

การตรวจสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



นายบัณฑิต ลีสุวรรณนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0976-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY THE COMPUTED
TOMOGRAPHY TECHNIQUE



Mr. Bandit Leelakkaranon

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2001

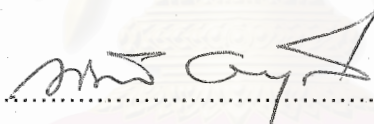
ISBN 974-03-0976-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิค
	การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
โดย	นายบัณฑิต ลีลครานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



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

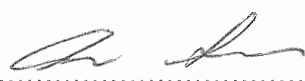
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

บัณฑิต ลีลัครานนท์ : การตรวจสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เทคนิคการคำนวณ
สร้างภาพโทโมกราฟี (INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
BY THE COMPUTED TOMOGRAPHY TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชัชชาติ
สิทธิพันธุ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.สมยศ ศรีสถิตย์, 75 หน้า. ISBN 974-03-0976-3.

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ระบบสแกนสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ในการตรวจสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่ทำลาย ระบบสแกนสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ความแรง 30 มิลลิคูรี และหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม) ขนาด 2 x 2 นิ้ว ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. ที่มีขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมต่างกัน ทำการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ของเสาคอนกรีตเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยสแกนทุก ๆ 2 มม. ด้วยอัตราเร็ว 2 มม.ต่อ 3 วินาที และใช้มุมระหว่างโพรไฟล์ เท่ากับ 2.5 องศา ซึ่งได้ข้อมูลโพรไฟล์รวม 72 โพรไฟล์ และใช้เวลาในการสแกนประมาณ 8 ชั่วโมง ข้อมูลโพรไฟล์ถูกนำไปผ่านกระบวนการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ทำให้สามารถเห็นขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังได้ใช้ระบบสแกนสำหรับการสร้างภาพโทโมกราฟีตรวจสอบคอนกรีตขนาด 15 x 15 ซม. ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัย 350, 500 และ 570 กก./ซม.² ภายหลังจากถูกไฟไหม้ โดยนำไปเผาไฟโดยใช้อุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM E-119 เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน คือ 15, 30 และ 60 นาที ผลการวิจัยพบว่าความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านคอนกรีตก่อนและหลังถูกไฟไหม้มีค่าต่างกัน และอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการประเมินสภาพของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2544

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

4170383021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : REINFORCED CONCRETE COLUMNS / COMPUTED TOMOGRAPHY

BANDIT LEELAKKARANON : INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY THE COMPUTED TOMOGRAPHY TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHADCHART SITTIPUNT, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. SOMYOT SRISATIT, 75 PP. ISBN 974-03-0976-3.

This research, a mobile computed tomography (CT) scanning system was applied for nondestructive inspection of reinforced concrete columns. The CT scanning system consisted of a 30 mCi ¹³⁷Cs source and a 2 x 2 in. NaI(Tl) detector. The 15 x 15 cm. reinforced concrete columns with having reinforced bars of different sizes at different positions were scanned to obtain the transmitted gamma-ray data profiles. Each column was scanned every 2 mm at a speed of 2 mm/ 3 seconds with an increment of 2.5 degrees to make 72 data profiles. The total scanning time for each column was approximately 8 hours. The data profiles were then processed and reconstructed into a CT image using a previously developed software. The sizes and positions of the reinforced bars were satisfactorily identified.

Moreover, the CT scanning system was used to inspect 15 x 15 x 15 cm. concrete specimens subjected to fire. The test specimens with varying ultimate compressive strength of 350, 500 and 570 ksc. were exposed to fire for 15, 30 and 60 minutes based on the ASTM standard E-119, then scanned with the CT scanning system. The results indicated that the transmitted gamma-ray intensities from the concrete specimen before and after fire were different. And this could lead to possible evaluation method for properties of concrete that have been subjected to fire.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2001	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว ซึ่งได้ให้แนวความคิดริเริ่มในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยชี้แนะแนวทางให้งานวิจัยนี้สำเร็จเป็นผลงานได้อย่างดี

ขอบคุณ พี่บัญชา อุนพานิช ที่คอยช่วยเหลือและจัดทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนและอนุญาตให้ใช้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย
ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา และนิสิตภาควิชา
วิศวกรรมเทคโนโลยีทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ผู้ซึ่งให้ความรัก ความเมตตา และคอยเป็นห่วงเป็นใยข้าพเจ้ามาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ และทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงอย่างที่ตั้งใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 หลักการของการสร้างภาพโทโมกราฟี.....	5
2.1.1 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ (Discrete beam).....	6
2.1.2 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (Fan beam).....	7
2.1.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (Cone beam).....	8
2.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	8
2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (Linear Attenuation Coefficient of Gamma-ray).....	9
2.2.2 นิยามของเรย์ซัม (Ray-Sum).....	10
2.2.3 แบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection).....	12
2.2.4 Filter Backprojection Method (FBP).....	14
2.3 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Quality of Computed Tomography Image).....	18
2.3.1 Pixel Noise.....	18
2.3.2 Probability Distribution Function (PDF).....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 Point Spread Function (PSF)	21
2.3.4 Modulation Transfer Function (MTF)	21
2.3.4 Edge Spread Function (ESF).....	24
บทที่ 3 ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	25
3.2 ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา	25
3.3 ระบบวัดรังสีแกมมา	27
3.3.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี	28
3.3.2 อุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี.....	29
3.3.3 ฐานหลอดและภาคขยายส่วนหน้า.....	30
3.3.4 แหล่งจ่ายคิกตาไฟฟ้าสูง	30
3.3.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว.....	30
3.4 ระบบขับเคลื่อน.....	31
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	
4.1 การทดสอบหาเวลาวัดที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	32
4.2 การทดสอบหาจำนวนข้อมูลไบโพรไฟล์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณ สร้างภาพโทโมกราฟี.....	33
4.3 การทดสอบหาระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณ สร้างภาพโทโมกราฟี.....	41
4.4 การทดสอบการแจกแจงรายละเอียดของภาพโทโมกราฟี.....	44
4.4.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	44
4.4.2 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ	48
4.5 การทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	51
4.6 การทดสอบหาค่ารีโซลูชันของระบบสแกน.....	54
4.7 ทดสอบหาขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	55
4.8 การตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังจากถูกไฟไหม้	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง	66
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การกัดกร่อน (Corrosion)	68
ภาคผนวก ข การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริม	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้ที่เวลาต่าง ๆ.....	32
4.2 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ.....	34
4.3 ผลการทดสอบหาค่า Pixel noise และค่า SNR ของชิ้นงานทดสอบ A.....	35
4.4 ค่าความเบี่ยงต่างของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ.....	39
4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ.....	42
4.6 ค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ.....	43
4.7 รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ.....	45
4.8 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L.....	48
4.9 ผลการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	52
4.10 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเหล็กเสริมที่ปริมาณการกักกรองนต่าง ๆ.....	55
4.11 ผลการทดสอบหาปริมาณการกักกรองนของเหล็กเสริมที่ได้จากภาพโทโมกราฟี.....	56
4.12 ผลการทดสอบคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยต่าง ๆ กัน ภายหลังถูกไฟไหม้.....	58
4.13 ผลการทดสอบคอนกรีตที่มี agg./paste ratio ต่าง ๆ กัน ภายหลังถูกไฟไหม้.....	59

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีลำแคบตัดผ่านวัตถุในระนาบของวัตถุที่มุม θ ใด ๆ หัววัดจะบันทึกข้อมูลไว้ 1 โพรไฟล์	5
2.2 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ	7
2.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด	7
2.4 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย	8
2.5 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลาง 3 แบบ	9
2.6 แสดงเรขาคณิตของรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านระนาบของตัวกลางชิ้นบาง ๆ	11
2.7 การสร้างภาพด้วยวิธีการแบ็กโพรเจกชัน	13
2.8 ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน	14
2.9 ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน	14
2.10 ตัวอย่างการหาค่า PDF	20
2.11 Point Spread Function	21
2.12 ภาพของ slit และตัวอย่างโปรไฟล์ของ slit	22
2.13 ข้อมูลโพรไฟล์ความถี่ของ slit	23
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่	23
2.15 ตัวอย่างข้อมูลโพรไฟล์สำหรับการคำนวณหาค่า Resolution ด้วยวิธี ESF	24
3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา	26
3.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาบรรจุในอุปกรณ์กำบังรังสี	28
3.3 หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (ทัลเลียม)	28
3.4 อุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี สำหรับต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี	29
3.5 ระบบวัดรังสีแกมมา	30
3.6 ระบบขับเคลื่อนเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี	31
4.1 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้ที่เวลาต่าง ๆ	33
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลโพรไฟล์กับค่า Pixel noise	36
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลโพรไฟล์กับค่า SNR	36
4.4(ก) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 9 โพรไฟล์	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4(ข) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 18 โพรไฟล์	37
4.4(ค) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 36 โพรไฟล์	38
4.4(ง) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 72 โพรไฟล์	38
4.4(จ) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ	39
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลโพรไฟล์กับค่าความเบี่ยงต่าง	40
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพกับค่า Resolution	44
4.7 ข้อมูลโพรไฟล์สำหรับการหาค่า Resolution ด้วยวิธี ESF	54
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต กับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0)	58
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาไฟกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0) สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยต่าง ๆ กัน	59
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง agg./paste ratio กับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0)	60
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาไฟกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0) สำหรับคอนกรีตที่มีค่า agg./paste ratio ต่าง ๆ กัน	60
ก.1 เซลเคมีไฟฟ้า หรือเซลล์วานิก	69
ข.1 โปรแกรมสำหรับใช้คำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต	72
ข.2 หน้าต่างสำหรับแสดงภาพโทโมกราฟี	73
ข.3 หน้าต่างสำหรับแสดงข้อมูลโพรไฟล์	74
ข.4 หน้าต่างแท็บ Position สำหรับการคำนวณหาขนาดและตำแหน่ง	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการตรวจสอบแบบไม่ทำลายมีบทบาทสำคัญอย่างมากในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบและประเมินสภาพความบกพร่องของชิ้นงานในขั้นตอนกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ให้มีคุณภาพดีอยู่เสมอ

สำหรับงานทางด้านการก่อสร้าง การตรวจสอบแบบไม่ทำลายก็มีความสำคัญเช่นกันในการที่จะตรวจสอบสภาพและประเมินกำลังรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นว่ามีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่ เพื่อที่จะได้ทำการซ่อมแซมสิ่งก่อสร้างนั้นให้สามารถกลับมาใช้งานได้ดีและมีความปลอดภัย วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic Technique) การใช้ความเร็วคลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity) เป็นต้น แต่ละวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดในการตรวจสอบต่างกัน เช่น การใช้ความเร็วคลื่นอุลตราโซนิกในการตรวจสอบคอนกรีตนั้น คลื่นเสียงจะมีการกระเจิงในคอนกรีตสูงมากเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ทำให้การตรวจสอบและประเมินผลต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญ

จากที่กล่าวมาในข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดในการนำเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี (Computed Tomography Technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้แพร่หลายในทางการแพทย์ เพราะสามารถสร้างภาพตัดขวางของอวัยวะของมนุษย์ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวินิจฉัยโรคใช้ในการตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย มีดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

1.2.2 เพื่อตรวจสอบสภาพการกักร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัย มีดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาที่ใช้เป็นระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ
- 1.3.2 ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137(Cs-137) และหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) [NaI(Tl)] ขนาด 2 x 2 นิ้ว
- 1.3.3 หาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 1.3.4 ตรวจสอบสภาพการกักร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 1.3.5 ตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.4.3 ทำการออกแบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและกำหนดรายละเอียดในการทดสอบ
- 1.4.4 จัดทำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.4.5 ทดสอบระบบสแกนเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.4.6 หาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 1.4.7 ทดสอบหาขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมในตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการกักร่อนด้วยเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.4.8 เปรียบเทียบขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมที่เกิดการกักร่อนที่คำนวณได้จากภาพโทโมกราฟีและที่ได้จากการวัดด้วยเวอร์เนีย
- 1.4.9 ตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้
- 1.4.10 สรุปผลการวิจัย และเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับสำหรับการวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

1.5.1 สามารถตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ด้วยเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

1.5.3 เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินสภาพของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้ได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

Skoulikidis, Th., Marinakis, D., and Batis, G.^[1] (1986) ศึกษาการเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากสนิมในเหล็กเสริม โดยใช้เครื่องมือ X-ray radiographic และตรวจวัดการแพร่กระจายของ Fe^{2+} ของเหล็ก โดยใช้วิธี electron probe micro-analysis (EPMA) พบว่าคอนกรีตภายใต้ภาวะแวดล้อมด้วยสารละลาย NaCl 3.5% และความต่างศักย์ 850 มิลลิโวลต์ เพื่อจำลองการเกิดการกัดกร่อน เกิดการแตกร้าวหลังจาก 27 วันของการทดสอบ

มงคล วรรณประภา^[2] (2536) พัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซีเซียม-137 (Cs-137) และหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (ทัลเลียม) ขนาด 2 x 2 นิ้ว ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาที่สร้างขึ้นเป็นระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ การทำงานต่าง ๆ ของระบบสแกนถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สุพร กุลวัฒน์ชัย^[3] (2540) พัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา อิริเดียม-192 ความแรง 37,000 เมกกะเบคเคอเรล และหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (ทัลเลียม) ขนาด 2 x 2 นิ้ว ทำการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 317, 468 และ 613 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าภาพโทโมกราฟีโดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงความเปรียบต่างได้ดีที่สุด โดยเฉพาะกับวัตถุที่มีค่าความหนาแน่นต่ำ เช่น อลูมิเนียม และ

พลาสติก เป็นต้น ส่วนค่าเรโซลูชัน (Resolution) ของภาพโทโมกราฟีโดยรังสีแกมมาทุกพลังงานมีค่าประมาณ 4 มิลลิเมตร

ประสิทธิ์ สิริทิพย์รัศมี^[4] (2544) พัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์ ผลการทดสอบพบว่าคุณภาพของภาพโทโมกราฟีดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มจำนวนเฟรมที่นำมาเฉลี่ย ค่า Pixel noise ที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 เมื่อใช้จำนวนชุดข้อมูลถึง 100 เฟรม อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนเฟรมที่นำมาเฉลี่ยมากกว่า 100 เฟรม ค่า Pixel noise มีความแตกต่างกันน้อยมาก และค่าเรโซลูชันของภาพโทโมกราฟีมีค่าประมาณ 125 ไมครอน



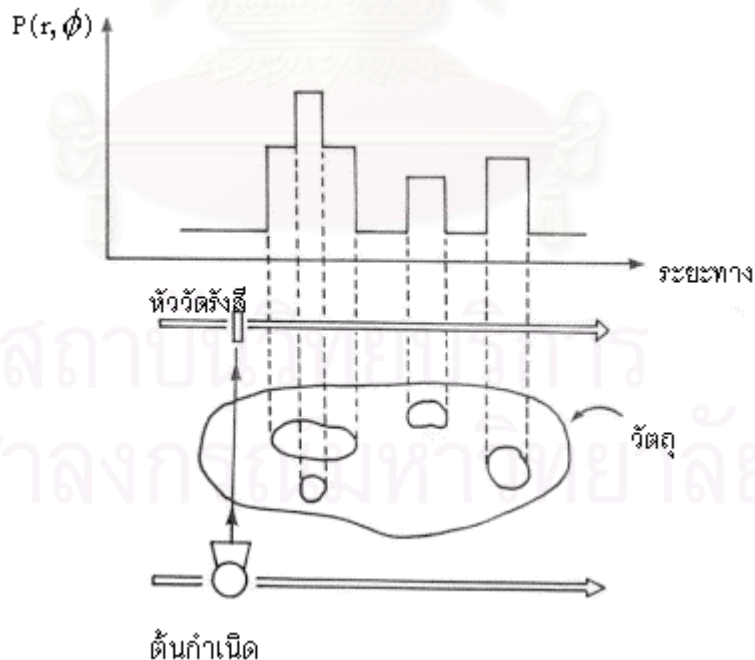
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการของการสร้างภาพโทโมกราฟี

ภาพโทโมกราฟี คือ ภาพสองมิติที่แสดงภาพตัดขวางของวัตถุ ที่จุดภาพแต่ละจุดแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นจะอาศัยหลักการทะลุผ่านของรังสีต่อวัตถุ โดยการสแกนเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรังสีซึ่งติดอยู่ด้านตรงข้ามกับต้นกำเนิดรังสีซึ่งมีวัตถุอยู่ระหว่างกลาง เมื่อระนาบของการหมุน ๆ เปลี่ยนมุมไปด้วยมุมน้อย ๆ แล้วเคลื่อนอุปกรณ์รับรังสีในแนวเส้นตรง ทำการสแกนรับความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุออกมาที่ละจุด เรียกค่าความเข้มรังสีนี้ว่า “เรย์ซัม (ray-sum)” โดยเมื่อสแกนเก็บค่าเรย์ซัมหลาย ๆ จุดต่อการหมุนแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลความเข้มรังสีในแนวสแกนหนึ่งชุด เรียกว่า “ข้อมูลโพรไฟล์ (profile data)” หรือ “ข้อมูลโพรเจกชัน (projection data)” สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.1



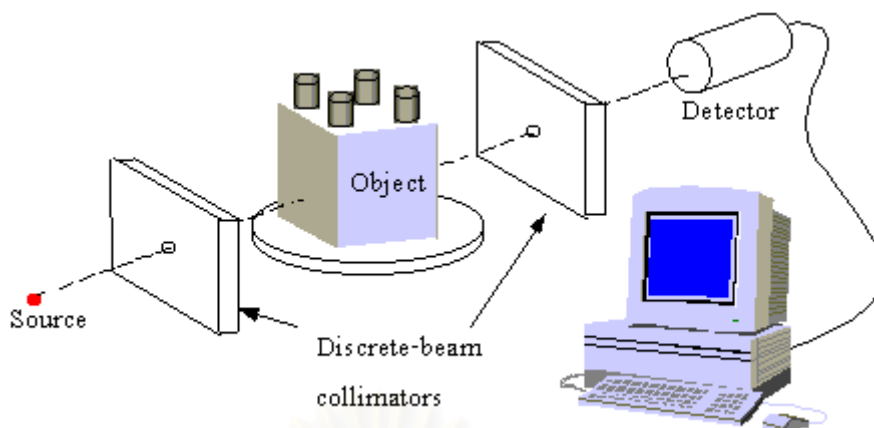
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีลำแคบตัดผ่านวัตถุในระนาบของวัตถุที่มุม ϕ ใด ๆ หัววัดจะบันทึกข้อมูลไว้ 1 โพรไฟล์

จากรูปที่ 2.1 แสดงการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ของชิ้นงานตัวอย่างที่มีมุม ϕ ใด ๆ จะได้ข้อมูลโพรไฟล์ 1 โพรไฟล์ จากนั้นหมุนระบบสแกนด้วยมุมน้อย ๆ และทำการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ต่อไปจนครบ 180 องศา นำข้อมูลโพรไฟล์ทั้งหมดที่ได้มาคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยวิธีการแบ็กโพรเจกชัน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป สามารถแบ่งระบบสแกนเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่

2.1.1 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ (Discrete beam)

เป็นระบบสแกนที่ใช้ลำรังสีแบบแคบหนึ่งลำตัดผ่านระนาบในแนวราบของชิ้นงานตัวอย่าง โดยมีหัววัดรังสี 1 หัววัดที่วางอยู่ตรงกันข้ามกับต้นกำเนิดรังสีสำหรับใช้วัดปริมาณความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างออกมา และนำข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้ไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลักการทำงานของระบบสแกนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ กล่าวคือ แบบแรกระบบจะขับเคลื่อนให้ชิ้นงานตัวอย่างเคลื่อนที่ตัดผ่านลำรังสีในแนวเส้นตรง (translation) ทีละสเต็ป (step) แล้วระบบวัดรังสีจะทำการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีไปที่ละสเต็ป หรือเรียกว่า “การสแกน” เมื่อสิ้นสุดการสแกนในแต่ละการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงจะได้ข้อมูลที่เรียกว่า “โพรไฟล์ (profile)” หรือ “โพรเจกชัน (projection)” จากนั้นระบบจะทำการหมุน (rotate) ชิ้นงานตัวอย่างให้เคลื่อนที่ไปที่ละสเต็ปแองเกิล (step angle) แล้วจึงเริ่มทำการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ใหม่ต่อไป จนได้ข้อมูลโพรไฟล์ที่มีมุมต่าง ๆ อย่างน้อยครบ 180 องศา ส่วนแบบที่สองจะมามีการทำงานในลักษณะเดียวกันกับแบบแรก โดยต่างกันที่ชิ้นงานตัวอย่างจะอยู่กับที่ แต่ระบบจะทำการขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงและการหมุน ซึ่งจะดีกว่าแบบแรกตรงที่สามารถใช้กับชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น เสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคาร เป็นต้น

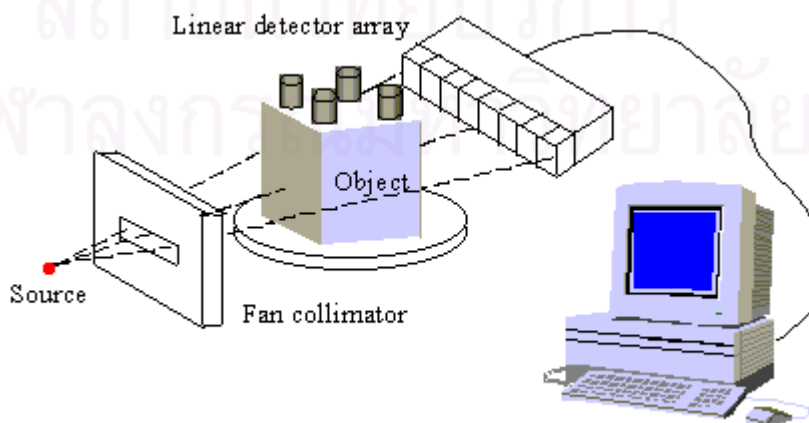
ด้วยเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบสแกนที่ทำงานในลักษณะนี้ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการนำระบบสแกนไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้โดยไม่มีข้อจำกัดในด้านน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง แต่มีเพียงข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้



รูปที่ 2.2 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ

2.1.2 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (Fan beam)

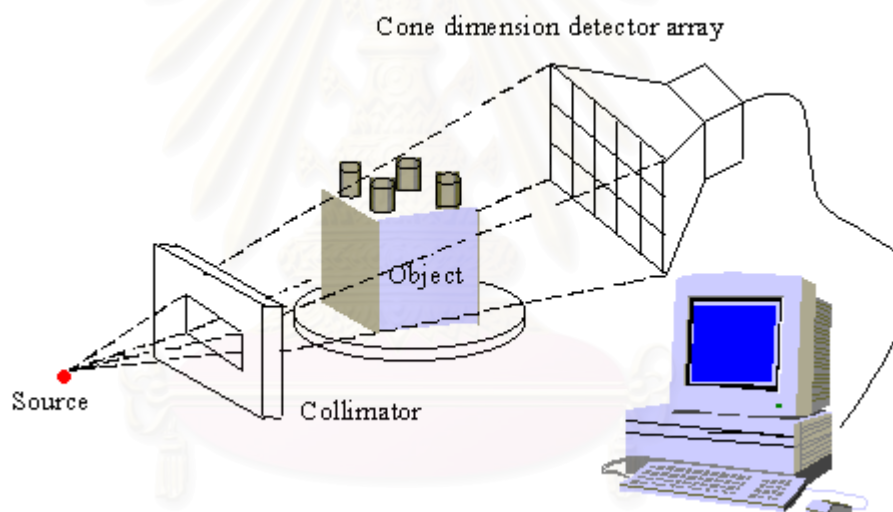
เป็นระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นจากระบบสแกนรังสีแบบรังสีลำแคบที่ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนาน เนื่องจากต้องทำการสแกนทุก ๆ จุดตลอดทั้งโฟรไฟล์ โดยระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัดนี้จะใช้หัววัดรังสีแบบ linear detector array ทำหน้าที่วัดปริมาณความเข้มรังสีของลำรังสีรูปพัดที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างออกมาเข้าสู่หัววัดรังสี หลักการทำงานของระบบสแกนนี้จะคล้ายกับระบบสแกนแบบแรก แต่ต่างกันที่ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด เมื่อระบบหมุนไปแต่ละครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโฟรไฟล์ได้โดยไม่ต้องสแกนเพราะสามารถเก็บข้อมูลทั้งโฟรไฟล์ได้เลย เป็นผลให้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยกว่าระบบสแกนแบบรังสีลำแคบมาก และยังสามารถตัดระบบขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงทิ้งไปได้ คงเหลือเพียงการขับเคลื่อนแบบหมุนอย่างเดียว ในการออกแบบสามารถเลือกให้ระบบทำการหมุนชิ้นงานตัวอย่าง หรือหมุนต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกันก็ได้



รูปที่ 2.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด

2.1.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (Cone beam)

ระบบสแกนนี้พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถแสดงรายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่างได้สองระนาบ คือ ระนาบในแนวนอนและระนาบในแนวตั้ง โดยออกแบบให้ลำรังสีเป็นแบบรูปกรวย และใช้หัววัดรังสีแบบ cone dimension detector array ซึ่งประกอบด้วยหัววัดรังสีแบบ linear detector array มากกว่า 1 แถวเรียงซ้อนกัน หรืออาจใช้แผ่นเรืองรังสีรับรังสีแล้วใช้กล้องโทรทัศน์จับภาพการเรืองแสง จึงอาจเรียกระบบนี้ว่า “ระบบโทรทัศน์ (television system)” ระบบสแกนแบบนี้จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์น้อยกว่าทั้งสองระบบดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากเมื่อระบบสแกนหมุนหนึ่งครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโพรไฟล์ของชิ้นงานตัวอย่างทุก ๆ ระนาบได้โดยไม่ต้องทำการขับเคลื่อนในแนวตั้ง แต่ขั้นตอนการเก็บข้อมูลโพรไฟล์นั้นต้องใช้เทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างสูง จึงจะได้ข้อมูลที่ให้ความละเอียดและชัดเจน



รูปที่ 2.4 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย

2.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

เนื่องจากทฤษฎีการสร้างภาพที่จะกล่าวต่อไปนี้เกี่ยวข้องกับภาระจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา ดังนั้นจะกล่าวถึงเทอมสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาเป็นการเริ่มต้น

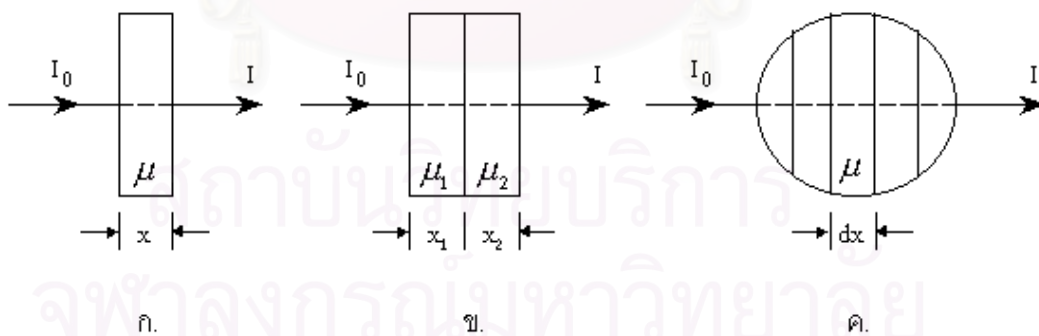
2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (Linear Attenuation Coefficient of Gamma-ray)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เมื่อเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางใดก็ตามจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางนั้น เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) หรือปรากฏการณ์แพร์โพรดักชัน (Pair production) เป็นต้น ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มีผลทำให้รังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้น ๆ ออกมาแล้วมีความเข้มลดลง

สมมติตัวกลางหรือวัตถุที่ประกอบด้วยเนื้อเดียวกันตลอด มีความหนา x หารังสีแกมมาที่มีความเข้ม I_0 ผ่านเข้าไปในตัวกลางนี้ เมื่อรังสีแกมมาทะลุออกมาปรากฏว่ามีความเข้มลดลงเป็น I ดังรูปที่ 2.5(ก) ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานเดียว กรณีนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_0 , I และ x ได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

เมื่อ	I	คือ	ความเข้มรังสีหลังทะลุผ่านตัวกลาง
	I_0	คือ	ความเข้มรังสีก่อนทะลุผ่านตัวกลาง
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวกลาง
	x	คือ	ความหนาของตัวกลาง



รูปที่ 2.5 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลาง 3 แบบ

- ตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกันตลอด
- ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกัน 2 ชนิด
- ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันหลายชนิด

จากสมการ (2.1) จะเห็นว่ารังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลางออกมาแล้วจะมีความเข้มลดลงโดยขึ้นกับความหนาและคุณสมบัติของตัวกลางนั้น ซึ่งแสดงการลดลงในเทอมของ $e^{-\mu x}$ กรณีที่ตัวกลางประกอบด้วยสารสองชนิดหนา x_1 และ x_2 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาของตัวกลางทั้งสองเป็น μ_1 และ μ_2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5(ข) จะได้

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)} \quad (2.2)$$

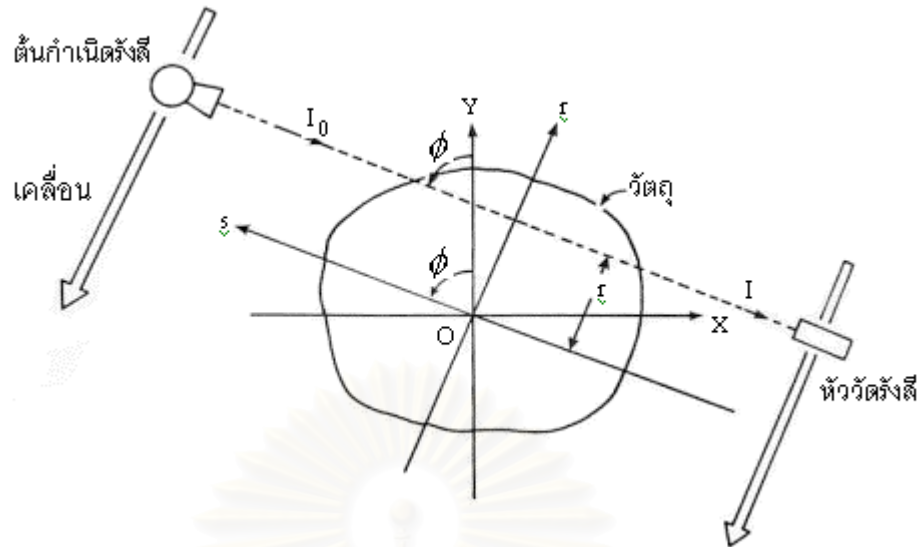
เมื่อ μ_1, μ_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 x_1, x_2 คือ ความหนาของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

กรณีที่ตัวกลางประกอบด้วยสารหลายชนิด ในการคิดการดูดกลืนรังสีแกมมาจำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นแถบเล็ก ๆ ขนาดความหนา dx เท่ากันจำนวนมากดังรูปที่ 2.5(ค) ความหนาของแถบเล็ก ๆ นั้นเล็กจนกระทั่งสามารถคิดได้ว่าในแถบเล็ก ๆ นั้นประกอบด้วยสารเนื้อเดียวกันตลอด กรณีนี้ความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \quad (2.3)$$

2.2.2 นิยามของเรย์ซัม (Ray-Sum)

สมการ (2.3) เป็นสมการที่อธิบายความเข้มรังสีแกมมาที่ผ่านตัวกลางซึ่งประกอบด้วยสารหลายชนิด ในสมการ (2.2) เทอมที่แสดงการลดลงของรังสีแกมมาเปลี่ยนจากการรวมกันธรรมดาเป็นการอินทิเกรตตามเส้นทางลำรังสีแกมมา (line integral) และสมการ (2.3) นี้จะยังคงเป็นจริงเฉพาะเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานค่าเดียวเท่านั้น ในทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพ สมการ (2.3) จะมีบทบาทสำคัญมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะขอกำหนดโคออร์ดิเนต (coordinate) ขึ้นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงเรขาคณิตของรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านระนาบของตัวกลางขึ้นบาง ๆ

จากรูปที่ 2.6 ทุกจุดบนระนาบนี้อธิบายด้วยโคออร์ดิเนต (x, y) รังสีแกมมาลำแคบพุ่งออกทำมุม ϕ กับแกน Y เพื่อความสะดวกรังสีแกมมาลำแคบจะอธิบายด้วยโคออร์ดิเนต (r, s) และลำรังสีแกมมาแต่ละลำอธิบายด้วยโคออร์ดิเนต (r, ϕ) ในระบบโคออร์ดิเนตที่กำลังพิจารณานี้ เฉพาะรังสีแกมมาลำแคบหนึ่ง ๆ สมการที่อธิบายความเข้มที่ทะลุผ่านออกมาจะคล้ายกับสมการ (2.3) โดยจะเป็น

$$I = I_0 \exp\left[-\int_{r, \phi} f(x, y) ds\right] \quad (2.4)$$

โดยที่ $f(x, y)$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา

โดยที่เทอมในวงเล็บหมายถึง การอินทิเกรตตามเส้นทางที่ถูกกำหนดด้วยโคออร์ดิเนต (r, s) สำหรับมุม ϕ ใดๆ มุมหนึ่งเท่านั้น สมการ (2.4) สามารถเขียนอีกรูปหนึ่งได้ดังนี้

$$P(r, \phi) = -\ln \frac{I}{I_0} = \int_{r, \phi} f(x, y) ds \quad (2.5)$$

เทอม $P(r, \phi)$ เป็นเทอมที่กำหนดขึ้นมีชื่อเรียกว่า “เรย์ซัม (ray-sum)” นิยามว่าเป็นการอินทิเกรต $f(x, y)$ ตามเส้นทางของรังสีแกมมาลำแคบที่มีโคออร์ดิเนต (r, ϕ) เป็นค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

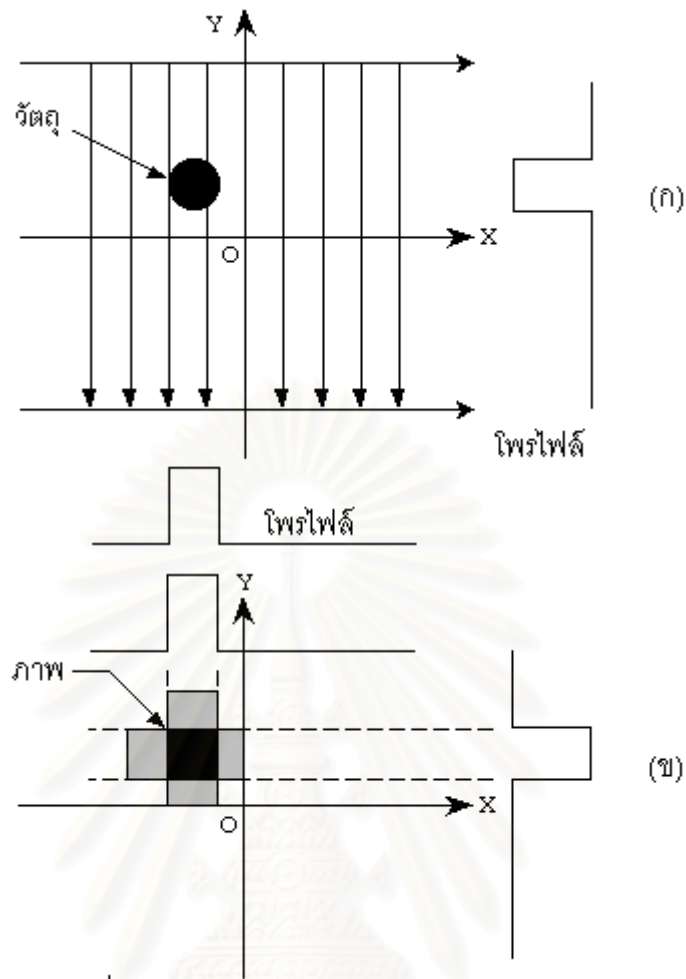
ที่มุม ϕ ใด ๆ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรง (translation) หมายถึง การเปลี่ยนค่า r จะได้เซต (set) ที่สมบูรณ์ของเรย์ซัม สำหรับมุม ϕ นั้น เซตดังกล่าวนี้เรียกว่า “โพรไฟล์ (profile)” หรือเรียกอีกอย่างว่า “โพรเจกชัน (projection)” จากรูปที่ 2.1 ประกอบ ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนต (x, y) และ (r, ϕ) คือ

$$\begin{aligned} r &= x \cos \phi + y \sin \phi \\ s &= y \cos \phi - x \sin \phi \end{aligned} \tag{2.6}$$

2.2.3 แบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection)

แบ็กโพรเจกชันเป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของข้อมูลโพรไฟล์ในแต่ละมุมมาทำการฉายค่ากลับลงบนตำแหน่งเดิมที่รังสีเดินทางผ่านเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้นจะพิจารณารูปที่ 2.7(ก) สมมติว่าการเคลื่อนที่ของรังสีลำแคบตัดวัตถุในแนวเส้นตรงครั้งแรกที่มุม $\phi = 0$ จะได้ข้อมูลโพรไฟล์ 1 ชุด หรือได้ $P(r, 0)$ จากนั้นทำการหมุนเคลื่อนที่ให้ลำรังสีตัดวัตถุในแนวเส้นตรงครั้งที่สองที่มุม $\phi = 90$ องศา จะได้โพรไฟล์อีก 1 ชุด หรือได้ $P(r, 90)$ เมื่อนำโพรไฟล์ทั้งสองมาทำการแบ็กโพรเจกชันจะได้ภาพตัดขวางของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข)

จะเห็นว่า ตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุ $P(r, 0)$ และ $P(r, 90)$ ที่มีค่าสูงมากจะรวมกันหรือเสริมกันทำให้เห็นเด่นเป็นภาพของวัตถุขึ้น แต่วิธีแบ็กโพรเจกชันไม่ใช่วิธีการที่ดีในการนำข้อมูลโพรไฟล์ที่ได้มาสร้างภาพ เพราะว่าแต่ละเรย์ซัมไม่ได้นำไปรวมกันเฉพาะตรงจุดที่มีความหนาแน่นสูงเท่านั้น แต่จะนำไปรวมกันบนทุก ๆ จุดตามเส้นทางของลำรังสีแกมมา ทำให้ภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้นไม่คมชัดเท่าที่ควร โดยตรงขอบภาพจะเกิดอาทิแฟ็ค (artifact) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข)

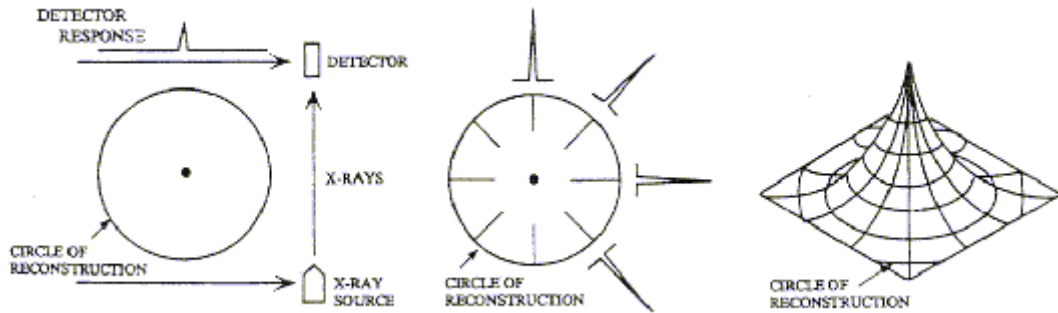


รูปที่ 2.7 การสร้างภาพด้วยวิธีการแบ็กโพรเจกชัน

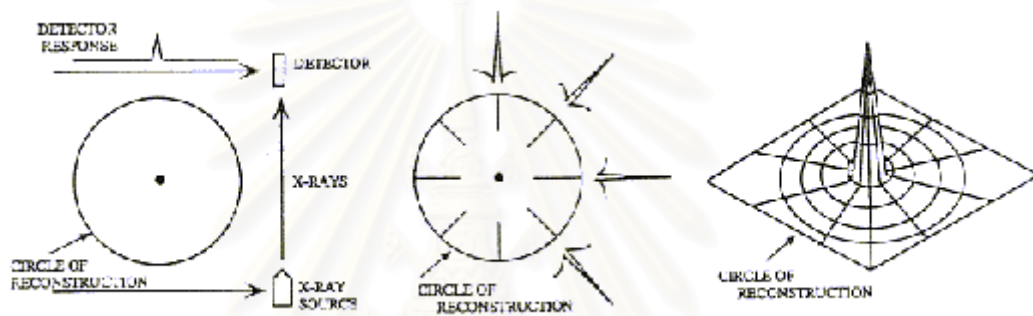
ก.) ข้อมูลโพรไฟล์ของวัตถุจำนวน 2 โพรไฟล์

ข.) ข้อมูลโพรไฟล์ในรูป ก. นำมาแบ็กโพรเจกชัน

การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน (filter function) ปรับปรุงข้อมูลโพรไฟล์ที่จะใช้ในการแบ็กโพรเจกชันทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นดังรูปที่ 2.9 พิจารณารูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีการแบ็กโพรเจกชันของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุดเหมือนกัน แต่รูปที่ 2.9 ใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชันทำการปรับปรุงข้อมูลโพรไฟล์ก่อนการสร้างภาพโทโมกราฟี ทำให้ข้อมูลโพรไฟล์บริเวณขอบของวัตถุมีความแตกต่างมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีความคมชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับข้อมูลโพรไฟล์ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน^[5]



รูปที่ 2.9 ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน^[5]

2.2.4 Filter Backprojection Method (FBP)

วิธีฟิลเตอร์แบ็กโพรเจคชัน เป็นวิธีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีวิธีหนึ่งที่ใช้เทคนิคการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เป็นพื้นฐาน พิจารณาฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์ 2 มิติ $F(X,Y)$ ของฟังก์ชัน $f(x, y)$

$$F(X,Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-i(Xx+Yy)} dx dy \quad (2.7)$$

เขียนฟังก์ชัน $f(x,y)$ ไปอยู่ในระบบพิกัด (r,s) โดยที่แกน r ทำมุม θ กับแกน x ของระนาบจะได้ฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์ $F(X,Y)$ เป็น

$$\begin{aligned}
 F(X, Y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[X(r \cos \theta - s \sin \theta) + Y(r \sin \theta + s \cos \theta)]} dr ds \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rR + sS]} dr ds \\
 &= F_{\theta}(R, S)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 R &= X \cos \theta + Y \sin \theta \\
 S &= Y \cos \theta - X \sin \theta
 \end{aligned}$$

สมการที่ (2.8) สืบให้ทราบว่า ถ้า $f_{\theta}(r, s)$ หมุนจาก $f(x, y)$ ไปเป็นมุม θ ฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ $F_{\theta}(R, S)$ ก็หมุนจาก $F(X, Y)$ เป็นมุม θ เช่นกัน

พิจารณาฟังก์ชันภาพฉาย $P(\theta, r)$

$$P(\theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) ds \tag{2.9}$$

และฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ $P(\theta, R)$ ของ $P(\theta, r)$ คือ

$$P(\theta, R) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) e^{-iRr} ds dr \tag{2.10}$$

หากเปรียบเทียบสมการที่ (2.8) และ สมการที่ (2.10) จะได้ว่า $P(\theta, R)$ มีค่าเทียบเคียงได้กับ $F_{\theta}(R, S)$ ตามแนวแกน R หรือ

$$P(\theta, R) = F_{\theta}(R, S) \Big|_{s=0} \tag{2.11}$$

สมการที่ (2.11) คือ ทฤษฎีโพรเจกชัน-สไลซ์ (Projection-slice theorem) ซึ่งกล่าวว่าฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 1 มิติของฟังก์ชันภาพฉาย คือฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 2 มิติของฟังก์ชันเดิมตามแนวภาพฉายที่ตัดผ่านจุดกำเนิด

ดังนั้นหากมีข้อมูลฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชัน ภาพฉายจำนวนอนันต์มมแล้ว เราจะทราบค่าทุกๆ จุดของ $F(X,Y)$ บนระนาบ (X,Y) และเมื่อทราบค่า $F(X,Y)$ ก็สามารรถคำนวณกลับเป็น $f(x,y)$ ด้วยการแปลงฟูรีเยร์ผกผันดังนี้

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(X,Y) e^{i(Xx + yY)} dx dy \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.12 สามารถเขียนให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วได้เป็น

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\theta,R) e^{iR(x \cos \theta + y \sin \theta)} R dR d\theta \quad (2.13)$$

โดยที่ $F(\theta,R)$ เทียบเคียงได้กับฟังก์ชัน $F_\theta(R,S)|_\theta$ ซึ่งจากทฤษฎีโพรเจกชัน-สไลซ์ (Projection-slice theorem) ก็คือ $P(\theta,R)$ และด้วยคุณสมบัติการหมุนแบบสมมาตร เราทราบว่า $F(-\theta,R)$ มีค่าเท่ากับ $F(\theta + \pi, R)$ ดังนั้น

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta,R) e^{iR \cdot r} |R| dR d\theta \quad (2.14)$$

สมการที่ 2.14 เป็นสมการที่ไม่มีขอบเขตจำกัด (Unbounded function) เนื่องจาก $|R|$ มีค่าลู่ออก (diversion) ดังนั้นค่า R จึงควรถูกจำกัดด้วยค่าๆ หนึ่ง $|R| \leq \Omega$ กำหนดให้ฟังก์ชันของการกรองหรือฟิลเตอร์ฟังก์ชัน, $H(R) = b(R)|R|$ โดยที่

$$b(R) = \begin{cases} 1 & \text{where } |R| \leq \Omega \\ 0 & \text{where } |R| > \Omega \end{cases} \quad (2.15)$$

กำหนดให้ช่วงห่างของการเก็บข้อมูลตามแนวขวาง (Lateral sampling) มีค่าเป็น a ดังนั้น จากทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling theorem) จะได้ว่า

$$\Omega = 2\pi f_{\max} = \frac{\pi}{a} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.14 แทนค่า $|R|$ ด้วย $H(R)$ และใช้ทฤษฎีคอนโวลูชัน (Convolution) จะได้สมการการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี (Reconstruction formula) เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty P(\theta, \tau) \otimes h(x \cos \theta + y \sin \theta - \tau) d\tau d\theta \quad (2.17)$$

เมื่อ $h(r)$ เป็นการแปลงฟูริเยร์ผกผันของ $H(R)$ ซึ่งสามารถเขียนในรูปวิเคราะห์ (Analytic form) ได้เป็น

$$h(r) = \begin{cases} \frac{\Omega^2}{2\pi} & , r=0 \\ \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2\Omega}{r} \sin(\Omega r) + \frac{2}{r^2} \cos(\Omega r) - \frac{2}{r^2} \right] & , r \neq 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน $h(r)$ สามารถเขียนเป็นรูปไม่ต่อเนื่อง $h(r_k = ak)$ เมื่อ $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ได้เป็น

$$\begin{aligned} h(0) &= \frac{\pi}{2a^2} \\ h(r_k) &= -\frac{2}{\pi k^2 a^2} \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคี่} \\ h(r_k) &= 0 \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคู่} \end{aligned} \quad (2.19)$$

สมการที่ 2.19 คือ ฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Ramachandran ซึ่งมีลักษณะที่แกว่งมาก ต่อมา Shepp และ Logan แนะนำฟิลเตอร์ฟังก์ชันที่มีการแกว่งน้อยลงซึ่งทำให้ผลกระทบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีดีขึ้น ดังสมการ

$$h(r_k) = -\frac{4}{\pi a^2 (4k^2 - 1)} \quad , k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1) \quad (2.20)$$

สมการนี้เรียกว่า "Shepp & Logan filter function" เมื่อนำข้อมูลโพรไฟล์จากการสแกนมาผ่านการคำนวณด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน จะเป็นการปรับข้อมูลโพรไฟล์ให้สามารถแยกแยะรายละเอียดของข้อมูลให้เห็นเด่นชัดมากขึ้น

ดังนั้นการประมาณแบบไม่ต่อเนื่องของสมการการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี FBP สามารถเขียนได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N P(\theta_j, r_k) \cdot h(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j - r_k) \quad (2.21)$$

โดย M คือ จำนวนมุมของการเก็บข้อมูล หรือจำนวนโพรไฟล์
 N คือ จำนวนจุดของการสแกนเก็บข้อมูลในหนึ่งโพรไฟล์

2.3 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Quality of Computed Tomography Image)

ภาพโทโมกราฟีที่ดีหมายถึงภาพที่สามารถแสดงรายละเอียดภายในของวัตถุได้ถูกต้องและชัดเจน และภาพโทโมกราฟีที่ดียังแสดงถึงระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ดีอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้ การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้

2.3.1 Pixel Noise

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างระบบที่ปราศจากสิ่งรบกวนเลย และสิ่งรบกวนก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพลดลง ถ้าลองสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่ประกอบด้วยเนื้อสารเดียวกันตลอด เช่น น้ำ เป็นต้น ภาพโทโมกราฟีที่ได้ควรประกอบด้วยพิกเซล (Pixel) ที่มีค่าเลขซีที (CT-number) เป็นศูนย์ทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติพบว่าไม่เป็นศูนย์ทั้งหมด โดยจะมีค่าที่ต่ำกว่าและสูงกว่าศูนย์เล็กน้อยและบางพิกเซลมีค่าเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนของเลขซีทีที่แบบนี้เรียกว่า “พิกเซลนอยส์ (Pixel noise)” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ (standard deviation) ค่า CT-number ของภาพโทโมกราฟีที่มีเนื้อสารเดียวกัน การคำนวณหาค่า Pixel noise นั้นควรเลือก CT-number ของภาพโทโมกราฟีที่บริเวณที่มีเนื้อสารเดียวกันมาจำนวนหนึ่ง โดยให้มีจำนวนอยู่ในช่วงระหว่าง 25 ถึง 100 ค่า ตามคำแนะนำของ ASTM E1441-95^[5] แล้วคำนวณหาค่า Pixel noise โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (2.22)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\mu_i - \bar{\mu})^2}{m-1}} \quad (2.23)$$

เมื่อ	$\bar{\mu}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของ CT-number ณ บริเวณที่เลือก
	μ_i	คือ	ค่า CT-number ใดๆ ณ บริเวณที่เลือก
	m	คือ	จำนวนข้อมูลที่เลือก
	σ	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CT-number หรือ Pixel noise ณ บริเวณที่เลือก

จากสมการที่ 2.23 ค่า Pixel noise ที่ได้ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน หรือที่เรียกกันว่า “ค่า SNR (Signal to Noise Ratio)” ได้จากสมการ

$$\text{SNR} = \frac{\bar{\mu}}{\sigma} \quad (2.24)$$

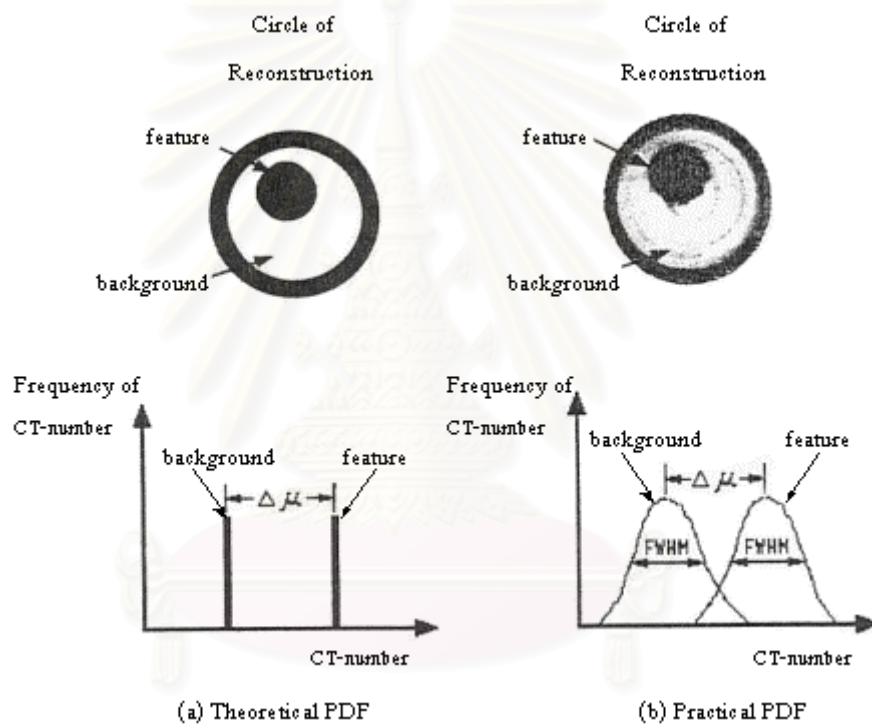
ค่า Pixel noise และค่า SNR ที่ได้สามารถบอกถึงคุณภาพของระบบได้โดยเมื่อค่า Pixel noise มีค่าน้อย และค่า SNR มีค่ามาก แสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณภาพที่ดี เพราะระบบมีสิ่งรบกวนน้อย ในทางกลับกัน ถ้าค่า Pixel noise มีค่ามากหรือค่า SNR มีค่าน้อย แสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณภาพที่ไม่ดี

2.3.2 Probability Distribution Function (PDF)

PDF เป็นกราฟแจกแจงความถี่ที่ค่า CT-number ต่าง ๆ จากตัวอย่างของกราฟ PDF ในรูปที่ 2.10(a) เป็นกราฟ PDF ในทางทฤษฎีของภาพโทโมกราฟี เห็นได้ว่าค่าความถี่ของค่า CT-number มีเพียงสองค่าเท่านั้นซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ค่า CT-Number ของวัตถุ (Feature ; μ_{feature}) และของแบ็กกราวด์ (Background ; $\mu_{\text{background}}$) ข้อมูลทั้งสองค่าสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast ; $\Delta\mu$) ได้ตามสมการ

$$\Delta\mu = \mu_{\text{feature}} - \mu_{\text{background}} \quad (2.25)$$

แต่ในทางปฏิบัติ กราฟ PDF ที่ได้นั้นจะไม่เหมือนกับในทางทฤษฎี เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ ในการคำนวณสร้างภาพทำให้เกิดความมัว (Blurring) ของภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้น ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ทำให้ภาพโทโมกราฟี และกราฟ PDF ที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.10(b) พบว่ากราฟ PDF จะมีการกระจายตัวมากกว่าในทางทฤษฎี โดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลได้จากความกว้างของกราฟ PDF ตรงตำแหน่งครึ่งหนึ่งของค่า CT-number สูงสุด ซึ่งเรียกว่า “ค่า FWHM (Full Width at Half Maximum)” สำหรับการหาค่าความเปรียบเทียบต่างของกราฟ PDF ในทางปฏิบัตินั้นคำนวณได้จากค่า CT-Number ที่มีค่าความถี่สูงสุดของทั้งวัตถุและแบ็กกราวด์ของกราฟ PDF

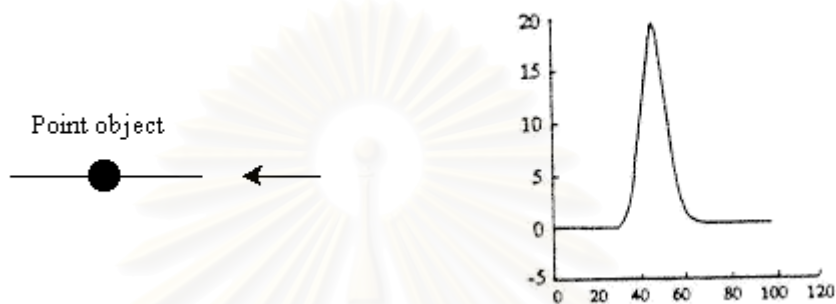


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการหาค่า PDF

จากที่กล่าวในข้างต้น สรุปได้ว่า กราฟ PDF สามารถบอกค่าความเปรียบเทียบของภาพโทโมกราฟี และการกระจายตัวของค่า CT-number ของภาพได้ โดยวัดได้จากค่า FWHM ซึ่งค่า FWHM นี้จะบอกถึงความมัวของภาพโทโมกราฟีที่ได้ ถ้าค่า FWHM มีค่ามาก แสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวมาก ในทางกลับกัน ถ้าค่า FWHM มีค่าน้อย แสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวน้อยหรือมีคุณภาพที่ดีนั่นเอง

2.3.3 Point Spread Function (PSF)

PSF เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่า Resolution โดยการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุด (point object) จากนั้นอ่านค่า CT-number จากตำแหน่งแฉกของข้อมูลที่ผ่านกึ่งกลางของวัตถุในภาพโทโมกราฟี ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของข้อมูลโพรไฟล์ดังรูปที่ 2.11

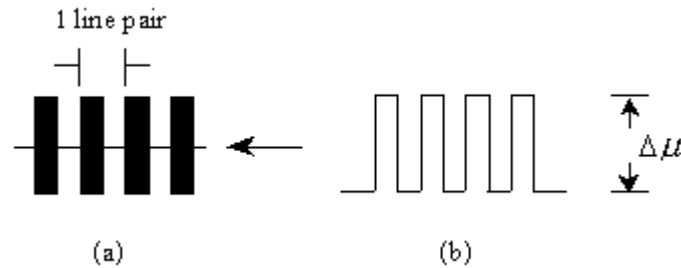


รูปที่ 2.11 Point Spread Function

ในการหาค่า Resolution ขั้นแรกต้องทำการเพิ่มขนาดของ point object ขึ้นจนกว่าค่า CT-number สูงสุดของโพรไฟล์ข้อมูลจะมีค่าคงที่ ขึ้นต่อมาให้ค่อย ๆ ลดขนาดของ point object ลง เมื่อลดขนาดของ point object ลงจะทำให้ค่า CT-number สูงสุดของโพรไฟล์ข้อมูลมีค่าลดลงด้วย เมื่อใดที่ค่า CT-number สูงสุดของโพรไฟล์ข้อมูลลดลงเหลือ 20% ของค่าที่คงที่ในขั้นตอนแรก ขนาดของ point object ณ ตำแหน่งนี้ก็คือ ค่า Resolution ของระบบนั่นเอง

2.3.4 Modulation Transfer Function (MTF)

MTF ปรับปรุงมาจากวิธี Point Spread Function (PSF) ด้วยการแปลงฟูริเยร์ โดยนำวัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งมาจัดวางให้มีระยะห่างเท่ากับความหนาของวัตถุ และออกแบบให้แท่งวัตถุมีความหนาแตกต่างกันหลาย ๆ ค่า เรียกว่าวัตถุนี้ว่า "slit" ดังรูปที่ 2.12(a)



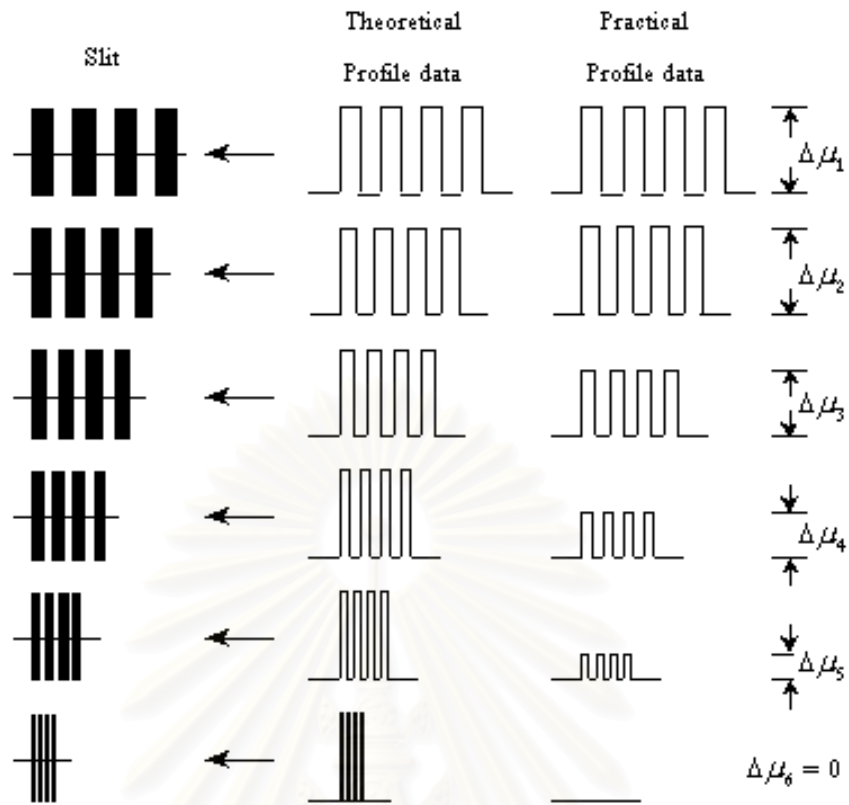
รูปที่ 2.12 ภาพของ slit และตัวอย่างโปรไฟล์ของ slit

การหาค่า MTF ทำได้โดยการอ่านค่า CT-number ของข้อมูลโปรไฟล์ความถี่ของ slit ดังรูปที่ 2.12(b) จากนั้นวัดจำนวนแท่ง slit ที่มองเห็นภายในหนึ่งเซนติเมตร (มีหน่วยเป็น เส้นคู่ต่อเซนติเมตร หรือ line pair/cm.) เช่น slit มีความหนา 5 มิลลิเมตร วางเรียงกันโดยเว้นช่องว่าง 5 มิลลิเมตร ตามความหนาของ slit ดังนั้นใน 1 เซนติเมตร ก็ต้องมีแท่ง slit 1 แท่ง หรือ 1 เส้นคู่ต่อเซนติเมตร จากนั้นหาความแตกต่างระหว่างค่า CT-number สูงสุดกับต่ำสุดจากโปรไฟล์ความถี่ โดยค่าที่ได้ก็คือ ค่าความเปรียบต่าง ($\Delta\mu$) ของ slit ในทางทฤษฎีค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่จะคงที่แม้ว่าความถี่ของ slit จะมากขึ้นดังรูปที่ 2.13 แต่ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อ slit มีความถี่มากขึ้นค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่สามารถลดลงได้ดังรูปที่ 2.13 โดยเมื่อความถี่ของ slit เพิ่มขึ้น ค่า $\Delta\mu_2$ ก็ยังมีค่าเท่ากับ $\Delta\mu_1$ แต่พอเพิ่มความถี่ของ slit ขึ้นเรื่อย ๆ ความเปรียบต่างก็ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ จนกระทั่ง $\Delta\mu_5$ ลดลงเป็นศูนย์ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่า MTF ได้จากสมการดังต่อไปนี้

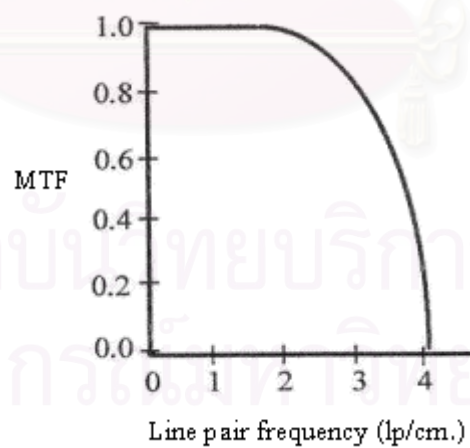
$$MTF = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_{max}} \quad (2.26)$$

เมื่อ $\Delta\mu$ คือ ค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่ที่ความถี่ใด ๆ
 $\Delta\mu_{max}$ คือ ค่าความเปรียบต่างสูงสุด

จากสมการที่ 2.26 เมื่อความถี่เส้นคู่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเปรียบต่างลดลง และยังทำให้ค่า MTF ลดลงด้วย จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ข้อมูลโพรไฟล์ความถี่ของ slit



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่

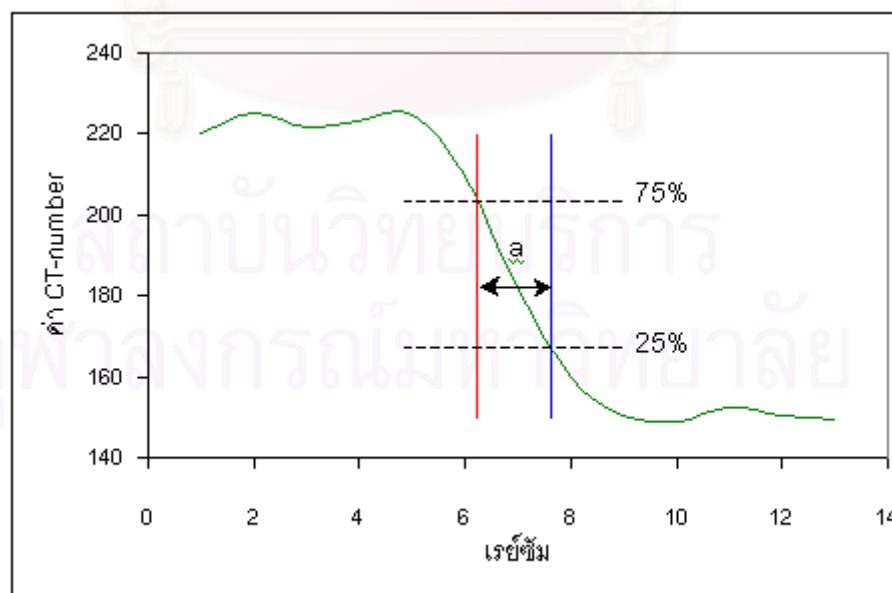
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่ที่ค่า MTF เท่ากับ 1 หรือ 100% แสดงว่าเป็นภาพที่มีความเหมือนกับวัตถุมากที่สุด และเมื่อค่า MTF ลดลงก็แสดงว่าภาพมีความเหมือนวัตถุน้อยลง สำหรับในงานด้านอุตสาหกรรมจะกำหนดให้ใช้ค่า MTF ที่ 20% ในการคำนวณหาค่า Resolution โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{resolution} = \frac{1}{2f} \quad (2.27)$$

เมื่อ f คือ ค่าความถี่เส้นคู่ที่ MTF เท่ากับ 20%

2.3.5 Edge Spread Function (ESF)

การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี Edge Spread Function เป็นวิธีการคำนวณหาค่า Resolution ของระบบสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีอีกวิธีหนึ่ง โดยอาศัยโพรไฟล์ของข้อมูล CT-number ที่ตำแหน่งขอบของชิ้นงานทดสอบในภาพโทโมกราฟี จากนั้นคำนวณหาจำนวนเรย์ซึ่มที่ค่า CT-number เพิ่มขึ้นจาก 25% ไปถึง 75% ซึ่งค่า Resolution จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างจำนวนเรย์ซึ่มที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างแต่ละจุดภาพ (ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างข้อมูลโพรไฟล์สำหรับการคำนวณหาค่า Resolution ด้วยวิธี ESF

บทที่ 3

ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

3.1.1 หัววัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลชันชนิดโซเดียมไอโอไดด์ (ทลเลียม) [NaI(Tl)] ขนาด 2 x 2 นิ้ว พร้อมหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ตรอน (PMT) BICRON MODEL 2M2/2PB

3.1.2 ฐานหลอด (tube base) พร้อมภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) ORTEC MODEL 276 สำหรับหัววัด NaI(Tl) ขนาด 2 x 2 นิ้ว

3.1.3 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (high voltage power supply) สำหรับหัววัดรังสีแกมมา ORTEC MODEL 556

3.1.4 NIM BIN และแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า

3.1.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดี่ยว (single channel analyzer : SCA) พร้อมภาคขยายสัญญาณ (amplifier) ORTEC MODEL 490A

3.1.6 อุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลานับ (counter / timer) CANBERRA 1772

3.1.7 ไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC/AT 16 บิต ที่แสดงผลบนจอโมโนโครมผ่านการ์ด Hercules หรือ เครื่องที่มีสมรรถนะเทียบเคียงกัน

3.1.8 ระบบขับเคลื่อนเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

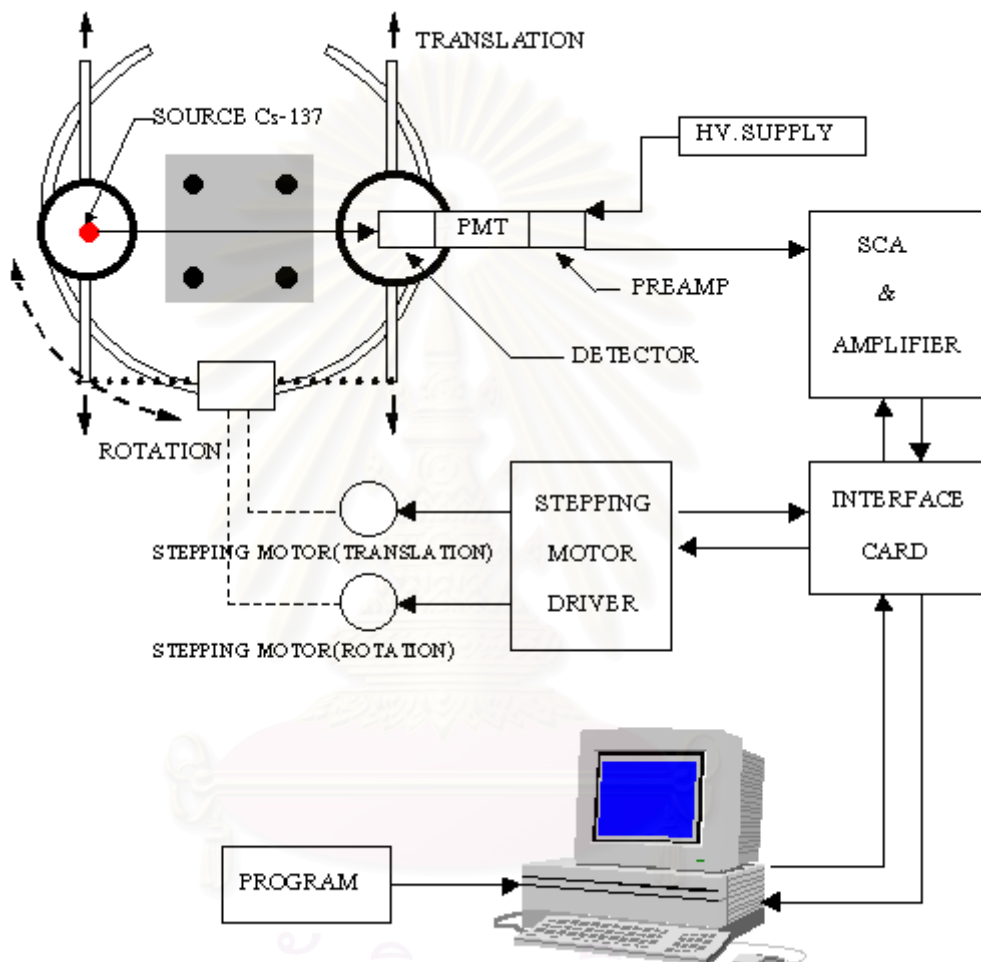
3.1.9 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ความแรงแรังสี 30 mCi

3.1.10 อุปกรณ์กัมบังรังสีและบังคัมบังรังสี สำหรับต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี ทำด้วยตะกั่ว

3.2 ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา

ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย มงคล วรณประภา [2] ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ระบบวัดรังสีแกมมา ระบบขับ

เคลื่อน และระบบเชื่อมโยงสัญญาณ ส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้จะทำงานร่วมกันโดยการควบคุมของโปรแกรมบนไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบสแกนได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา

จากแผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบสแกน จะเห็นได้ว่าระบบสแกนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

-ระบบวัดรังสีแกมมา ทำหน้าที่วัดปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างในช่วงเวลาที่กำหนดด้วยอุปกรณ์นับรังสี ซึ่งระบบจะวัดเฉพาะรังสีแกมมาที่มาจากต้นกำเนิด

รังสีแกมมา Cs-137 เท่านั้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว แล้วส่งผ่านข้อมูลที่ได้ไปยังไมโครคอมพิวเตอร์

-ระบบขับเคลื่อน ทำหน้าที่ขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสีไปพร้อมกัน ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Translation) และการหมุน (Rotation) ซึ่งควบคุมโดยไมโครคอมพิวเตอร์

-ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ ทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์กับระบบวัดรังสีแกมมาและระบบขับเคลื่อน

-โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบสแกน ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบสแกนทั้งระบบ

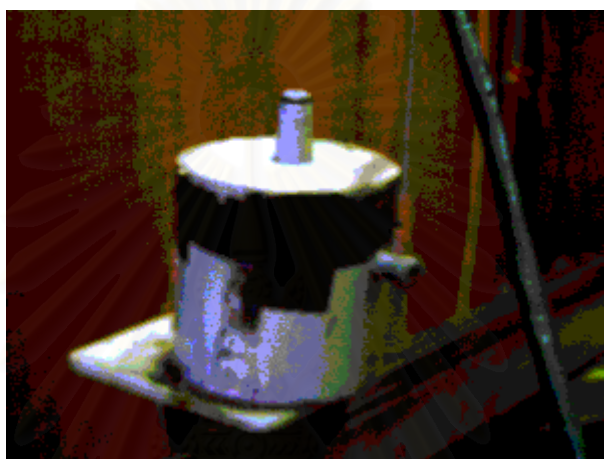
การทำงานของระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี จะอาศัยการควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ โดยที่เริ่มต้นระบบสแกนจะทำการ reset ระบบขับเคลื่อนไปยังจุดเริ่มต้นทุกครั้งโดยมีไมโครสวิตช์ (microswitch) เป็นตัวตรวจสอบ จากนั้นระบบวัดรังสีแกมมาจะเริ่มทำการวัดปริมาณความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่าง ณ ตำแหน่งนั้นด้วยหัววัดรังสี NaI(Tl) ซึ่งระบบจะวัดเฉพาะรังสีแกมมาที่มาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เท่านั้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว ในการวัดปริมาณความเข้มของรังสีจะใช้อุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลานับ โดยจะวัดเป็นปริมาณความเข้มของรังสีแกมมา (count) และข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จะถูกส่งไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ เมื่อสิ้นสุดการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งนั้น ๆ ไมโครคอมพิวเตอร์จะสั่งการให้ระบบสแกนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่จะเก็บข้อมูลถัดไปจนครบทุกตำแหน่งบนชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นระบบสแกนจะทำการหมุนระบบไปด้วยมุมน้อย ๆ และเก็บข้อมูลเช่นเดียวกันกับมุมแรก ระบบสแกนจะทำการเก็บข้อมูลที่มุมต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างจนครบ 180 องศา หลังจากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกลงในไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

3.3 ระบบวัดรังสีแกมมา

ระบบวัดรังสีแกมมา ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีแกมมา และหัววัดรังสีแกมมา อุปกรณ์กำบังและบังค้ำรังสี แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว พร้อมภาคขยายสัญญาณ อุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลานับ และ NIM BIN ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.3.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี

งานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ความแรงรังสี 30 mCi ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 662 keV และใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ขนาด 2 x 2 นิ้ว วัดเฉพาะพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เท่านั้น



รูปที่ 3.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาบรรจุในอุปกรณ์กำบังรังสี

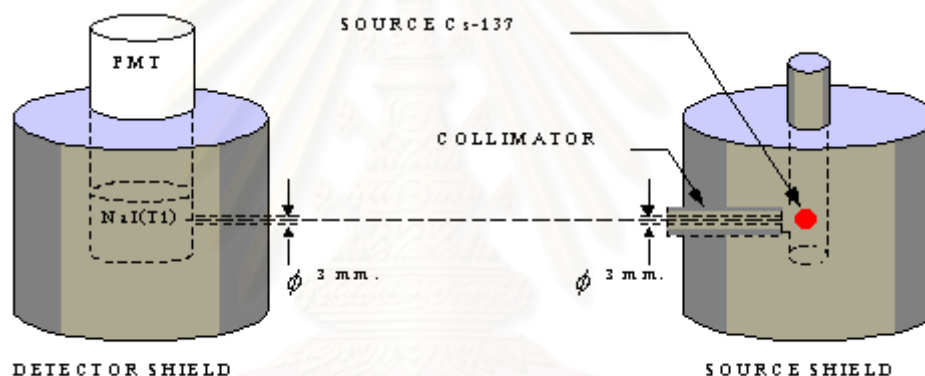


รูปที่ 3.3 หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)

3.3.2 อุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี

เนื่องจากระบบสแกนที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ จึงต้องมีการบังคับลำรังสี (collimating) ให้เป็นลำรังสีแบบแคบหนึ่งลำ ทั้งนี้เพื่อเป็นการจำกัดรังสีในทิศทางที่ไม่ต้องการ โดยใช้ตะกั่วมาทำเป็นอุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี เพราะตะกั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีสูง และหาง่าย

ระบบสแกนนี้มีการใช้อุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี อยู่ 2 ตำแหน่ง คือ ที่ต้นกำเนิดรังสีแกมมา และที่หัววัดรังสี รายละเอียดแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์กำบังและบังคับลำรังสี สำหรับต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี

จากรูปจะเห็นได้ว่าต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ถูกบรรจุอยู่ภายในอุปกรณ์กำบังรังสีที่ทำจากตะกั่ว และมีแท่งตะกั่วปิดไว้ด้านบนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งรังสีแกมมาจะถูกกำบังในทุกทิศทาง จะเหลือเพียงลำรังสีแบบแคบหนึ่งลำที่ผ่านช่องของอุปกรณ์บังคับลำรังสีขนาด 3 มิลลิเมตร ลำรังสีแบบแคบนี้จะทะลุผ่านชั้นงานก่อนเข้าสู่หัววัดรังสีที่อยู่ด้านตรงกันข้าม โดยผ่านช่องอุปกรณ์กำบังรังสีที่หัววัดรังสีขนาด 3 มิลลิเมตร ซึ่งทำหน้าที่บังคับลำรังสีอีกชั้นหนึ่ง เพื่อให้หัววัดได้รับเฉพาะลำรังสีแกมมาขนาด 3 มิลลิเมตร ที่ตรงทะลุผ่านชั้นงาน

3.3.3 ฐานหลอดและภาคขยายส่วนหน้า

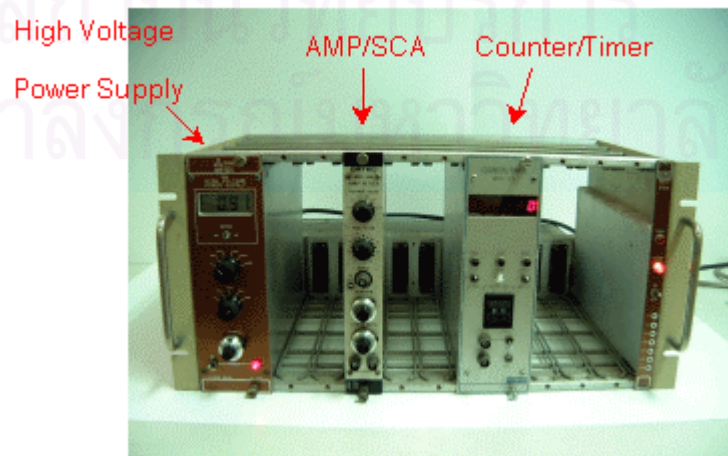
เนื่องจากหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ และหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ตรอนจะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีศักดาไฟฟ้าป้อนผ่านฐานหลอด ซึ่งภายในฐานหลอดมีวงจรขยายส่วนหน้า ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากหัววัดรังสีให้มีขนาดพอเหมาะสำหรับส่งผ่านสายนำสัญญาณไปยังภาคขยายสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ใช้ฐานหลอด ORTEC MODEL 276

3.3.4 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง

การทำงานของหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ต้องการศักดาไฟฟ้าสูงป้อนผ่านฐานหลอด ซึ่งหากศักดาไฟฟ้าสูงจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่คงที่จะทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลงมีค่าไม่แน่นอน ทำให้ค่าพลังงานที่เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยววิเคราะห์ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องการแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงที่สามารถจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงได้อย่างเที่ยงตรง ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง ORTEC MODEL 556

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดี่ยว

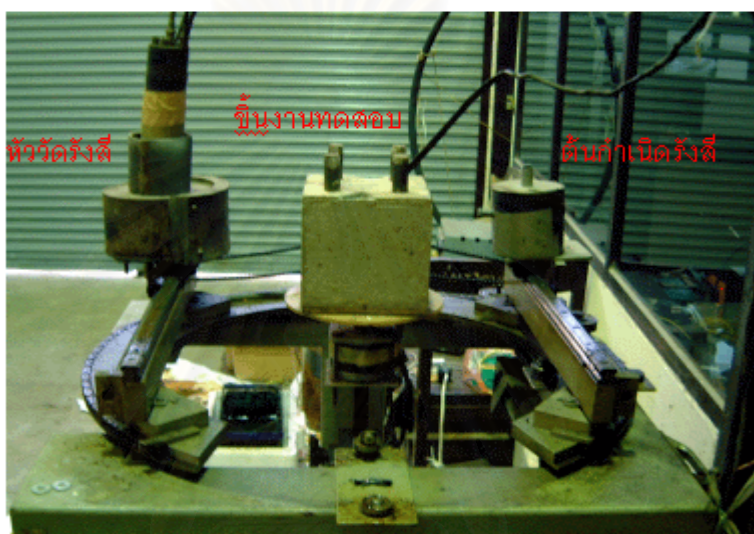
ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดี่ยว (SCA) ซึ่งจะเลือกวัดเฉพาะรังสีแกมมาที่มาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 เท่านั้น เพื่อป้องกันการวัดรังสีกระเจิงที่มาจากทิศทางอื่น ๆ ซึ่งจะทำให้ความคมชัดของภาพโทโมกราฟีที่ได้อลดลง



รูปที่ 3.5 ระบบวัดรังสีแกมมา

3.4 ระบบขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนเพื่อการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ทำหน้าที่ขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี ด้วยสเต็ปมอเตอร์จำนวน 2 ตัว ในงานวิจัยนี้ใช้สเต็ปมอเตอร์แบบ Reactive Variable ซึ่งมีแรงบิด (torque) มาก เพื่อที่จะสามารถขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี และอุปกรณ์กำลังรังสีที่ทำจากตะกั่วได้



รูปที่ 3.6 ระบบขับเคลื่อนเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

การทำงานของสเต็ปมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทำงานของสเต็ปมอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบสแกนให้เคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรง (Translation) โดยการขับเคลื่อนเฟืองตัวหนอนที่ยึดติดกับแท่นเลื่อน 2 ชุด ซึ่งวางขนานกัน ด้านหนึ่งวางต้นกำเนิดรังสีแกมมา และอีกด้านวางหัววัดรังสี โดยระบบสแกนสามารถเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงได้ที่ละ step และสามารถเลือก step ของการเคลื่อนที่ได้ คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

- สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบสแกนให้เคลื่อนที่แบบหมุน (Rotation) โดยการหมุนชุดขับเคลื่อนที่มีต้นกำเนิดรังสีแกมมา และหัววัดรังสีวางอยู่ให้หมุนเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ระบบสแกนสามารถหมุนไปได้ที่ละ step angle ซึ่งสามารถเลือก step angle ได้ คือ 2.5, 3.65, 5, 7.31, 10, 14.61 และ 20 องศา

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

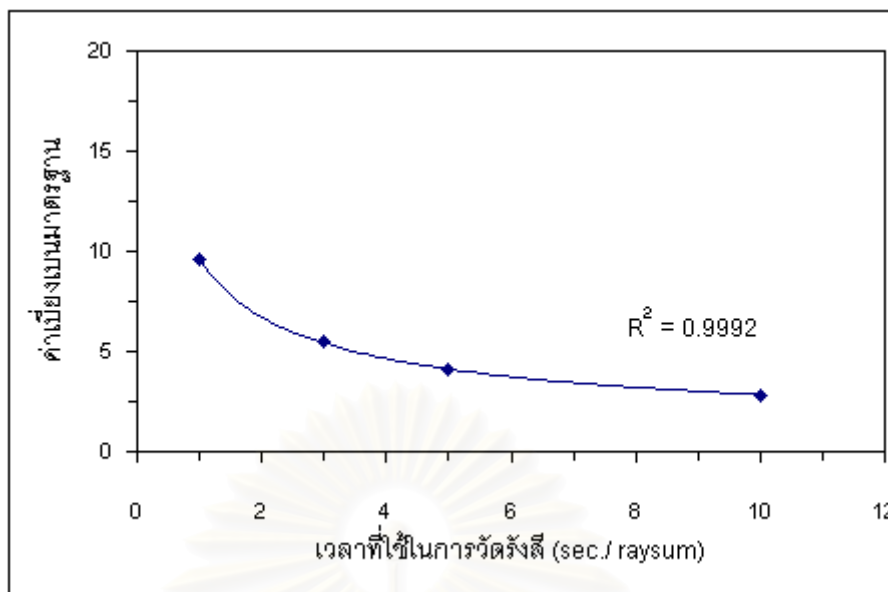
4.1 การทดสอบหาเวลาวัดที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

การทดสอบในขั้นตอนนี้เพื่อหาเวลาวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซัมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ข้อมูลความเข้มรังสีที่มีความแปรปรวนทางสถิติน้อย ซึ่งพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชิ้นงานทดสอบ A ในตารางที่ 4.2 เป็นตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. เหล็กเสริมเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร

ทำการทดสอบโดยการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณที่มีแต่คอนกรีตไม่มีเหล็กเสริม จำนวน 100 ครั้ง ณ ตำแหน่งเรย์ซัมเดียวกัน โดยไม่ได้ขยับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี และใช้เวลาในการวัดความเข้มรังสีต่าง ๆ กัน ได้แก่ 1, 3, 5 และ 10 วินาที แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้ที่เวลาต่าง ๆ

เวลาที่ใช้ในการวัดรังสี (วินาที)	ความเข้มรังสีเฉลี่ย	ความเข้มรังสีเฉลี่ย / เวลา	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	85.61	85.61	9.57
3	264.12	88.04	5.49
5	435.54	87.11	4.15
10	872.39	87.24	2.81



รูปที่ 4.1 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้ที่เวลาต่าง ๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีแต่ละเรย์ซัมเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจากนั้นจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มรังสีที่วัดได้มีค่าลดลงเป็นการแสดงให้เห็นว่าข้อมูลโพรไฟล์จะมีความแปรปรวนลดลงด้วย และเมื่อนำข้อมูลโพรไฟล์ที่ได้ไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจะทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นด้วย

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เวลาในการวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซัมเท่ากับ 3 วินาที สำหรับตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใกล้เคียงกับที่เวลา 5 วินาที แต่ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์น้อยกว่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมงคล^[2]

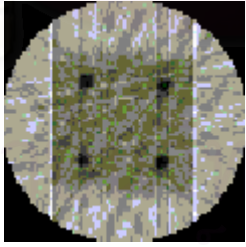
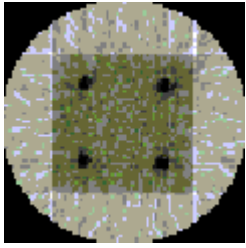
4.2 การทดสอบหาจำนวนข้อมูลโพรไฟล์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

เมื่อได้เวลาที่ใช้ในการวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซัมที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบหาจำนวนข้อมูลโพรไฟล์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้ด้วยค่า Pixel noise ค่า SNR และกราฟ PDF

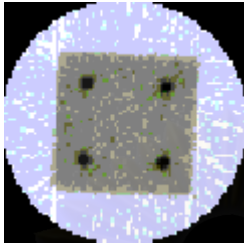
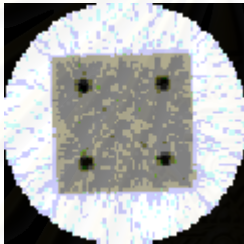
ทำการทดสอบเก็บข้อมูลโพรไฟล์ของชิ้นงานทดสอบ A เป็นตัวอย่างเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบที่แล้ว โดยใช้เวลาในการวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซั่มเท่ากับ 3 วินาที ระยะการเคลื่อนที่แต่ละเรย์ซั่มเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จำนวนเรย์ซั่มทั้งหมดเท่ากับ 125 เรย์ซั่ม และกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนหมุนเปลี่ยนไปที่ละ 20, 10, 5 และ 2.5 องศา เมื่อทำการเก็บข้อมูลโพรไฟล์จนครบ 180 องศา จะได้ข้อมูลโพรไฟล์ทั้งหมดเท่ากับ 9, 18, 36 และ 72 โพรไฟล์ ตามลำดับ แล้วนำข้อมูลโพรไฟล์ที่ได้ไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี จากนั้นนำข้อมูล CT-number จำนวน 100 ข้อมูลจากภาพโทโมกราฟีในบริเวณที่เป็นวัตถุชนิดเดียวกัน (ในที่นี้คือบริเวณที่เป็นคอนกรีต) และที่ตำแหน่งเดียวกันของทุก ๆ ภาพ มาคำนวณหาค่า Pixel noise และค่า SNR

ผลการทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีแสดงในตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่า Pixel noise และค่า SNR แสดงในตารางที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลโพรไฟล์กับค่า Pixel noise และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลโพรไฟล์กับค่า SNR แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ และจากภาพโทโมกราฟีที่ได้เมื่อนำข้อมูล CT-number ทุกค่ามาเขียนเป็นกราฟ PDF จะได้กราฟดังรูปที่ 4.4(ก)-(จ)

ตารางที่ 4.2 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ

จำนวนโพรไฟล์	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
9 โพรไฟล์ (20 องศา)		ภาพที่ได้มีความบิดเบือน (distortion) ไปจากชิ้นงานจริงมาก เกิดอาทิแฟ็ค (artifact) ขึ้นบนภาพมาก ทำให้เห็นเหล็กเสริมในคอนกรีตไม่ชัดเจน
18 โพรไฟล์ (10 องศา)		ภาพที่ได้ไม่มีความบิดเบือน มีรูปร่างเหมือนชิ้นงานจริง แต่ยังมีอาทิแฟ็คบนภาพค่อนข้างมาก และยังเห็นเหล็กเสริมได้ไม่ชัดเจน

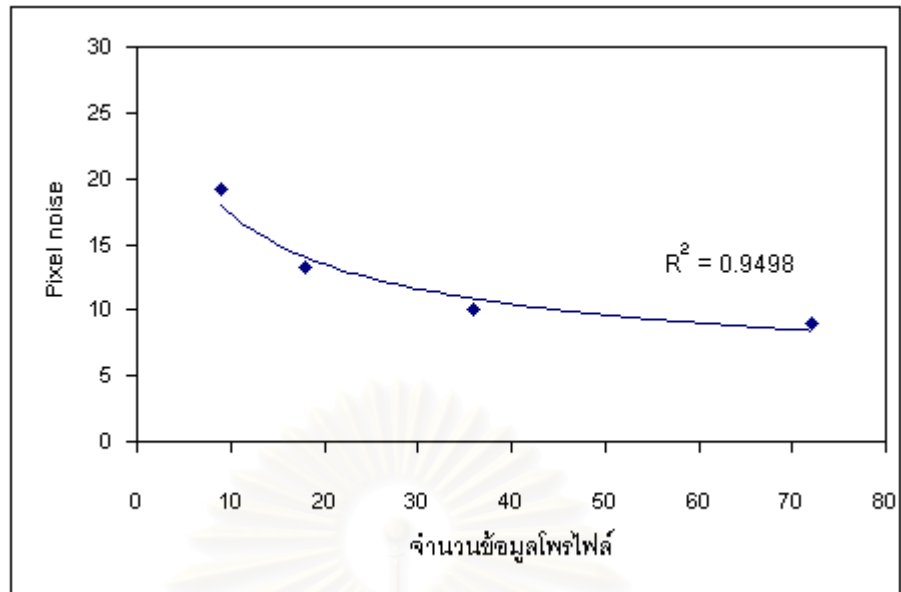
ตารางที่ 4.2 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ (ต่อ)

จำนวนโพรไฟล์	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
36 โพรไฟล์ (5 องศา)		ภาพมีความคมชัดมากขึ้น มีอาทิแฟ็คเกิดขึ้นบนภาพลดลง มีความเปรียบต่างของภาพน้อย การแจกแจงรายละเอียดของเหล็กเสริมดีขึ้น แต่ยังเห็นเหล็กเสริมไม่กลมเท่าที่ควร
72 โพรไฟล์ (2.5 องศา)		ภาพที่ได้มีความคมชัดมาก มีอาทิแฟ็คเกิดขึ้นน้อยมาก มีความเปรียบต่างมาก และสามารถแจกแจงรายละเอียดของเหล็กเสริมได้ชัดเจนมากขึ้น เหล็กเสริมมีลักษณะค่อนข้างกลม

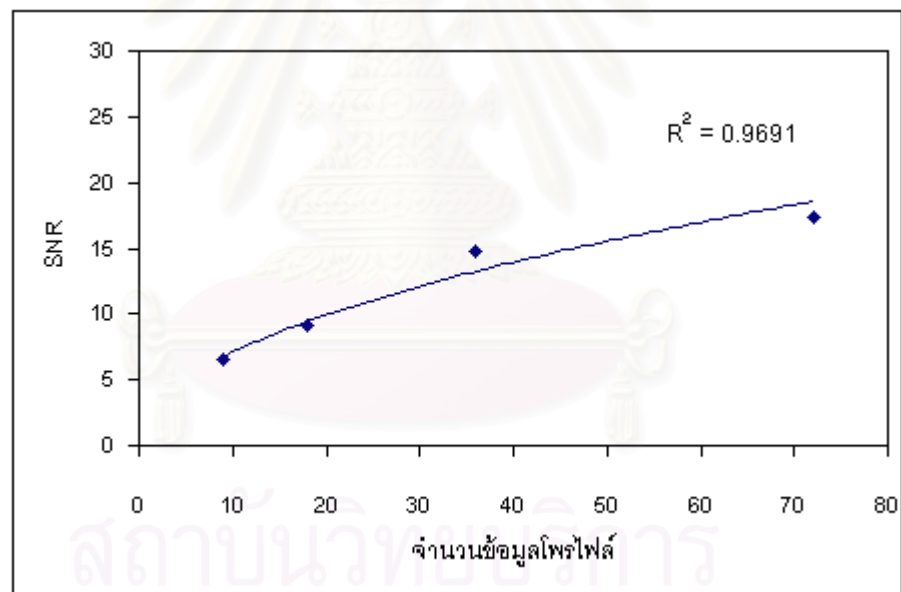
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่า Pixel noise และค่า SNR ของชิ้นงานทดสอบ A

จำนวนโพรไฟล์	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล*	Pixel noise	SNR	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
9	126.44	19.16	6.60	40 นาที
18	121.07	13.18	9.19	1 ชั่วโมง 20 นาที
36	150.11	10.12	14.83	2 ชั่วโมง 40 นาที
72	156.83	9.02	17.39	5 ชั่วโมง 20 นาที

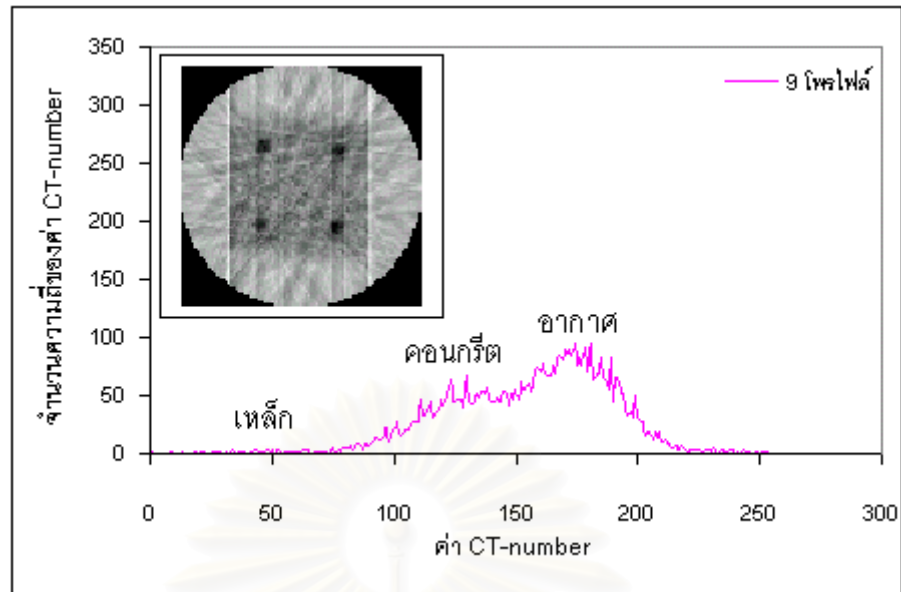
* คือ ค่าเฉลี่ยของ CT-number จากจำนวน 100 จุดภาพ ณ บริเวณเดียวกันทุกภาพ



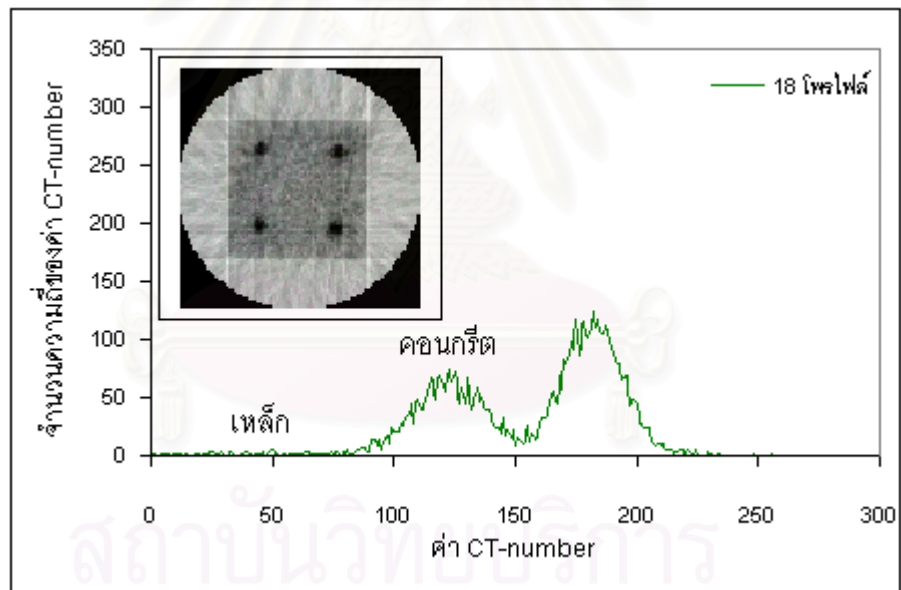
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลพิกเซลกับค่า Pixel noise



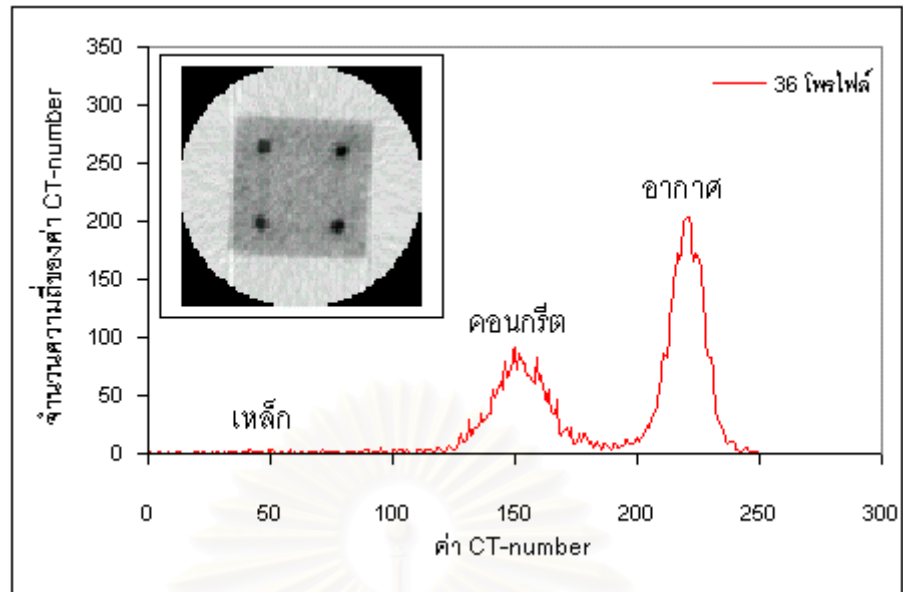
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลพิกเซลกับค่า SNR



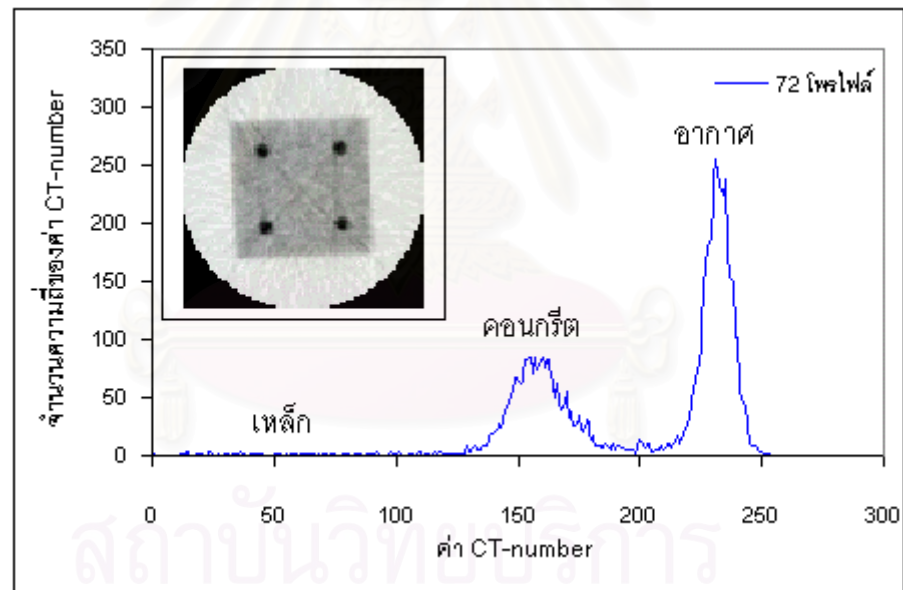
รูปที่ 4.4(ก) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโปรไฟล์เท่ากับ 9 โปรไฟล์



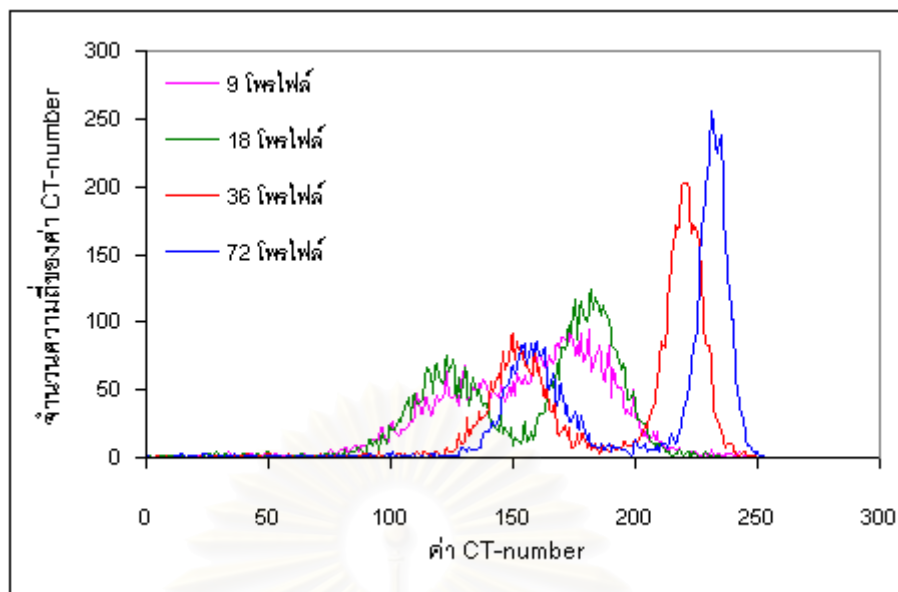
รูปที่ 4.4(ข) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโปรไฟล์เท่ากับ 18 โปรไฟล์



รูปที่ 4.4(ค) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 36 โพรไฟล์



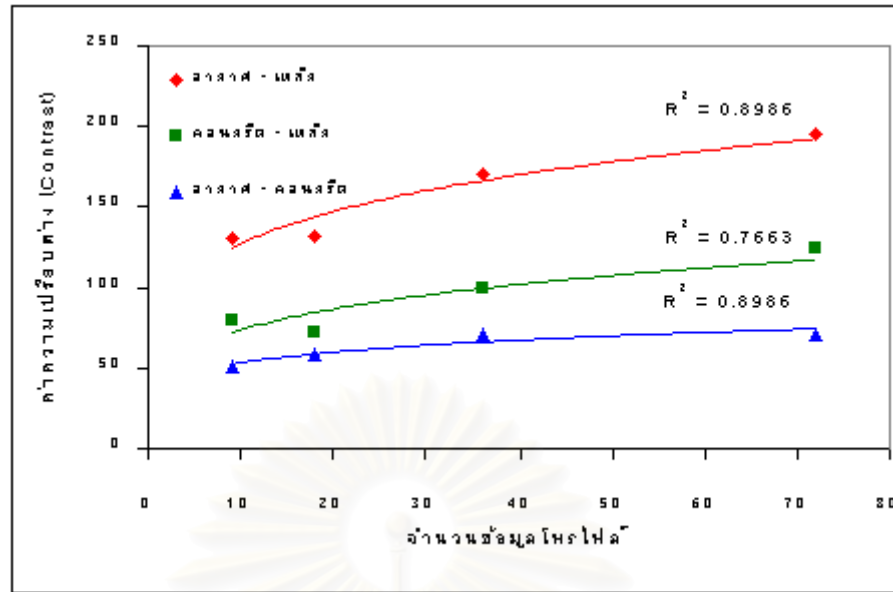
รูปที่ 4.4(ง) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 72 โพรไฟล์



รูปที่ 4.4(จ) กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าความเปรียบเทียบต่างของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ

จำนวนข้อมูลโพรไฟล์	ค่าความเปรียบเทียบต่าง (Contrast)		
	อากาศ - คอนกรีต	คอนกรีต - เหล็ก	อากาศ - เหล็ก
9	51	80	131
18	59	73	132
36	71	99	170
72	71	124	195



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลพิกเซลกับค่าความแปรปรวนต่าง

ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ด้วยจำนวนข้อมูลพิกเซลเท่ากับ 9, 18, 36 และ 72 พิกเซล ได้ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่มีความละเอียดของภาพขนาด 89 x 89 เรย์ซิม เท่ากันทุกภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อจำนวนข้อมูลพิกเซลมากขึ้น หรือสแกนด้วยมุมมองศาน้อย ๆ จะได้ภาพโทโมกราฟีที่มีคุณภาพดีขึ้นตามลำดับ และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ดีขึ้นด้วย แต่การเก็บข้อมูลพิกเซลจำนวนมาก ๆ นั้น จะใช้เวลาค่อนข้างมาก จะเห็นได้จากภาพโทโมกราฟีที่สร้างจากจำนวนข้อมูลพิกเซลเท่ากับ 72 พิกเซล จะให้รายละเอียดของภาพที่ดีที่สุด แต่ก็ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลพิกเซลมากที่สุด

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่า Pixel noise และค่า SNR พบว่า เมื่อจำนวนข้อมูลพิกเซลเพิ่มขึ้น ค่า Pixel noise จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันค่า SNR จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ค่า Pixel noise และค่า SNR สามารถบอกถึงคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้ คือถ้าภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า Pixel noise มากหรือมีค่า SNR น้อย แสดงว่าภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณภาพไม่ดี ความคมชัดของภาพไม่ดี มีอาทิแฟ็ค (artifact) เกิดขึ้นบนภาพมาก ผลการทดสอบเห็นได้ว่าภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลพิกเซลเท่ากับ 72 พิกเซล ซึ่งมีค่า Pixel noise เท่ากับ 9.02 และมีค่า SNR เท่ากับ 17.39 จะให้ภาพโทโมกราฟีที่มีคุณภาพดีที่สุด

ในรูปที่ 4.4(ก)-(จ) แสดงกราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ พบว่า เมื่อจำนวนข้อมูลโพรไฟล์มากขึ้น การกระจายตัวของข้อมูล CT-number จะลดลงทำให้เห็นความแตกต่างของข้อมูล CT-number ของอากาศ คอนกรีต และเหล็ก ชัดเจนมากขึ้น และจากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงค่าความเบี่ยงต่างของวัตถุภายในภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์ต่าง ๆ เมื่อจำนวนข้อมูลโพรไฟล์มากขึ้น ค่าความเบี่ยงต่างของวัตถุภายในภาพโทโมกราฟีจะมีค่ามากขึ้น เห็นได้จากภาพโทโมกราฟีที่จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 72 โพรไฟล์ กราฟ PDF มีการกระจายตัวของข้อมูล CT-number น้อยที่สุด มีค่าความเบี่ยงต่างของวัตถุภายในภาพมากที่สุด เป็นผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีความคมชัดและความเบี่ยงต่างดีที่สุด

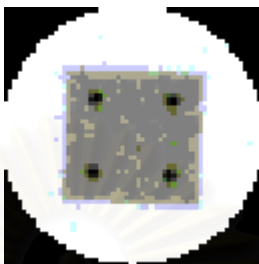
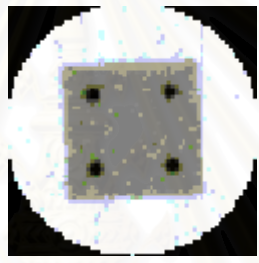
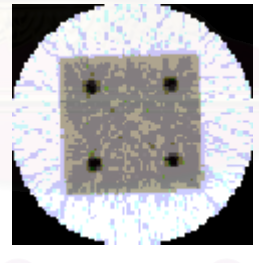
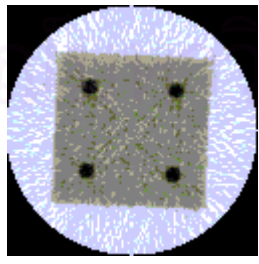
จากผลการทดสอบดังกล่าวในข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีเท่ากับ 72 โพรไฟล์ หรือกำหนดให้ระบบสแกนหมุนเปลี่ยนไปที่ละ 2.5 องศา เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพดีที่สุด และมีความคมชัดมากที่สุด

4.3 การทดสอบหาระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

การทดสอบหาระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ (เรย์ซั่ม) ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยอาศัยการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้ ด้วยการคำนวณหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี ซึ่งจะบอกถึงการให้รายละเอียดของวัตถุภายในภาพโทโมกราฟีดังกล่าว เนื่องจากภาพโทโมกราฟีที่นำมาเปรียบเทียบมีความละเอียดของจำนวนจุดภาพไม่เท่ากัน และโดยตามหลักการแล้วการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ด้วยระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพน้อย ๆ จะให้รายละเอียดของวัตถุภายในภาพที่ดีกว่า

ทำการทดสอบสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A โดยกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนหมุนเปลี่ยนไปที่ละ 2.5 องศา ทำการเก็บข้อมูลจนครบ 180 องศา จะได้ข้อมูลโพรไฟล์จำนวน 72 โพรไฟล์ และใช้เวลาในการวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซั่มเท่ากับ 3 วินาที ทำการปรับเปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่แต่ละเรย์ซั่มเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร จำนวนเรย์ซั่มเท่ากับ 125, 89, 71 และ 59 เรย์ซั่ม ตามลำดับ ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5

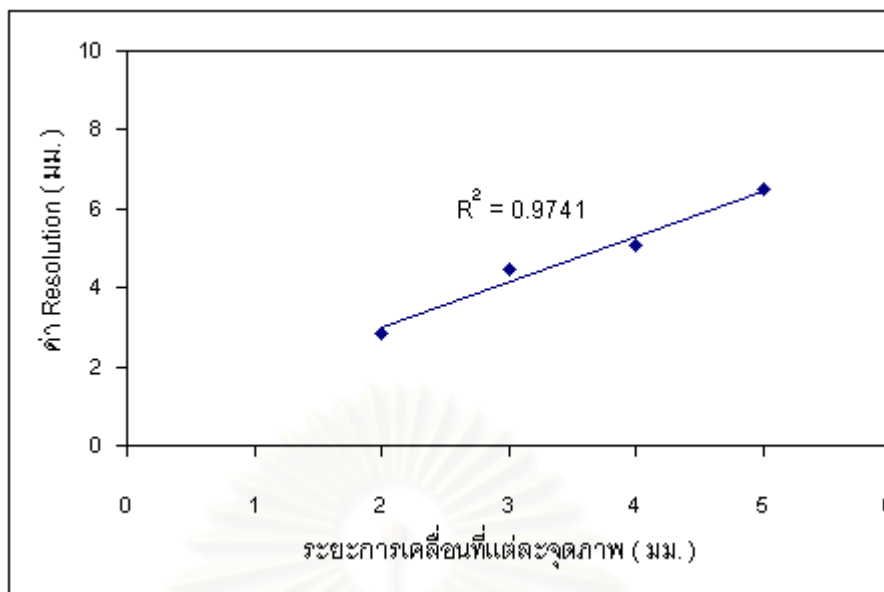
ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ

ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
5 มิลลิเมตร		ภาพที่ได้มีความมัวมาก เห็นเหล็กเสริมภายในได้ไม่ชัดเจน
4 มิลลิเมตร		ภาพมีความคมชัดมากขึ้น เห็นเหล็กเสริมได้ชัดเจนขึ้น
3 มิลลิเมตร		ภาพมีความคมชัด และมีความเปรียบต่างมากขึ้น เหล็กเสริมมีลักษณะค่อนข้างกลม
2 มิลลิเมตร		ภาพที่ได้มีคุณภาพดี มีความคมชัด และมีความเปรียบต่างมาก มองเห็นเหล็กเสริมมีลักษณะกลมมากขึ้น

จากภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ ในตารางที่ 4.5 นำมาคำนวณหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี ด้วยวิธี Edge Spread Function (ESF) โดยนำข้อมูลโปรไฟล์ของค่า CT-number ที่ตำแหน่งขอบของชิ้นงานทดสอบในภาพโทโมกราฟี มาคำนวณหาจำนวนเรย์ซึ่มที่ค่า CT-number เพิ่มขึ้นจาก 25% ไปถึง 75% โดยที่ค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของจำนวนเรย์ซึ่มที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างแต่ละจุดภาพ (ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ) ซึ่งผลการคำนวณหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ กับค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี แสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ

ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ (มม.)	ค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี (มม.)
2	2.84
3	4.47
4	5.08
5	6.50



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพกับค่า Resolution

จากภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพต่าง ๆ ในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพลดลง ภาพโทโมกราฟีที่ได้จะมีคุณภาพดีขึ้น และสามารถเห็นรายละเอียดของวัตถุภายในภาพได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากเมื่อระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพลดลง รายละเอียดที่ได้จากข้อมูลโพรไฟล์จะดีขึ้น และค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีที่ได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6

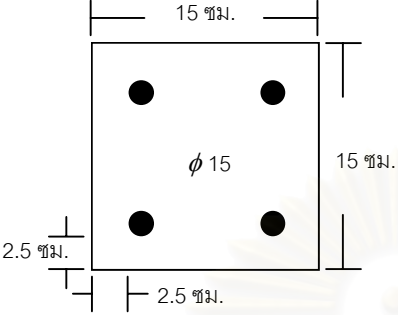
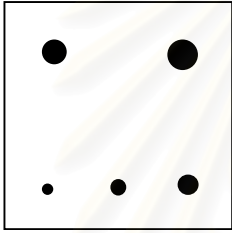
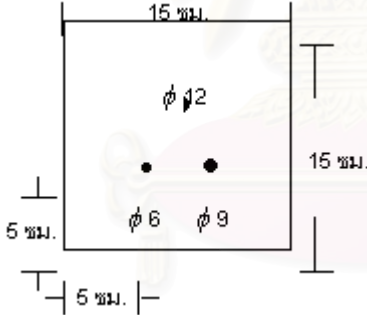
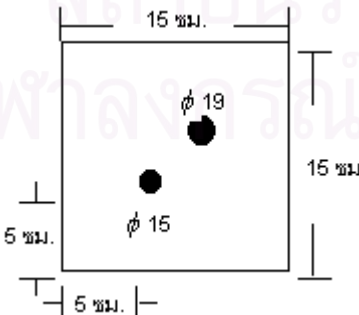
จากผลการทดสอบดังกล่าว ที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จะให้ภาพโทโมกราฟีที่มีความคมชัดที่สุด และสามารถเห็นเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตได้ชัดเจน และมีลักษณะกลมกว่าภาพโทโมกราฟีที่มีระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

4.4 การทดสอบการแจกแจงรายละเอียดของภาพโทโมกราฟี

4.4.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

เป็นตัวเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. ทุกชิ้นงาน แต่มีลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ

	แผนภาพชิ้นงานทดสอบ	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
A		<p>คอนกรีตขนาด 15 x 15 ซม. มีเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. จำนวน 4 เส้น โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>
B		<p>มีเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด วางเรียงกันดังรูป โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>
C		<p>มีเหล็กเส้นกลมขนาด 6, 9 และ 12 มม. โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 5 ซม.</p>
D		<p>มีเหล็กเส้นกลมขนาด 15 และ 19 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 5 ซม.</p>

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ (ต่อ)

	แผนภาพชิ้นงานทดสอบ	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
E		<p>เหล็กเส้นกลมขนาด 6 มม. มีการจัดวางเหล็กให้มีระยะห่างต่าง ๆ กัน ได้แก่ 1 เท่า และ 0.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก วางติดกัน และมัดรวมกัน ดังรูป</p>
F		<p>เหล็กเส้นกลมขนาด 9 มม. มีลักษณะการจัดวางเหมือนกันกับชิ้นงาน E ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>
G		<p>เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จัดวางเหมือนกันกับชิ้นงาน E ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>
H		<p>เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. จัดวางเหมือนกันกับชิ้นงาน E ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>

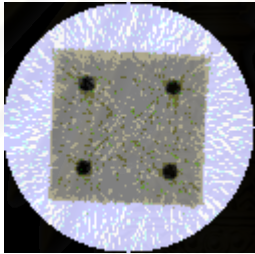
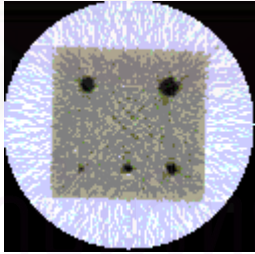
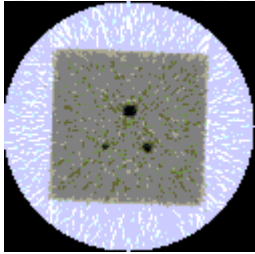
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ (ต่อ)

	แผนภาพชิ้นงานทดสอบ	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
I		<p>เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. จัดวางเหมือนกันกับชิ้นงาน E มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม.</p>
J		<p>ทำการหล่อคอนกรีตให้มีรูขนาด 19 มม. จำนวน 4 รู เพื่อเอาไว้ใส่เหล็กที่เกิดการกัดกร่อน ใช้ในการทดสอบหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต</p>
K		<p>หล่อคอนกรีตให้มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 9, 12, 15 และ 19 มม. ในตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป</p>
L		<p>มีเหล็กยื่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. และมีเหล็กปลอกขนาด 6 มม. รัศรอบเหล็กยื่น ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นเท่ากับ 2.5 ซม.</p>

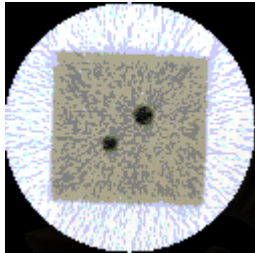
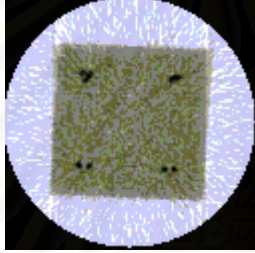
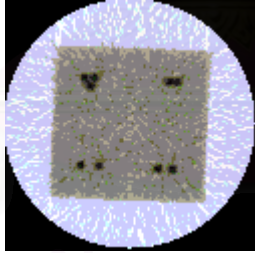
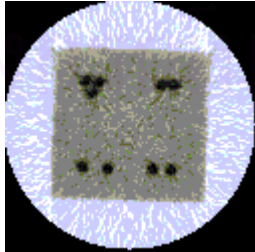
4.4.2 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ

ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L ใช้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 125 เรย์ซั้ม โดยสแกนด้วยมุมละ 2.5 องศา จำนวนข้อมูลโพรไฟล์เท่ากับ 72 โพรไฟล์ ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพเท่ากับ 2 มิลลิเมตร เวลาในการวัดความเข้มรังสีเท่ากับ 3 วินาทีต่อเรย์ซั้ม รวมใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์ทั้งหมดประมาณ 7 ชั่วโมง 30 นาที ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน A		ภาพที่ได้มีความคมชัด สามารถเห็นเหล็กเสริมมีลักษณะกลมชัดเจน
ชิ้นงาน B		ภาพที่ได้สามารถแจกแจงขนาดของเหล็กเสริมได้อย่างถูกต้อง แต่เหล็กเสริมขนาด 6 มม. จะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจนนัก
ชิ้นงาน C		มองเห็นเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน และอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ตารางที่ 4.8 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน D		ภาพที่ได้สามารถมองเห็นเหล็กเสริมมีลักษณะกลมได้ชัดเจน และอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง
ชิ้นงาน E		สามารถแยกแยะลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมภายในได้ แต่ไม่ค่อยชัดเจนเท่าไร โดยเฉพาะเหล็กเสริมที่วางติดกัน และมีดรวมกัน
ชิ้นงาน F		มองเห็นลักษณะการจัดเรียงของเหล็กได้ชัดเจนมากขึ้น แต่ยังไม่สามารถแยกแยะเหล็กเสริมที่วางติดกันได้
ชิ้นงาน G		สามารถแยกแยะลักษณะการจัดวางของเหล็กเสริมได้อย่างถูกต้องทุกลักษณะการจัดวาง

ตารางที่ 4.8 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน H		สามารถแจกแจงรายละเอียดการจัดวางของเหล็กเสริมได้อย่างถูกต้องและชัดเจนมาก มองเห็นเหล็กเสริมมีลักษณะค่อนข้างกลม
ชิ้นงาน I		มองเห็นการจัดวางของเหล็กเสริมได้ถูกต้องและชัดเจนมาก เหล็กเสริมมีลักษณะกลม
ชิ้นงาน J		มองเห็นช่องว่างภายในได้ชัดเจนและมีลักษณะกลมถูกต้อง
ชิ้นงาน K		สามารถแจกแจงขนาดของรูในคอนกรีตได้ถูกต้องและชัดเจน

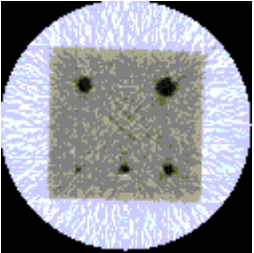
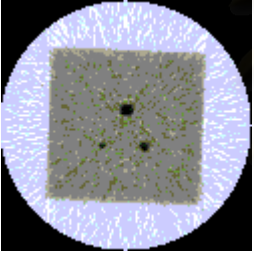
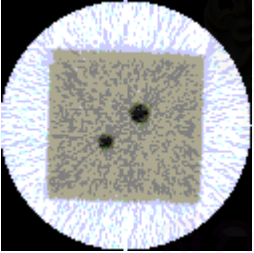
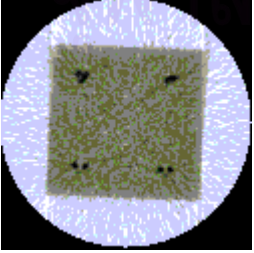
ตารางที่ 4.8 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง L (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน L		ภาพที่ได้สามารถมองเห็นเหล็กปลอกได้แต่ยังไม่ค่อยชัดเจน เนื่องจากระนาบการสแกนไม่อยู่ในระนาบของเหล็กปลอก
		เมื่อระนาบการสแกนเปลี่ยนไปสามารถมองเห็นเหล็กปลอกได้ครบทั้งปลอก และชัดเจนมากขึ้น

4.5 การทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

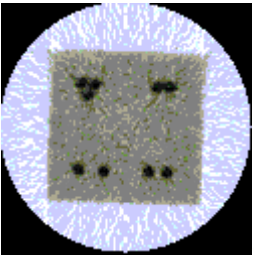
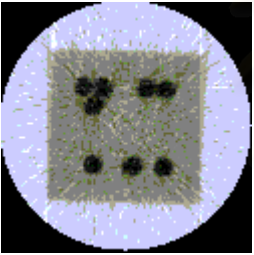
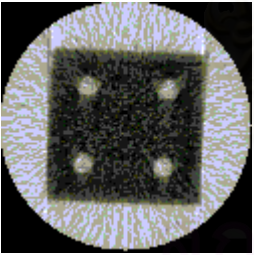
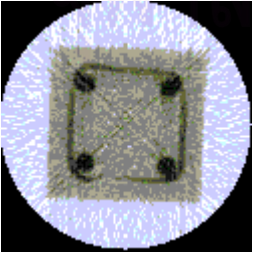
เป็นการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้น ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic 6.0) โดยเปรียบเทียบกับขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมจริงในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 x 15 ซม. โดยมีการจัดวางเหล็กเสริมในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และผลการทดสอบการหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 4.9 วิธีการใช้โปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ภาพโทโมกราฟี	ขนาดของเหล็กเสริม (มม.)			ตำแหน่งของเหล็กเสริม* (มม.)		
	ขนาดจริง	จากภาพ	ผิดพลาด	ระยะจริง	จากภาพ	ผิดพลาด
	6	6	0	25	26	+1
	9	8	-1			
	12	12	0			
	15	16	+1			
	19	20	+1			
	6	6	0	50	50	0
	9	8	-1			
	12	12	0			
	15	14	-1	50	50	0
	19	20	+1			
	6	6	0	25	24	-1
				6**	4**	-2**
				3**	2**	-1**

* ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก, ** ระยะการจัดวางเหล็กเสริม (ดูรายละเอียดในตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

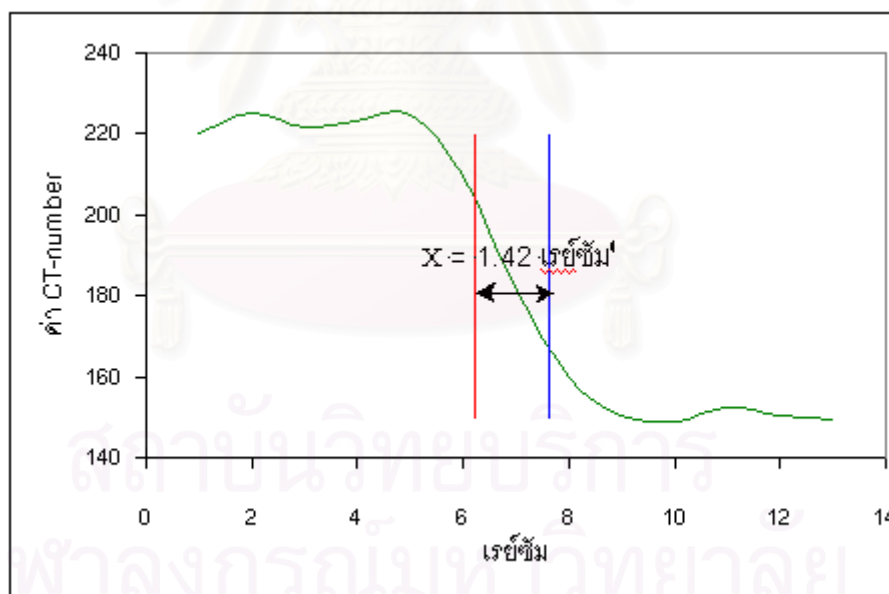
ภาพโทโมกราฟี	ขนาดของเหล็กเสริม (มม.)			ตำแหน่งของเหล็กเสริม (มม.)		
	ขนาดจริง	จากภาพ	ผิดพลาด	ระยะจริง	จากภาพ	ผิดพลาด
	12	12	0	25 12 6	24 14 6	-1 +2 0
	19	20	+1	25 19 10	26 20 10	+1 +1 0
	19	20	+1	25	26	+1
	6* 19	8* 20	+2* +1	19** 25	18** 26	-1** +1

* ขนาดของเหล็กปลอก, ** ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของเหล็กปลอก

จากผลการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมที่หาได้จากภาพโทโมกราฟีโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 มม. จากขนาดจริงที่วัดได้จากตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.6 การทดสอบหาค่ารีโซลูชันของระบบสแกน

การทดสอบหาค่ารีโซลูชัน (Resolution) ของระบบสแกนสำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยวิธี Edge Spread Function (ESF) โดยนำข้อมูลโปรไฟล์ของค่า CT-number ที่ตำแหน่งขอบของชิ้นงานทดสอบในภาพโทโมกราฟี มาคำนวณหาจำนวนเรย์ซั่มที่ค่า CT-number เพิ่มขึ้นจาก 25% ไปถึง 75% โดยที่ค่า Resolution จะมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเรย์ซั่มที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างแต่ละจุดภาพ (ในที่นี้คือ ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือชิ้นงานทดสอบ A ในตารางที่ 4.7 โปรไฟล์ของข้อมูล CT-number ของชิ้นงานทดสอบ A แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณหาค่า Resolution ด้วยวิธี ESF

จากรูปที่ 4.7 จำนวนเรย์ซั่มที่ค่า CT-number เพิ่มขึ้นจาก 25% ไปถึง 75% มีค่าเท่ากับ 1.42 เรย์ซั่ม ดังนั้นค่า Resolution ของระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีมีค่าเท่ากับ 2.84 มิลลิเมตร ซึ่งหมายความว่า จะสามารถมองเห็นวัตถุภายในภาพโทโมกราฟีได้ตั้งแต่ขนาด 2.84 มิลลิเมตรขึ้นไป ได้อย่างชัดเจน

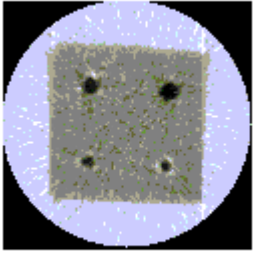
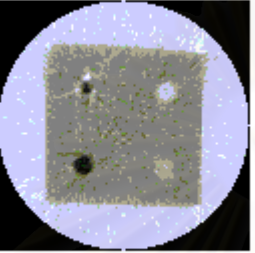
4.7 ทดสอบหาขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เป็นการทดสอบหาขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบขนาดของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนที่คำนวณหาได้จากภาพโทโมกราฟีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับขนาดของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่จริง (กำจัดสนิมออกจนหมด) ที่ได้จากการวัดด้วยเวอร์เนียร์ ในการกำจัดสนิมออกนั้นทำได้ด้วยการนำเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริกประมาณ 20 นาที จากนั้นทำการขัดสนิมออกด้วยแปรงอย่างระมัดระวัง และวัดขนาดเหล็กที่เหลืออยู่ด้วยเวอร์เนียร์โดยทำการวัดหลาย ๆ ค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม

ในการทดสอบนี้ได้มีการจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยเซลไฟฟ้าเคมี (เซลล์กัลวานิก) เนื่องจากข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการทดสอบจึงใช้เสาคอนกรีตที่หล่อให้มีรูไว้สำหรับใส่เหล็กเสริมที่ปริมาณการกัดกร่อนต่าง ๆ รายละเอียดและวิธีการเร่งการกัดกร่อนแสดงไว้ในภาคผนวก ก. เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ผลการทดสอบคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเหล็กเสริมที่ปริมาณการกัดกร่อนต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.10 และผลการทดสอบหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ได้จากภาพโทโมกราฟี แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเหล็กเสริมที่ปริมาณการกัดกร่อนต่าง ๆ

ภาพลำดับที่	ภาพโทโมกราฟี	รายละเอียดของภาพ
1		จากภาพตำแหน่งที่ 1 เป็นเหล็กที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ส่วนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 เหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนที่ปริมาณการกัดกร่อนต่าง ๆ กัน

2		ตำแหน่งที่ 5 เป็นเหล็กที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ส่วนในตำแหน่งอื่น ๆ เหล็กเสริมมีการกัดกร่อนที่ปริมาณการกัดกร่อนต่าง ๆ กัน
3		ได้มีการจำลองการเกิดสนิม 100% โดยการนำผงสนิมใส่ลงไปในส่วนตำแหน่งที่ 12 จากภาพที่ได้สามารถมองเห็นความแตกต่างระหว่างเหล็กที่ไม่เกิดการกัดกร่อนกับผงสนิมได้อย่างชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับอากาศ (#9) สามารถแยกแยะได้โดยการตรวจสอบด้วยค่า CT-number

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ได้จากภาพโทโมกราฟี

ตำแหน่งของเหล็กเสริม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม			ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (%)		
	จากการวัด	จากภาพ	ผิดพลาด	จากการวัด	จากภาพ	ผิดพลาด
# 1	19.00	18.00	-1.00	0.00	0.00	0.00
# 2	18.04	17.00	-1.04	5.07	5.56	+0.49
# 3	17.64	17.00	-0.64	7.17	5.56	-1.61
# 4	15.95	15.00	-0.95	16.05	16.67	+0.62
# 5	19.00	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00
# 6	17.84	18.00	+0.16	6.12	5.26	-0.86
# 7	12.48	13.00	+0.52	34.34	31.58	-2.76
# 8	11.60	11.00	-0.60	38.95	42.10	+3.15
# 11	19.00	20.00	+1.00	0.00	0.00	0.00
# 10	12.48	13.00	+0.52	34.34	35.00	+0.66

ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคำนวณหาได้จากสมการ

$$\% \text{ Corrosion} = \frac{(D_1 - D_2)}{D_1} \times 100$$

โดยที่	% Corrosion	คือ ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (%)
	D ₁	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมก่อนเกิดการกัดกร่อน
	D ₂	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมหลังเกิดการกัดกร่อน

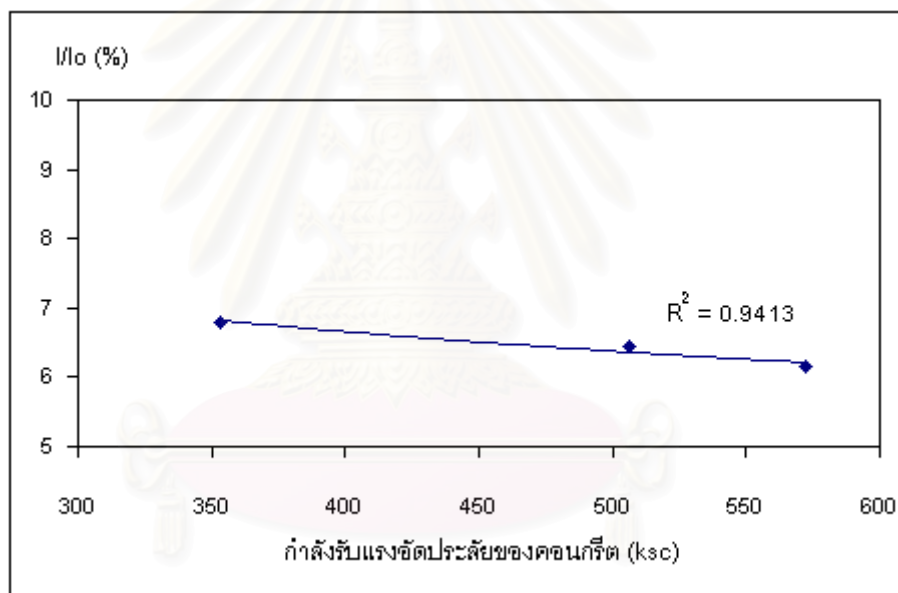
จากตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบหาขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ได้จากภาพโทโมกราฟี พบว่าในการคำนวณหาขนาดของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 มม. จากขนาดที่วัดได้จากเวอร์เนียร์ และสำหรับการคำนวณหาปริมาณการกัดกร่อนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 5 % จากปริมาณการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากขนาดที่วัดได้ด้วยเวอร์เนียร์ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นจากการวัดด้วยเวอร์เนียร์ได้ เนื่องจากการกัดกร่อนอย่างไม่สม่ำเสมอของเหล็กเสริม

4.8 การตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้

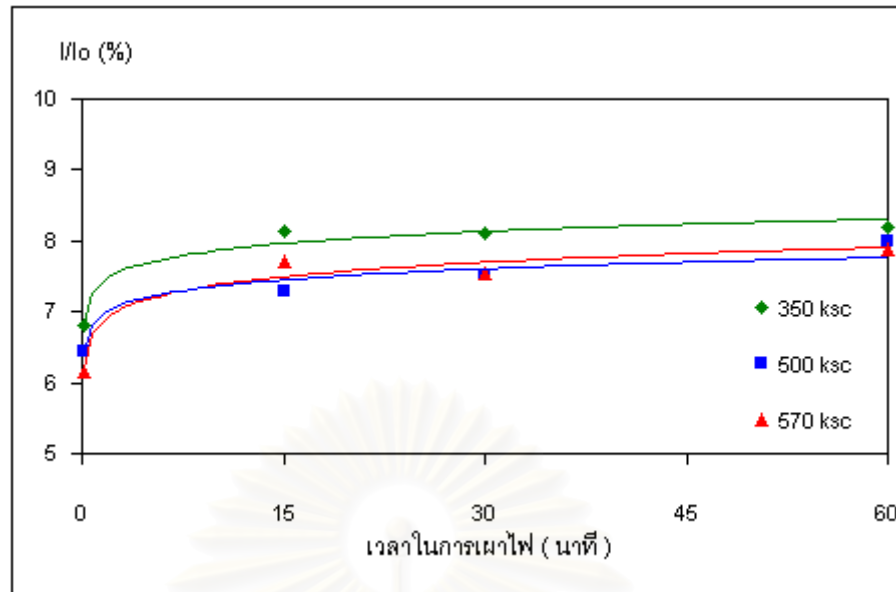
เป็นการตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้ โดยเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (percent of transmission ; I/I_0) ของคอนกรีตทั้งก่อนและภายหลังถูกไฟไหม้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นลูกบาศก์คอนกรีตขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. ที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่าง ๆ กัน และมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างมวลรวมหยาบและเพสต์ (ซีเมนต์+ทราย+น้ำ) (aggregate / paste ratio) ต่าง ๆ กัน วิธีการทดสอบ นำคอนกรีตทั้งหมดไปสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ของความเข้มรังสี จากนั้นนำคอนกรีตไปเผาไฟโดยใช้อุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM E-119 เป็นเวลาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 15, 30 และ 60 นาที แล้วนำไปสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยต่าง ๆ กัน ภายหลังจากไฟไหม้

เวลาในการเผาไฟ (นาที)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0)		
	$f'_c = 350$ ksc	$f'_c = 500$ ksc	$f'_c = 570$ ksc
0	6.80	6.45	6.15
15	8.13	7.30	7.70
30	8.11	7.51	7.55
60	8.19	7.98	7.87



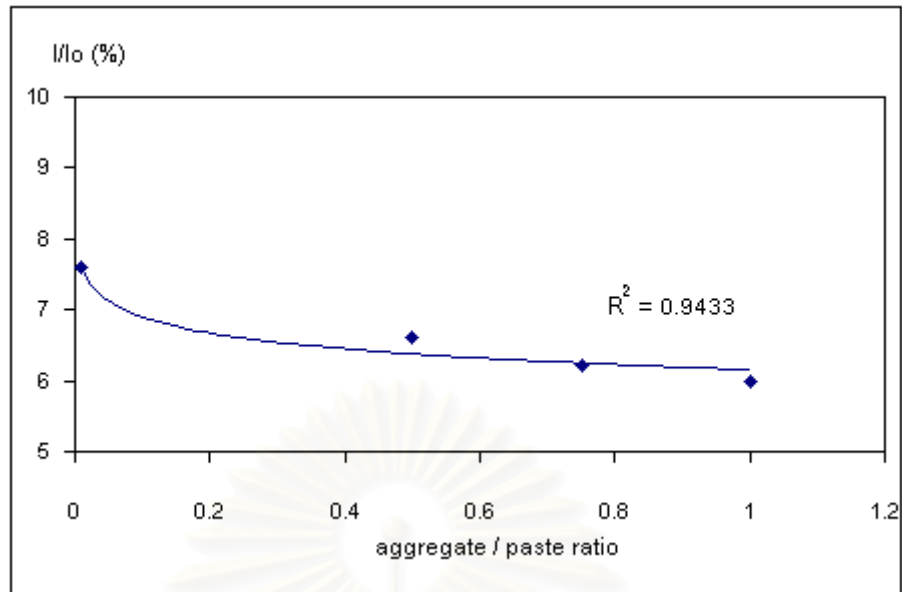
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0)



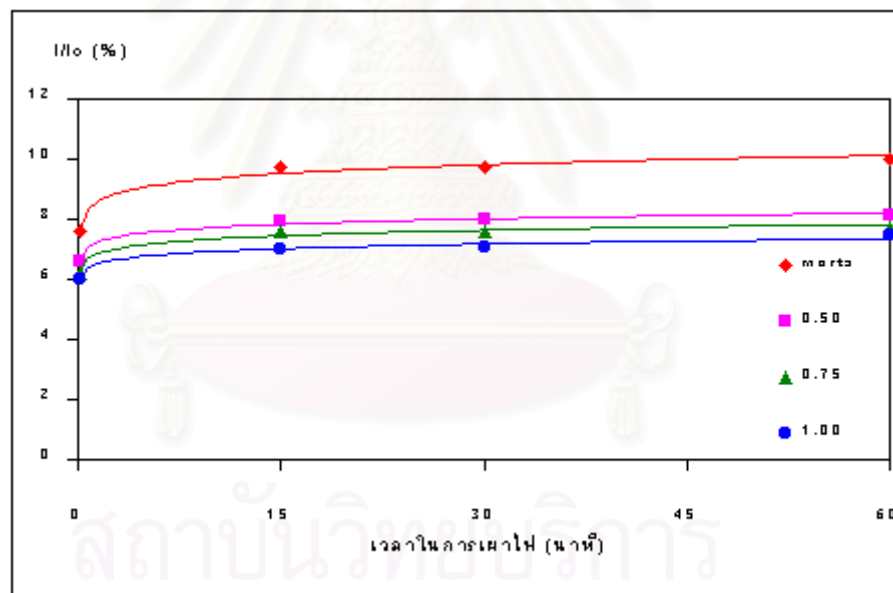
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาไฟกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0) สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบคอนกรีตที่มี agg./paste ratio ต่าง ๆ กัน ภายหลังจากไฟไหม้

เวลาในการเผาไฟ (นาทีก)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0)			
	aggregate / paste ratio			
	0 (morta)	0.50	0.75	1.00
0	7.59	6.61	6.22	5.98
15	9.75	7.94	7.57	7.00
30	9.72	8.01	7.61	7.07
60	10.02	8.12	7.76	7.46



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง agg./paste ratio กับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I₀)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาไฟกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I₀) สำหรับคอนกรีตที่มีค่า agg./paste ratio ต่าง ๆ กัน

จากกราฟในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 พบว่า คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0) จะมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่มีค่า $agg./paste$ ratio เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสี (I/I_0) จะมีค่าลดลงด้วย เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

จากกราฟในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.11 พบว่า คอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้เป็นเวลานานขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสีจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที สาเหตุที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นเนื่องจากคอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้ น้ำภายในช่องว่างของคอนกรีตจะพยายามเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกทำให้เกิดความดันขึ้นภายในของคอนกรีต และความดันที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว เป็นผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตจึงมีค่าลดลง รังสีจึงทะลุผ่านคอนกรีตมากขึ้น

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา เพื่อใช้ในการตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้ ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาที่ใช้เป็นระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ ระบบวัดรังสีประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ความแรง 30 มิลลิวินาที ให้รังสีแกมมาพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และหัววัดรังสีแบบซิลทิเลชันชนิดโซเดียมไอโอไดต์ (ทัลเลียม) 2×2 นิ้ว โดยจัดวางระบบวัดให้ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกัน และมีตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ตรงกลางระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการวิจัยนี้มีขนาด 15×15 ซม. ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการทดสอบหาเวลาวัดที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าการตั้งเวลาวัดความเข้มรังสีมาก ๆ จะทำให้ความแปรปรวนของข้อมูลโพรไฟล์ลดลง ซึ่งจะทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เวลาในการวัดความเข้มรังสีแต่ละเรย์ซั่มเท่ากับ 3 วินาที สำหรับเสาคอนกรีตขนาด 15×15 ซม. ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมงคล^[2]

5.1.2 ผลการทดสอบหาจำนวนข้อมูลโพรไฟล์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี แสดงให้เห็นว่า เมื่อจำนวนข้อมูลโพรไฟล์มากขึ้น หรือกำหนดให้ระบบสแกนหมุนเปลี่ยนไปด้วยมุมน้อย ๆ จะให้รายละเอียดของภาพโทโมกราฟีดีกว่าจำนวนข้อมูลโพรไฟล์น้อย ๆ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีเท่ากับ 72 โพรไฟล์ หรือกำหนดให้ระบบสแกนหมุนเปลี่ยนไปที่ละ 2.5 องศา ซึ่งให้ภาพโทโมกราฟีที่สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพดีที่สุด และมีความคมชัดมากที่สุด

5.1.3 ผลการทดสอบหาระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี พบว่า เมื่อระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพลดลง ภาพโทโมกราฟีที่ได้จะมีคุณภาพดีขึ้น ค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าภาพโทโมกราฟี

ที่ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพเท่ากับ 2 มม. สามารถเห็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้ชัดเจน และมีลักษณะกลมกว่าที่ได้จากภาพโทโมกราฟีที่ระยะการเคลื่อนที่มีระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะการเคลื่อนที่แต่ละจุดภาพเท่ากับ 2 มม. ในการเก็บข้อมูลโพไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

5.1.4 การทดสอบการแจกแจงรายละเอียดของภาพโทโมกราฟี เป็นการทดสอบขีดความสามารถของระบบสแกนในการแจกแจงรายละเอียดของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตที่มีลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ภาพโทโมกราฟีที่ได้สามารถแจกแจงรายละเอียดและตำแหน่งของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตได้อย่างถูกต้องและชัดเจน และยังสามารถเห็นเหล็กปลอกขนาด 6 มม. ในเสาคอนกรีตได้อย่างชัดเจนอีกด้วย

5.1.5 ผลการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาพโทโมกราฟีโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น พบว่า สามารถบอกขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้ถูกต้อง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 มม. จากขนาดจริงที่วัดได้จากตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.1.6 จากผลการทดสอบพบว่าระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยวิธี Edge Spread Function (ESF) พบว่า ระบบสแกนมีค่า Resolution เท่ากับ 2.84 มิลลิเมตร ซึ่งหมายความว่า จะสามารถมองเห็นวัตถุภายในภาพโทโมกราฟีได้ตั้งแต่ขนาด 2.84 มิลลิเมตรขึ้นไป ได้อย่างชัดเจน

5.1.7 ผลการทดสอบหาขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาพโทโมกราฟี โดยการเปรียบเทียบขนาดของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากภาพโทโมกราฟีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับขนาดของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่จริง (กำจัดสนิมออกจนหมด) ที่ได้จากการวัดด้วยเวอร์เนียร์ พบว่า สามารถบอกขนาดและปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้ค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยในการคำนวณหาขนาดของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 มม. จากขนาดที่วัดได้จากเวอร์เนียร์ และสำหรับการคำนวณหาปริมาณการกัดกร่อนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ จากปริมาณการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากขนาดที่วัดได้ด้วยเวอร์เนียร์ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นจากการวัดด้วยเวอร์เนียร์ได้ เนื่องจากการกัดกร่อนอย่างไม่สม่ำเสมอของเหล็กเสริม

5.1.8 ผลการตรวจสอบสภาพของคอนกรีตภายหลังถูกไฟไหม้ โดยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสีของคอนกรีตทั้งก่อนและหลังถูกไฟไหม้ พบว่า คอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้เป็นเวลานานขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสีจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที สาเหตุที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้ น้ำภายในช่องว่างของคอนกรีตจะพยายามเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกทำให้เกิดความดันขึ้นภายในช่องว่างของคอนกรีต และความดันที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว เป็นผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตจึงมีค่าลดลง รังสีจึงทะลุผ่านคอนกรีตมากขึ้น

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาและวิจัยสามารถวิจารณ์ผลการวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถใช้ตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้ถูกต้อง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 มม. ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของระบบสแกนที่ใช้งานมานาน

5.2.2 ในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้น จะใช้เวลาทั้งหมดเท่ากับ 7 ชั่วโมง 30 นาที สำหรับจำนวนโพรไฟล์ 72 โพรไฟล์ ซึ่งนานมาก แต่เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่มีคุณภาพดีและสามารถใช้ตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และเนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยมากนัก เพราะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.2.3 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง

5.2.4 ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อการทดสอบในภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและวิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

5.3.1 ควรพัฒนาและปรับปรุงให้ระบบสแกนสามารถผู้ใช้ตรวจสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 x 20 ซม. โดยต้องพิจารณาเลือกพลังงาน และความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสีให้มีความเหมาะสมกับขนาดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้ภาพที่ให้รายละเอียดที่ดี และลดเวลาในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์

5.3.2 ควรปรับปรุงอุปกรณ์จำกัดลำรังสีหน้าหัววัดรังสีให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่สามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานได้ดีขึ้น

5.3.3 ควรพัฒนาระบบสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ให้มีขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก รวมทั้งประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถสแกนผนังคอนกรีตได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการตรวจสอบในภาคสนาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Skoulikidis, T., Marinakis, D., and Batis, G. X-Ray Permeability of Corrosion Products as a Measure of the Rate of Corrosion of Rebars and Prediction of Concrete Cracking. ASTM STP 906, 1986.
- [2] มงคล วรรณประภา. การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- [3] สุพร กุลวัฒน์ชัย. การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [4] ประสิทธิ์ สิริทิพย์รัศมี. การพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [5] ASTM. Metal Test Methods and Analytical Procedure (E 1441-97). Volume 03.03.1998 Annual Book of ASTM Standards section 3. Easton, MD, USA, 1998.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

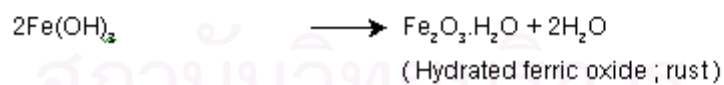
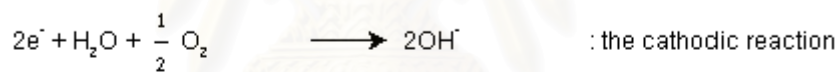
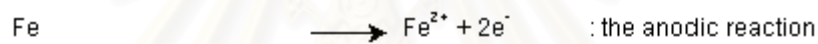
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การกัดกร่อน (Corrosion)

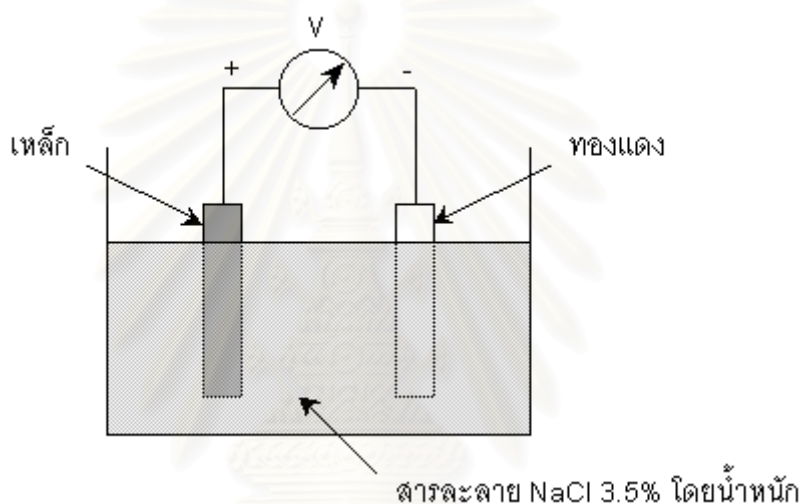
การกัดกร่อน หมายถึง การเสื่อมสภาพของโลหะหรือโลหะผสมในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อให้เกิดคราบเซลล์เคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน โดยโลหะที่เกิดการกัดกร่อนจะเป็นฝ่ายเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือให้อิเล็กตรอน และมีระบบรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้แก่ ความชื้น หรือน้ำ หรือสารเคมีต่าง ๆ ที่สัมผัสโลหะอยู่

สนิมเหล็ก (Rust) เป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก เกิดจากโลหะเกิดการกัดกร่อนแล้วกลายเป็น อีออนเหล็ก (Fe^{2+}) ซึ่งทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศหรือน้ำ และออกซิเจน เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ ดังนี้



การเกิดสนิมที่ผิวหน้าของเหล็กนั้น จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเหล็กกลายเป็นสนิมทั้งหมด อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสนิมนั้น เรียกว่า อัตราการกัดกร่อน ซึ่งหมายถึง อัตราการเสื่อมสภาพของโลหะหรือโลหะผสมในสิ่งแวดล้อมนั้นในช่วงเวลาหนึ่ง อัตราการกัดกร่อนจะเปลี่ยนไปในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ในน้ำหรือในน้ำทะเล ก็มีผลให้โลหะมีค่าอัตราการกัดกร่อนแตกต่างกันแม้ในสิ่งแวดล้อมเดียวกัน แต่มีสมบัติต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และความเร็วของสารละลายที่สัมผัสกับโลหะต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการเกิดการกัดกร่อน โดยเร่งการกัดกร่อนของเหล็กด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี หรือเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) ด้วยการนำเหล็กที่ต้องการเร่งการกัดกร่อนวางอยู่ในเซลล์กัลวานิก ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยที่เหล็กจะเป็นขั้วแอโนด แผ่นทองแดงเป็นขั้วคาโทด และมีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยน้ำหนัก เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จากนั้นทำการให้ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเร่งการกัดกร่อน หรือที่เรียกว่า กระแสการกัดกร่อน (Corrosion current)



รูปที่ ก.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า หรือเซลล์กัลวานิก

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนและน้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อน สามารถคำนวณหาได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta W = \frac{AIt}{ZF} \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่	ΔW คือ	น้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อน
	A คือ	เลขอะตอมของเหล็ก (56)
	I คือ	กระแสการกัดกร่อน (A)
	Z คือ	valency of the reacting electrode (ของเหล็กมีค่าเท่ากับ 2)
	F คือ	ค่าคงที่ของ Faraday (96,500 A.s)

น้ำหนักของเหล็กที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อนยังสามารถอธิบายได้จากสมการ

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

โดยที่

- a คือ พื้นที่ผิวของเหล็กก่อนการกัดกร่อน (cm^2)
- δ คือ เหล็กที่หายไป (cm)
- γ คือ ความหนาแน่นของเหล็ก (g/cm^3)

กระแสการกัดกร่อนที่ป้อนให้กับเซลล์เคมีไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ

$$I = i a \quad (ก.3)$$

โดยที่ i คือ ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (A/cm^2)

แทนค่า สมการ (ก.2) และ (ก.3) ลงในสมการ (ก.1) จะได้

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

แทนค่า A , $\gamma = 7.86 \text{ g/cm}^3$, Z และ F ในสมการ (ก.4) กำหนดให้ R แทนเหล็กที่หายไปต่อปี (cm/year) และ $t = 1$ ปี จะได้

$$R = 1156 i \quad (ก.5)$$

พิจารณาการกัดกร่อนเมื่อเวลาผ่านไป T ปี จะได้เหล็กที่หายไปมีเท่ากับ RT (cm) ดังนั้น

$$\% \text{ การลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กใน } T \text{ ปี} = \frac{2 R T}{D} \times 100 \quad (ก.6)$$

แทนค่า R จากสมการ (ก.5) ลงในสมการ (ก.6) จะได้

$$\% \text{ การลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก} \left(\frac{2 R T}{D} \right) \% = 2312 i \frac{T}{D} \quad (\text{ก.7})$$

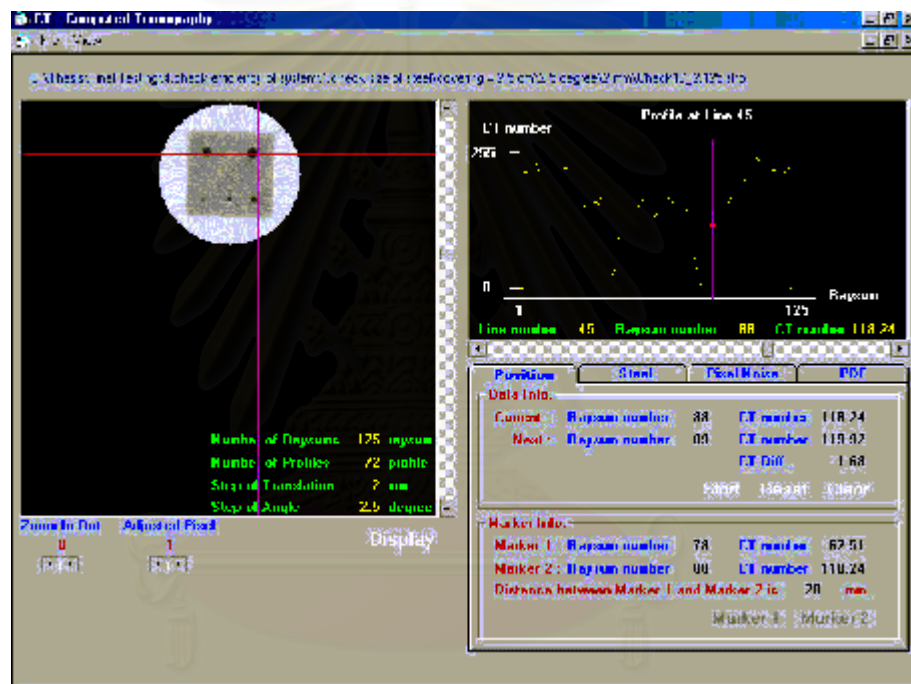
จากสมการ (ก.7) ทำให้สามารถทำนายน้ำหนักของเหล็กที่หายไปและเปอร์เซ็นต์การลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กได้ ในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน $(i) = 13.5 \text{ mA/cm}^2$ ในการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 19 มม. ความยาว 15 ซม. มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 89.54 ซม.^2 จากสมการ (ก.3) กระแสการกัดกร่อนที่ป้อนให้กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีจึงใช้ประมาณ 1.2 A และเมื่อพิจารณาจากสมการ (ก.7) เห็นได้ว่าการลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กที่จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ และเพื่อให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนด้วยอัตราการกัดกร่อนคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนกระแสการกัดกร่อนให้กับเซลล์ไฟฟ้าให้มีกระแสที่มีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทำการเร่งการกัดกร่อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริม

ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากภาพโทโมกราฟีนั้น สามารถหาได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual Basic 6.0) ดังแสดงในรูปที่ ข.1



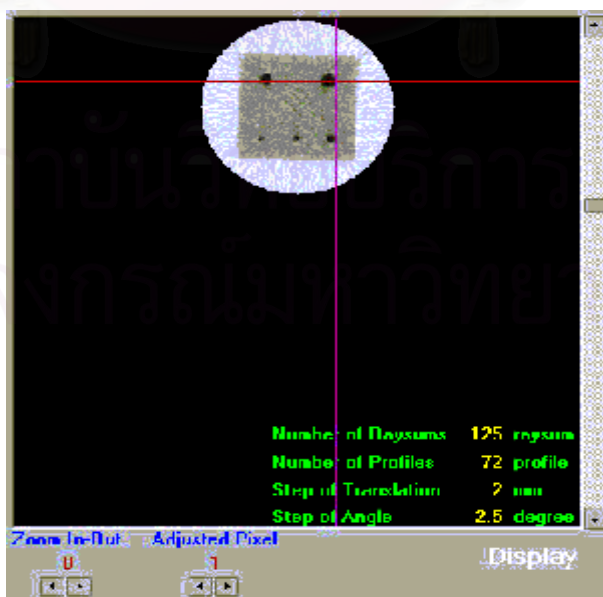
รูปที่ ข.1 โปรแกรมสำหรับใช้คำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้วิธีการนับจำนวนจุดภาพระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่งบนภาพโทโมกราฟี ซึ่งระยะทางจริงของวัตถุจะมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนจุดภาพระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่งกับระยะห่างแต่ละจุดภาพ (ในงานวิจัยนี้คือ ระยะการเคลื่อนที่แต่ละเรย์ซัม)

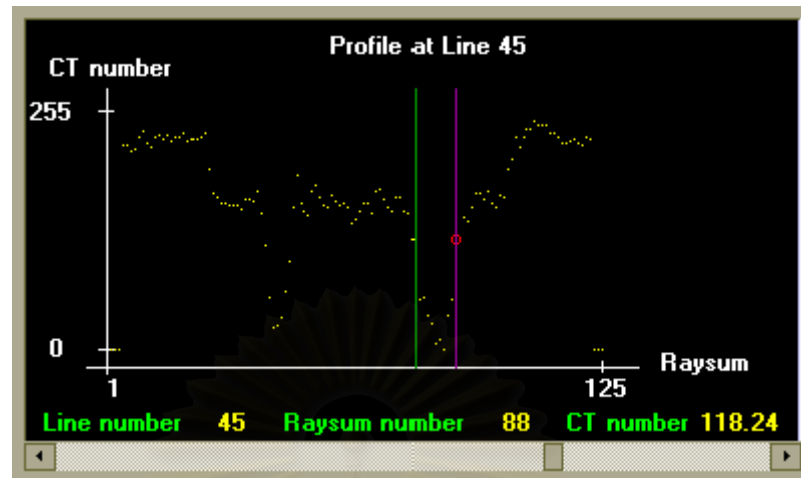
ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต ใช้ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน B ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตขนาด 15 x 15 ซม. มีเหล็กเสริมขนาด 6, 9, 12, 15 และ 19 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5 ซม. โดยมีวิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งดังต่อไปนี้

1. คลิกเมนู File เลือก Open เพื่อทำการเปิดไฟล์ภาพโทโมกราฟีที่ต้องการ
2. กดปุ่ม Display เพื่อแสดงภาพโทโมกราฟี และข้อมูลโพรไฟล์ ในรูปที่ ข.2 และรูปที่ ข.3
3. เลือกแท็บ Position เพื่อเข้าสู่หน้าต่างโปรแกรมหาขนาดและตำแหน่ง
4. เลื่อน Vertical Scrollbar เพื่อเลือกตำแหน่งที่ต้องการหาขนาดและตำแหน่ง
5. กดปุ่ม Star ในแท็บ Position จะปรากฏ vertical line สีเขียว ในหน้าต่างที่แสดงภาพโทโมกราฟี
6. เลื่อน Horizontal Scrollbar เพื่อเลือกหาตำแหน่งที่ต้องการจะหาขนาดและตำแหน่ง จากนั้นกดปุ่ม Marker 1 เพื่อระบุตำแหน่งแรกให้กับโปรแกรม
7. เมื่อกดปุ่ม Marker 1 เพื่อระบุตำแหน่งแรกแล้วจะปรากฏ vertical line สีชมพู ใช้สำหรับเลือกหาตำแหน่งที่สองที่ต้องการหาขนาดและตำแหน่ง
8. จากนั้นกดปุ่ม Marker 2 เพื่อระบุตำแหน่งที่สองให้กับโปรแกรม
9. โปรแกรมจะคำนวณหาระยะห่างระหว่าง Marker 1 และ Marker 2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับระยะทางหรือขนาดจริงของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ ข.4

จากโปรแกรมสามารถคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตจากภาพโทโมกราฟีได้ถูกต้อง (ผลการทดสอบแสดงในบทที่ 4)



รูปที่ ข.2 หน้าต่างสำหรับแสดงภาพโทโมกราฟี



รูปที่ ข.3 หน้าต่างสำหรับแสดงข้อมูลโพรไฟล์



รูปที่ ข.4 หน้าต่างแท็บ Position สำหรับการคำนวณหาขนาดและตำแหน่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบัณฑิต ลีลัคนานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ.2519 จังหวัดอุดรธานี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2541 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหา บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย