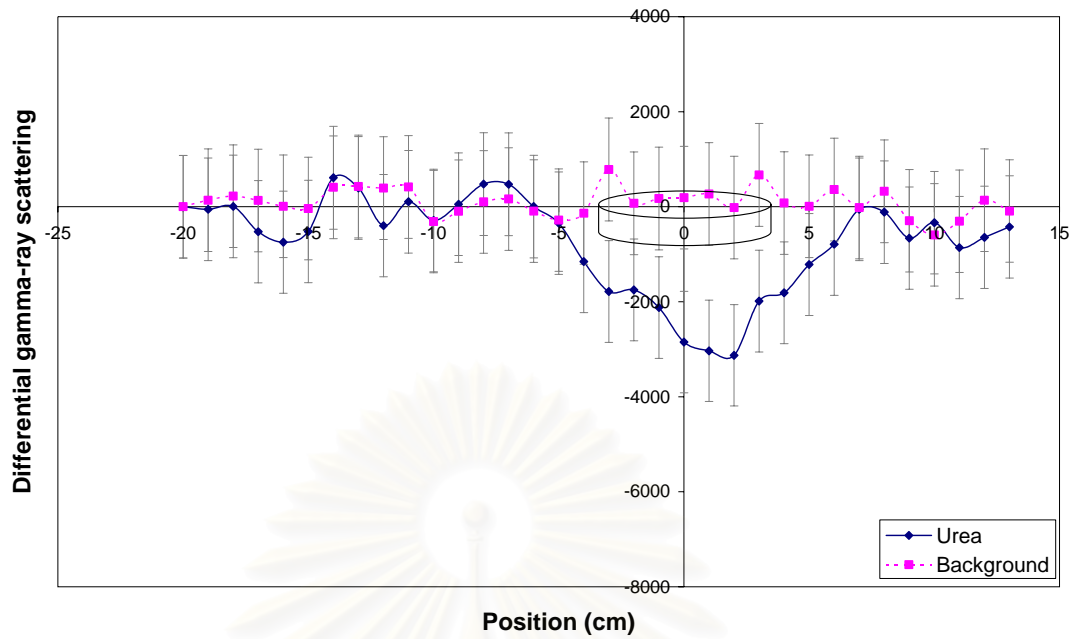
กรณีที่ 4 รังสีแกมมาตกกระทบบนดินแล้วกระเจิงกลับเข้าสู่หัววัดโดยไม่ผ่านวัตถุตัวอย่าง ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริง จะมีค่าเท่ากับแบคกราวด์



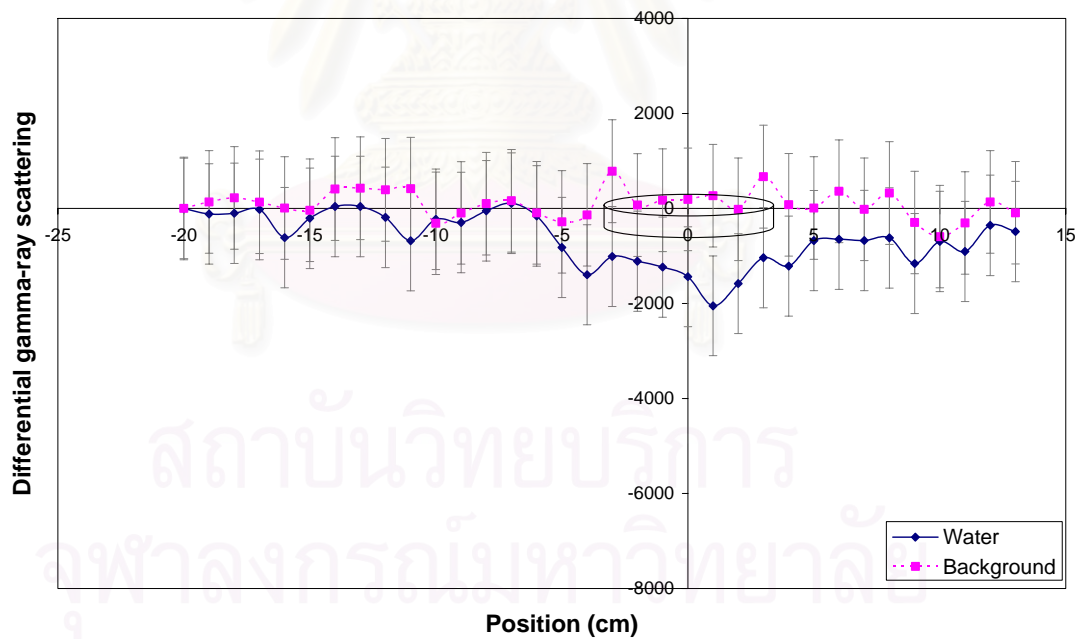
รูปที่ 4.15 การตกกระทบบนและการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่กระทำต่อวัตถุในกรณีต่างๆ



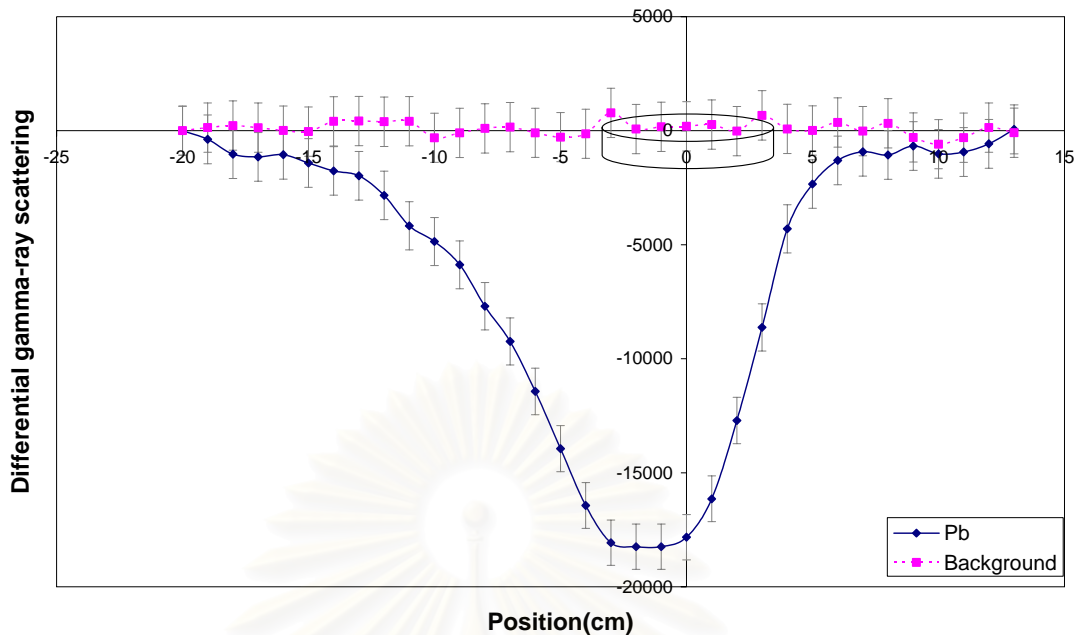
รูปที่ 4.16 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาแมเรย์สแกตเทอริง แต่ละตำแหน่งที่สแกนเมื่อวัตถุเป็นกล่องพลาสติกเปล่า



รูปที่ 4.17 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง แต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัตถุตัวอย่างเป็น ยูเรียบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก



รูปที่ 4.18 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงแต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัตถุตัวอย่างที่เป็น น้ำบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก



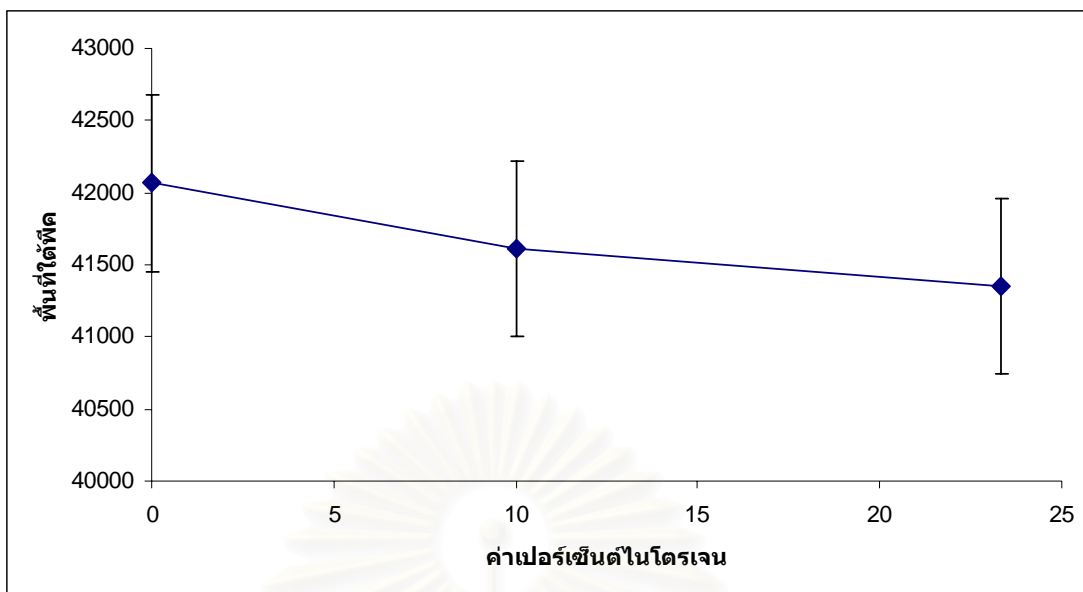
รูปที่ 4.19 ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงแต่ละตำแหน่งที่สแกน เมื่อวัดฤดูตัวอย่างที่เป็น ตะกั่วบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติก

4.3 ผลศึกษาของปริมาณไนโตรเจนที่มีผลต่อแกมมาเรย์สแกตเทอริง

ผลของปริมาณไนโตรเจนต่อค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อนำยูเรียซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน 46.6 % มาทำให้เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนต่อน้ำหนักเชื้อจางลงโดยการผสมยูเรียลงไปไนโพลีเอทิลีน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนดังรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อผสมกับโพลีเอทิลีนกับค่าพื้นที่ใต้พีคของแกมมาเรย์สแกตเทอริง

ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน	พื้นที่ใต้พีค ± ค่าคลาดเคลื่อน
0 (PE only)	42068 ± 615
10	41611 ± 612
23.325	41349 ± 610
46.6	43805 ± 628

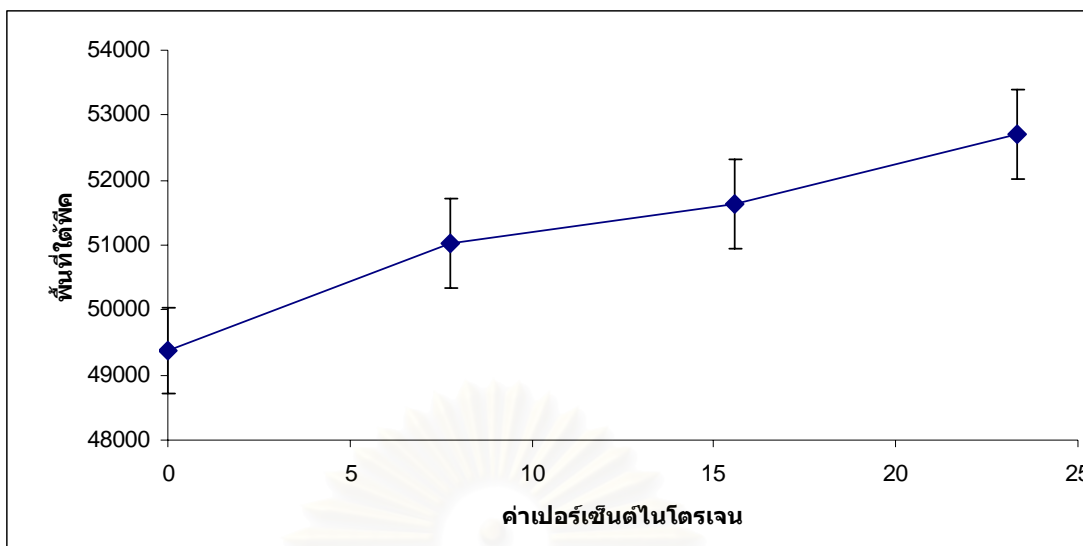


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ได้พืชกับเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อผสมกับโพสโซเฟออสฟอรัส

ผลของปริมาณไนโตรเจนต่อค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อนำยูเรียมาทำให้เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนต่อน้ำหนักเชื้อจางลงโดยการผสมยูเรียลงไปได้น้ำ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ได้พืชแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมื่อนำสารยูเรียเจือจางในน้ำกับค่าพื้นที่ได้พืชของแกมมาเรย์สแกตเทอริง

ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน	พื้นที่ได้พืช \pm ค่าคลาดเคลื่อน
0	49378 \pm 667
7.775	51029 \pm 678
15.55	51632 \pm 682
23.325	52700 \pm 689
46.6 (100% Urea)	43805 \pm 629

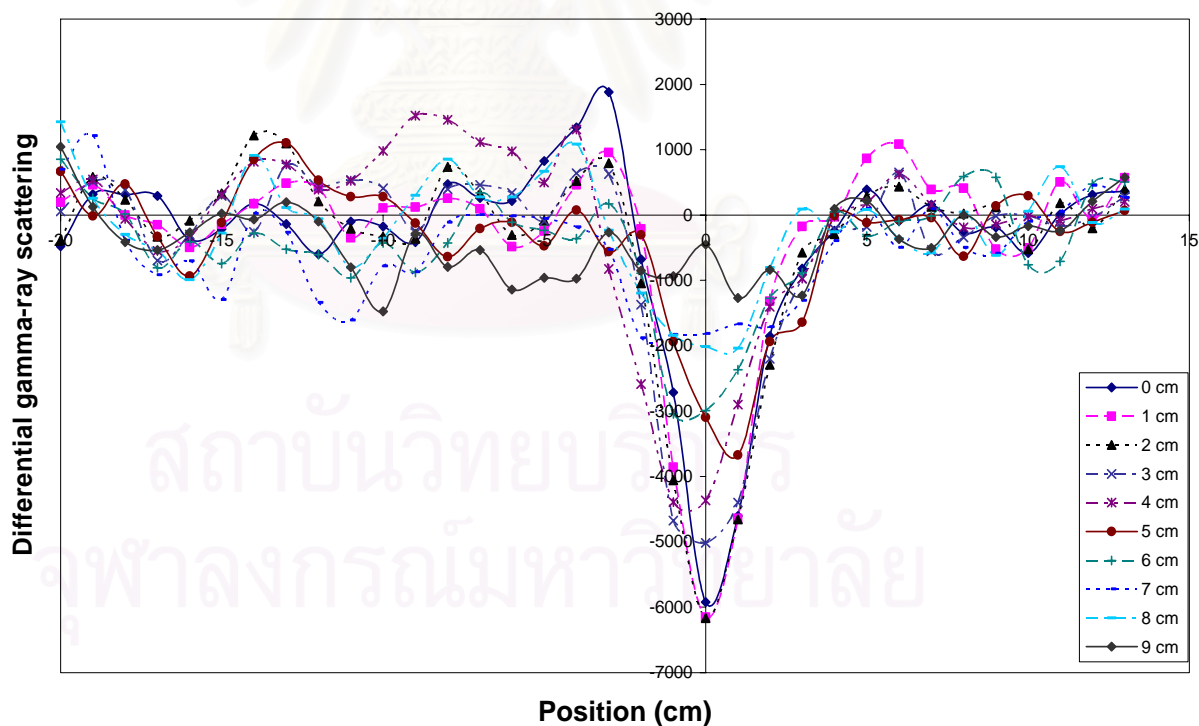


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ที่ได้ฟัดกับเปอร์เซ็นต์ในโตรเจนเมื่อเจือจางในน้ำ

4.4 ผลการศึกษาของขนาด ความลึกและตำแหน่งของวัสดุที่ฝังอยู่ในดิน

4.4.1 ผลการศึกษาความลึกของวัตถุ

4.4.1.1 ขนาดของท่อ 20 มิลลิเมตร

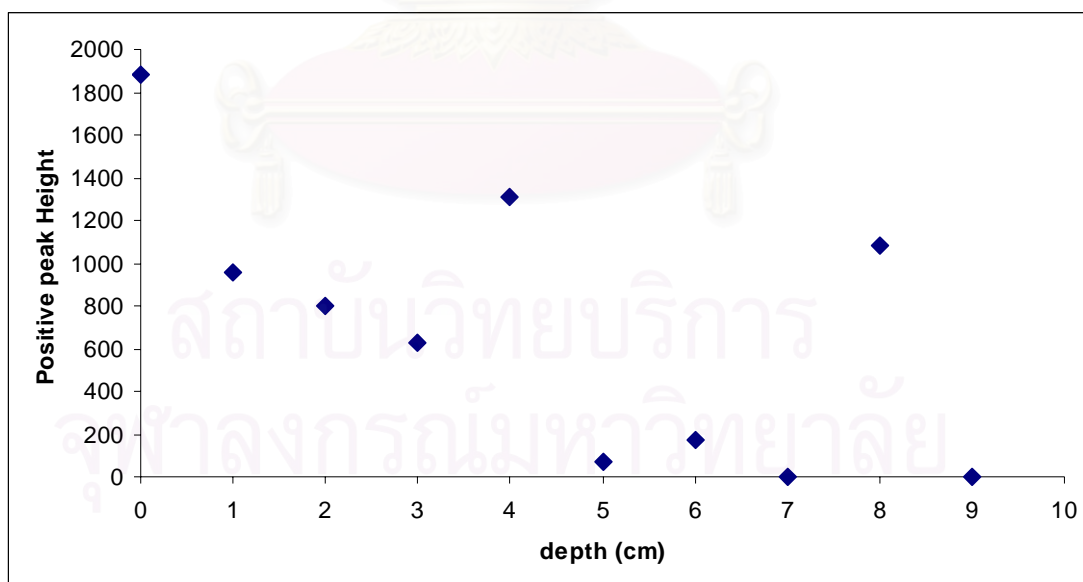


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกนผ่านวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรแต่ละตำแหน่งเมื่อวัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน

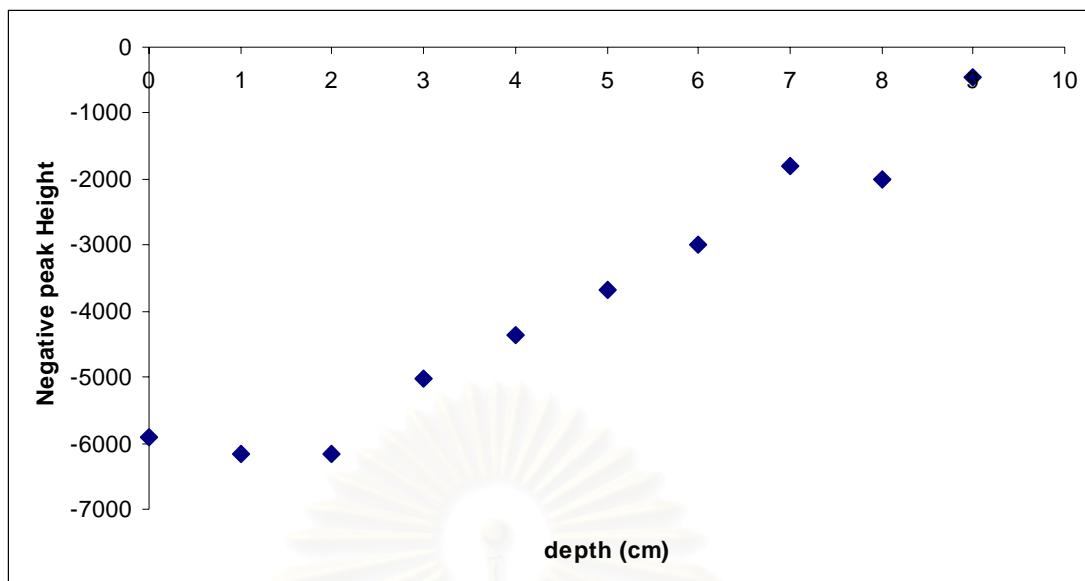
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุเยื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรกับความสูงพีค

ความลึกที่ฝังวัตถุ (cm)	ความสูงพีคด้านบวก	ความสูงพีคด้านลบ
0	1883.55	-5921.75
1	954.034	-6150.55
2	797.31	-6166.03
3	627.036	-5016.93
4	1310.932	-4364.08
5	74.1004	-3669.95
6	173.058	-2991.4
7	**	-1813.32
8	1081.628	-2014.76
9	**	-451.07

หมายเหตุ ** ไม่สามารถหาความสูงพีคได้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านบวกกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุเยื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

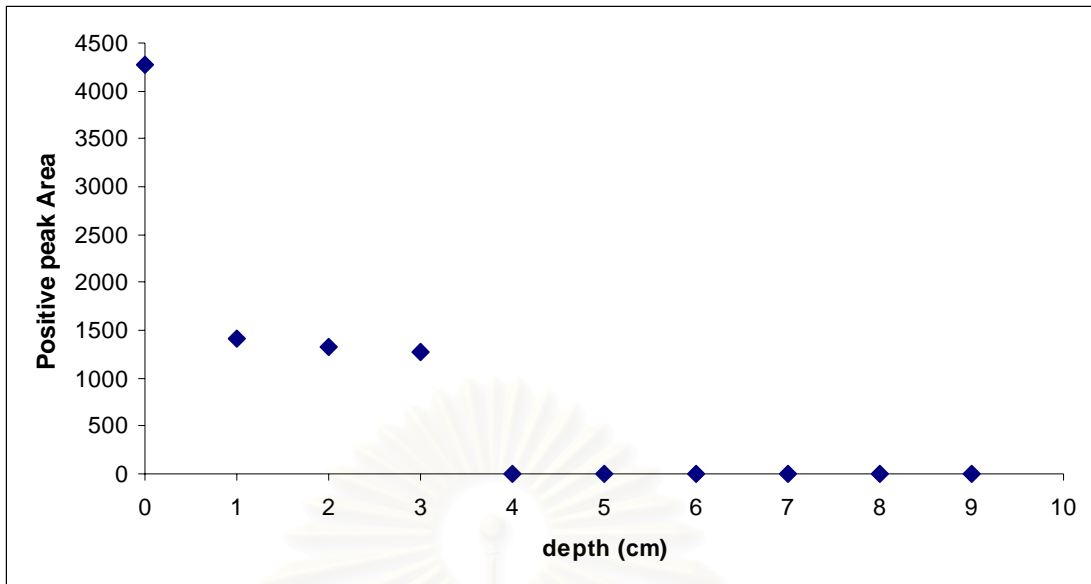


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านลบกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

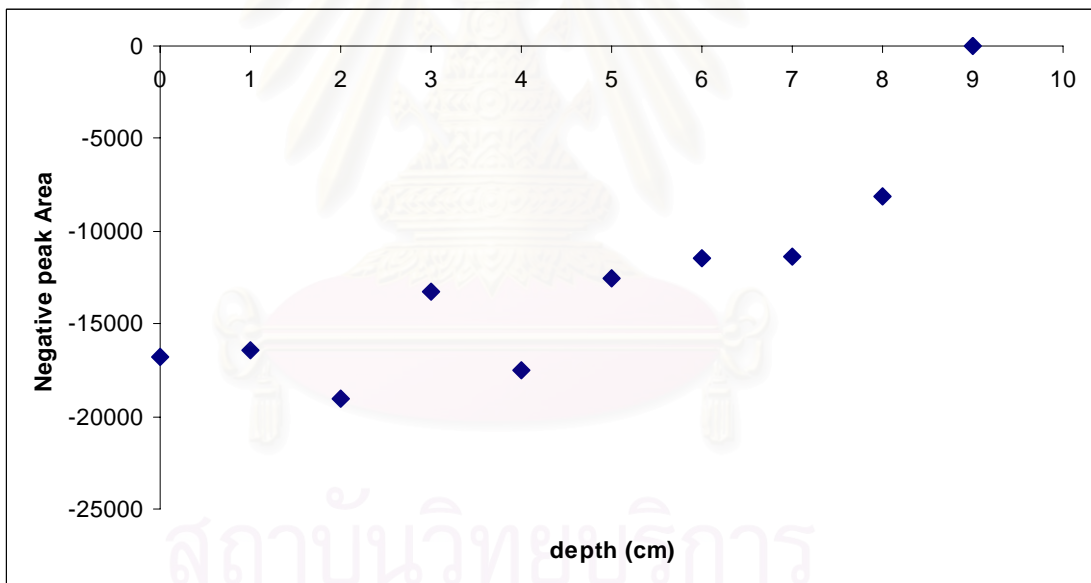
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรกับพื้นที่ใต้พีค

ความลึกที่ฝังวัตถุ (cm)	พื้นที่ใต้พีคด้านบวก	พื้นที่ใต้พีคด้านลบ
0	4275.8	-16827
1	1415.596	-16383.5
2	1320.4	-19074.7
3	1270.394	-13252.6
4	***	-17467.7
5	***	-12574.7
6	***	-11442.9
7	***	-11342.2
8	***	-8121.02
9	***	***

หมายเหตุ *** ไม่สามารถหาพื้นที่ใต้พีคได้

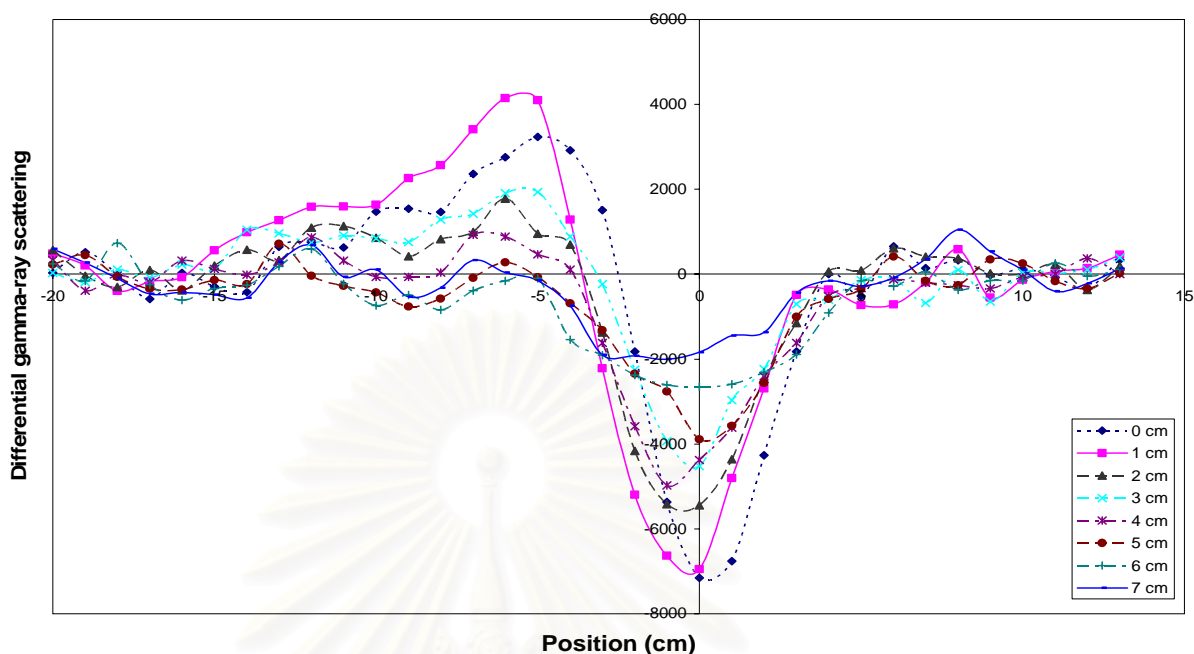


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านบนกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านล่างกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

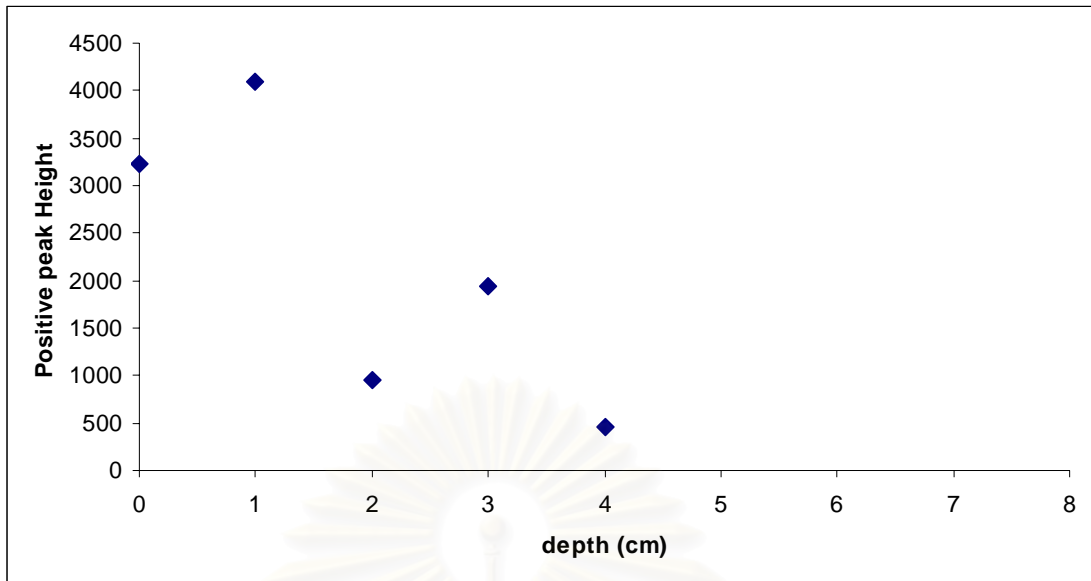
4.4.1.2 ขนาดของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ที่ความลึกต่างๆ



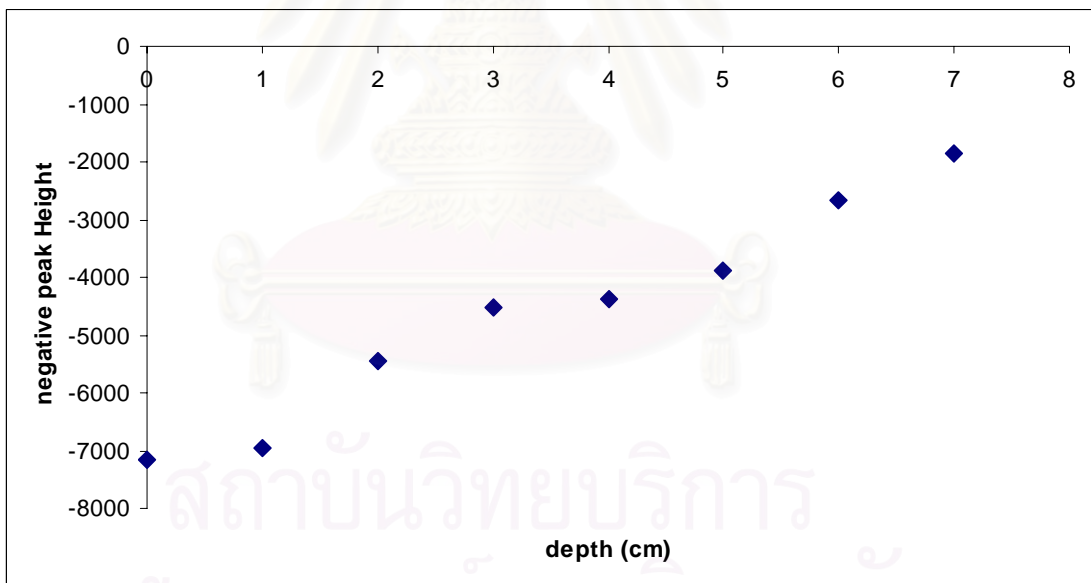
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกนผ่านวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรแต่ละตำแหน่งเมื่อวัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรกับความสูงพีค

ความลึกที่ฝังวัตถุ (cm)	ความสูงพีคด้านบวก	ความสูงพีคด้านลบ
0	3229.241	-7151.23
1	4093.397	-6952.93
2	953.4815	-5449.78
3	1935.131	-4526.31
4	462.811	-4377.56
5	-75.155	-3891.98
6	-96.255	-2655.06
7	-147.88	-1844.63



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านบวกกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร

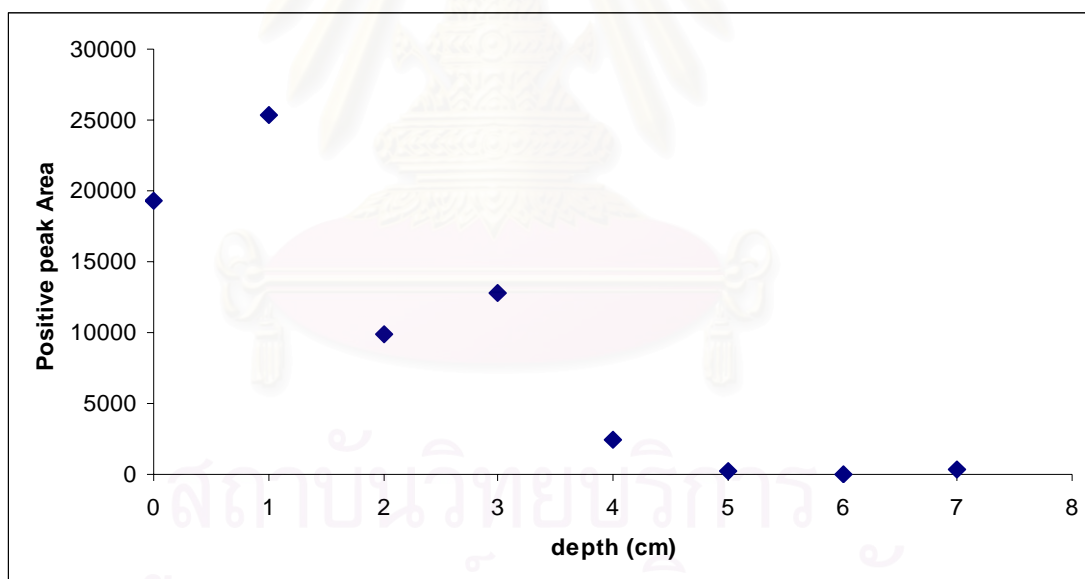


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านลบกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร

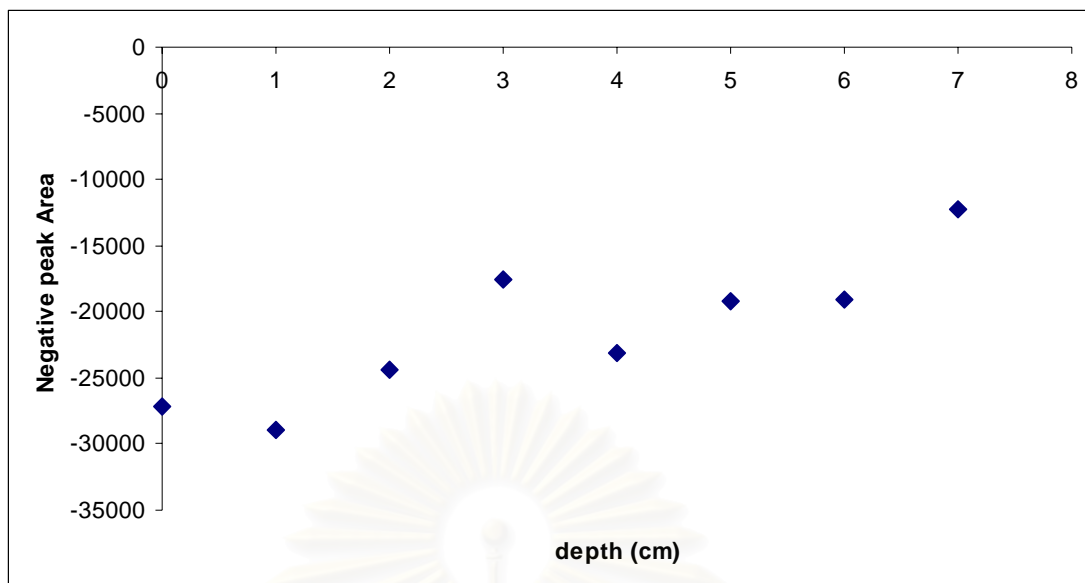
ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุรีขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรกับพื้นที่ที่ได้พืค

ความลึกที่ฝังวัตถุ (cm)	พื้นที่ที่ได้พืคด้านบวก	พื้นที่ที่ได้พืคด้านลบ
0	19264.55	-27197.5
1	25393.68	-28991.5
2	9863.402	-24381.5
3	12814.48	-17605.7
4	2418.426	-23167.7
5	273.01	-19166.8
6	***	-19052.7
7	366.0913	-12270.9

หมายเหตุ *** ไม่สามารถหาพื้นที่ที่ได้พืคได้

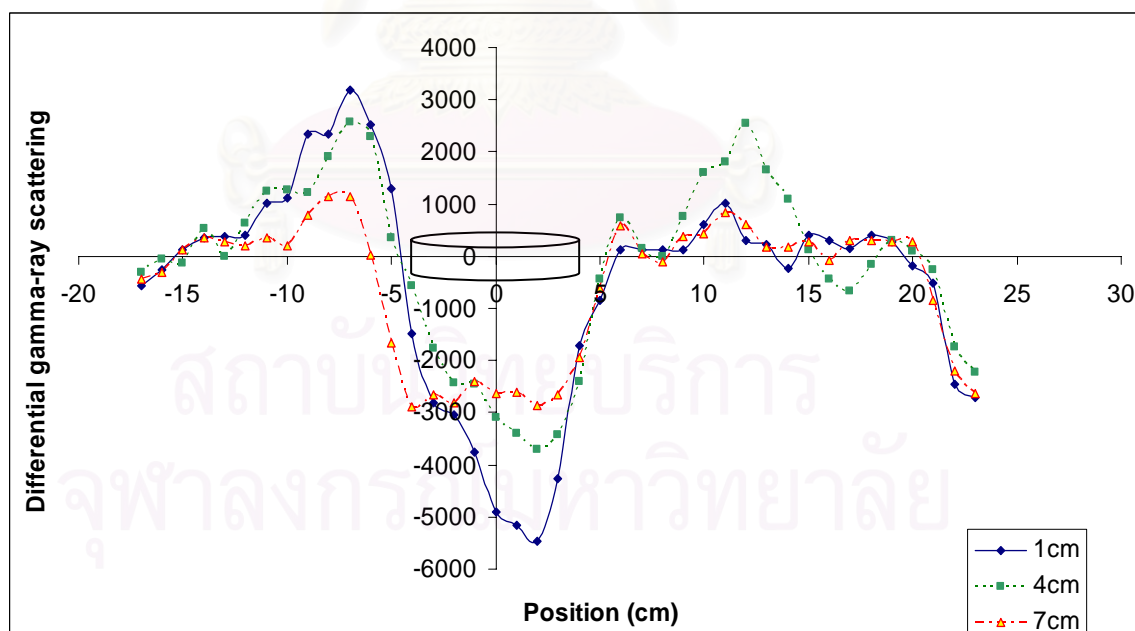


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ที่ได้พืคด้านบวกกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุรีขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคทางด้านลบกับความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นท่อบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร

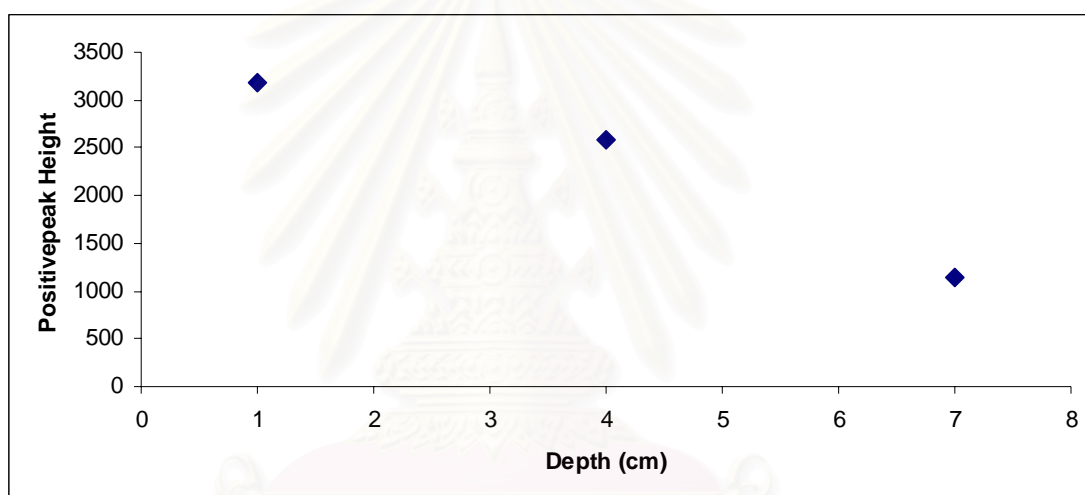
4.4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติกบรรจุยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร กับความลึก



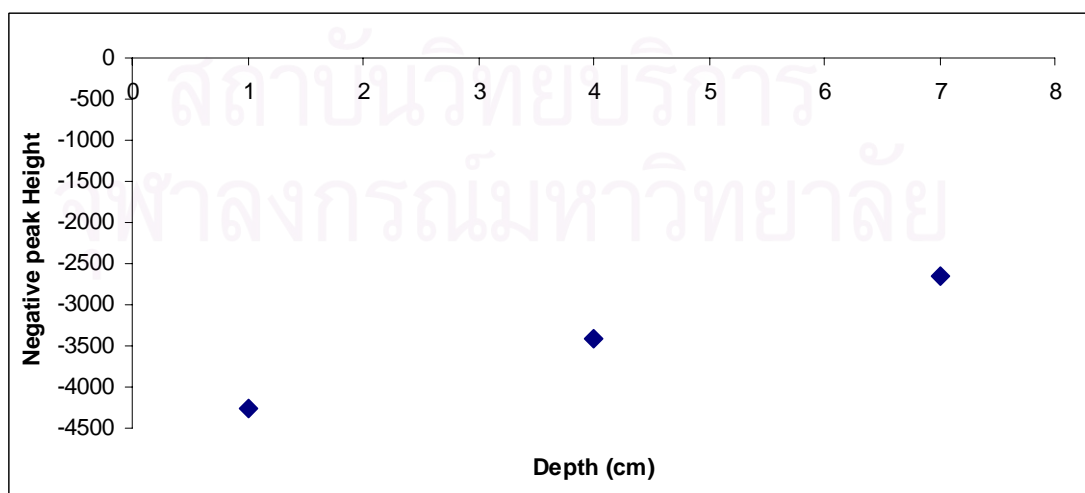
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมเมื่อสแกนผ่านวัตถุที่เป็นกล่องบรรจุยูเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตรสูง 3 เซนติเมตร แต่ละตำแหน่งเมื่อวัตถุอยู่ในระยะความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ฝังวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติกกับความสูงพีคและพื้นที่ใต้พีค

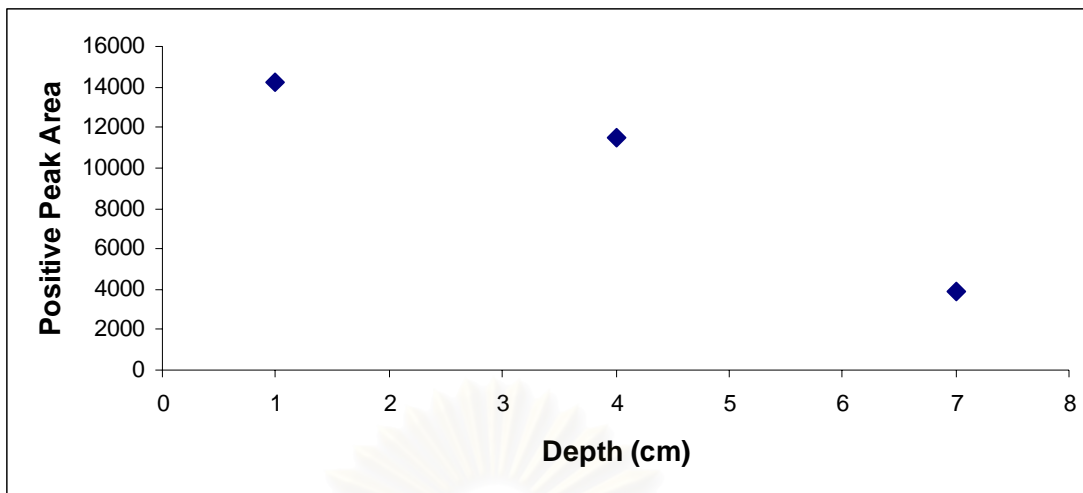
ความลึก (cm)	ความสูงพีคบวก	ความสูงพีคลบ	พื้นที่ใต้พีคบวก	พื้นที่ใต้พีค ลบ	พื้นที่ใต้พีค ลบ
1	3181.05	-4268.7	14222.5	-33441	-33441
4	2582.29	-3411.9	11520.1	-23662	-23662
7	1137.97	-2647.3	3847.14	-25725	-25725



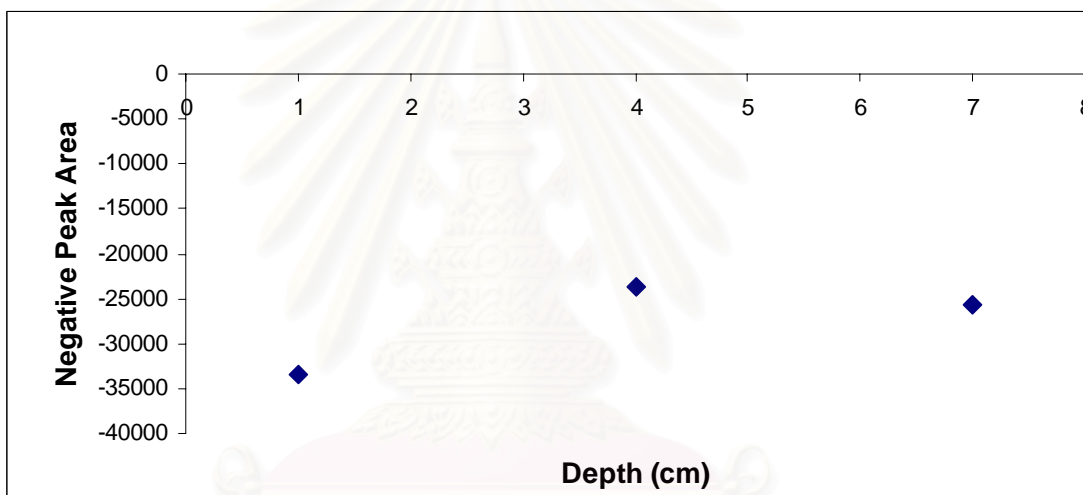
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านบวกกับความลึกของกล่องพลาสติก



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านลบกับความลึกของกล่องพลาสติก



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านบนบวกกับความลึกของกล่องพลาสติก

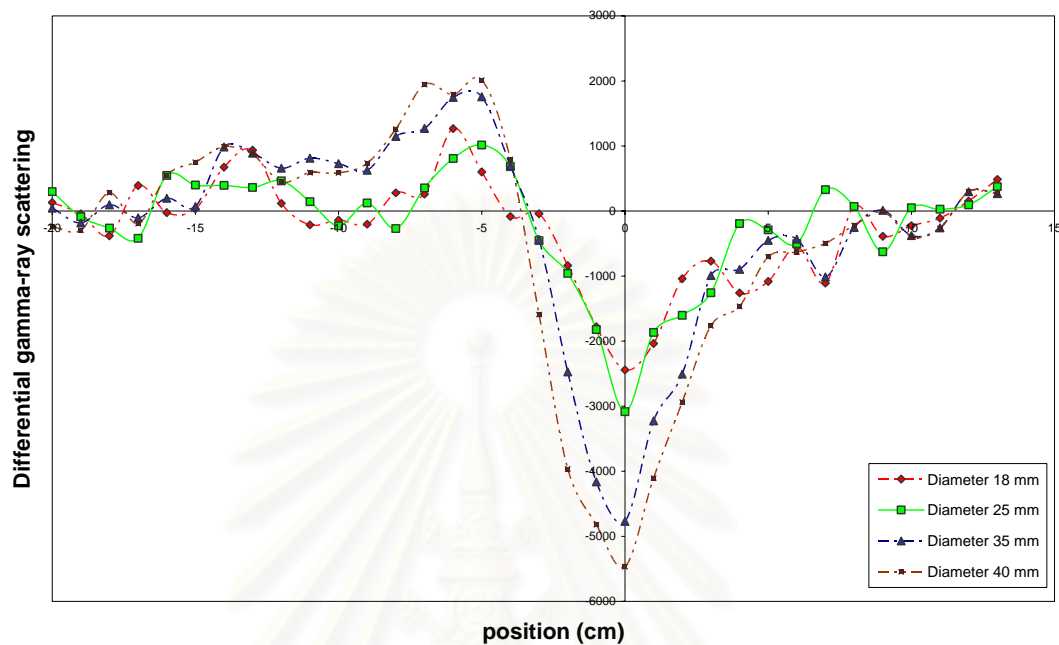


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านล่างลบกับความลึกของกล่องพลาสติก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 ผลการศึกษาขนาดของวัตถุ

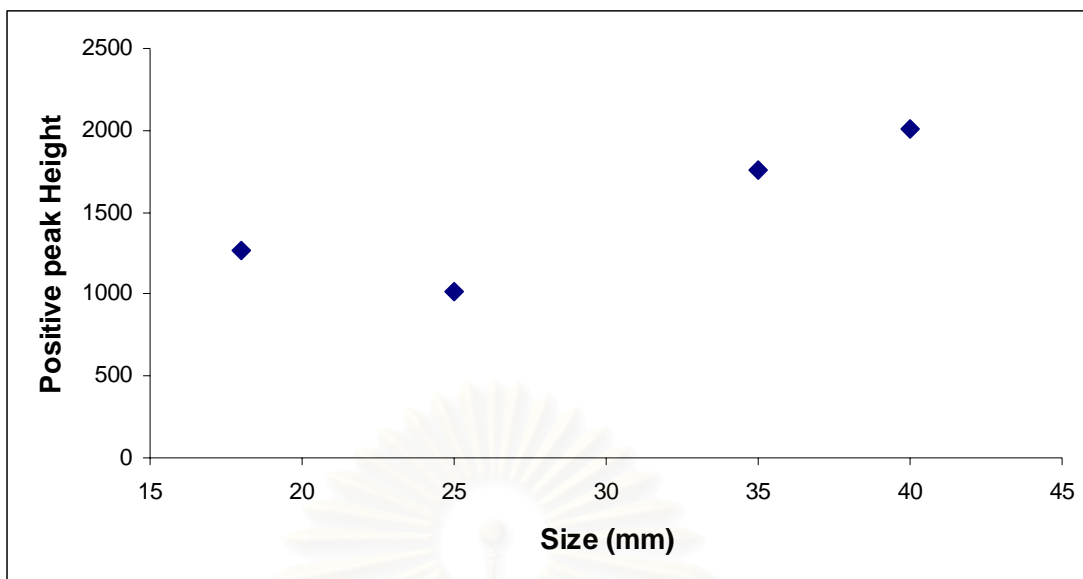
4.4.2.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง



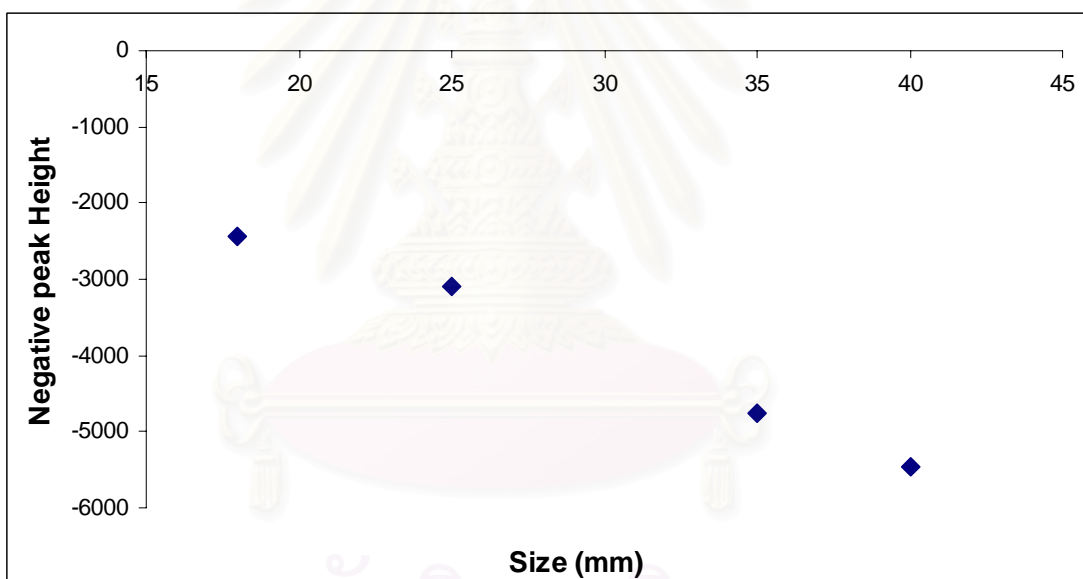
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับขนาดของวัตถุเมื่อวัตถุตัวอย่างเป็นท่อบรรจุยูเรียขนาดต่างๆ

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อกับความสูงพีคด้านบวก

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)	ความสูงพีคด้านบวก	ความสูงพีคด้านลบ
18	1268.26	-2442.09
25	1015.837	-3083.95
35	1757.64	-4769.18
40	2013.931	-5466.16



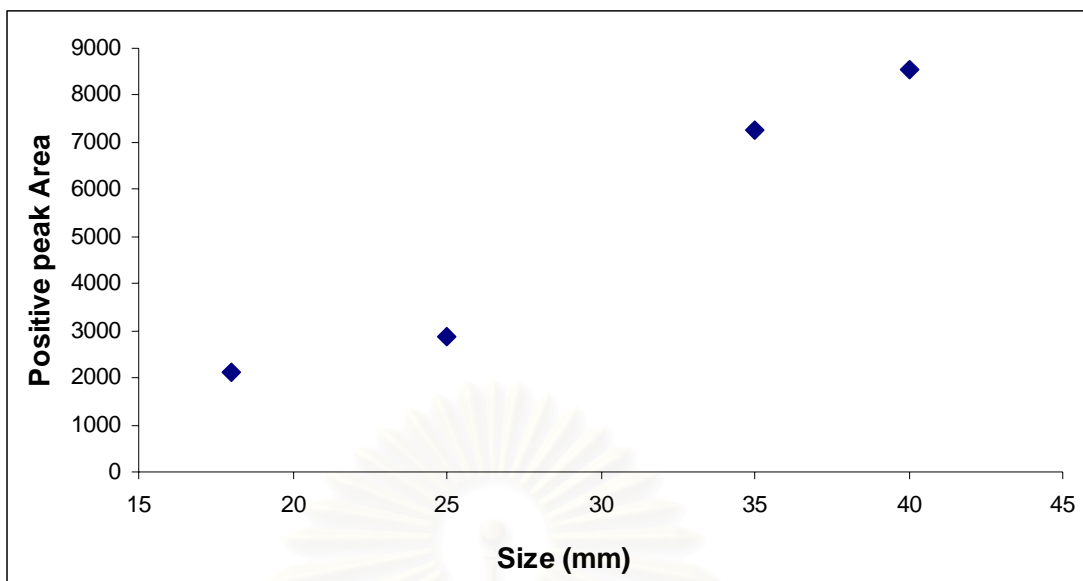
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านบวกกับขนาดท่อ



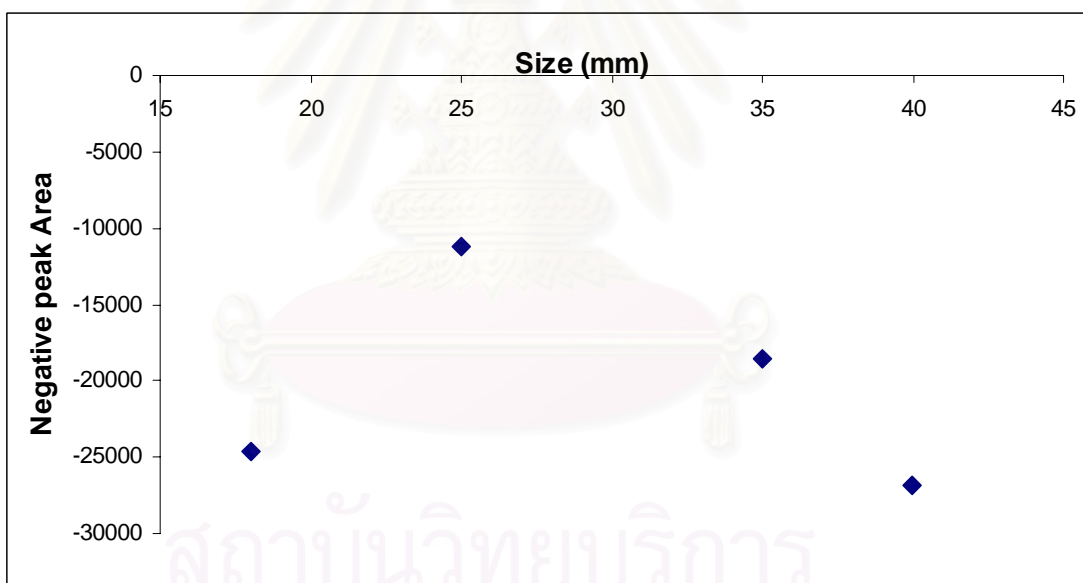
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพีคด้านล่างกับขนาดท่อ

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อกับพื้นที่ใต้พีคและความกว้างของพีค

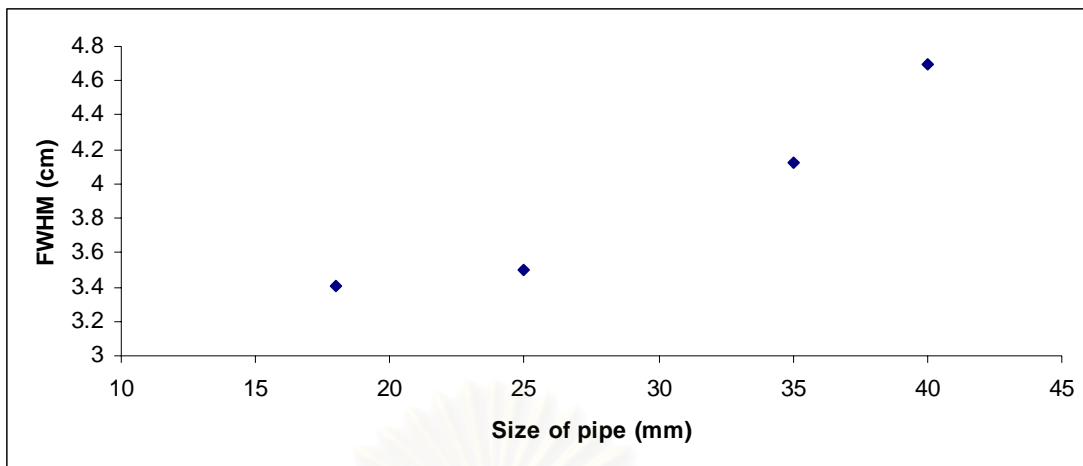
ขนาดท่อ (mm)	พื้นที่ใต้พีคซ้าย	พื้นที่ใต้พีคขวา	ความกว้างพีค
18	2129.78	-24648.1	3.4887
25	2864.463	-11233.8	3.4961
35	7245.516	-18563.3	4.1234
40	8537.746	-26816.6	4.6925



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านบวกกับขนาดท่อ

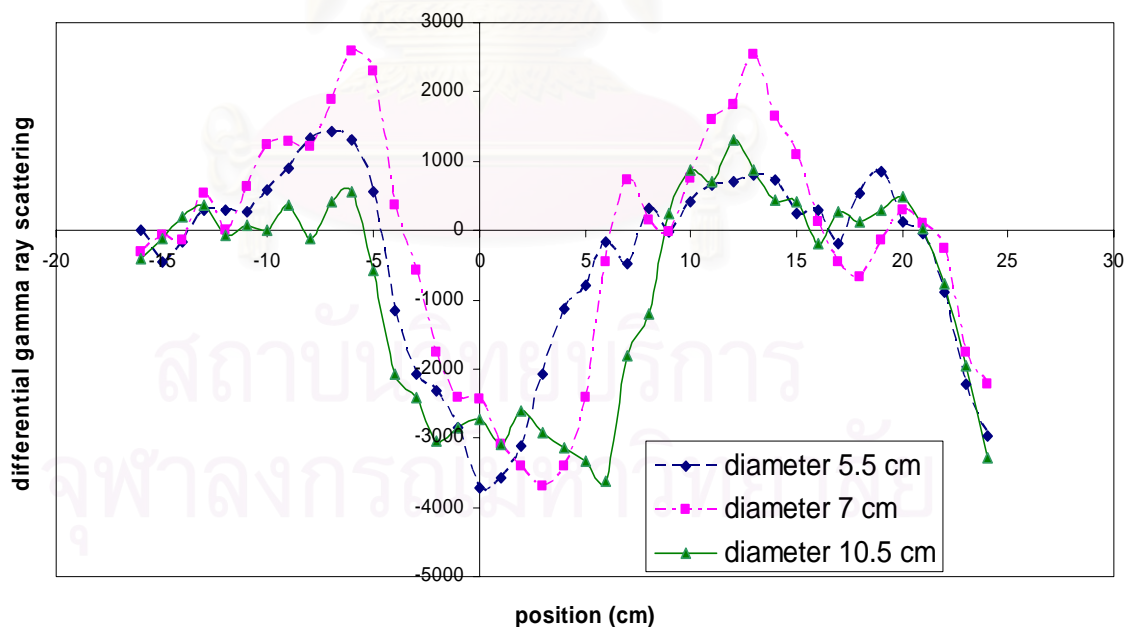


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคด้านลบกับขนาดท่อ



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพีคกับขนาดท่อ

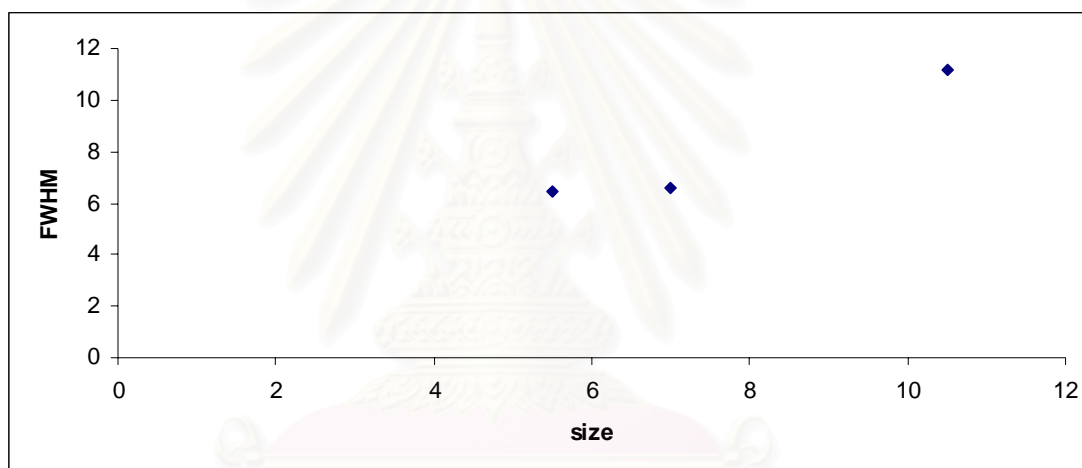
4.4.2.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกล่องพลาสติกกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงกับขนาดของวัตถุเมื่อวัตถุตัวอย่างเป็นกล่องพลาสติกบรรจุเหรียญ

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติกกับความสูงพีคและขนาดความกว้างพีค

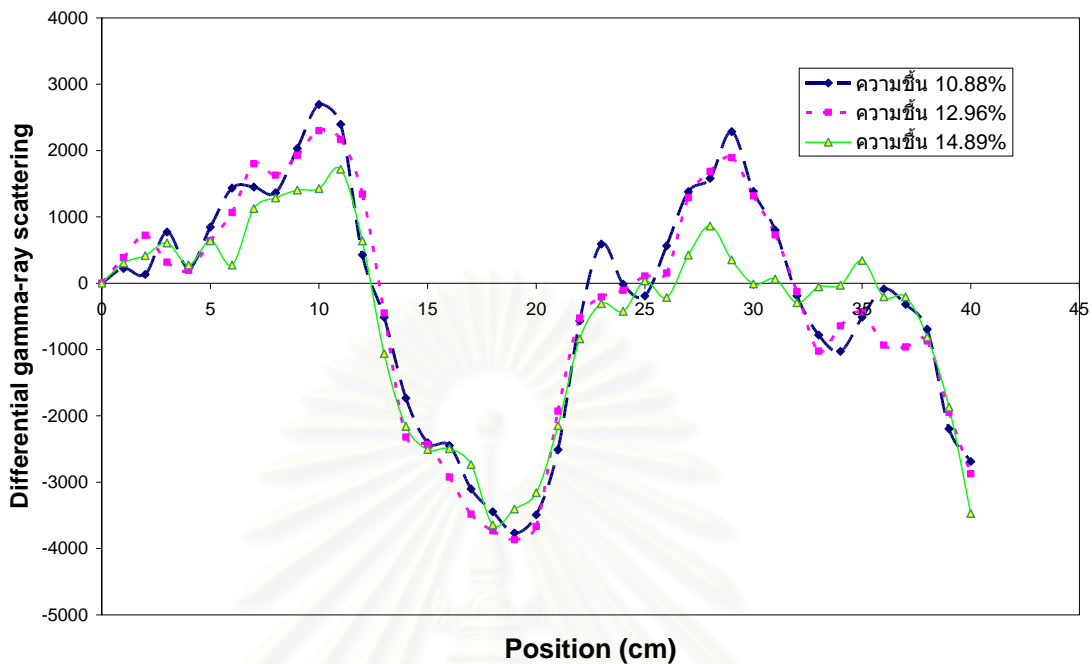
ขนาดกล่องของ พลาสติก	ความสูงพีคด้านบวก	ความสูงพีคด้านลบ	ความกว้างของพีค
5.5	1306.13	-3713.4	6.4669
7	2582.29	-3706	6.5864
10.5	567.059	-3613.5	11.1972



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของพีคกับขนาดของวัตถุที่เป็นกล่องพลาสติก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ผลการศึกษาของความชื้นที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัม

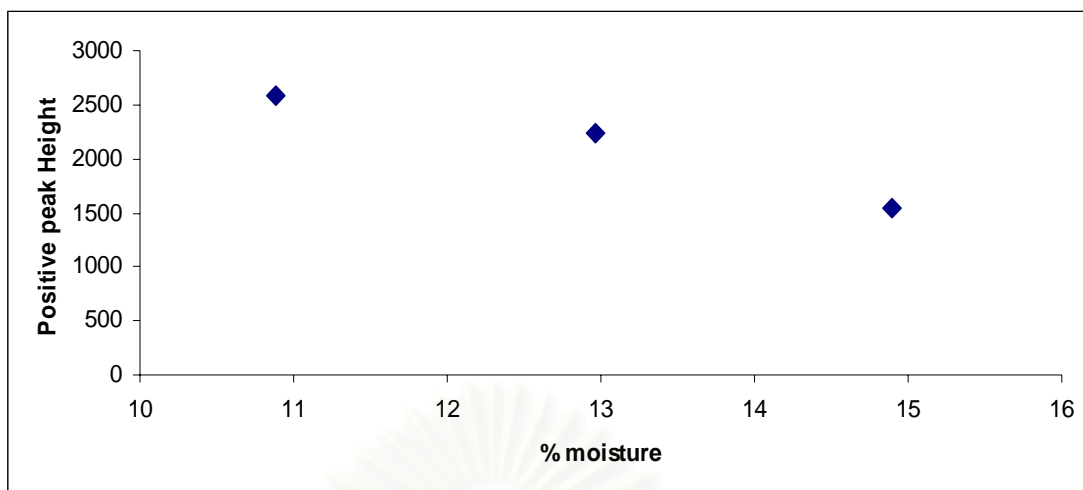


รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมแต่ละตำแหน่งการสแกน กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน

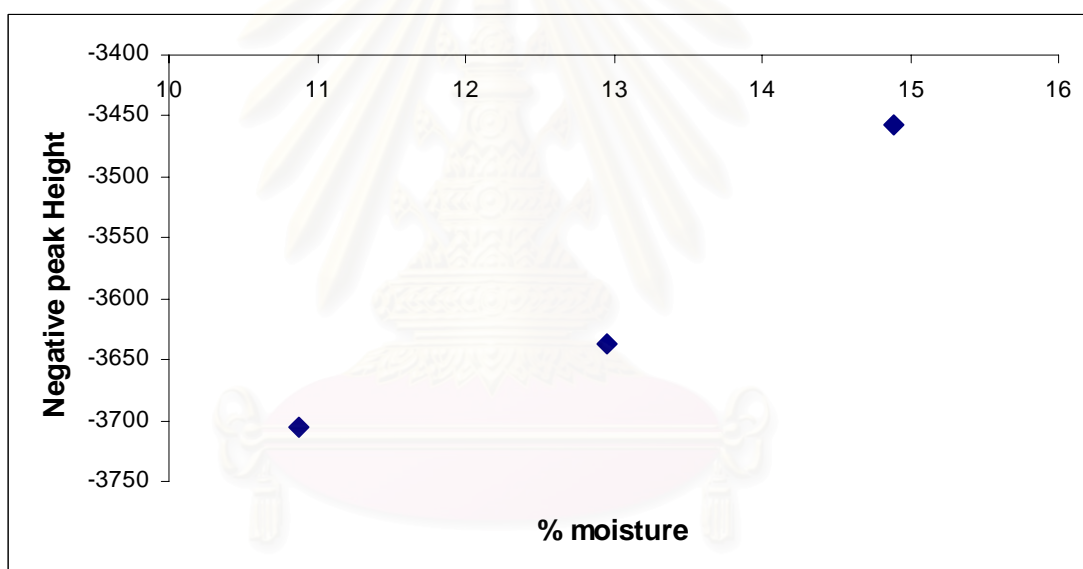
ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดินกับความสูงของพีคในแต่ละด้าน

% ความชื้นในดิน	ความสูงพีคด้านบวก	ความสูงพีคด้านลบ
10.88	2582.29	-3706.04
12.96	2238.21	-3637.27
14.89	1538.048	-3457.85

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



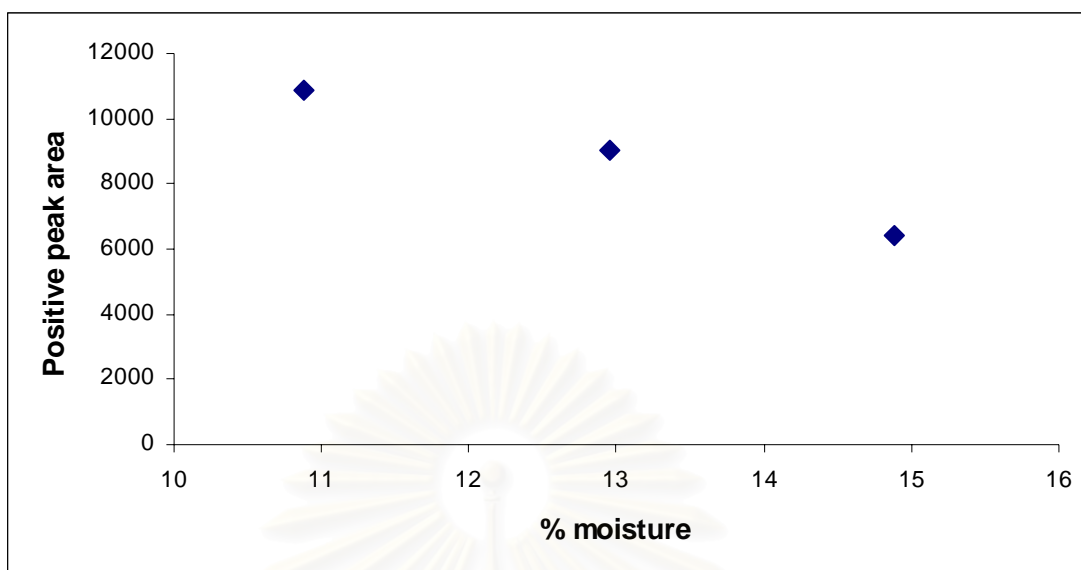
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของพีคทางด้านบวกกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน



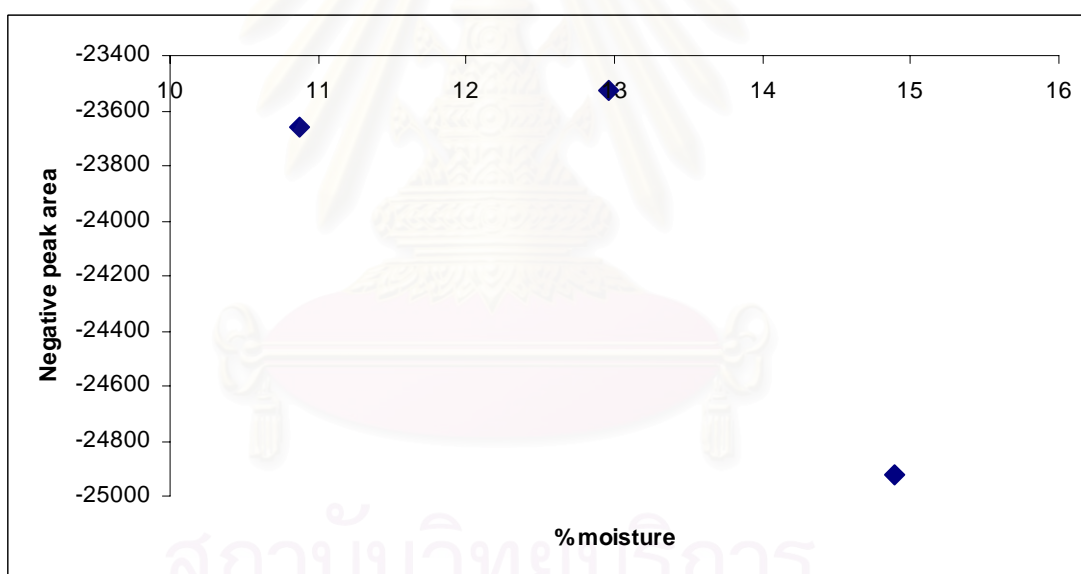
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของพีคทางด้านลบซ้ายกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดินกับพื้นที่ใต้พีคในแต่ละด้าน

% ความชื้นในดิน	พื้นที่ใต้พีคด้านบวก	พื้นที่ใต้พีคด้านลบ
10.88	10881.73	-23662.2
12.96	9054.05	-23528.3
14.89	6387.904	-24923.8



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคทางด้านบวกกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน

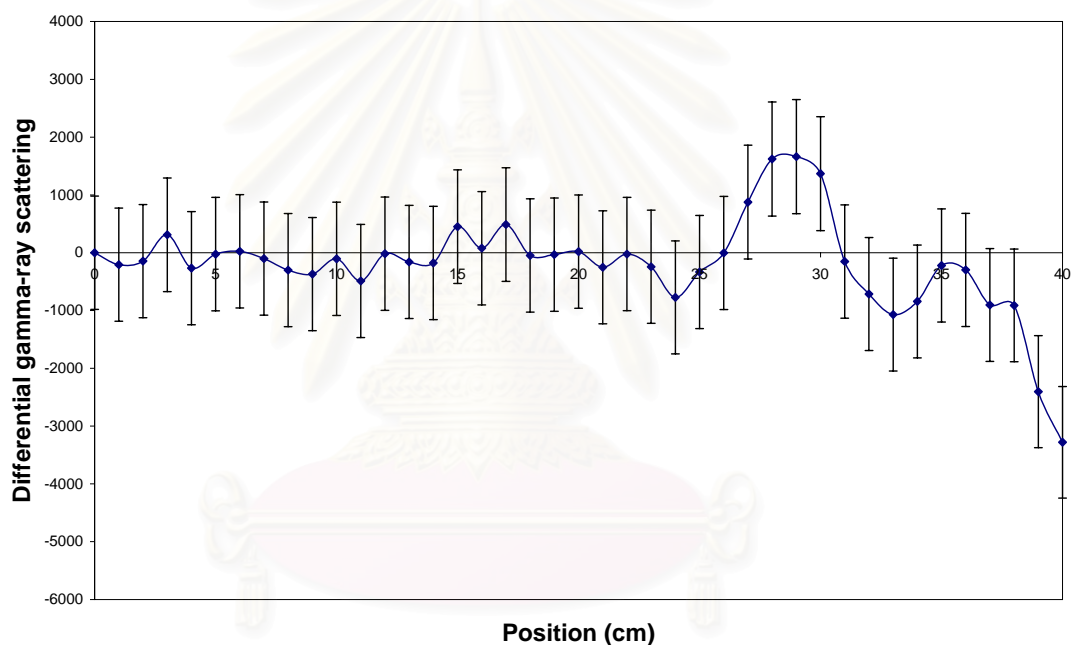


รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคทางด้านลบกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นภายในดิน

4.6 ผลการทดลองวัดกับระเบิด ณ พื้นที่จริงเพื่อศึกษาผลของวัตถุแปลกปลอมที่ฝังอยู่ในดิน

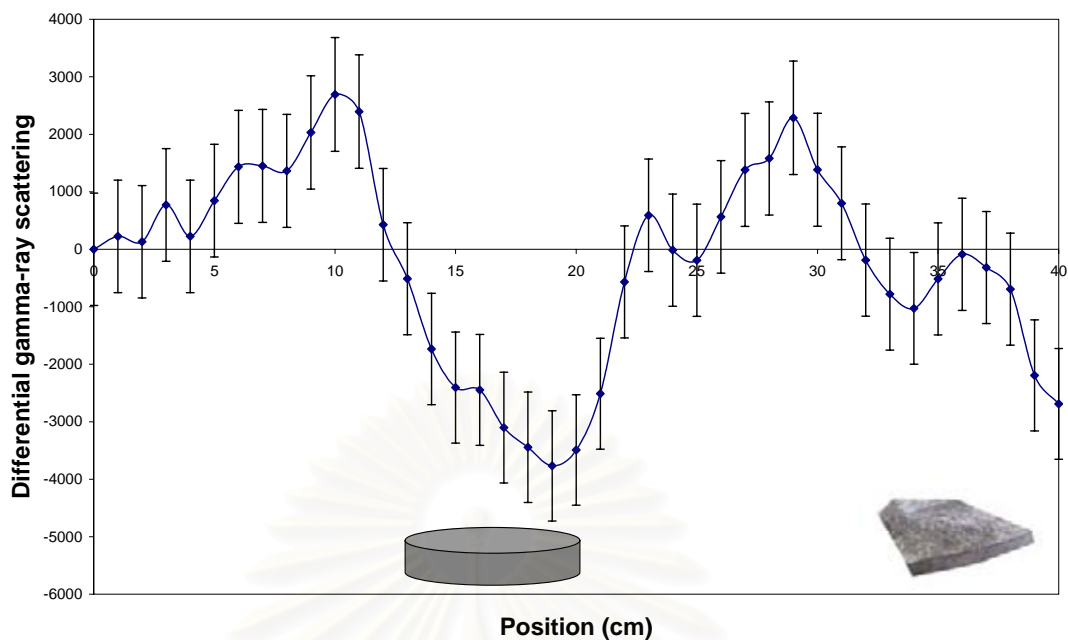
4.6.1 ผลการทดลองวัดวัตถุเสมือนระเบิดที่ฝังอยู่ในดิน ณ พื้นที่ ที่ 1

ทำการสแกน ณ พื้นที่หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีโดยทำการวัดตำแหน่งละ 100 วินาทีแต่ละตำแหน่งห่างกัน 1 เซนติเมตรตามแนวสแกนทั้งหมด 40 ตำแหน่ง ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงดังรูปที่ 4.50 และจากนั้นได้ทำการฝังวัตถุเสมือนระเบิดซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้กล่องอะคริลิกบรรจุยูเรเนียมผงไว้ที่ความลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีที่กระเจิงจากวัตถุตัวอย่างกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 1 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

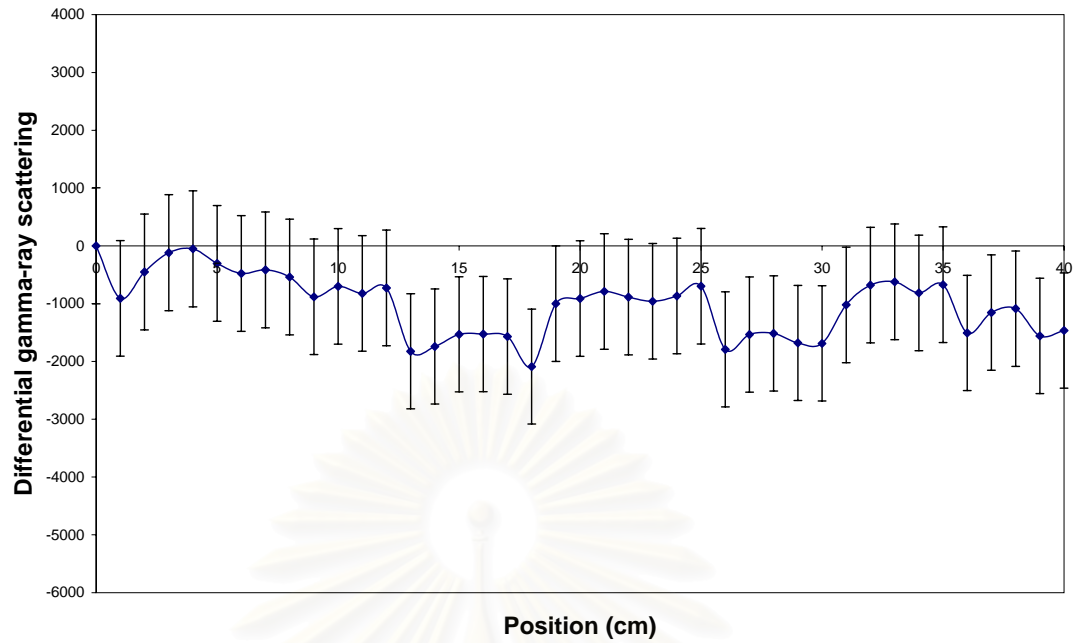
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



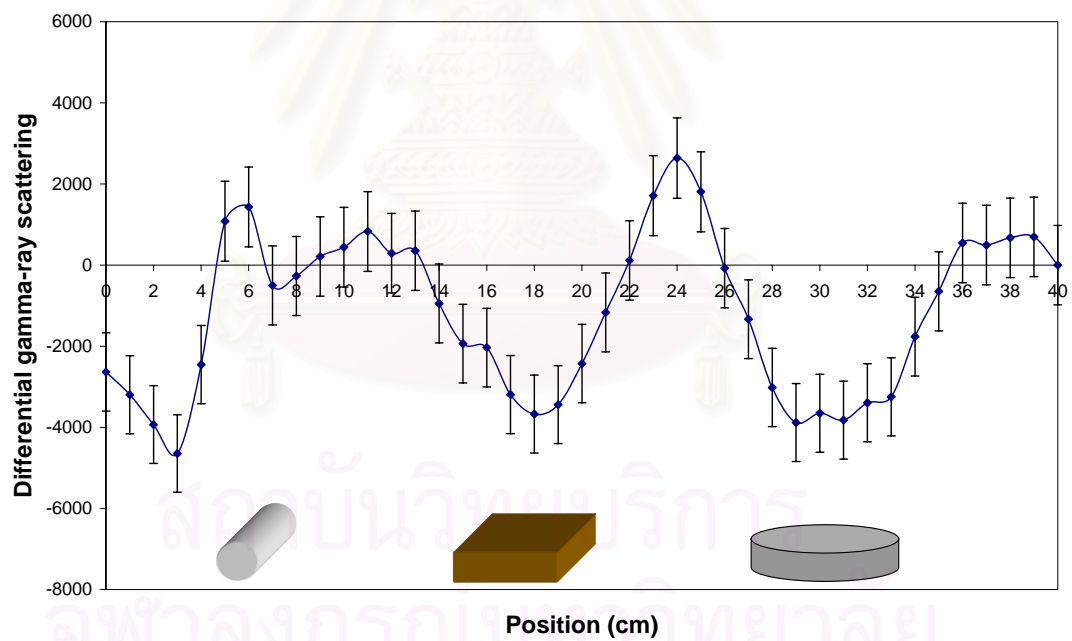
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดไว้ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ณ พื้นที่บริเวณที่ 1 หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

4.6.2 ผลการทดลองวัตถุเสมือนระเบิดที่ฝังอยู่ในดิน ณ พื้นที่ ที่ 2

ทำการสแกน ณ พื้นที่หน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีโดยทำการวัดตำแหน่งละ 100 วินาทีแต่ละตำแหน่งห่างกัน 1 เซนติเมตรตามแนวสแกนทั้งหมด 40 ตำแหน่ง ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงดังรูปที่ 4.52 และจากนั้นได้ทำการฝังวัตถุเสมือนระเบิดซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้กล่องอะคลีริกบรรจุยูเรียฝังไว้ที่ความลึกจากผิวดิน 4 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร และได้ฝังวัตถุแปลกปลอมได้แก่ เหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว และไม้ที่มีขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ไว้ที่ตำแหน่ง 6 เซนติเมตร และตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้สเปกตรัมของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงของแต่ละตำแหน่งตามแนวสแกนดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 2 หน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแนวรังสีตกกระทบ เมื่อฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดและวัตถุแปลกปลอมในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ณ พื้นที่บริเวณที่ 2 หน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 เมื่อทำการศึกษาผลของระยะห่างของระบบวัด จากพื้นดินที่ใช้ทำการสแกนโดยฝั่งตัวอย่างวัตถุที่เป็นกล่องบรรจุเย็บที่ระยะความลึกผิวดินและที่ระยะความลึกจากผิวดินถึงผิวของวัตถุตัวอย่าง 4 เซนติเมตร พบว่าผลของระยะห่างระหว่างระบบวัดกับพื้นผิวดินนั้นไม่มีผลกับความเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงมากนัก แต่ความลึกของวัตถุตัวอย่างที่ฝังอยู่ในดินมีผลต่อสเปกตรัมดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงมากกว่า

5.1.2 เมื่อทำการวัดวัตถุแต่ละชนิดในอากาศ โดยผลที่เกิดจากแกมมาเรย์คอมป์ตันสแกตเทอริงที่กระเจิงจากวัตถุตัวอย่างแต่ละชนิด พบว่าค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีคที่เกิดจากผลของการกระเจิงของรังสีแกมมาของแต่ละวัสดุนั้นมีค่าแตกต่างกันไป ซึ่งผงตะไบเหล็กจะมีค่าพื้นที่ใต้พีคจากการกระเจิงของรังสีแกมมามากกว่าดินและ ตะกั่วจะมีค่าพื้นที่ใต้พีคจากการกระเจิงของรังสีแกมมาน้อยที่สุด ยูเรียมและน้ำมีค่าพื้นที่ใต้พีคมากขึ้นตามลำดับแต่วัสดุทั้งสามมีค่าพื้นที่ใต้พีคจากการกระเจิงรังสีแกมมาน้อยกว่าดิน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีคที่เกิดจากผลของการกระเจิงของรังสีแกมมาของแต่ละวัสดุ นั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและค่าเลขอะตอมประสิทธิผลของแต่ละวัสดุเพราะโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาคอมป์ตันสแกตเทอริงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของตัวกลาง ซึ่งเมื่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มมากขึ้นค่าจำนวนนับพื้นที่ใต้พีคจากการกระเจิงของรังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้นด้วยและจะลดลงเมื่อวัสดุมีค่าเลขอะตอมมากขึ้น ซึ่งเมื่อวัสดุมีเลขอะตอมมากขึ้นจะทำให้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ได้มาก ซึ่งโอกาสที่จะเกิดจะมีค่าประมาณเลขอะตอมประสิทธิผลของวัสดุ ยกกำลัง 4

เมื่อนำวัตถุตัวอย่างแต่ละชนิดไปฝังดินสามารถเกิดลักษณะของการกระเจิงแกมมาเรย์สแกตเทอริงขึ้นได้ 4 กรณี ทำการสแกนแต่ละตำแหน่งโดยห่างกันตำแหน่งละ 1 เซนติเมตร นั้นจะสรุปได้ว่าผลของดิฟเฟอเรนเชียลแต่ละตำแหน่งของแต่ละวัตถุตัวอย่างจะแตกต่างกันไปโดยเมื่อวัตถุมีค่าคอมป์ตันสแกตเทอริงน้อยกว่าดินจะทำให้ค่าดิฟเฟอเรนเชียลคอมป์ตันสแกตเทอริงมีค่าติดลบและตัววัตถุตัวอย่างเองสามารถดูดกลืนรังสีแกมมาที่กระเจิงจากดินเข้าสู่หัววัดได้ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัตถุและค่าเลขอะตอมประสิทธิผล

ของวัตถุตัวอย่าง ทำให้สามารถที่จะแยกแยะวัตถุที่ฝังอยู่ในดินได้ว่ามีค่าความหนาแน่นมากหรือน้อยกว่าพื้นดิน

5.1.3 จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคอมปีตันสแกตเทอริงกับผลของปริมาณไนโตรเจนที่เปลี่ยนไปซึ่งในการทดลองนั้นได้นำสารยูเรียผสมกับโพลีเอททีลีนและนำสารยูเรียละลายในน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของไนโตรเจนลง พบว่าค่าที่ได้ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของไนโตรเจนต่อน้ำหนักของตัวอย่างนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งจะอยู่ในช่วงค่าความผิดพลาด 3σ ทำให้ไม่สามารถที่จะแยกแยะวัตถุที่มีปริมาณไนโตรเจนที่แตกต่างกันได้

5.1.4 ผลจากการทดลองในการหาตำแหน่งและความลึกของวัตถุที่ฝังอยู่ในดินนั้น โดยใช้ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 และ 35 มิลลิเมตรบรรจุสารยูเรียไว้ภายในและนำไปฝังดินที่ระยะความลึกต่างๆ กัน เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ของแนวรังสีที่ตกกระทบกับวัตถุเมื่อรังสีตกกระทบตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ นั้นค่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ได้มีค่ามากที่สุด และลดลงเมื่อตำแหน่งที่ตกกระทบออกห่างจากตำแหน่งกึ่งกลางวัตถุออกไปจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อแต่ละความลึกนั้น พบว่าเมื่อท่ออยู่ใกล้ผิวดินมากเท่าไรค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงจะมีค่าติดลบมากที่สุด และค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อท่ออยู่ลึกจากผิวดินลงไป และเมื่อถึงระดับความลึก 9 เซนติเมตรไม่สามารถตรวจหาคะเบ็ดที่ฝังอยู่ในดินได้

ผลการทดลองในการหาขนาดของวัตถุที่ฝังอยู่ในดินที่ระดับความลึก 4 เซนติเมตร จากผิวดินถึงผิวของท่อ ทดสอบโดยใช้ท่อพลาสติกที่บรรจุสารยูเรียไว้ภายใน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40, 35, 25 และ 18 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงแต่ละตำแหน่งในแนวสแกน พบว่าเมื่อรังสีตกกระทบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงจะมีค่าติดลบมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อของแต่ละขนาดพบว่าค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงมีค่าติดลบมากที่สุดเมื่อท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และมีค่าติดลบน้อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็กลง

5.1.5 จากการศึกษาค่าผลของความชื้นภายในพื้นดินนั้น เมื่อนำตัวอย่างวัตถุที่เป็นยูเรียบรรจุในกล่องพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ฝังไว้ในดินที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ลึก 4 เซนติเมตร ทำการสแกนตามแนวผ่านกึ่งกลางวัตถุจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตร ถึง ตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตร โดยเปลี่ยนแปลงความชื้นของดินที่ 10.88, 12.96, 14.89 เปอร์เซ็นต์ความชื้น(ต่อน้ำหนักแห้ง) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคและความสูงพีคเมื่อรังสีตกกระทบวัตถุตามแนวสแกน มีค่าลดลงเมื่อความชื้นในดินมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นในดินทำให้ค่าแกมมาเรย์สแกตเทอริงของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงของวัตถุลดลง

5.1.6 จากการทดลองฝังวัตถุเสมือนกับระเบิด ณ พื้นที่จริงซึ่งในการทดลองนี้ใช้กล่องพลาสติกบรรจุสารยูเรีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ฝังไว้บริเวณหน้าภาควิชาทั้งสองบริเวณ ที่บริเวณที่ 1 ทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตรถึง ตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตร โดยทำการฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดไว้ที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตรโดยพบว่าค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงที่ตำแหน่งบริเวณที่ฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดจะมีค่าลดลงและที่บริเวณตำแหน่งที่ 38 เซนติเมตรก็จะต่ำลงด้วยเช่นกัน ได้ทำการขุดดินบริเวณตำแหน่งที่ 38 ปรากฏว่าพบเศษปูนขนาด 8 เซนติเมตรฝังอยู่ในดิน ที่บริเวณที่ 2 ทำการสแกนจากตำแหน่งที่ 0 เซนติเมตรถึง ตำแหน่งที่ 40 เซนติเมตร โดยทำการฝังวัตถุเสมือนกับระเบิดไว้ที่ตำแหน่ง 30 เซนติเมตร และฝังวัตถุแปลกปลอมที่เป็นเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว และไม้ที่มีขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ไว้ที่ตำแหน่ง 6 เซนติเมตร และตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อรังสีตกกระทบตรงตำแหน่งกึ่งกลางของเหล็ก(ตำแหน่งที่ 6 เซนติเมตร)ค่าดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่ 14 ถึง 21 เซนติเมตรกับตำแหน่งที่ 27 ถึง 35 เซนติเมตรจะมีค่าดิฟเฟอเรนเชียลลดลงซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการฝังไม้และวัตถุเสมือนกับระเบิดไว้ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าการตรวจหากับระเบิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสามารถตรวจหาวัตถุต้องสงสัยว่าเป็นกับระเบิดได้แต่ไม่เจาะจงว่าเป็นกับระเบิดหรือไม่

จากผลการวิจัยข้างต้นสรุปได้ว่าเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของวัตถุที่ฝังอยู่ในดิน โดยลักษณะของสเปกตรัมที่ได้ และค่าผลรวมในช่วงที่เหมาะสม มีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาด ระดับความลึก ชนิดและความหนาแน่นของวัตถุ ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์กับปัจจัยดังกล่าวในลักษณะที่เขียนเป็นกราฟ หรือสมการความสัมพันธ์ได้ แต่สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน เมื่อมีวัตถุแปลกปลอมฝังอยู่ในดิน และการเปลี่ยนนี้เริ่มเห็นได้แม้ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบมิได้อยู่ตรงกับ

วัตถุแปลกปลอมในดินก็ตาม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ใช้เทคนิคนิวตรอน [5, 7] แล้วพบว่าเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงให้ผลเป็นที่น่าพอใจ หากมีการวิจัยพัฒนาต่อไป น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจหากับระเบิดได้โดยตรง หรือใช้ประกอบกับเทคนิคอื่น ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงในการตรวจหากับระเบิดนั้นยังไม่ได้มีการนำไปใช้งานจริงในงานภาคสนาม จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ในการตรวจหากับระเบิดโดยเฉพาะ และเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบ จึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.2.1 ใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงรังสีมากขึ้น เพราะจะทำให้ความเข้มรังสีที่กระเจิงจากชั้นวัสดุเข้าสู่หัววัดเพิ่มขึ้น ค่าผลรวมดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงก็จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการสแกนลงได้ ซึ่งจะทำให้ระบบการสแกนแสดงผลการตรวจหากับระเบิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ซึ่งมีขีดจำกัดในการตรวจหาวัตถุระเบิดที่ระดับความลึกไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทำให้ไม่สามารถที่จะตรวจหากับระเบิดที่เป็นแบบทำลายรถถังได้เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกฝังไว้ที่ความลึกจากพื้นผิวดินมากถึง 15 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจหากับระเบิดที่ระดับลึก จึงควรใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่านี้

5.2.3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหากับระเบิดให้แม่นยำมากยิ่งขึ้นควรใช้เทคนิคในการสร้างภาพจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันของวัตถุ และควรทำการตรวจสอบร่วมกับ วิธีอื่น ๆ ด้วยเช่นการใช้นิวตรอนเนื่องจากนิวตรอนสามารถที่จะบอกองค์ประกอบของธาตุที่ใช้ทำกับระเบิดได้

รายการอ้างอิง

- [1] Samin, Anghate, et al. Material Characterization and Flaw Detection Sizing and Location by Differential Gamma-Ray Scattering Spectroscopy Technique. Nuclear Technology 91 (September 1990) : 361-387.
- [2] อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา. การตรวจจบบรรยากาศของรังสีแกมมาในชั้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโตรสโคปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541.
- [3] สราพรรณ พจน์ชนะชัย. การตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโตรสโคปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] ศิโรจน์ พยัคฆวงศ์. การพัฒนาเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [5] Cor P. Datema, Victor R. Bom and Carel W.E. Van Eijk DUNBLAD: The Delft University Neutron Landmine Detection the Dutch Ministry of Defence Manuscript received March 20, 2002.
- [6] Shiro Tuzi, and Otomura sato. Locating the Positions of Reinforcing Bars in Reinforced Concrete using Backscattering Gamma Rays. Applied Radiation and Isotopes 41 ,10/11 (1990): 1013-1018.
- [7] R. Doczi , B. Kiraly and J. Csikai Landmine detection by neutron methods contact No. IRMM/ST/2001-248"14-CCR 478519(2001)
- [8] Esam M.A.Hussein, Marc Eesrosiers, Edward J. Waller On the use of radiation scattering for the detection of landmine Received 15 April 2004: received in revised form 20 July 2004; accepted 21 July 2004.
- [9] Esam M.A.Hussein, Edward J. Waller Landmine Detection: The Problem and the Challenge Applied Radiation and Isotopes, 53 (2000) : 557-563
- [10] Jehuda Yinon, Field detection and monitoring of explosives trends in analytical chemistry, vol. 21, no. 4 , 2002.

- [11] Andy Buffler Contraband detection by fast neutron scattering. Paper presented at the 2nd National Nuclear Technology Conference, NAC, South Africa, 13-15 May 2001
- [12] John R.Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. 2nded. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983.
- [13] Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 3rded. New York: John Wiley & sons, 1999.
- [14] Gilmore Gordon and John D. Hemingway. Practical Gamma-Ray Spectrometry. Chichester: John Wiley & sons, 1995.
- [15] จรัญ พรหมสุวรรณ. ปฏิกิริยานิวเคลียร์เชิงทฤษฎี. พิษณุโลก : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2540.
- [16] อังรอง เมธาศิริ. ฟิสิกส์แผนใหม่: ความรู้พื้นฐานสำหรับนักฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเฉลิมพงษ์ โพธิ์ดี เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2522 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย