

การพัฒนาเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้  
โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สเกตเทอร์ริง



นายศิโรจน์ พัคฆวงษ์

ศูนย์วิทยพัทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3527-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MOBILE UNIT FOR INSPECTION OF MATERIALS USING  
DIFFERENTIAL GAMMA - RAY SCATTERING TECHNIQUE



Mr.Siroj Payarkawong

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

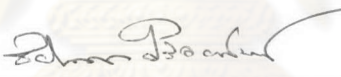
ISBN 974-17-3527-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริง
โดย	นายศิโรจน์ พัคฆวงษ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

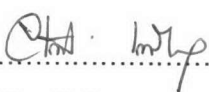
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุบลัมภ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์เจตต์ เจ็นใจ)

ศิโรจน์ พยัคฆวงษ์ : การพัฒนาเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิค  
ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง. (DEVELOPMENT OF A MOBILE UNIT FOR  
INSPECTION OF MATERIALS USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY  
SCATTERING TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม :  
ผศ.อรรถพร ภัทรสุมันต์, 99 หน้า. ISBN 974-17-3527-8.

เครื่องต้นแบบที่ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงได้ถูกออกแบบและ  
สร้างขึ้นสำหรับการตรวจสอบโดยไม่ทำลายสำหรับวัสดุที่ผิวหน้าขนาดใหญ่และเป็นระนาบ  
เครื่องตรวจสอบประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม - 137 ความแรง 5.5  
มิลลิวูท และหัววัดรังสีบิสแมสเจอร์มาเนตขนาด 5 ซม. X 5 ซม. อยู่บนโครงเหล็กกล้าขนาด 50 ซม.  
X 80 ซม. และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมกลไกการขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีและหัววัดให้  
เคลื่อนที่ไปตามทิศทางและความเร็วที่ต้องการ ลำรังสีแกมมาจะถูกบังคับด้วยตะกั่วกำบังรังสีที่มี  
ความหนา 5 ซม. และทำให้ลำรังสีออกมามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ตกกระทบกับผิวหน้า  
ชิ้นงานเป็นมุมฉาก หัววัดจะถูกหุ้มด้วยตะกั่วกำบังรังสีและวางท่ามุม 45 องศากับลำรังสีแกมมา

ได้ทดสอบเครื่องตรวจสอบวัสดุที่พัฒนาขึ้นโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์  
สแกตเทอริงกับคอนกรีตขนาด 40 ซม. x 20 ซม. X 10 ซม. ที่มีขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้น  
แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าผลรวมของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดและ  
ตำแหน่งของเหล็กเส้น เมื่อทดสอบกับคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นคอนกรีตพบว่าผลรวมของ  
ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมก็ไวต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วยซึ่งทำให้รบกวนค่าที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม  
สามารถสรุปได้ว่า เครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมา  
เรย์สแกตเทอริงที่พัฒนาขึ้นไวต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในชิ้นงานที่ทดสอบและสามารถประยุกต์  
ใช้กับการตรวจสอบวัสดุในกรณีเฉพาะได้

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....<sup>ศิโรจน์</sup> พยัคฆวงษ์.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....<sup>นเรศร์ จันทน์ขาว</sup>.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....<sup>อรรถพร ภัทรสุมันต์</sup>.....



##4370520921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: GAMMA-RAY SCATTERING / BGO DETECTOR / CONCRETE INSPECTION

SIROJ PAYARKAWONG : DEVELOPMENT OF A MOBILE UNIT FOR  
INSPECTION OF MATERIALS USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY  
SCATTERING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.NARES  
CHANKOW , THESIS COADVISOR : ASST.PROF. ATTAPORN  
PATTARASUMUNT, 99 PP. ISBN 974-17-3527-8.

A prototype unit using the Differential Gamma-Ray Scattering Technique (DGST) was designed and constructed to be used for nondestructive inspection of materials having large flat surface. The unit consisted of a 5.5 mCi (203 MBq)  $^{137}\text{Cs}$  gamma-ray source and a 5 cm x 5 cm BGO detector mounted on a 50 cm x 80 cm steel frame with microcomputer controlled driven mechanism to move the source and the detector over the specimen surface at a desired speed and direction. The gamma-ray beam was collimated by a 5 cm thick lead collimator with 8 mm  $\phi$  opening allowing the gamma-ray beam to reach the specimen surface at right angle. The detector was side shielded with lead and positioned at  $45^\circ$  relative to the gamma-ray beam.

The DGST unit was tested with 40 cm x 20 cm x 10 cm concrete mortars containing steel rebars of different sizes and positions. It was found that the integral of the differential spectrum changed corresponding to the size and position of the rebars. When the DGST unit was tested with reinforced concrete slab and floor, it was found that the integral of the differential spectrum was also sensitive to other components particularly aggregates which interfered the readings. However, it could be concluded that the developed DGST unit was very sensitive to changes in the test specimens and could be used for inspection of materials in specific cases.

Department Nuclear Technology

Student's signature..... *Siroj Payarkawong*.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature..... *Nares Chankow*.....

Academic year 2003

Co-advisor's signature..... *Attaporn Pattarasumunt*.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์เจ้เจ็จ เย็นใจ ที่เป็นผู้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และได้กรุณาตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์โดยตลอด รวมทั้งขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาชีวเคมีสรีรวิทยาและเทคโนโลยี

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุณพานิช ที่ได้ให้คำแนะนำในส่วนอิเล็กทรอนิกส์ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี ที่ช่วยดูแลระบบวัดนิวเคลียร์ รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้องทุกท่าน ในภาควิชาชีวเคมีสรีรวิทยาและเทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือคอนกรีตตัวอย่างในการทดสอบ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณย่า และคุณอา และขอขอบคุณน้องฟิล์ม และ ยั้ง ที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และส่งเสริมด้านการศึกษาด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. รังสีแกมมาและเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริง.....	5
2.1 รังสีแกมมา.....	5
2.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา.....	6
2.3 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา.....	7
2.4 สัมประสิทธิ์การลดทอน.....	19
2.5 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริง.....	23
3. การพัฒนาเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริง.....	29
3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริง.....	29
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยใช้เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเทอริง.....	30



4. การทดสอบเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	44
4.1 ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อขนาดของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กแตกต่างกัน.....	49
4.2 ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อตำแหน่งของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กแตกต่างกัน.....	54
4.3 ศึกษาดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อระยะห่างของตำแหน่ง ของเหล็กเส้นในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กต่างกัน.....	64
4.4 ทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง.....	74
4.5 ทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงของพื้นที่คอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณถนนข้างภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	80
4.6 ทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงตรงแนวท่อน้ำทิ้ง ใต้พื้นที่คอนกรีตบริเวณทางเดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี.....	82
5. สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	87
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9, 1.2, 0.6 และ 0.4 ซม. ที่อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2 ซม.....	51
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นกับพื้นที่ใต้พีค ความสูงของพีค และ ความกว้างของพีค ที่ความลึก 2.0 ซม.....	53
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 1.0, 1.4, 2.0 และ 2.6 ซม. ตามลำดับ.....	56
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความลึกของเหล็กเส้นกับพื้นที่ใต้พีค ความสูงของพีค และความกว้างของพีค ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม.....	58
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. อยู่ลึก 0.5, 1.1, 1.5, 2.2 และ 2.5 ซม. ตามลำดับ.....	61
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความลึกของเหล็กเส้นกับพื้นที่ใต้พีค ความสูงของพีค และความกว้างของพีค ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม.....	63
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 7.0, 14.0, 20.5 และ 26.5 ซม. ตามลำดับ.....	66
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่าง ๆ กันของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. กับพื้นที่ใต้พีค ความสูงของพีค และความกว้างของพีค ที่ความลึก 2.0 ซม. (ชั้นที่ 1).....	68
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 7.0, 12.5, 17.5, 21.5 และ 25.5 ซม. ตามลำดับ.....	69
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่าง ๆ กันของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. กับพื้นที่ใต้พีค ความสูงของพีค และความกว้างของพีค ที่ความลึก 2.0 ซม. (ชั้นที่ 2).....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 5.0, 11.0, 16.0, 20.5, 23.5 และ 25.5 ซม.ตามลำดับ.....	72
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่างๆกันของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม.กับพื้นที่ใต้พิก ความสูงของพิก และความกว้างของพิก ที่ความลึก 2.0 ซม.....	74
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง (แนวที่1).....	75
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง (แนวที่2).....	78
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถนนหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาเทคโนโลยี.....	81
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงตรงแนวท่อน้ำทิ้งใต้พื้นคอนกรีตบริเวณทางเดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี.....	83

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	6
2.2	8
2.3	9
2.4	10
2.5	11
2.6	14
2.7	15
2.8	17
2.9	18
2.10	19
2.11	19
2.12	21
2.13	22
2.14	24
2.15	27
2.16	28



## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แผนภาพแสดงเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้โดยใช้เทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	30
3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิด Na(Tl) และ BGO ขนาด 38 มม. X 38 มม.....	32
3.3 แผนภาพของระบบวัดรังสี.....	33
3.4 ภาพถ่ายระบบขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี.....	33
3.5 วงจรขับสแต็ปมอเตอร์.....	34
3.6 วงจรตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้าย.....	35
3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า.....	35
3.8 แผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ.....	36
3.9 ความหมายของบิตต่าง ๆ ในรหัสควบคุม.....	37
3.10 ผังการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์กับระบบขับเคลื่อน ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี.....	38
3.11 ลักษณะการกระตุ้นแบบ 2 เฟส.....	38
3.12 ผังการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์กับ ระบบวัดรังสี.....	39
3.13 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลา.....	40
3.14 แผนภาพเวลาของสัญญาณจากอุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลา.....	40
3.15 แสดงเมนูหลักทางหน้าจอไมโครคอมพิวเตอร์.....	41
3.16 ผังการทำงานของเครื่องตรวจสอบวัสดุแบบเคลื่อนย้ายได้ โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง.....	42
4.1 การตกกระทบและการกระเจิงของรังสีแกมมากรณีต่าง ๆ กันที่ทำให้ เกิดดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมต่างกัน.....	45
4.2 ตัวอย่างแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมของพื้นคอนกรีตเสริมมอร์ตาร์หลัก ขนาด 1.9 ซม. ที่ตำแหน่งความลึก 2.0 ซม.....	47
4.3 ตัวอย่างแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมของพื้นคอนกรีตมอร์ตาร์ (ไม่มีเหล็กเส้น).....	47



## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมระหว่าง พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กกับพื้นคอนกรีตมอร์ตาร์ (ไม่มีเหล็กเส้นเส้น).....	48
4.5 พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9, 1.2, 0.6, 0.4 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.0 ซม. เท่ากัน.....	49
4.6 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมของเหล็กเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 และ 1.2 ซม. ที่ความลึก 2.0 ซม. เท่ากัน.....	50
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล เกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9, 1.2, 0.6, 0.4 ซม. อยู่ลึกจากผิวคอนกรีต 2.0 ซม. ....	52
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้พิกัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นใน พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์ที่ความลึก 2.0 ซม. ....	53
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพิกัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นใน พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์ที่ความลึก 2.0 ซม. ....	54
4.10 ตัวอย่างดิฟเฟอเรนเชียลเกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกตรัมของเหล็กเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่ความลึก 1.0 และ 2.0 ซม. ....	55
4.11 พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่ความลึก 1.0, 1.4, 2.0 และ 2.6 ซม. ....	56
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล เกมมาเรย์สแกตเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 1.0, 1.4, 2.0 และ 2.6 ซม. ตามลำดับ.....	58
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้พิกัดกับความลึกของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ....	59
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพิกัดกับความลึกของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ....	59
4.15 พื้นคอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. ที่ความลึก 0.5, 1.1, 1.5, 2.2 และ 2.6 ซม. ....	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกดเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาด 1.2 ซม. อยู่ลึก 0.5, 1.1, 1.5, 2.2 และ 2.5 ซม. ตามลำดับ.....	62
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคกับความลึกของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม.....	63
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของพีคกับความลึกของเหล็กเส้น ในพื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์ของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม.....	64
4.19 พื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่ความลึก 2 ซม. ที่ระยะห่างแตกต่างกัน (ขั้นที่1).....	65
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกดเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 7.0, 14.0, 20.5 และ 26.5 ซม.ตามลำดับ.....	67
4.21 พื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. ที่ความลึก 2 ซม. ที่ระยะห่างแตกต่างกัน (ขั้นที่2).....	68
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกดเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 7.0, 12.5, 17.5, 21.5 และ 25.5 ซม. ตามลำดับ.....	70
4.23 พื้นที่คอนกรีตมอร์ตาร์เสริมเหล็กที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. ที่ความลึก 2 ซม. ที่ระยะห่างแตกต่างกัน.....	71
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าดิฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกดเทอริงเมื่อเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ซม. อยู่ลึก 2.0 ซม. ที่ตำแหน่ง 5.0, 11.0, 16.0, 20.5, 23.5 และ 25.5 ซม. ตามลำดับ.....	73
4.25 คอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง.....	75
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกดเทอริงของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง.....	77
4.27 ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง (แนวที่ 1) .....	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงของคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง (แนวที่ 2).....	79
4.29 ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ ของคอนกรีตตัวอย่าง(แนวที่ 2).....	80
4.30 ภาพถ่ายถนนก่อนทำการเทปูน.....	80
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถนนข้างภาควิชาวิศวกรรมโยธาเทคโนโลยี .....	82
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแนวรังสีตกกระทบกับผลรวมค่าแกมมาเรย์ สแกตเทอริงตรงแนวท่อน้ำทิ้งใต้พื้นคอนกรีตบริเวณทางเดินหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี .....	84


  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย