

การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้
สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



นายสุรกิจ ชาวแผ้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MOBILE LOW ENERGY GAMMA-RAY SCANNING SYSTEM
FOR COMPUTED TOMOGRAPHY



Mr. Surakit Khowprew

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

510808

สุรกิจ ขาวแผ้ว : การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้
 สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. (DEVELOPMENT OF A MOBILE LOW
 ENERGY GAMMA-RAY SCANNING SYSTEM FOR COMPUTED TOMOGRAPHY)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.
 สมยศ ศรีสถิตย์ 78 หน้า.

ได้พัฒนาระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้
 สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีเพื่อใช้ในงานด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้
 รังสีแกมมาพลังงาน 59.5 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ความแรง 100 mCi และหัววัด
 รังสีแกมมา CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตร ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ระบบวัดรังสีแกมมา ระบบ
 กลสำหรับสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยสามารถสแกนเก็บข้อมูลโปร-
 ไฟล์ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 20 เซนติเมตร จากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ตัวอย่าง
 เสาไม้ ท่อปูนซีเมนต์ และท่ออลูมิเนียม พบว่าภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ
 โดยมีความคมชัดเท่ากับ 4.53 มิลลิเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4970656121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : COMPUTED TOMOGRAPHY / NONDESTRUCTIVE TESTING

SURAKIT KHOWPREW : DEVELOPMENT OF A MOBILE LOW ENERGY
GAMMA-RAY SCANNING SYSTEM FOR COMPUTED TOMOGRAPHY.

ADVISOR : ASST.ATTAPORN PATTARASUMUNT, CO-ADVISOR :
ASSOC.PROF.SOMYOT SRISATIT, 78 pp.

A mobile low energy gamma-ray scanning system for computed tomography was developed using 59.5 keV gamma-ray from 100 mCi Am-241 source and 5 mm CdTe semiconductor detector in order to use in nondestructive testing. The developed system consisted of a gamma-ray measuring system, a mechanical scanning system and a developed software which could collect profile data of specimens with diameter smaller than 20 cm. From collected profile data of wood, cement duct and aluminum duct specimens, the tomographic image quality was to be within satisfactory level with sharpness of 4.53 mm.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : NUCLEAR TECHNOLOGY.....

Field of Study : NUCLEAR TECHNOLOGY.....

Academic Year : 2008.....

Student's Signature 

Advisor's Signature 

Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย

สำหรับความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ คำแนะนำที่มอบให้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และรองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ถวายกำลังใจและให้กำลังใจ

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า บิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอน และน้องๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1 หลักการเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	5
2.1 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	7
2.1 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี.....	17
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี.....	21
3. ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	23
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.2 การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	24

บทที่	หน้า
3.3 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบสแกนและรับข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการ คำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	32
4. การทดสอบการทำงานของระบบ และผลการทดสอบ.....	38
4.1 การทดสอบระบบกล.....	38
4.2 การทดสอบระบบวัดรังสีแกมมา.....	41
4.3 การทดสอบเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	42
4.4 การทดสอบหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการวัด และจำนวนเรย์ซั่มในการ เก็บข้อมูลโปรไฟล์ สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	47
4.5 การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด.....	50
4.6 การออกแบบชิ้นงานทดสอบ และผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของ ชิ้นงานทดสอบ.....	52
4.7 การทดสอบการใช้งานภาคสนาม และผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	56
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงตำแหน่งของกลุ่มสัญญาณ Address เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อพอร์ตนาน.....	30
4.1	ผลการทดสอบระบบกล.....	40
4.2	แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซึ่มต่าง ๆ.....	47
4.2	แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซึ่มต่าง ๆ (ต่อ)..	48
4.2	แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซึ่มต่าง ๆ (ต่อ)..	49
4.2	แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซึ่มต่าง ๆ (ต่อ)..	50
4.3	ชิ้นงานทดสอบสำหรับระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	52
4.3	ชิ้นงานทดสอบสำหรับระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์ (ต่อ).....	53
4.4	ผลการทดสอบภาพโทโมกราฟีด้วยระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ.....	54
4.4	ผลการทดสอบภาพโทโมกราฟีด้วยระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (ต่อ).....	55
4.5	ตัวอย่างงานภาคสนาม.....	57
4.6	ผลการทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟี ในการใช้งานภาคสนาม.....	58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ระบบสแกนลำรังสีแคบ.....	6
2.2	ระบบสแกนลำรังสีรูปพัด.....	6
2.3	ระบบสแกนลำรังสีรูปกรวย.....	7
2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับคุณสมบัติของ ตัวกลางและพลังงานของโฟตอน.....	8
2.5	การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	9
2.6	การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	9
2.7	การเกิดแฟร์ไอโรดักชันและ Anihilation.....	10
2.8	ลำรังสีแกมมาที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางลักษณะต่าง ๆ.....	11
2.9	วิธีการแบ็กโปรเจกชัน.....	12
2.10	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน.....	13
2.11	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน.....	13
2.12	ตัวอย่างการหาค่า PDF.....	19
3.1	แผนภาพระบบสแกนสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	24
3.2	แสดงสเปกตรัมจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241.....	25
3.3	หัววัดรังสีแกมมา ชนิดกึ่งตัวนำ CdTe.....	26
3.4	Scaler Ratemeter รุ่น LUDLUM 2200.....	26
3.5	ร่างเลื่อนสำหรับระบบกล.....	27
3.6	สเตปป์มอเตอร์รุ่น PM42L-048.....	27
3.7	แผนผังแสดงการทำงานของชุดควบคุมสเตปป์มอเตอร์.....	28
3.8	แผนผังแสดงการกระตุ้นขดลวดภายในสเตปป์มอเตอร์แบบ one-two-phase..	28
3.9	วงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง +5V และ +12V.....	29
3.10	สัญญาณต่าง ๆ ของพอร์ตขนาน.....	29
3.11	วงจรเชื่อมต่อพอร์ตขนาน.....	30
3.12	วงจรขับสเตปป์มอเตอร์.....	31
3.13	วงจรรับสัญญาณจากโฟโตทรานซิสเตอร์.....	31

ภาพที่		หน้า
3.14	หน้าต่างของโปรแกรมควบคุมระบบสแกน และเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	32
3.15	แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน.....	33
3.16	แผนภาพการเก็บ บันทึกลง และเรียกใช้ค่านับวัด I_0	34
3.17	แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลโปรไฟล์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับแก้.....	35
3.18	แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการปรับแก้ค่า I_0 แล้ว.....	36
3.19	แผ่นวงจรเชื่อมต่อพอร์ตนาน และควบคุมสเตปมอเตอร์.....	36
3.20	ระบบกลเคลื่อนย้ายได้สำหรับสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	37
3.21	ระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	37
4.1	แผนภาพแสดงการทดสอบระบบกล.....	38
4.2	หน้าต่างโปรแกรมทดสอบระบบกล.....	39
4.3	แผนภาพแสดงระบบวัดรังสีแกมมา.....	41
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัด และ LLD.....	41
4.5	ระบบทดสอบเก็บข้อมูล I_0	42
4.6	ข้อมูลโปรไฟล์ I_0	43
4.7	แสดงระยะห่างระหว่างหัววัดรังสี และต้นกำเนิดรังสีที่มุมต่าง ๆ.....	44
4.8	แสดง Angular Independent ของหัววัดรังสี.....	44
4.9	ชิ้นงานทดสอบระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	45
4.10	แผนภาพแสดงระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	45
4.11	ข้อมูลโปรไฟล์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับแก้.....	46
4.12	ข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการปรับแก้ค่า I_0 แล้ว.....	46
4.13	กราฟแสดงการทดสอบแบบ Edge-Spread Function.....	51
4.14	ผลการทดสอบความคมชัด.....	51
4.15	แสดงการติดตั้งใช้งานระบบสแกนภาคสนาม.....	56
4.16	แสดงการใช้งานภาคสนาม.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคนิคการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในทางการแพทย์และในงานอุตสาหกรรม รวมถึงการใช้ในงานทางด้านการทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรมที่ได้เริ่มมีการใช้เทคนิคนี้บ้างแล้ว ซึ่งการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนี้เป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยการประยุกต์ใช้รังสีเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างภายในของวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลรวดเร็ว และไม่ทำลายวัสดุนั้นอีกด้วย ระบบสแกนเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักมีขนาดใหญ่ และเคลื่อนย้ายไม่สะดวก จึงได้มีแนวความคิดที่จะพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายไปใช้งานในที่ต่าง ๆ ได้สะดวกยิ่งขึ้น ระบบสแกนเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้นจะอาศัยหลักการส่งรังสีแกมมาผ่านวัตถุตัวอย่าง แล้วใช้หัววัดรังสีที่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา วัดความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัตถุตัวอย่างที่ทำการตรวจสอบในมุมต่างๆ แล้วนำมาคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้กับไมโครคอมพิวเตอร์ ระบบสแกนดังกล่าวจะมีประโยชน์ในการประยุกต์อย่างมากในด้านอุตสาหกรรม และงานทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรม เพราะจะทำให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดโครงสร้างภายในที่ต้องการตรวจสอบในลักษณะของภาพตัดขวาง โดยไม่ทำลายวัตถุนั้น ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้ สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบสแกนชนิดเคลื่อนย้ายได้ โดยใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ ซึ่งประกอบด้วยระบบวัดรังสี ระบบกลสำหรับสแกนเก็บข้อมูล วงจรเชื่อมโยงระหว่างระบบสแกนกับไมโครคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน of ระบบสแกน และรับข้อมูลไปรไฟล์
2. ทดลองเก็บข้อมูลไปรไฟล์ของชิ้นงานบางชนิดด้วยระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นและนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างระบบกลที่เคลื่อนย้ายได้สำหรับสแกนเก็บข้อมูล
3. ออกแบบและสร้างวงจรเชื่อมโยงระหว่างระบบสแกนกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานและรับข้อมูลไปรไฟล์
4. ทดสอบ และปรับปรุงการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น
5. ทดลองเก็บข้อมูลไปรไฟล์ตัวอย่างบางชนิดและคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
6. สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการตรวจสอบโดยไม่ทำลายในงานด้านอุตสาหกรรมและการทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ในปี 2536 มงคล วรรณประภา^[1] ได้พัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยเทคนิค Convolution Back Projection โดยใช้ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 พลังงาน 662 keV ความแรง 1,110 MBq และใช้หัววัดรังสีแบบซินทิลเลชันชนิดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ซึ่งมุ่งเน้นไปที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาตำแหน่ง และขนาดของเส้นเหล็ก ชีตความสามารถในการสแกนจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 x 20 เซนติเมตร ซึ่งจำนวน Projection เพียงพอต่อการคำนวณสร้างภาพนั้น เท่ากับ 18 โปรไฟล์ มุมหมุนไปที่ละ 10 องศา ระยะห่างระหว่างเรย์ซิมของการเคลื่อนที่นั้น เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาเก็บข้อมูลประมาณ 4 ชั่วโมง ข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ จะถูกบันทึกอยู่ในแผ่นข้อมูล (Disk) แล้วจึงค่อยนำไปประมวลผล สำหรับภาพโทโมกราฟีสามารถมองเห็นเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตรได้อย่างชัดเจน

1.6.2 ในปี 2538 สมยศ ศรีสถิตย์ และ อรรถพร ภัทรสุมันต์^[2] ได้ทำการวิจัยเรื่องการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยศึกษาการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หรือภาพตัดขวางของวัตถุโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ลงบนฟิล์มหลาย ๆ ระนาบ โดยหมุนวัตถุที่ละ 3.6 องศา จนได้ภาพอย่างน้อย 180 องศาแล้วนำภาพเอกซ์เรย์ไปอ่านค่าความดำด้วยเครื่องอ่านค่าความดำอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยโปรแกรมจากระบบไมโครคอมพิวเตอร์ บันทึกข้อมูลโปรไฟล์ที่อ่านได้ลงบนแผ่นดิสก์ แล้วจึงนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ใช้หลักการคอนโวลูชันฟิลเตอร์ แบคโปรเจกชัน โดยใช้ฟิลเตอร์ของ Shepp-Logan ในการคำนวณสร้างภาพ ได้ภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีความคมชัดและให้รายละเอียดดี

1.6.3 ในปี 2544 ประสิทธิ์ สิริทิพย์รัศมี^[3] ได้พัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์ ที่สามารถทำได้รวดเร็วและได้ภาพที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการตรวจสอบโดยไม่ทำลายในทางอุตสาหกรรม โดยทำการทดสอบด้วยชิ้นงานต่าง ๆ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเฟรมที่นำมาเฉลี่ย ทำให้ค่า Pixel noise ที่ได้จากค่าข้อมูลของภาพโทโมกราฟีจะลดลงอย่างรวดเร็ว และได้คุณภาพของภาพโทโมกราฟีดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

1.6.4 ในปี 1999 D.V. Rao, R. Cesareo, A. Brunetti^[4] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง "Computed tomography with image intensifier imaging and characterization of materials" เป็นการสร้างภาพโทโมกราฟี เพื่อหาคุณลักษณะของวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น เซรามิก ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ไม้ เป็นต้น โดยได้มีการนำเอาฉากเพิ่มความเข้มแสงใช้ในระบบสแกน และทำการพัฒนาโปรแกรมด้วยโปรแกรม PASCAL ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ผลจากการศึกษาที่ผลงานต่าง ๆ กับแผ่นกรองรังสีที่ใช้ค่าที่ดีที่สุด ได้ภาพโทโมกราฟีของวัสดุมีรายละเอียดดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎี

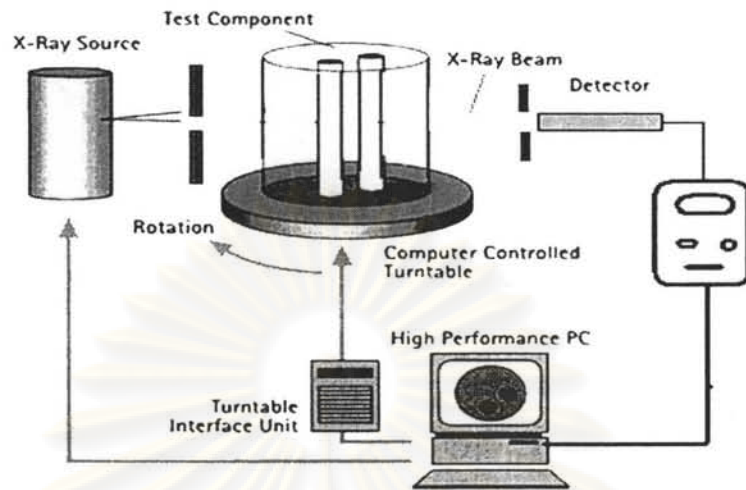
2.1 หลักการเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ภาพโทโมกราฟี คือ ภาพตัดขวางของวัตถุซึ่งเป็นภาพในระนาบสองมิติที่มีจุดภาพแต่ละจุดแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจะอาศัยหลักการทะลุผ่านของรังสีต่อวัตถุ โดยการสแกนเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรังสีที่ติดอยู่ด้านตรงข้ามกับต้นกำเนิดรังสีโดยมีวัตถุระหว่างกลางเมื่อทำให้วัตถุหมุนไปด้วยมุมน้อย ๆ ก็สแกนเก็บข้อมูลจนได้ข้อมูลเพียงพอ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้อมทั้งหมดมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นพร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน และท้ายที่สุดนำข้อมูลที่ได้อ้อมคำนวณด้วยวิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชันเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี โดยระบบการเก็บข้อมูลสามารถแบ่งระบบการทำงานออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

2.1.1 ระบบสแกนแบบลำรังสีแคบ (Narrow Beam)

ลักษณะการทำงานของระบบคือ ใช้ลำรังสีแบบแคบหนึ่งลำ ใช้หัววัดรังสี 1 หัว ในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสี เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลักการทำงานของระบบสแกนแบบนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแรกให้วัตถุเคลื่อนที่ตัดลำรังสีในลักษณะที่วัตถุเคลื่อนที่ไปพร้อมกับต้นกำเนิดรังสี โดยที่วัตถุเคลื่อนที่ไปพร้อมกับต้นกำเนิดรังสีโดยที่วัตถุตัวอย่างอยู่กับที่ ลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้สองก็เช่นเดียวกับแบบแรกคือ เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทีละ step หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การสแกนระยะทางที่เคลื่อนที่ได้แต่ละ step จะเท่ากับขนาดของช่องรับรังสีของหัววัดนั้น เมื่อสิ้นสุดการสแกน 1 แถว จะได้ข้อมูลที่เรียกว่า "โปรไฟล์ (Profile)" หรือ "โปรเจกชัน (Projection)" และหมุนไปเป็นมุมน้อย ๆ จนครบ 180 องศา

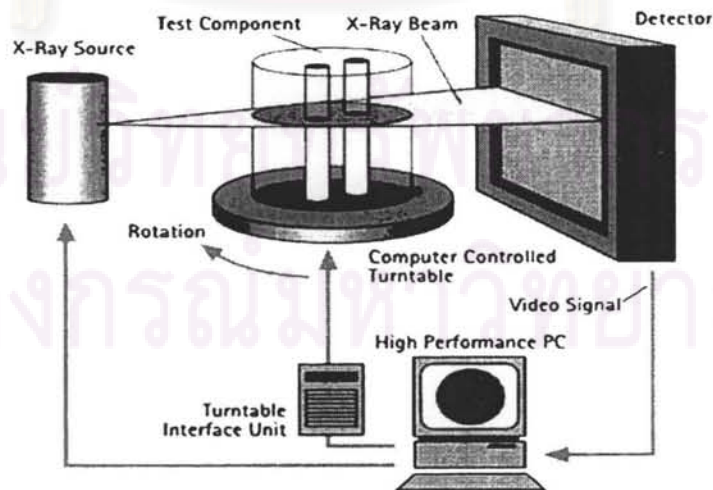
ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ระบบสแกนแบบลำรังสีแคบ

2.1.2 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (Fan Beam)

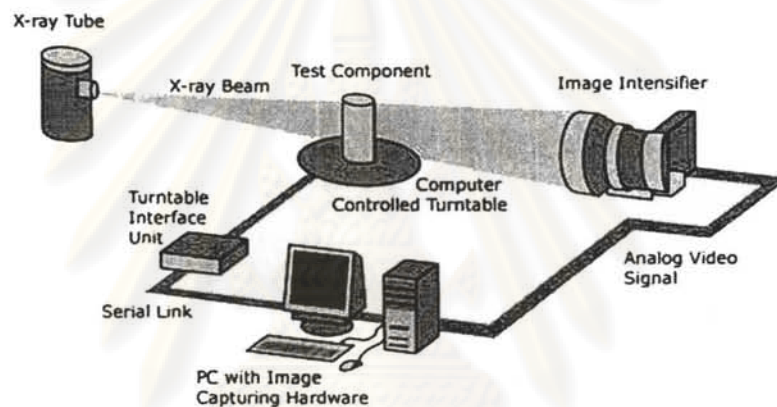
เนื่องจากระบบสแกนรังสีลำแคบ ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีมาก จึงได้มีการพัฒนาระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัดขึ้นมา เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูล โดยมีลำรังสีเป็นแบบพัด ให้อั้วตรังสีแบบ Linear detector array หลักการทำงานจะคล้ายกับระบบสแกนแบบแรก จะต่างกันเมื่อหมุนไปแต่ละครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดยไม่ต้องสแกนเพราะสามารถเก็บข้อมูลทั้งโปรไฟล์ จึงเป็นผลให้ระบบสแกนนี้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนั้นน้อยลงซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ สามารถที่จะออกแบบให้อั้วตรังสีอย่างหมุนเคลื่อนที่ หรือออกแบบให้อั้วตรังสีเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กับต้นกำเนิดรังสีก็ได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบสแกนลำรังสีรูปพัด

2.1.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (Cone Beam)

ระบบสแกนแบบนี้ถูกสร้างขึ้น เพื่อให้สามารถสร้างรายละเอียดของภาพได้สองระนาบ (Two Dimension) คือ ระนาบในแนวแกนนอนกับระนาบในแนวแกนตั้ง โดยออกแบบให้ลำรังสีเป็นแบบรูปกรวย (Cone Dimension Detector Array) ซึ่งจะมีหัววัดเรียงกันมากกว่า 1 แถว และในแต่ละแถวจะมีหัววัดรังสีอยู่หลายอัน หรืออาจใช้แผ่นเรืองแสงรับภาพ และมีกล้องโทรทัศน์จับภาพ โดยระบบสแกนแบบนี้ จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์น้อยกว่าทั้งสองระบบที่กล่าวมา ดังรูปที่ 2.3 สำหรับขั้นตอนการเก็บข้อมูลโปรไฟล์นั้นจะต้องใช้เทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างสูงจึงจะได้ข้อมูลที่ให้ความละเอียดและชัดเจน



รูปที่ 2.3 ระบบสแกนลำรังสีรูปกรวย

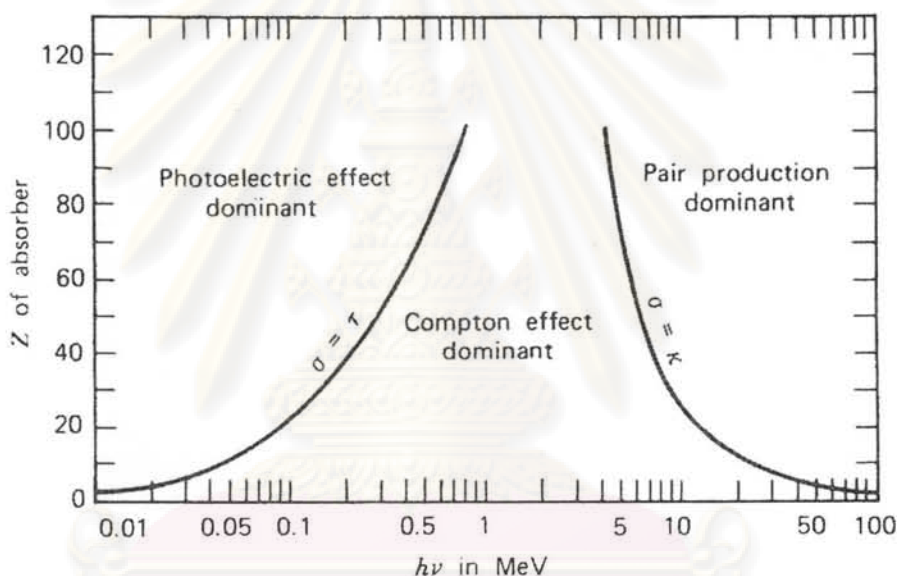
2.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

จากที่ได้อธิบายข้างต้น เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ได้ดีจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงลักษณะของการลดทอนของรังสีเมื่อทะลุผ่านตัวกลางก่อน จากนั้นจึงจะศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคและวิธีการสร้างภาพโทโมกราฟี

2.2.1 การทำอันตรกิริยาของรังสีแกมมา (Gamma-ray Interactions)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับตัวกลาง 4 ชนิดคือ นิวคลีออน (Nucleons) อิเล็กตรอน (Atomic Electron) สนามไฟฟ้าของอะตอม (Electric Field of Atom) และสนามเมซอนของนิวเคลียส (Meson Field of Nucleus) อันตรกิริยากับตัวกลางแต่ละชนิดสามารถเกิดได้ 3 รูปแบบ คือ การถ่ายเทพลังงานอย่างสมบูรณ์ (Complete Absorption) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic

Scattering) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) กล่าวคือปรากฏการณ์ที่โฟตอนสามารถเกิดอันตรกิริยาในทางทฤษฎีได้ทั้งหมด 12 รูปแบบ แต่ในอันตรกิริยาบางชนิดยังไม่สามารถพบเห็นได้ในปัจจุบัน และแม้ว่ารังสีแกมมาจะสามารถเกิดอันตรกิริยาได้หลายรูปแบบ แต่มีเพียง 3 รูปแบบที่มีความสำคัญ คือ การเกิดโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering) และการเกิดแฟร์ไพร์ดักชัน (Pair Production) โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 รูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางและพลังงานของโฟตอน เมื่อพลังงานของโฟตอนมีพลังงานต่ำจะมีโอกาสเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้ดี แต่เมื่อพลังงานสูงขึ้นโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาในอีก 2 รูปแบบจึงจะเพิ่มขึ้น และการเกิดโฟโตอิเล็กทริกก็จะน้อยลง^[3]

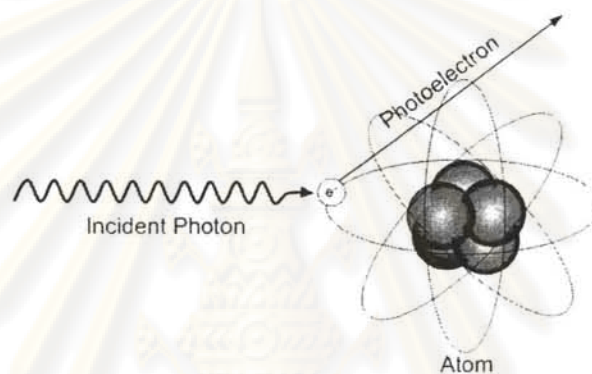


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับคุณสมบัติของตัวกลางและพลังงานของโฟตอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1.1 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก

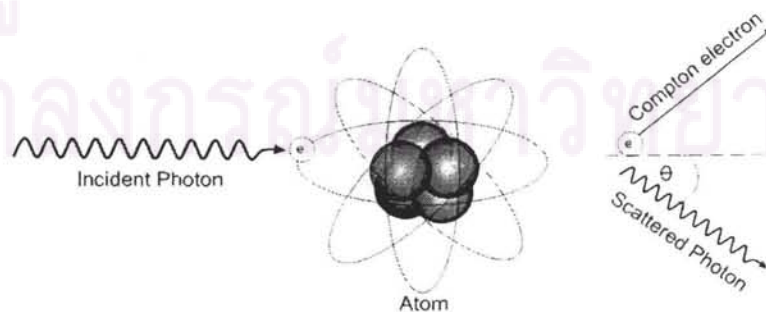
เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียสของอะตอมของตัวกลาง ด้วยการถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนทั้งหมดทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรเป็นอิสระ อะตอมจะกลายเป็นไอออนบวก สำหรับอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานของโฟตอนหลุดออกไปนี้เรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน" การสูญเสียอิเล็กตรอนดังกล่าว จะต้องมีการรักษาสมดุลโครงสร้าง โดยการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) ออกมาดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

2.2.1.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

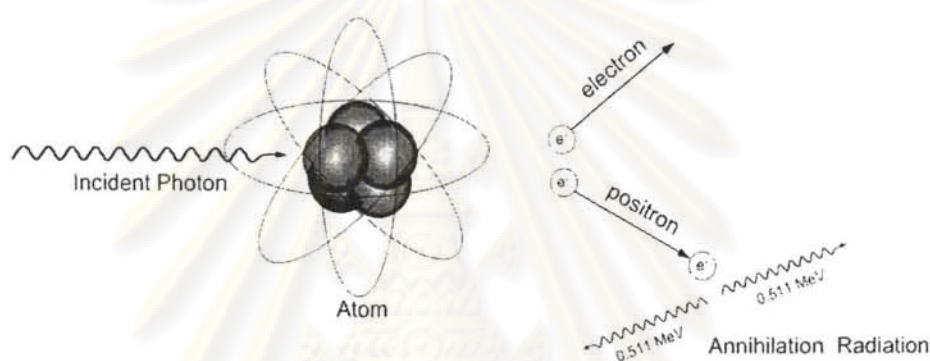
เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับอิเล็กตรอนอิสระรอบนิวเคลียสหรืออิเล็กตรอนที่วงนอก แต่การชนทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานบางส่วนจากโฟตอนและกระเจิงออกจากวงโคจรไป อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกไปเรียกว่า "รีคอยล์ อิเล็กตรอน" (Recoil Electron) ส่วนโฟตอนจะมีพลังงานลดลงและกระเจิงต่อไปอีกทางหนึ่งดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน

2.2.1.3 การเกิดแฟรีโพรตักชัน

เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับสนามไฟฟ้ารอบนิวเคลียส ในกรณีที่โฟตอนมีพลังงานสูงมากจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนบริเวณใกล้นิวเคลียส ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง โฟตอนจะหายไปและเกิดเป็นอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนขึ้น จากนั้นในช่วงเวลาอันสั้นโพสิตรอนจะจับอิเล็กตรอนอิสระบริเวณใกล้เคียงเกิดการสลายมวล (Annihilation) ทันทีกลายเป็นรังสีแกมมา 2 ตัวปลดปล่อยออกมาในทิศทางทำมุม 180 องศา โดยรังสีแกมมาแต่ละตัวมีพลังงานจากการสลายมวล 0.511 MeV ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดแฟรีโพรตักชันและ Annihilation

2.2.2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (Linear Attenuation Coefficient of Gamma ray)

เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ ตัวกลางนั้นจะดูดกลืนรังสีแกมมาได้ด้วยอันตรกิริยาต่าง ๆ ทำให้ปริมาณของรังสีที่ผ่านตัวกลางออกมาลดลง การลดลงของรังสีจะเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังนี้

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

เมื่อ I ความเข้มรังสีหลังผ่านตัวกลางความหนา x

I_0 ความเข้มรังสีก่อนผ่านตัวกลาง

μ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

x ความหนาของตัวกลาง

จากสมการของแลมเบิร์ตเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ผ่านตัวกลางจะลดลงตามความหนาและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและคุณสมบัติของตัวกลาง สำหรับลักษณะการลดลงของรังสีแกมมาเมื่อผ่านตัวกลางลักษณะต่าง ๆ กัน แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8 โดยกรณีแรกแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางชนิดเดียว แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8(a) จากกราฟ ได้ภาพเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ลดลง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวกลางเป็นแบบเอกซโปเนนเชียลตามสมการของแลมเบิร์ต กรณีที่สองแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางสองชนิดดังรูป 2.8(b) จากกราฟ ได้ภาพเมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นสีขาวยังเป็นตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสูงกว่าบริเวณที่เป็นสีเข้ม เห็นได้ว่าในบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสูง การลดลงของรังสีจะมากกว่าบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นต่ำกว่าปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางสองชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

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

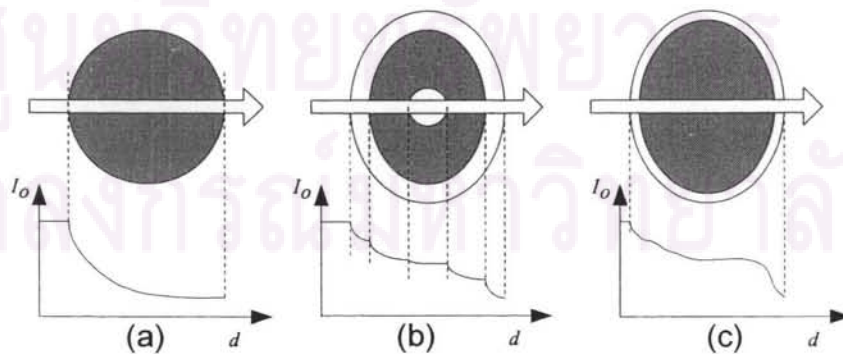
เมื่อ μ_1, μ_2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวกลางที่ 1 และ 2

x_1, x_2 ความหนาของตัวกลางที่ 1 และ 2

และสำหรับกรณีสุดท้ายแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางหลาย ๆ ชนิดดังรูปที่ 2.8(c) ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางหลาย ๆ ชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

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

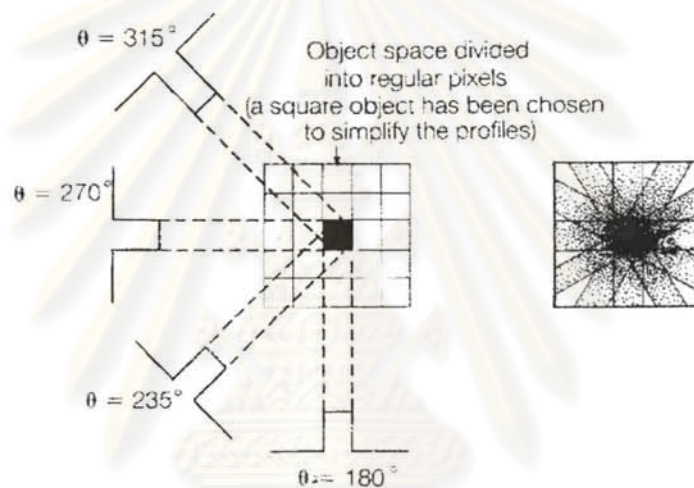
เมื่อ $\mu(s)$ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ตัวกลางต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 ลำรังสีแกมมาที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางลักษณะต่างๆ

2.2.3 วิธีการแบ็กโปรเจกชัน (Back Projection Method)

แบ็กโปรเจกชันเป็นวิธีที่ใช้ในการสร้างภาพโทโมกราฟีโดยอาศัยการนำชุดข้อมูลของปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุในแต่ละมุมมาทำการฉายกลับลงมาบนตำแหน่งเดิมที่รังสีเดินทางผ่านเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี ตัวอย่างการแบ็กโปรเจกชันแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ซึ่งด้านซ้ายมือ เป็นภาพของวัตถุที่จะสร้างภาพโทโมกราฟีพร้อมกับข้อมูลโปรเจกชันที่มุมหนึ่ง ส่วนภาพด้านขวาเป็นการฉายกลับโดยนำชุดข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมุมต่าง ๆ มาฉายซึ่งจะได้ภาพโทโมกราฟีตามภาพด้านขวา^[2]

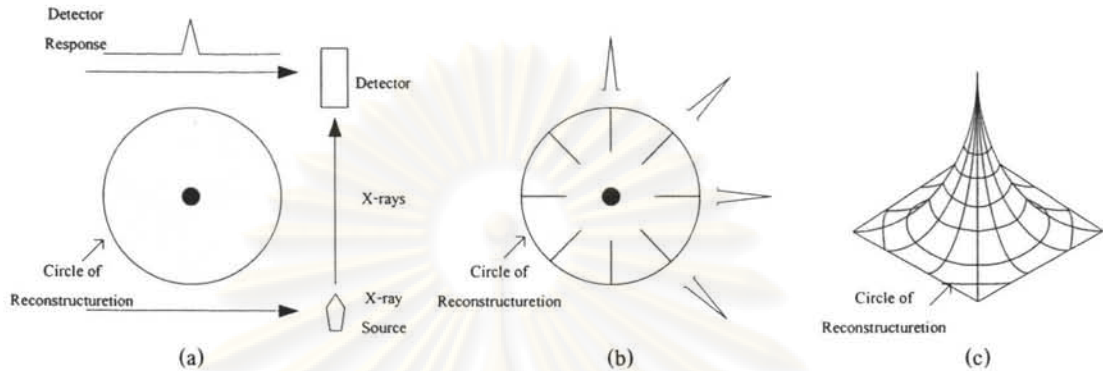


รูปที่ 2.9 วิธีการแบ็กโปรเจกชัน

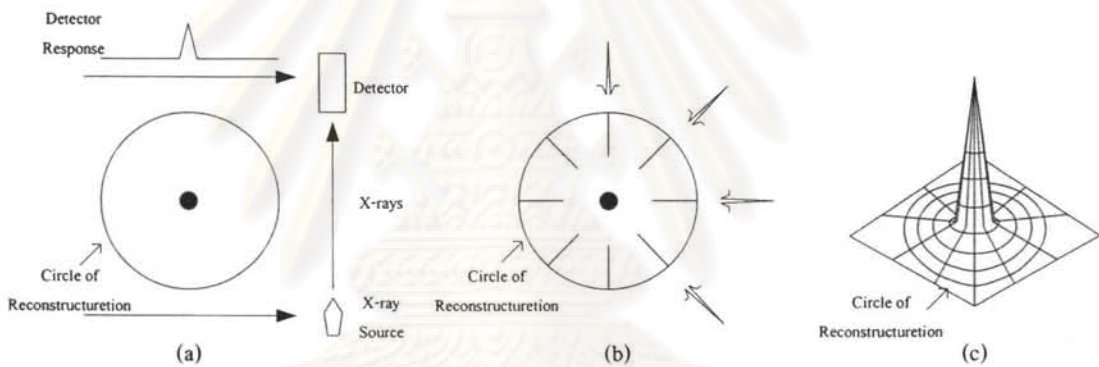
2.2.4 ฟังก์ชันฟังกชัน (Filter Function)

ในการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชัน ข้อมูลของทุกโปรเจกชันจะถูกรวมเข้าไปในแต่ละส่วนของภาพโทโมกราฟี ทำให้ภาพที่ได้เกิดความมัวขึ้นดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชันของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุด เป็นโปรไฟล์ของภาพหลังจากการแบ็กโปรเจกชันแล้วโปรไฟล์ของภาพที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.10(c) ซึ่งความจริงจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.11(c) แต่ด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชันทำให้ภาพโทโมกราฟีเกิดความมัวขึ้น การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันฟังกชันปรับปรุงข้อมูลโปรไฟล์ที่จะใช้ในการแบ็กโปรเจกชันเพื่อให้ภาพโทโมกราฟีมีคุณภาพดีขึ้นดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุเหมือนกับในรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะใช้ฟังก์ชันฟังกชันในการปรับปรุงข้อมูลโปรไฟล์ก่อนการสร้างภาพโทโมกราฟี จากรูปที่ 2.11(b) โปรไฟล์ของข้อมูลบริเวณขอบของวัตถุจะมี

ความแตกต่างมากขึ้นทั้งนี้เพื่อช่วยให้ความมัวของภาพโทโมกราฟีลดลง ดังรูปที่ 2.11(c) ซึ่งโปรไฟล์ของภาพมีความคมชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 2.10(c)



รูปที่ 2.10 ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน



รูปที่ 2.11 ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน

2.2.5 วิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน (Filter Back Projection Method)

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

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(Xx+Yy)} dx dy \dots(2.4)$$

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

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i(X(r \cos \theta - r \sin \theta) + Y(r \sin \theta + r \cos \theta))} dr ds$$

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rX \cos \theta - rX \sin \theta + rY \sin \theta + rY \cos \theta]} dr ds$$

เมื่อกำหนดให้ $R = X \cos \theta + Y \sin \theta$

$$S = Y \cos \theta - X \sin \theta$$

จะได้
$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rR + sS]} dr ds \quad \dots(2.5)$$

$$F(X, Y) = F_{\theta}(R, S)$$

สมการที่ 2.5 สื่อนให้ทราบว่า ถ้า $f_{\theta}(r, s)$ หมุนจาก $f(x, y)$ ไปเป็นมุม θ ฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ $F_{\theta}(R, S)$ ก็หมุนจาก $F(X, Y)$ เป็นมุม θ เช่นกัน

พิจารณาฟังก์ชันภาพฉาย $P(\theta, r)$

$$P(\theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) ds \quad \dots(2.6)$$

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

$$P(\theta, R) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) e^{-iRr} ds dr \quad \dots(2.7)$$

หากเปรียบเทียบสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) จะได้ว่า $P(\theta, R)$ มีค่าเทียบเคียงได้กับ $F_{\theta}(R, S)$ ตามแนวแกน R หรือ

$$P(\theta, R) = F_{\theta}(R, S)|_{S=0} \quad \dots(2.8)$$

สมการที่ (2.8) คือ ทฤษฎีโปรเจกชัน-สไลซ์ (Projection-Slice Theorem) ซึ่งกล่าวว่า ฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 1 มิติของฟังก์ชันภาพฉาย คือฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 2 มิติของฟังก์ชันเดิมตามแนวภาพฉายที่ตัดผ่านจุดกำเนิด

ดังนั้นถ้าหากมีข้อมูลฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันภาพฉายจำนวนอนันต์มมแล้ว เราจะทราบค่าทุก ๆ จุดของ $F(X,Y)$ บนระนาบ (X,Y) เมื่อทราบค่า $F(\theta,R)$ ก็สามารรถคำนวณกลับได้เป็น $f(x,y)$ ด้วยการแปลงฟูรีเยร์ผกผันได้ดังนี้

สมการที่ (2.9) สามารถเขียนให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงมุมได้เป็น

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\theta,R) e^{iR(x\cos\theta + y\sin\theta)} R dR d\theta \quad \dots(2.10)$$

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

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta,R) e^{iRr} |R| dR d\theta \quad \dots(2.11)$$

สมการที่ (2.10) เป็นสมการที่ไม่มีขอบเขตจำกัด (Unbounded Function) เนื่องจาก $|R|$ มีค่าลู่ออก (Divergence) ดังนั้นค่า R จึงควรถูกจำกัดด้วยค่า ๆ หนึ่ง $|R| \leq \Omega$ กำหนดให้ฟังก์ชันของการกรอง หรือฟิลเตอร์ฟังก์ชัน $H(R) = b(R)|R|$ โดยที่

$$b(R) = \begin{cases} 1 & \text{where } |R| \leq \Omega \\ 0 & \text{where } |R| > \Omega \end{cases} \quad \dots(2.12)$$

กำหนดให้ช่วงห่างของการเก็บข้อมูลตามแนวขวาง (Lateral Sampling) มีค่าเป็น a ดังนั้น จากทฤษฎีบทการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Theorem) จะได้ว่า

$$\Omega = 2\pi f_{\max} = \frac{\pi}{a} \quad \dots(2.13)$$

จากสมการที่ (2.11) ใช้ทฤษฎีคอนโวลูชัน (Convolution) จะได้สมการการสร้างภาพโทโมกราฟี (Reconstruction Formula) เป็น

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta,\tau) \cdot h(x\cos\theta + y\sin\theta - \tau) d\tau d\theta \quad \dots(2.14)$$

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

$$h(r) = \begin{cases} \frac{\Omega^2}{2\pi} & , r = 0 \\ \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2\Omega}{r} \sin(\Omega r) + \frac{2}{r^2} \cos(\Omega r) - \frac{2}{r^2} \right] & , r \neq 0 \end{cases} \quad \dots(2.15)$$

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

$$h(0) = \frac{\pi}{2a^2}$$

$$h(r_k) = -\frac{2}{\pi k^2 a^2} \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคี่} \quad \dots(2.16)$$

$$h(r_k) = 0 \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคู่}$$

สมการที่ (2.16) คือ ฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Ramachandran ซึ่งมีลักษณะที่แกว่งมาก ต่อมา Shepp-Logan แนะนำฟิลเตอร์ฟังก์ชันที่แกว่งน้อยลงซึ่งทำให้ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีดีขึ้น ดังสมการ

$$h(r_k) = -\frac{4}{\pi a^2 (4k^2 - 1)} , k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1) \quad \dots(2.17)$$

สมการนี้เรียกว่า "Shepp & Logan Filter Function" เมื่อนำข้อมูลโปรไฟล์จากการสแกนมาผ่านการคำนวณด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน การคำนวณนี้จะเป็นการปรับข้อมูลให้สามารถแยกแยะรายละเอียดของข้อมูลให้เด่นชัดมากขึ้น^[4]

การประมาณแบบไม่ต่อเนื่องของสมการการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยวิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน สามารถเขียนได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N P(\theta_j, r_k) \cdot h(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j - r_k) \quad \dots(2.18)$$

เมื่อ M คือ จำนวนมุมของการเก็บข้อมูล หรือจำนวนโปรไฟล์

N คือ จำนวนจุดของการสแกนเก็บข้อมูลในหนึ่งโปรไฟล์

2.3 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Quality of Computed Tomography Image)

จุดประสงค์ของการสร้างภาพโทโมกราฟีก็เพื่อสร้างภาพตัดขวางที่สามารถแสดงองค์ประกอบภายในของวัตถุได้โดยไม่ทำลาย ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงหมายถึงภาพที่สามารถแสดงรายละเอียดภายในของวัตถุได้ถูกต้องและชัดเจน การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบ่งบอกถึงภาพโทโมกราฟีที่ดี และภาพโทโมกราฟีที่ดียังหมายความถึงระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ดีอีกด้วย การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีดังนี้

2.3.1 Pixel noise

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างระบบที่ปราศจากสิ่งรบกวนเลย และสิ่งรบกวนก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพลดลง การวัดค่าสิ่งรบกวนของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการหาค่าสิ่งรบกวนของระบบสามารถคำนวณได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ CT-number บริเวณหนึ่งของภาพโทโมกราฟีที่มีเนื้อสารเดียวกัน โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า Pixel noise

การหาค่า Pixel noise ขั้นแรกต้องสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีเนื้อสารชนิดเดียวกันนั้นเลือกข้อมูล CT-number มาจำนวนหนึ่ง (ควรเลือกจำนวนข้อมูลให้อยู่ในช่วง 25 ถึง 100 ตัว ตามคำแนะนำของ ASTM ฉบับที่ E 1441-97) จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_i \quad \dots(2.19)$$

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^m (\mu_i - \bar{\mu})^2}{m - 1} \right]^{1/2} \quad \dots(2.20)$$

เมื่อ $\bar{\mu}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ CT-number ณ บริเวณที่เลือก

μ_i คือ ค่า CT-number ต่าง ๆ ที่เลือก

m คือ จำนวนข้อมูลที่เลือก

σ คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CT-number หรือ Pixel noise ณ บริเวณที่เลือก

จากสมการดังกล่าว ค่า Pixel noise ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนหรือที่นิยมเรียกกันว่าค่า SNR (Signal to Noise Ratio) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$SNR = \frac{\bar{\mu}}{\sigma} \quad \dots(2.21)$$

จากค่า Pixel noise และค่า SNR ที่ได้ทำให้สามารถบอกถึงคุณสมบัติของระบบได้โดยเมื่อค่า pixel noise น้อยหรือค่า SNR มากแสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณสมบัติที่ดี เพราะระบบมีสิ่งรบกวนน้อย ในทางกลับกันถ้าค่า pixel noise มากหรือค่า SNR น้อยแสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่ดี

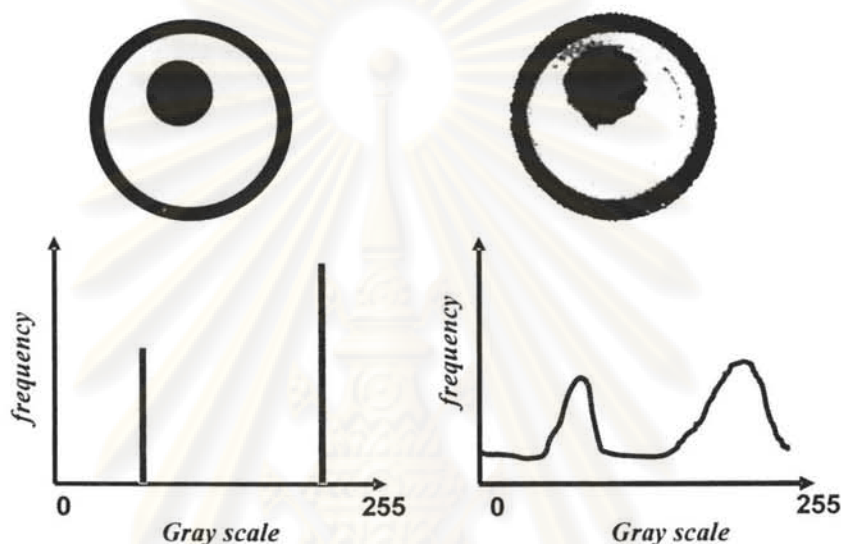
2.3.2 Probability Distribution Function (PDF)

PDF เป็นกราฟแจกแจงความถี่ที่แสดงค่าความถี่ที่ค่า CT-number ต่าง ๆ จากตัวอย่างของกราฟ PDF ในรูปที่ 2.12(a) เป็นกราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีในทางทฤษฎีเห็นได้ว่าค่าความถี่ของ CT-number มีเพียงสองค่าซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ CT-number ของวัตถุ (feature; $\mu_{feature}$) และของแบ็กกราวด์ (background; $\mu_{background}$) ข้อมูลทั้งสองนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast ; $\Delta\mu$) ได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\Delta\mu = \mu_{feature} - \mu_{background} \quad \dots(2.22)$$

ในทางปฏิบัติกราฟ PDF ไม่ได้เหมือนกับในทางทฤษฎี เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ ในการสร้างภาพโทโมกราฟี ทำให้เกิดความมัว (blurring) ในภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้นซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีและกราฟ PDF มีลักษณะดังตัวอย่างในรูปที่ 2.12(b) ซึ่งเห็นได้ว่ากราฟ PDF จะมีการกระจายตัวมากกว่าในทางทฤษฎี โดยในการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสามารถวัดได้จากความกว้างของค่า CT-number ที่ค่าความถี่เป็นครึ่งหนึ่งของค่าความถี่สูงสุด หรือ FWHM (Full Width at Half Maximum) ที่เนื้อสารเดียวกัน ดังรูปที่ 2.12(b) สำหรับการหาค่าความเปรียบต่างของกราฟ PDF ในทางปฏิบัติ จะใช้ค่า CT-number ที่มีค่าความถี่สูงสุดของทั้งวัตถุและแบ็กกราวด์ในกราฟ PDF

จากที่กล่าวมา สรุปได้ว่ากราฟ PDF สามารถบอกค่าความเปรียบต่างของภาพโทโมกราฟีและการกระจายตัวของค่า CT-number ในภาพได้โดยวัดจากค่า FWHM ซึ่งค่า FWHM จะสื่อให้เห็นถึงความมัวของภาพโทโมกราฟีได้ ถ้าค่า FWHM มีค่ามากแสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวมาก ในทางกลับกันถ้าค่า FWHM มีค่าน้อยแสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวน้อยหรือมีคุณภาพที่ดีนั่นเอง



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่า PDF

2.3.3 Point Spread Function (PSF)

PSF เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่า Resolution สามารถทำได้โดยการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุด (point object) จากนั้นอ่านค่า CT-number จากตำแหน่งแนวของข้อมูลในภาพโทโมกราฟี ในการหาค่า Resolution ขั้นแรกเพิ่มขนาดของ point object ขึ้นจนกว่าค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ข้อมูลจะมีค่าคงที่ ขั้นตอนต่อมาให้ค่อย ๆ ลดขนาดของ point object ลง ในการลดขนาด point object ลงจะทำให้ค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์มีค่าลดลงด้วย เมื่อใดที่ค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ลดลงเหลือ 20% ของค่าที่คงที่ขั้นตอนแรก ขนาดของ point object ณ ตำแหน่งนั้นก็คือค่า Resolution ของระบบนั่นเอง

2.3.4 Modulation Transfer Function (MTF)

MTF ปรับปรุงมาจาก Point Spread Function (PSE) โดยการแปลงฟูริเยร์ ค่า CT-number ของวัตถุมีความแตกต่างกัน เมื่อใช้วัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งมาจัดวางให้มีระยะห่าง

เท่ากันกับความหนาของวัตถุ ออกแบบให้แท่งวัตถุมีความหนาแตกต่างกันหลาย ๆ ค่า อาจเรียกวัตถุตัวอย่างนี้ว่า "slit" ^[3]

การหาค่า MTF ทำได้โดยการอ่านค่า CT-number จากตำแหน่งแถวของข้อมูลในภาพ slit ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของโปรไฟล์ความถี่โดยวัดจากจำนวนแท่ง slit ที่มองเห็นภายในหนึ่งเซนติเมตร (มีหน่วยเป็น เส้นคู่ต่อเซนติเมตร หรือ line pair/cm.) เช่น slit มีความหนา 5 มิลลิเมตร เมื่อวางเรียงกันโดยเว้นช่องว่าง 5 มิลลิเมตรตามความหนาของ slit ในหนึ่งเซนติเมตรก็มีแท่ง slit 1 แท่งหรือ 1 เส้นคู่ต่อเซนติเมตร จากนั้นหาความแตกต่างระหว่างค่า CT-number สูงสุดกับต่ำสุดจากโปรไฟล์ความถี่โดยค่าที่ได้ก็คือค่าความเปรียบต่าง ($\Delta\mu$) ของ slit ในทางทฤษฎีค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่จะคงที่ แม้ความถี่ของ slit จะเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อ slit มีความถี่สูงขึ้นค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่สามารถลดลง โดยในช่วงแรกเมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น $\Delta\mu_1$ ก็ยังเท่ากับ $\Delta\mu_2$ แต่พอเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อย ๆ ความเปรียบต่างก็ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับจนกระทั่ง $\Delta\mu_5$ ลดลงจนเป็นศูนย์ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่า MTF ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$MTF = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_{\max}} \quad \dots(2.23)$$

เมื่อ $\Delta\mu$ คือ ค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่ที่ความถี่ใด ๆ

$\Delta\mu_{\max}$ คือ ค่าความเปรียบต่างสูงสุด

ถ้าพิจารณาสมการข้างต้นแล้วเมื่อความถี่เส้นคู่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเปรียบต่างลดลงและยังผลให้ค่า MTF ลดลงด้วย ความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่ ที่ค่า MTF เท่ากับ 1 หรือ 100% แสดงว่าเป็นภาพที่มีความเหมือนวัตถุมาก และเมื่อค่า MTF น้อยลงก็แสดงว่าภาพมีความเหมือนวัตถุน้อยลง สำหรับในงานด้านอุตสาหกรรมกำหนดให้ใช้ค่า MTF ที่ 20% ในการคำนวณหาค่า Resolution โดยค่า Resolution สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\text{resolution} = \frac{1}{2f} \quad \dots(2.24)$$

เมื่อ f คือ ค่าความถี่เส้นคู่ที่ MTF 20%

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี

2.4.1 ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งรบกวนของข้อมูลทางรังสี

เนื่องจากภาพโทโมกราฟีเกิดจากการคำนวณข้อมูลทางรังสี ซึ่งข้อมูลทางรังสีที่ได้ จะมีความแปรปรวนตามลักษณะของการปลดปล่อยรังสีแบบสุ่ม (random) ความแปรปรวนของ ข้อมูลสูงก็จะส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า pixel noise สูงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ สำหรับการ แก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนนับทางรังสี ซึ่งการเพิ่มจำนวนนับทางรังสีจะช่วยลดค่าสิ่ง รบกวน (σ_d) ดังสมการที่ 2.25

$$\sigma_d \cong \left[\frac{1}{n \exp(-2\mu_0(\bar{E})R_0)} + \frac{1}{n} \right]^{1/2} \quad \dots(2.25)$$

เมื่อ n คือ จำนวนนับทางรังสี

$\mu_0(\bar{E})$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุที่พลังงาน \bar{E}

\bar{E} คือ ค่าพลังงานของรังสีแกมมา

R_0 คือ รัศมีของการสร้างภาพ

จากสมการที่ 2.25 ทำให้ทราบว่า การลดสิ่งรบกวนในการเก็บข้อมูลได้โดยการ เพิ่มค่า n , $\mu_0(\bar{E})$ และ R_0 ในทางปฏิบัติการเพิ่มค่า n เป็นวิธีที่ดีกว่า โดยถ้าเก็บข้อมูลด้วย หัววัดรังสี การเพิ่มค่า n สามารถทำได้โดยการเพิ่มเวลาในการเก็บข้อมูลนั่นเอง

2.4.2 ปัจจัยที่เกิดจากข้อมูลที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน

ในการสร้างภาพโทโมกราฟีถ้าไม่ได้ปรับปรุงข้อมูลด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันก่อนการ คำนวณสร้างภาพแล้ว จะทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้เกิดความมัวมากขึ้น ซึ่งความมัวดังกล่าว จะ อยู่ในรูปการกระจายตัวของค่า CT-number ถ้าการกระจายตัวสูงก็คือภาพจะมีความมัวมากโดย อาจจะได้จากค่า Pixel noise การใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชันก็เพื่อให้ลดความมัวของภาพโทโมกราฟีลง

2.4.3 ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ไม่เพียงพอ

การหมุนวัตถุตัวอย่างในการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีไม่ครบครึ่งรอบ หรือ 180 องศา จะทำให้ข้อมูลขาดรายละเอียดที่เพียงพอ ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้ไม่สมบูรณ์ เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงต้องสแกนเก็บข้อมูลให้ได้อย่างน้อย 180 องศา

2.4.4 ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนเรย์ซั่มต่อภาพโทโมกราฟี

เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลทำให้ภาพโทโมกราฟีไม่คมชัดและขาดรายละเอียดทั้งนี้จำนวนเรย์ซั่มต่อภาพที่น้อยเกินไป หรืออาจมีเหตุผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสีโตเกินไป ทำให้เก็บรายละเอียดได้ไม่เพียงพอ ความคมชัดของภาพโทโมกราฟีจึงต่ำ เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงควรสร้างภาพโทโมกราฟีจากจำนวนเรย์ซั่มที่สูง ๆ

2.4.5 ปัจจัยที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนจุดหมุน

ความคลาดเคลื่อนจุดหมุน คือ การที่จุดกึ่งกลางของการหมุนไม่ตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ การที่จุดหมุนผิดตำแหน่งนั้นจะส่งผลให้การแบ็กโปรเจกชันผิดพลาด ภาพโทโมกราฟีที่ได้จึงผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ยิ่งความคลาดเคลื่อนจุดหมุนของข้อมูลมีมากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้ก็จะมีส่วนโค้งเว้ามากขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงควรจัดวางจุดหมุนให้ตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ก่อนนำข้อมูลโปรไฟล์ไปคำนวณสร้างภาพ^[2]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้ สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

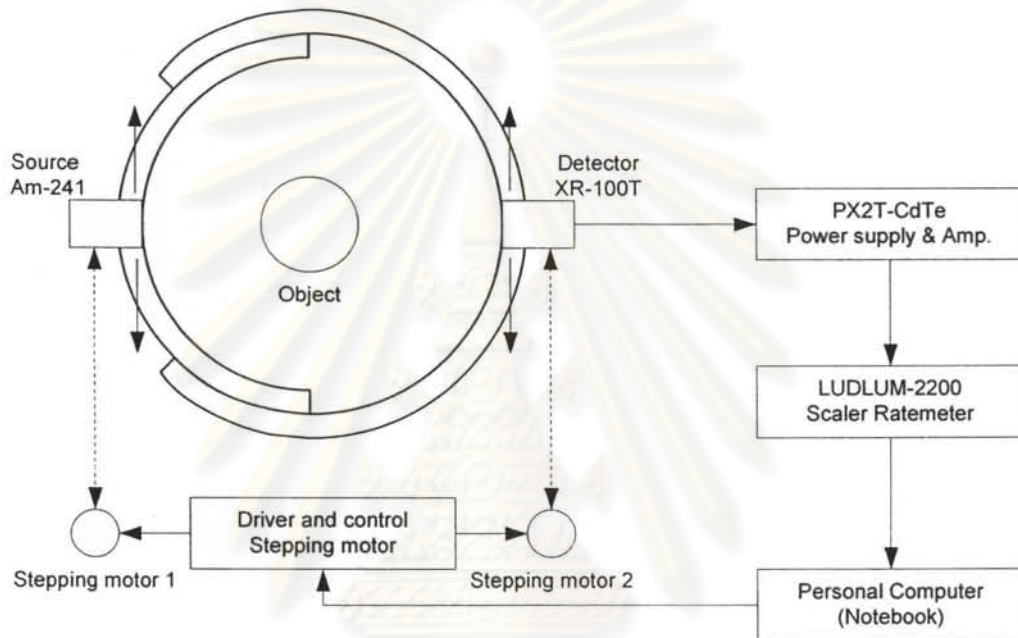
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 พลังงาน 59.5 keV ความแรงรังสี 100 mCi
- 3.1.2 หัววัดรังสีแกมมาชนิดกึ่งตัวนำ CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตรรุ่น XR-100T จากบริษัท AMPTEK
- 3.1.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง และวงจรขยายสัญญาณ โมเดล PX2T CdTe 100T จากบริษัท AMPTEK
- 3.1.4 เครื่อง Scaler Ratemeter โมเดล 2200 ของบริษัท Ludlum
- 3.1.5 สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor) ชนิด 4 เฟส ขนาด 12 โวลต์ 1 แอมแปร์ต่อเฟส ความละเอียดในการหมุน 1.8 องศาต่อสเต็ป
- 3.1.6 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์
- 3.1.7 รางเลื่อนรูปครึ่งวงกลม 2 ส่วน (C-clamp)
- 3.1.8 คอมพิวเตอร์ชนิดพกพา ที่มีพอร์ตขนาน และพอร์ตอนุกรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ออกแบบให้มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาเพื่อให้เหมาะกับการตรวจสอบวัตถุในงานภาคสนาม ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบสแกนสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

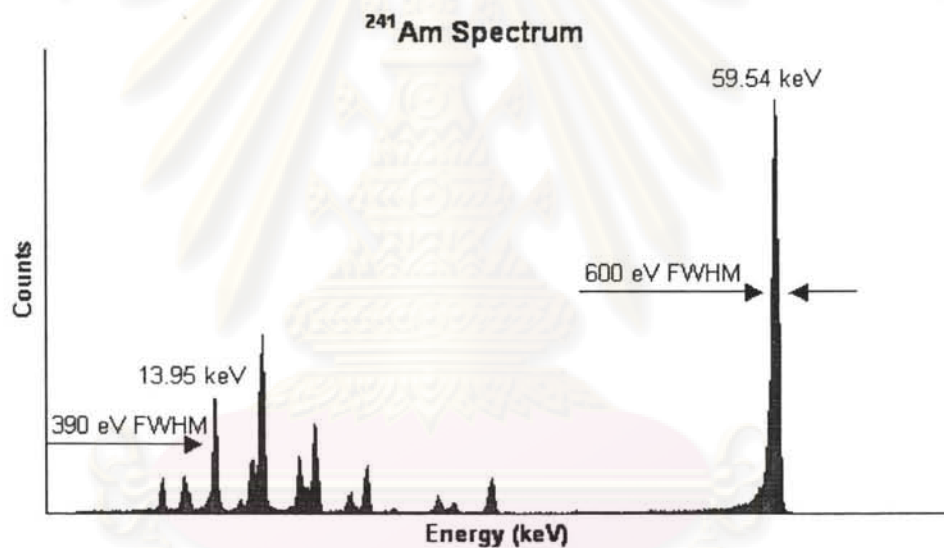
จากแผนภาพ ระบบสแกนเพื่อเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญคือ ระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ ระบบขับเคลื่อนระบบกลสำหรับการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ และโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของระบบและรับข้อมูลโปรไฟล์ หลักการทำงานของระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ทำงานโดยมีไมโครคอมพิวเตอร์สั่งงานชุดควบคุมระบบกลผ่านทางพอร์ตขนาน ซึ่งจะทำการตั้งต้นระบบสแกนไปยังจุดเริ่มต้น โดยมีโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นเซนเซอร์ตรวจสอบตำแหน่ง จากนั้นระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์จะเริ่มทำการเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยการวัดความเข้มรังสีแกมมาพลังงานต่ำที่ส่งผ่านตัวอย่าง ณ ตำแหน่งนั้นด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิดกึ่งตัวนำ CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตร ที่ปรับระบบให้วัดเฉพาะรังสีแกมมาพลังงาน 59.5 keV จากต้นกำเนิดรังสี Am-241 ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากการนับวัดจะถูกส่งเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านทาง

พอร์ตอกรวม เมื่อสิ้นสุดการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งนั้น ไมโครคอมพิวเตอร์จะสั่งงานชุดควบคุมระบบ กลให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งถัดไปจนเก็บข้อมูลครบทุกตำแหน่งบนตัวอย่าง ในการเก็บข้อมูลแต่ละโปรไฟล์นั้น จะหมุนระบบกลไปด้วยมุนน้อย ๆ และเก็บข้อมูลเช่นเดียวกันกับมุมแรก โดยจะทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ จนครบ 180 องศา หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้ไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

3.2.1 ระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

3.2.1.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานต่ำ

งานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา $Am-241$ มีระดับพลังงาน 59.5 keV ความแรง 100 mCi ใช้สำหรับตรวจสอบเสาไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 20 เซนติเมตร

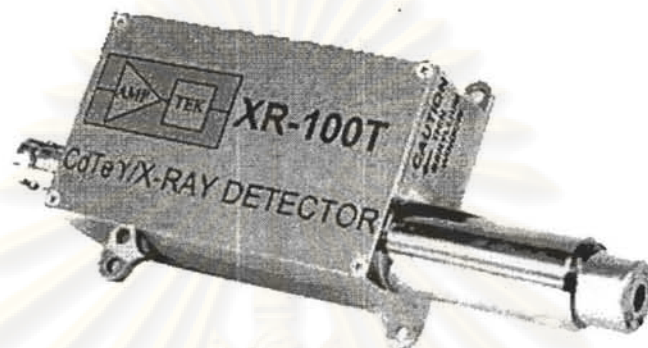


รูปที่ 3.2 แสดงสเปกตรัมจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา $Am-241$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.2 หัววัดรังสีแกมมาชนิดกึ่งตัวนำ CdTe

งานวิจัยนี้เลือกใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดกึ่งตัวนำ ผลึก CdTe ความหนา 5 mm เนื่องจากมีขนาดเล็ก และตอบสนองรังสีแกมมาพลังงานต่ำได้ดี



รูปที่ 3.3 หัววัดรังสีแกมมาชนิด Compound Semiconductor CdTe

3.2.1.3 Scaler Ratemeter

Scaler Ratemeter รุ่น LUDLUM 2200 ตั้งค่าสำหรับเลือกวัดช่องสัญญาณพลังงานของรังสีแกมมา Am-241 ที่ช่วงพลังงาน 59.5 keV



รูปที่ 3.4 Scaler Ratemeter รุ่น LUDLUM 2200

3.2.1.4 รางเลื่อนสำหรับระบบกล

มีลักษณะเป็นรางเลื่อนรูปครึ่งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 cm ทำจากอลูมิเนียมแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนระบบกลของต้นกำเนิดรังสี และส่วนระบบกลของหัววัดรังสีแกมมา



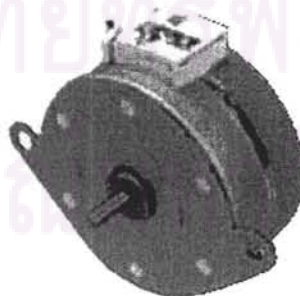
รูปที่ 3.5 รางเลื่อนสำหรับระบบกล

3.2.2 ระบบกลสำหรับการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

เนื่องจากงานวิจัยนี้ ต้องการความละเอียดแม่นยำของตำแหน่ง และระยะเวลาที่แน่นอน จึงเลือกใช้สเตปปีงมอเตอร์มาใช้ในการขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีแกมมา

3.2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์

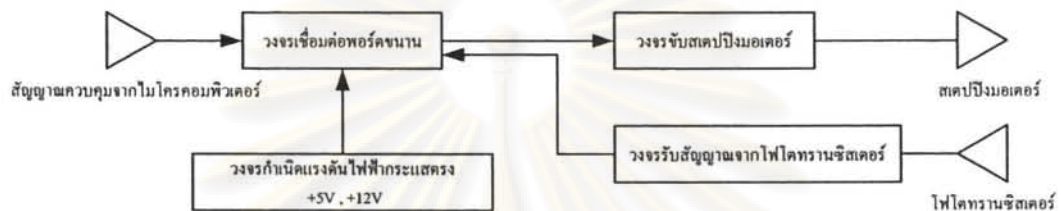
งานวิจัยนี้เลือกใช้สเตปปีงมอเตอร์รุ่น PM42L-048 ให้ความละเอียด 7.5° ต่อสเตป โดยใช้ความต่างศักย์ 12 โวลต์



รูปที่ 3.6 สเตปปีงมอเตอร์รุ่น PM42L-048

3.2.2.2 ชุดวงจรควบคุมสเตปป์มอเตอร์

การใช้งานสเตปป์มอเตอร์ นั้นจะต้องทำการกระตุ้นเฟสของขดลวดให้เรียงลำดับกันต่อเนื่องทางใดทางหนึ่ง ซึ่งการกระตุ้นเฟสมี 3 แบบคือ กระตุ้นเฟสเดียว (single phase excitation) กระตุ้นสองเฟส (two phase excitation) กระตุ้นโดยสลับหนึ่งเฟส และสองเฟส (one-two phase excitation)



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการทำงานของชุดควบคุมสเตปป์มอเตอร์

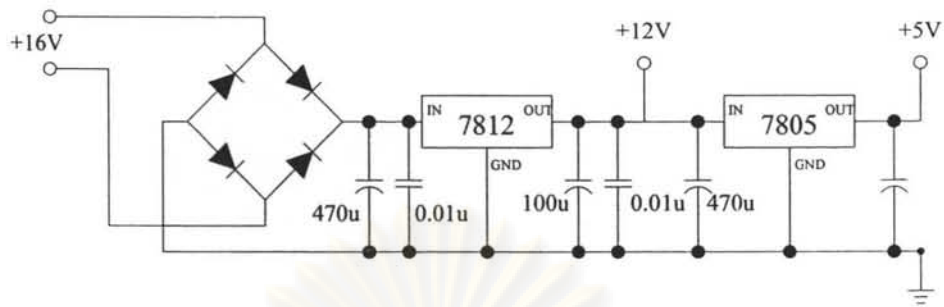
สเตปป์ที่	เฟสที่1	เฟสที่2	เฟสที่3	เฟสที่4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงการกระตุ้นขดลวดภายในสเตปป์มอเตอร์แบบ one-two Phase

งานวิจัยชิ้นนี้เลือกวิธีการกระตุ้นแบบสองเฟส เนื่องจากให้กำลังมากกว่า เข้าตำแหน่งแต่ละสเตปป์ได้เร็วกว่า และให้แรงบิดมากกว่าการกระตุ้นแบบอื่นๆ ซึ่งการกระตุ้นเฟสจำเป็นต้องใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆดังนี้

3.2.2.2.1 วงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 V และ 12 V

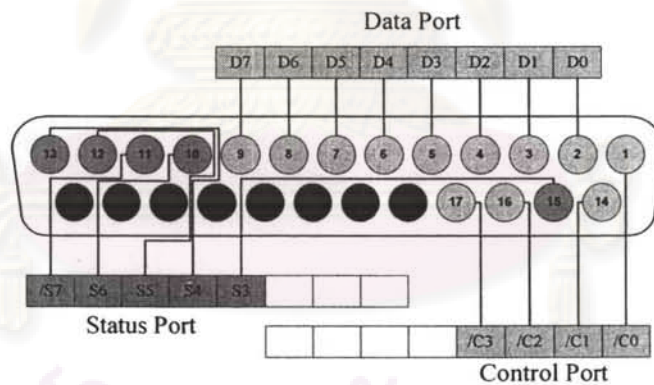
ในการใช้งานวงจรต่างๆ เพื่อกระตุ้นเฟสของสเตปป์มอเตอร์นั้น จำเป็นจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในการขับวงจรรวม และตัวสเตปป์มอเตอร์เอง โดยในงานวิจัยนี้ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 2 ความต่างศักย์ คือ 5 V และ 12 V โดยมีวงจรถูกกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง +5V และ +12V

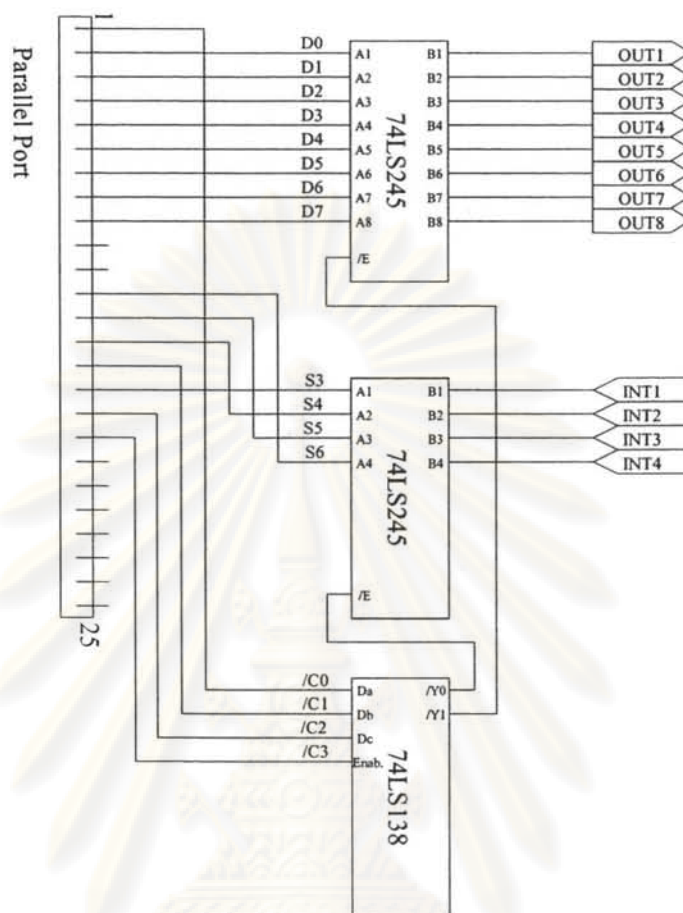
3.2.2.2.2 วงจรเชื่อมต่อพอร์ตขนาน

พอร์ตขนานหรือ Parallel Port นั้นบางครั้งจะเรียกกันว่า Printer Port เพราะการใช้งานส่วนใหญ่กับพอร์ตขนานเป็นการใช้งานโดยต่อกับ printer เป็นหลัก โดยที่พอร์ตขนานนั้นสามารถให้ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลได้รวดเร็วกว่าพอร์ตอนุกรม (Serial Port) ประมาณ 8-10 เท่า ซึ่งสามารถส่งข้อมูลขนาน 8 บิตได้นั้นเอง ลักษณะของ connector ของพอร์ตขนานนั้นจะเป็นแบบ DB 25 pin โดยตัวเมียจะอยู่ทางด้านหลัง PC พอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยสัญญาณทั้งหมด 25 เส้น แต่สามารถใช้งานได้จริงได้ 17 เส้น โดยสัญญาณจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ Data Port, Status Port, Control Port [6]



รูปที่ 3.10 สัญญาณต่าง ๆ ของพอร์ตขนาน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 วงจรเชื่อมต่อพอร์ตขนาน

ตารางที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของกลุ่มสัญญาณ Address เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อพอร์ตขนาน

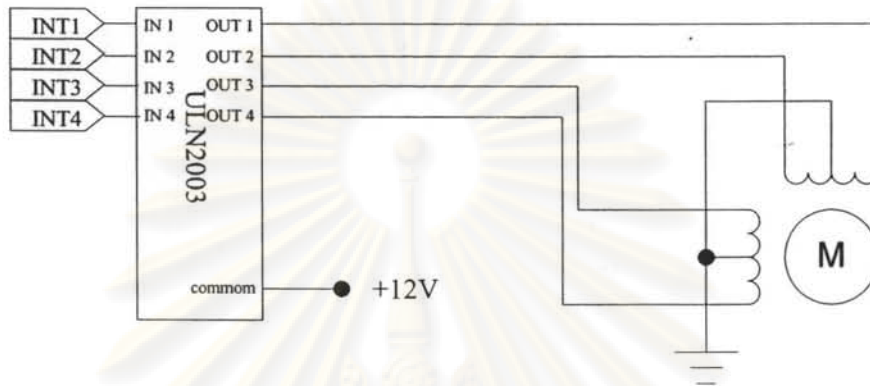
กลุ่มสัญญาณ	LPT1	LPT2
Data Port	378H	3BCH
Status Port	379H	3BDH
Control Port	37AH	3BEH

วงจรเชื่อมสัญญาณระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์จาก

ภายนอก อาศัยการโอนถ่ายสัญญาณผ่านพอร์ตทางเข้า และพอร์ตทางออก ของไมโครคอมพิวเตอร์ในตำแหน่งที่แสดง ดังตารางที่ 3.1

3.2.2.2.3 วงจรขับสเตปมอเตอร์

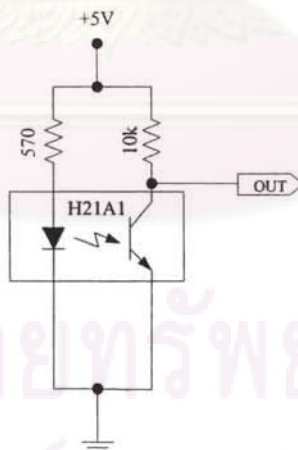
ใช้ IC เบอร์ ULN2003 เป็นตัวขับสเตปมอเตอร์รับสัญญาณจากวงจรเชื่อมต่อพอร์ตนาน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 วงจรขับสเตปมอเตอร์

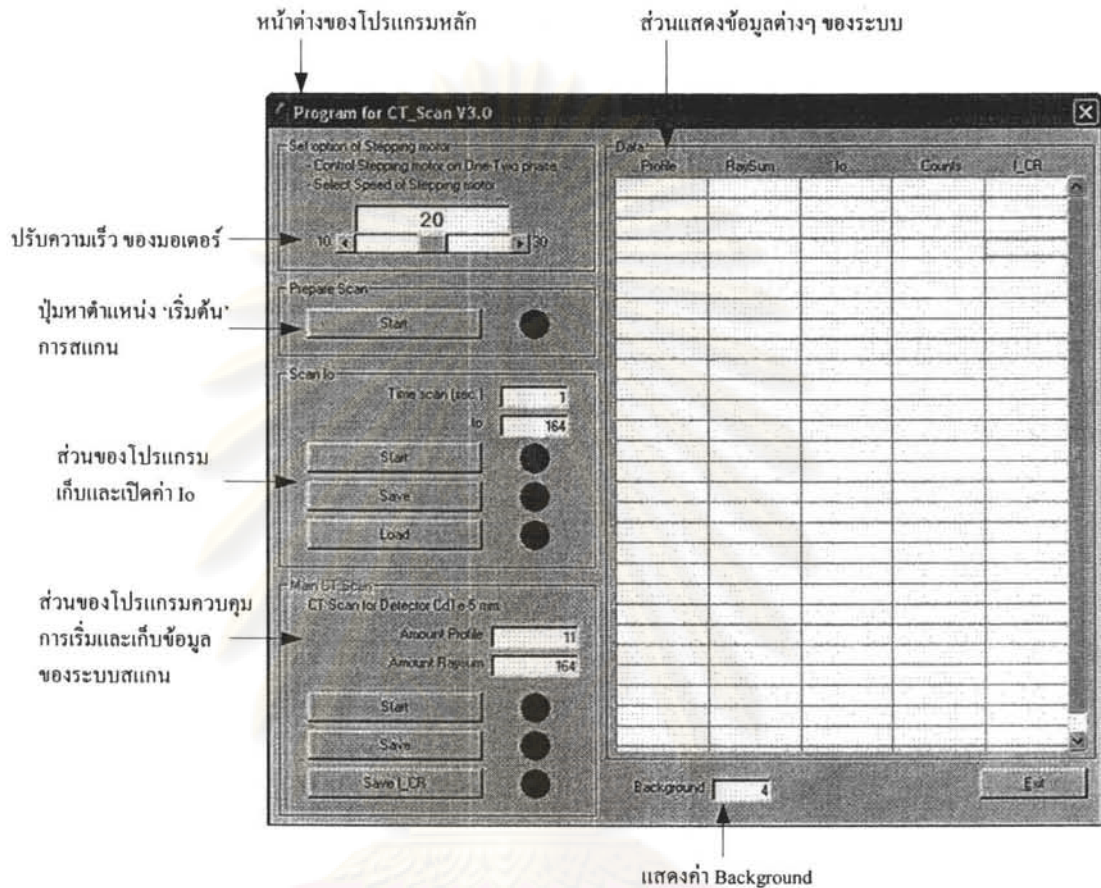
3.2.2.2.4 วงจรรับสัญญาณจากโฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว จะทำหน้าที่ในการบอกตำแหน่งเริ่มต้นและสุดท้ายของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดยเมื่อถึงตำแหน่งที่ตั้งไว้ จะส่งสัญญาณลอจิก 0 เข้าสู่วงจรเชื่อมต่อพอร์ตนาน



รูปที่ 3.13 วงจรรับสัญญาณจากโฟโตทรานซิสเตอร์

3.3 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบสแกนและรับข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



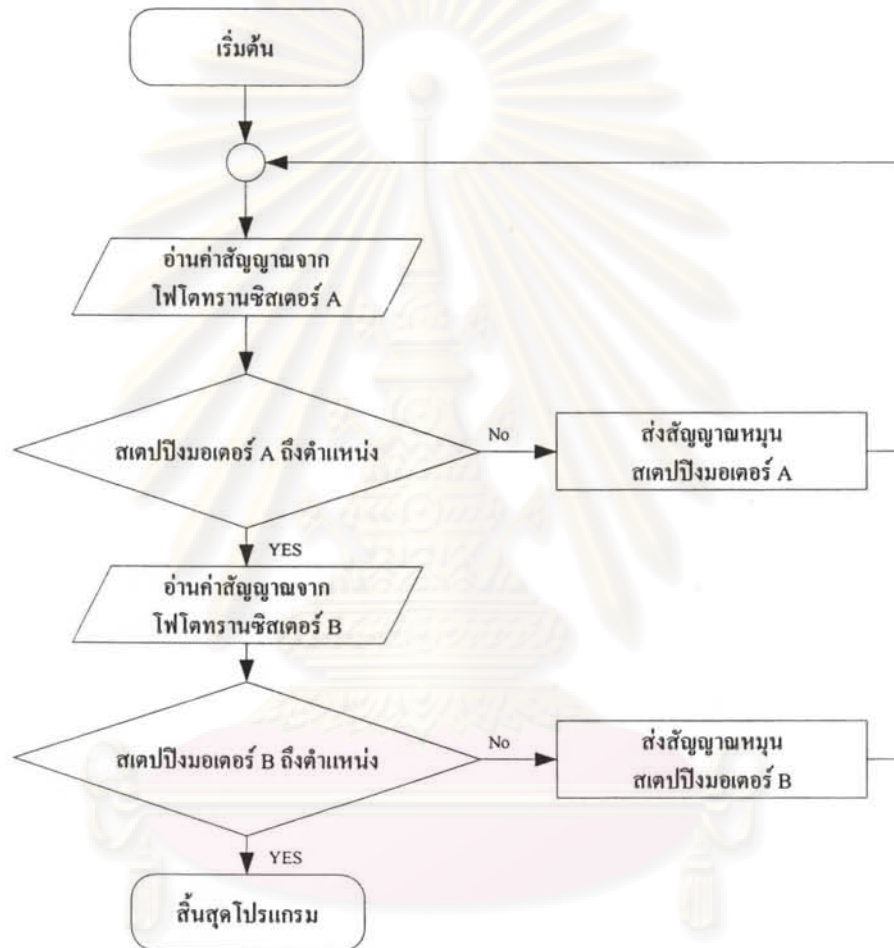
รูปที่ 3.14 หน้าต่างของโปรแกรมควบคุมระบบสแกน และเก็บข้อมูลโปรไฟล์

โปรแกรมควบคุมระบบสแกน และเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Basic 6.0 ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์จะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนหาตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและเรียกข้อมูล I_0 และขั้นตอนการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 ขั้นตอนการหาตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน

เป็นการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวให้เคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งเมื่อถึงตำแหน่งเริ่มต้นการสแกนสัญญาณจากโฟโตทรานซิสเตอร์จะส่งไปสู่มicroคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตขนานที่ตำแหน่งแอดเดรส 379H เพื่อแจ้งให้โปรแกรมทราบ



รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน

3.3.2 ขั้นตอนการเก็บ บันทึก และเรียกใช้ ค่านับวัด I_0

ก่อนการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทุกครั้ง โปรแกรมจะทำการเรียกหาค่านับวัด I_0 ซึ่งจะนำมาใช้ในการ correct data เพื่อทำการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีต่อไป ขั้นตอนการเก็บข้อมูลค่านับวัด I_0 อธิบายได้จาก รูปภาพที่ 3.16(a) ซึ่งเริ่มจากต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน กำหนดเวลานับวัด I_0 และเริ่มทำการสแกนเก็บค่า I_0 โปรแกรมจะเริ่มทำงานอัตโนมัติ จนเสร็จสิ้นการสแกนเก็บค่า I_0 ต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี จะกลับมาอยู่ใน

ตำแหน่งเริ่มต้นการสแกนนั้นหมายถึงมีการเก็บข้อมูลนับวัดค่า I_0 เสร็จสิ้นแล้ว เราสามารถที่จะบันทึกค่า I_0 เพื่อเก็บไว้เรียกใช้ในกรณีที่การสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ใช้เวลานานนับวัดที่เท่ากัน ตามหลักการทำงานดังรูปที่ 3.16(b) หรือกรณีที่ต้องการเรียกใช้ข้อมูลค่านับวัด I_0 ก็สามารถเรียกใช้ค่านับวัดที่บันทึกไว้แล้วได้เช่นกัน ตามหลักการทำงานดังรูปที่ 3.16(c)

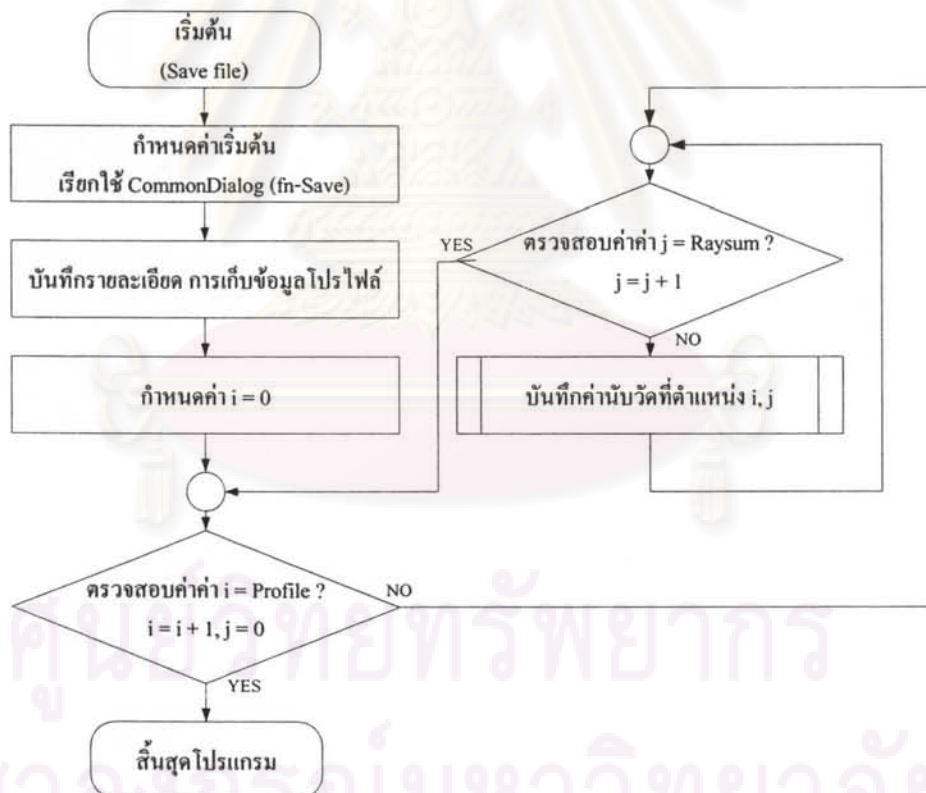


รูปที่ 3.16 แผนภาพการเก็บ บันทึก และเรียกใช้ ค่านับวัด I_0

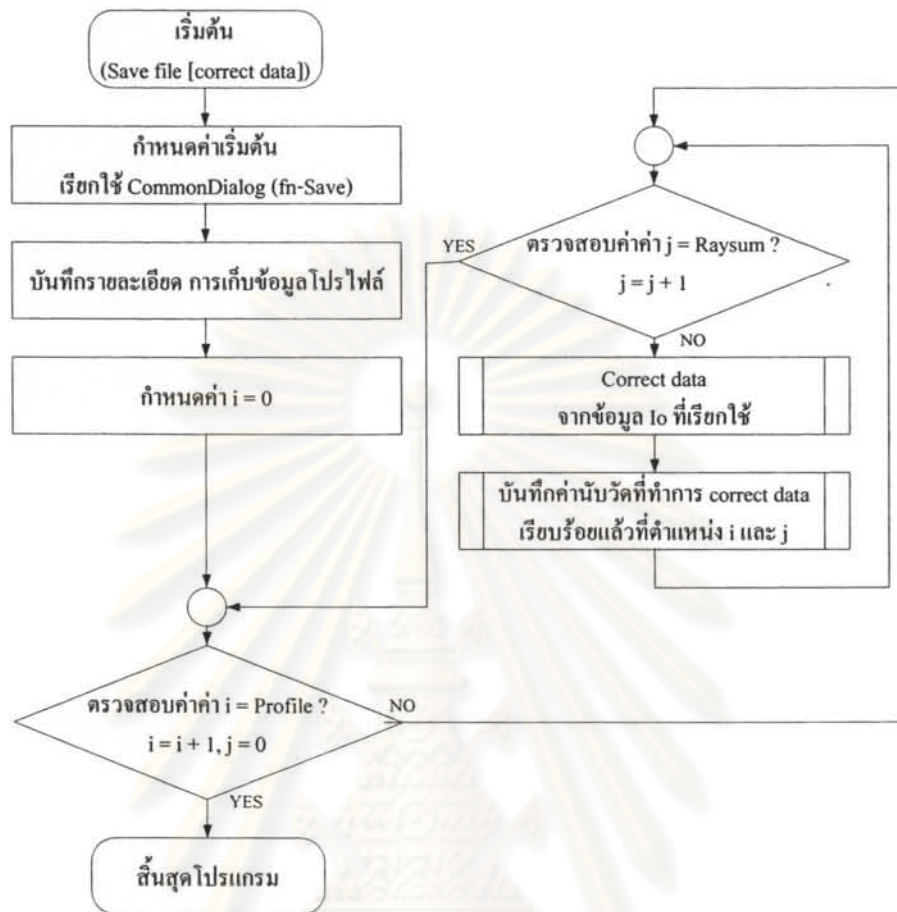
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลโปรไฟล์

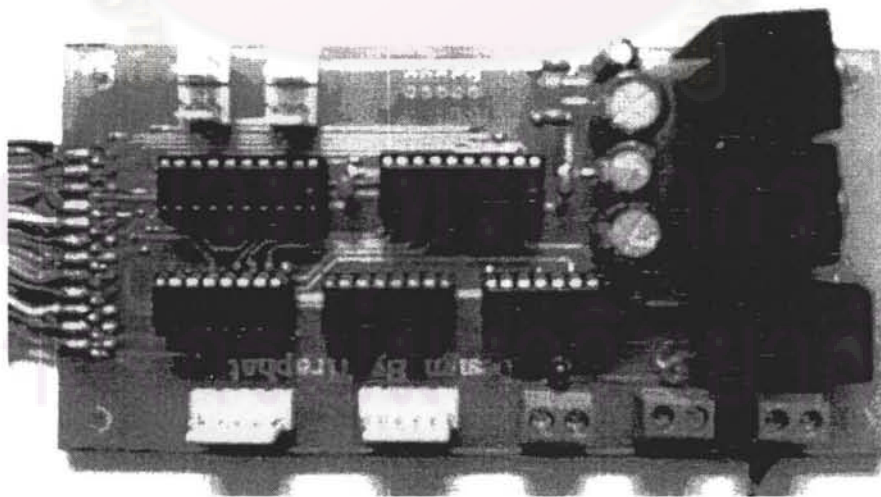
การเก็บข้อมูลโปรไฟล์จำเป็นต้องกำหนดค่าเวลานับวัด จำนวนเรย์ซิม และจำนวนโปรไฟล์ที่ต้องการ โดยที่ค่าเวลานับวัด และจำนวนเรย์ซิมต้องสัมพันธ์กับค่า I_0 ที่เรียกใช้ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์เริ่มจาก ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นการสแกน กำหนดจำนวนโปรไฟล์ แล้วเริ่มการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ มีหลักการการทำงานดังรูปที่ 3.17 เมื่ออุปกรณ์สแกน ทำการสแกนเสร็จสิ้นแล้ว ต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี จะกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นการสแกนเช่นเดิม โปรแกรมควบคุมระบบสแกน และเก็บข้อมูลโปรไฟล์ สามารถบันทึกข้อมูลโปรไฟล์ได้ทั้งแบบข้อมูลดิบ และข้อมูลที่ผ่านการ correct data กับ I_0 แล้ว โดยมีหลักการการทำงานดังรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.18 ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถเรียกดู ข้อมูลค่านับวัด I_0 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ยังไม่ผ่านการ correct data และข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการ correct data เรียบร้อยแล้วได้ที่ตารางแสดงข้อมูลต่างๆ ในโปรแกรมอีกด้วย



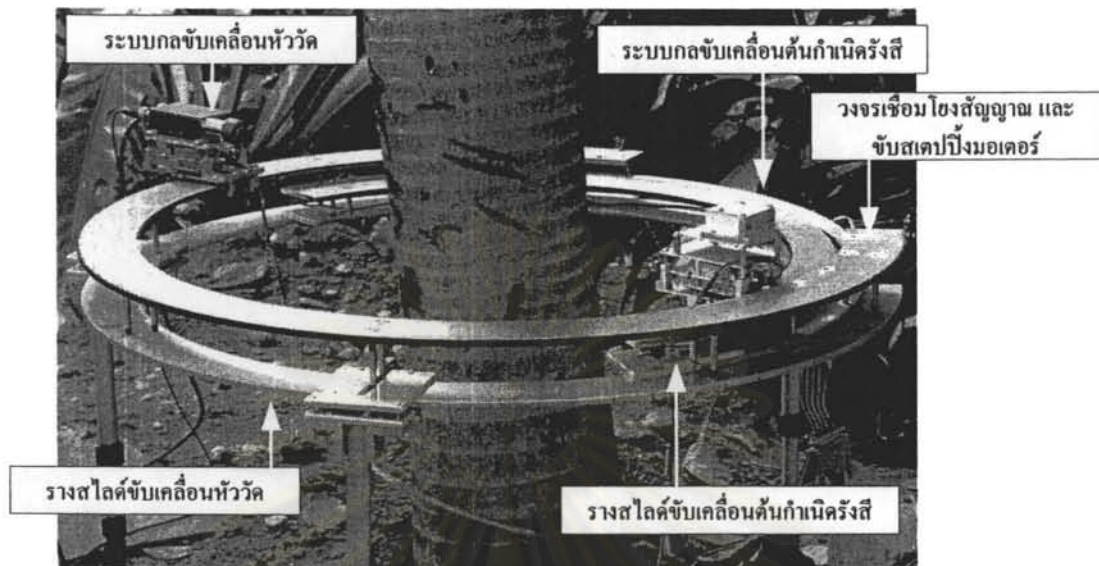
รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลโปรไฟล์ที่ยังไม่ได้ผ่านการ correct data



รูปที่ 3.18 แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการ correct data แล้ว



รูปที่ 3.19 แผงวงจรเชื่อมต่อพอร์ตนาน และควบคุมสเตปมอเตอร์



รูปที่ 3.20 ระบบกลเคลื่อนย้ายได้ สำหรับสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์



รูปที่ 3.21 ระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

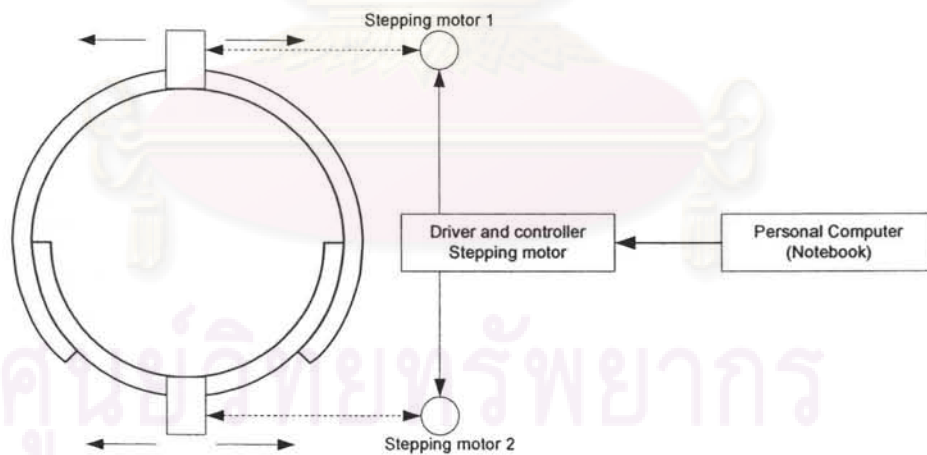
บทที่ 4

การทดสอบการทำงานของระบบ และผลการทดสอบ

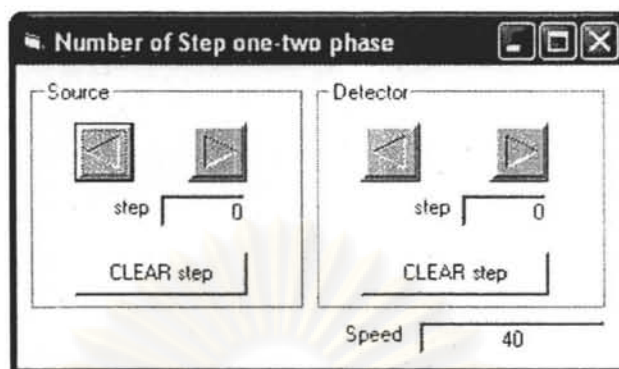
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยแบ่งการทดสอบการทำงานของระบบเป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ส่วนแรก คือ การทดสอบระบบกลสำหรับขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี โดยการทดสอบความถูกต้อง และความแม่นยำของการควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์ ส่วนที่สองคือ การทดสอบระบบวัดรังสี และส่วนที่สามคือ การทดสอบหาความเหมาะสมของเวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

4.1 การทดสอบระบบกล

ระบบกลสำหรับควบคุมการหมุนของต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี ต้องทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำของการควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์ โดยจัดระบบทดสอบ ดังรูปที่ 4.1 ทำเครื่องหมายระบุตำแหน่งทุก ๆ 10 องศา บนรางสไลด์ทั้งสองส่วน โดยใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ช่วยในการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดที่ทำเครื่องหมายระบุตำแหน่ง แล้วใช้โปรแกรมควบคุม และนับจำนวนสเตปของสเตปปีงมอเตอร์ เพื่อให้ตรวจสอบความถูกต้องหน้าต่างโปรแกรมทดสอบระบบกลแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการทดสอบระบบกล



รูปที่ 4.2 หน้าต่างโปรแกรมทดสอบระบบกล

โปรแกรมการทดสอบระบบกลแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ควบคุมหัววัดรังสี และส่วนที่ควบคุมต้นกำเนิดรังสี โดยใช้การกระตุ้นเฟสของสเตปปีงมอเตอร์แบบ One-Two Phase กำหนดความเร็ว และแสดงจำนวนสเตปที่ใช้ในการเคลื่อนที่

การทดสอบระบบกล โดยกำหนดให้สเตปปีงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปและกลับ โดยทดสอบที่มุม 10, 45, 90, 135, 180, และ 270 องศา แล้วตรวจสอบจำนวนสเตปที่ใช้ในการเคลื่อนที่ โดยสเตปปีงมอเตอร์ส่วนของหัววัดรังสีจะต้องเคลื่อนที่ทั้งสิ้น 270 องศา ส่วนสเตปปีงมอเตอร์ส่วนต้นกำเนิดรังสีจะเคลื่อนที่ 180 องศา พบว่าการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์เป็นไปด้วยความแม่นยำสูงผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

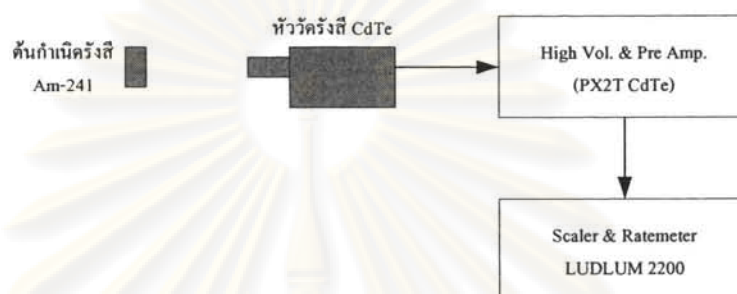
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบระบบกล

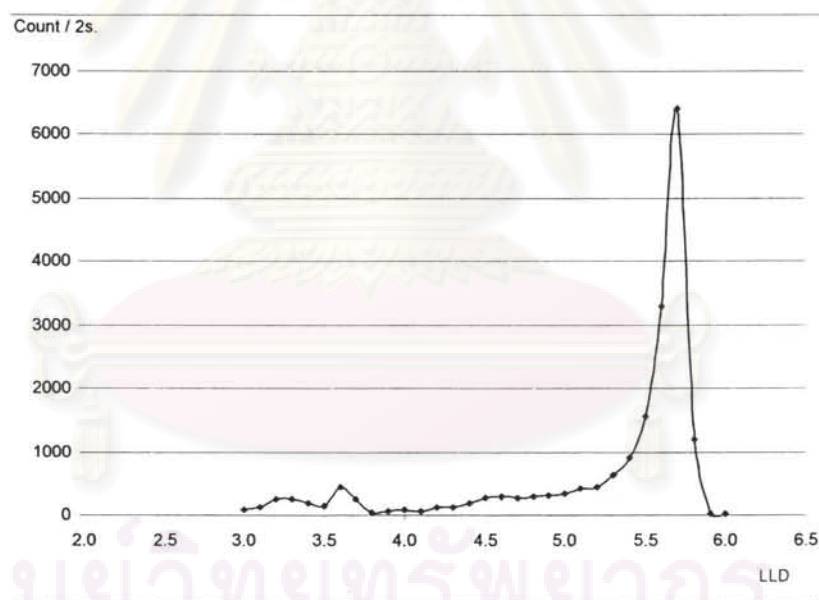
มุม (องศา)	ครั้งที่	จำนวนสเตปของ Stepping motor 1		จำนวนสเตปของ Stepping motor 2	
		Turn left	Turn right	Turn left	Turn right
10	1	292	292	292	292
	2	292	292	292	292
	3	292	292	292	292
	4	292	292	292	292
	5	292	292	292	292
45	1	964	964	964	964
	2	964	964	964	964
	3	964	964	964	964
	4	964	964	964	964
	5	964	964	964	964
90	1	1928	1928	1928	1928
	2	1928	1928	1928	1928
	3	1928	1928	1928	1928
	4	1928	1928	1928	1928
	5	1928	1928	1928	1928
135	1	2912	2912	2912	2912
	2	2912	2912	2912	2912
	3	2912	2912	2912	2912
	4	2912	2912	2912	2912
	5	2912	2912	2912	2912
180	1	3856	3856	3856	3856
	2	3856	3856	3856	3856
	3	3856	3856	3856	3856
	4	3856	3856	3856	3856
	5	3856	3856	3856	3856
270	1	7824	7824	-	-
	2	7824	7824	-	-
	3	7824	7824	-	-
	4	7824	7824	-	-
	5	7824	7824	-	-

4.2 การทดสอบระบบวัดรังสีแกมมา

ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 พลังงาน 59.5 keV ความแรงรังสี 100 mCi ร่วมกับหัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ CdTe หนา 5 มิลลิเมตร โดยจัดระบบวัดดังรูปที่ 4.3 บันทึกการนับวัด นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดกับ LLD ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงระบบวัดรังสีแกมมา

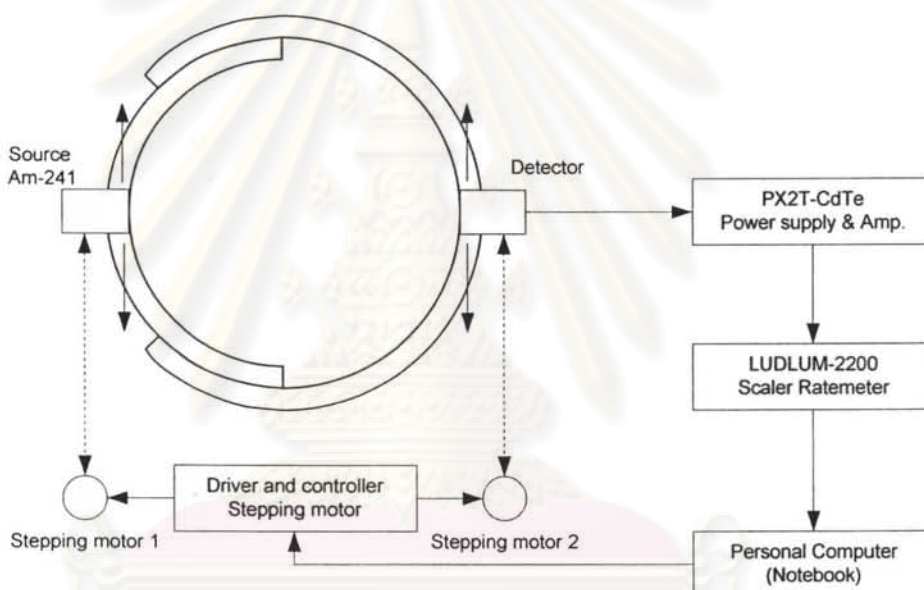


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัด และ LLD

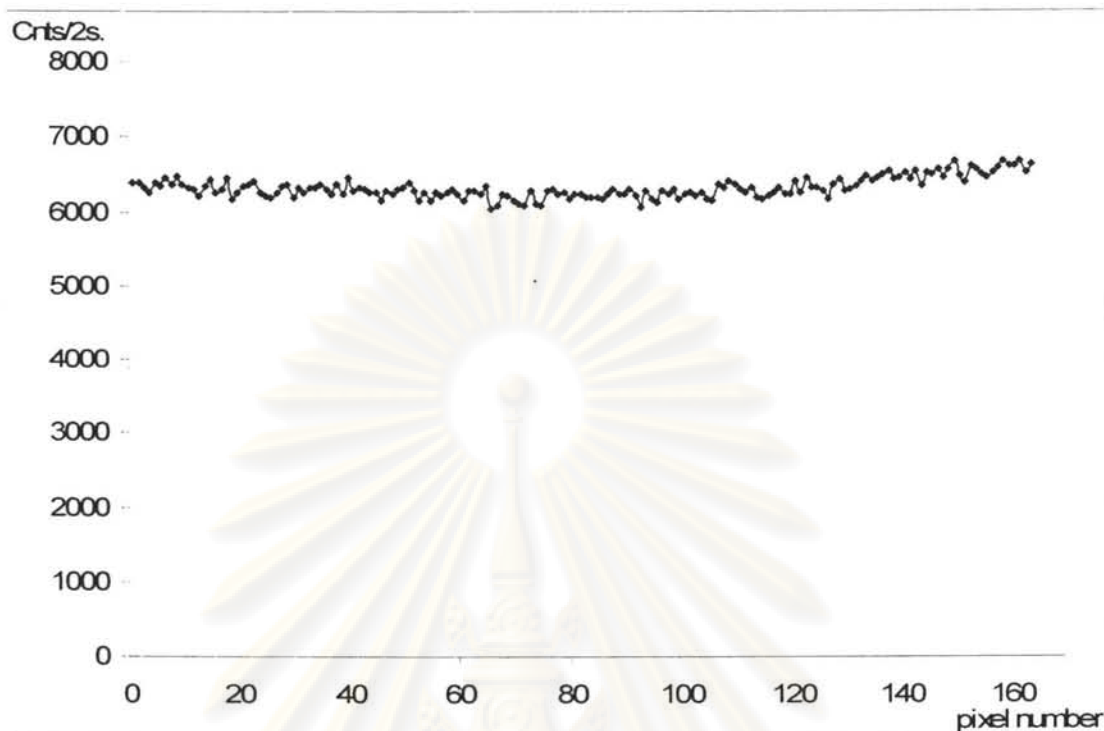
การทำงานของระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ จะวัดความเข้มของรังสีเฉพาะส่วนที่เป็นโฟโตพีคเท่านั้น ซึ่งก่อนที่จะใช้งานระบบสแกนทุกครั้งจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบ และปรับระบบวัดให้ครอบคลุมในส่วนที่เป็นโฟโตพีคเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการกระเจิงของรังสี ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้

4.3 การทดสอบเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการสแกน เป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับแก้ ดังนั้นก่อนที่จะสร้างภาพโทโมกราฟีได้นั้นจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูล I_0 เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับแก้ข้อมูลโปรไฟล์ก่อนการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี การเก็บข้อมูล I_0 สามารถจัดระบบได้ดังรูปที่ 4.5 สแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ เรย์ซึ่มละ 2 วินาที โดยไม่มีวัตถุตัวอย่าง ควบคุมส่วนของหัววัดรังสีให้เคลื่อนที่เป็นมุม 90 องศา จากจุดหมุน เนื่องจากขณะมีชิ้นงานตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร หัววัดรังสีจะเคลื่อนที่ครอบคลุมวัตถุเป็นมุม 90 องศา จากจุดหมุนพอดี นำมาเขียนกราฟแสดงข้อมูลโปรไฟล์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



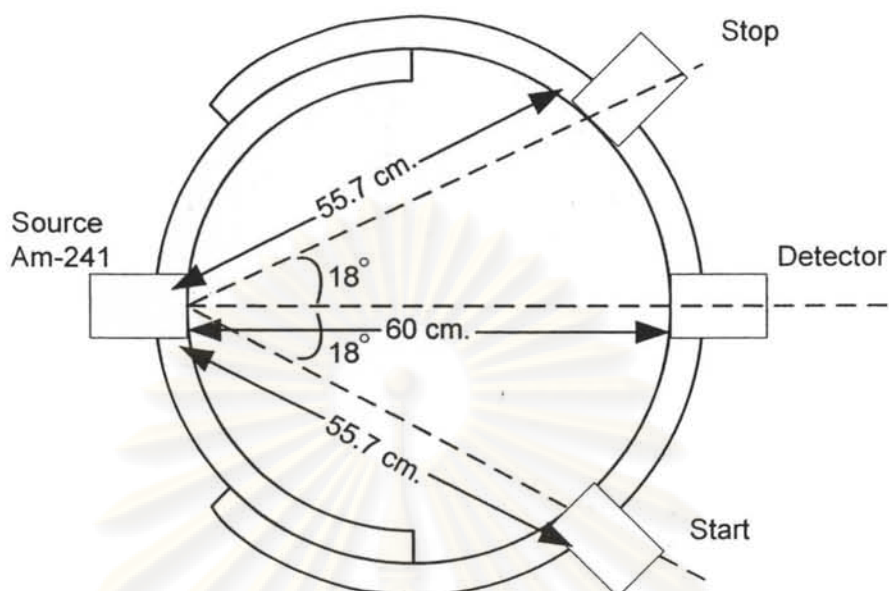
รูปที่ 4.5 ระบบทดสอบเก็บข้อมูล I_0



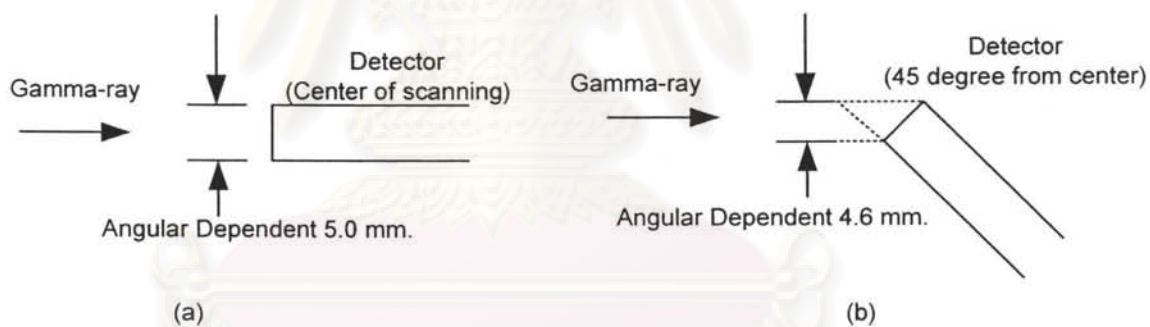
รูปที่ 4.6 ข้อมูลโปรไฟล์ I_0

จากข้อมูลโปรไฟล์ I_0 สังเกตว่าปริมาณความเข้มรังสีจะลดลงต่ำที่สุดช่วง Pixel Number ที่ 82 เนื่องจาก ปริมาณความเข้มรังสีก็ลดลงตามระยะทางยกกำลังสอง จากรูปที่ 4.6 ระยะห่างระหว่างหัววัดถึงต้นกำเนิดรังสีมากที่สุดที่จุดกลางโปรไฟล์เป็นผลให้ปริมาณความเข้มของรังสีต่ำกว่าบริเวณด้านข้าง และมีผลจาก Angular Dependent เกิดจากหัววัดรังสีขณะจุดเริ่มสแกน และสิ้นสุดการสแกนของแต่ละโปรไฟล์ จะเกิดมุมที่หัววัดรังสีทำกับต้นกำเนิดรังสี ทำให้ไม่สามารถรับปริมาณรังสีได้เท่ากันตลอดโปรไฟล์ ดังรูปที่ 4.8(a) เป็นรูปแสดง Angular Dependent ขณะหัววัดอยู่ที่จุดกลางการสแกนทำให้สามารถรับความเข้มรังสีเข้าสู่หัววัดได้โดยตรง ส่วนรูปที่ 4.8(b) เป็นมุมสูงที่สุดที่หัววัดรังสีทำกับต้นกำเนิดรังสี (ที่จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดการสแกน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



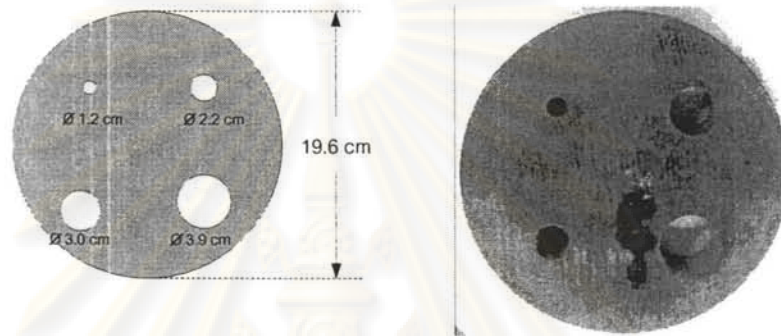
รูปที่ 4.7 แสดงระยะห่างระหว่างหัววัดรังสี และต้นกำเนิดรังสีที่มุมต่างๆ



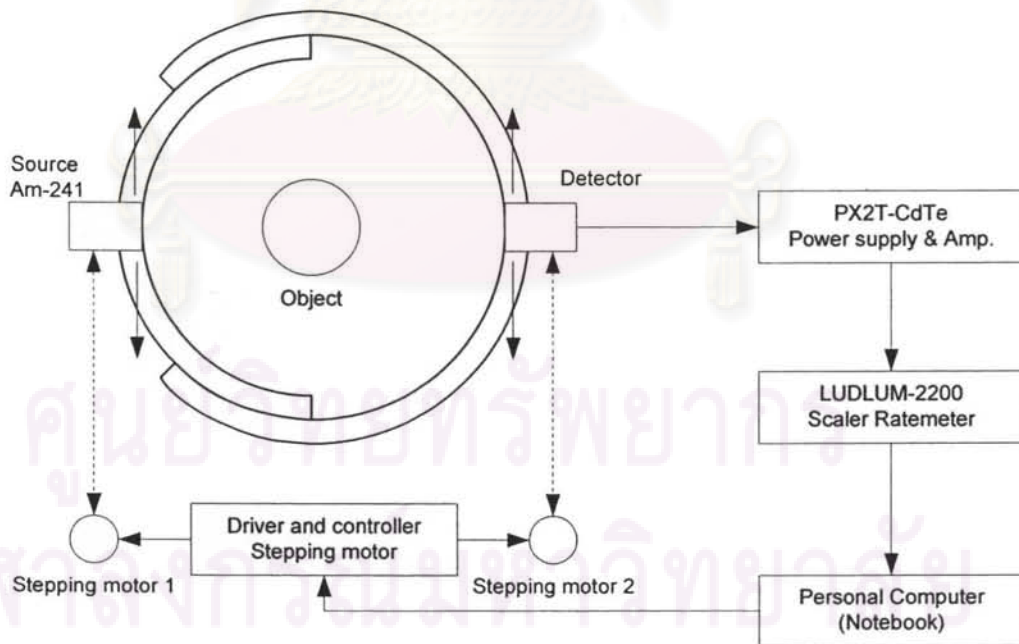
รูปที่ 4.8 Angular Dependent ของหัววัดรังสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

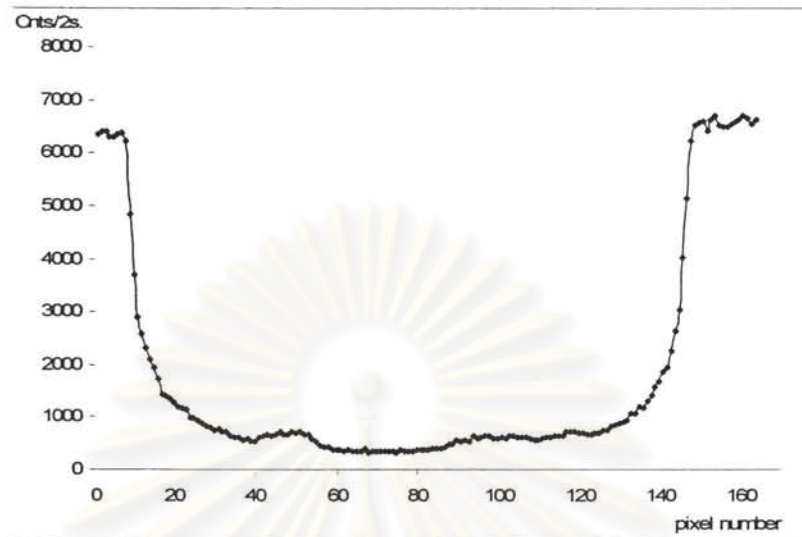
เมื่อสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยมีวัตถุตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะเป็นไม้เนื้อแข็งทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 19.6 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร เจาะรูในลักษณะเปรียบเทียบเสมือนเป็นโพรงไม้ 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน คือ 1.2, 2.2, 3.0 และ 3.9 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.9 และจัดระบบการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ดังรูปที่ 4.10 กำหนดให้สแกนเก็บข้อมูลจำนวนหนึ่งโปรไฟล์ เรย์ซั่มละ 2 วินาที ข้อมูลโปรไฟล์แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานทดสอบระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

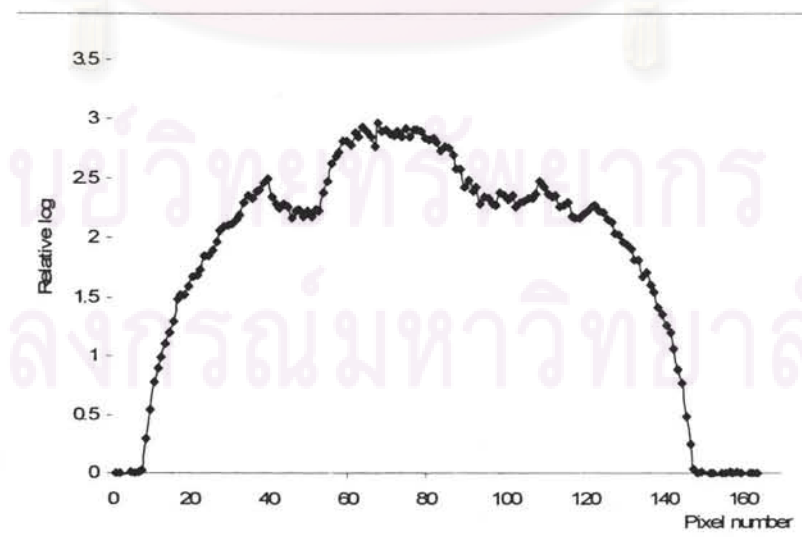


รูปที่ 4.11 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับแก้

จากกราฟแสดงข้อมูลโปรไฟล์สังเกตว่าเมื่อรังสีผ่านวัตถุตัวอย่าง ปริมาณความเข้มรังสีที่ลดลงจะสัมพันธ์กับความหนาของวัตถุตัวอย่าง และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับแก้กับค่า I_0 จากสมการที่ 4.1

$$I = I_0 \ln \left(\frac{I - \text{Background}}{I_0 - \text{Background}} \right) \quad \dots 4.1$$

แล้วเขียนกราฟแสดงข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการปรับแก้ได้ดังรูปที่ 4.12 พบว่าข้อมูลโปรไฟล์สามารถแยกแยะรายละเอียดได้ดีขึ้น

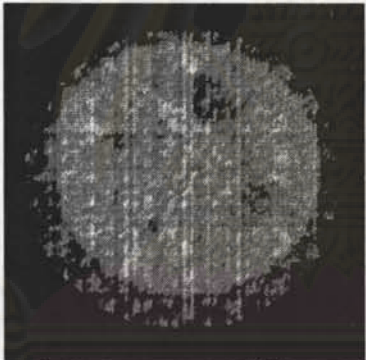
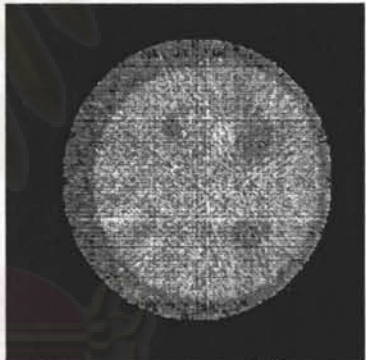


รูปที่ 4.12 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการปรับแก้ I_0 แล้ว

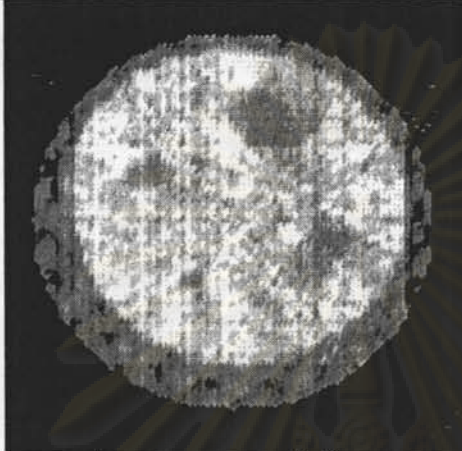
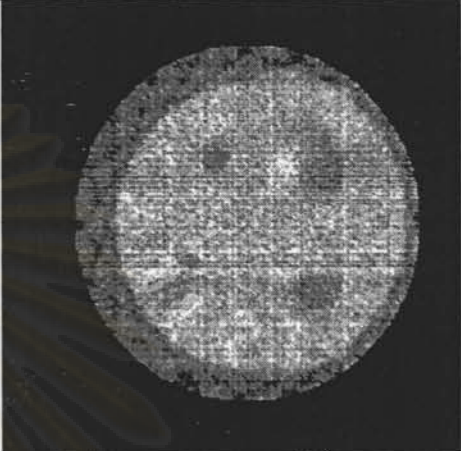
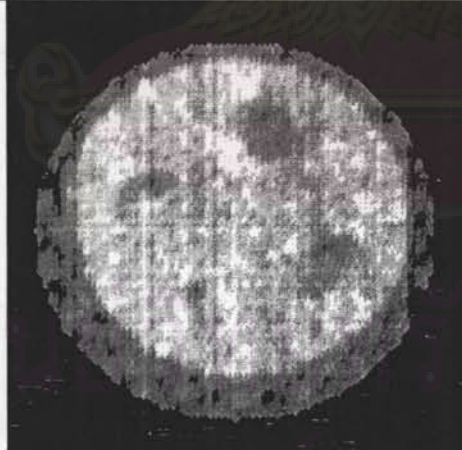
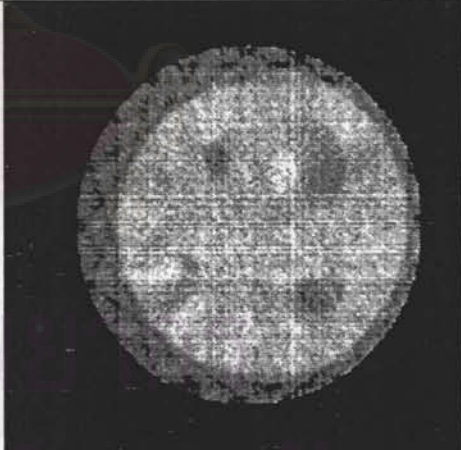
4.4 การทดสอบหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการวัด และจำนวนเรย์ซึ่มในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

การใช้งานระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมควบคุมระบบสแกน จำเป็นต้องเรียกข้อมูล I_0 จากข้อมูลที่บันทึกไว้ให้สอดคล้องกับจำนวนเรย์ซึ่มและเวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ต้องการ ทำการสแกนให้ครอบคลุมวัสดุตัวอย่างทั้งสิ้น 180 องศา แล้วจึงทำการทดสอบหาความเหมาะสมของเวลา และจำนวนเรย์ซึ่มที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์แต่ละโปรไฟล์ โดยจัดอุปกรณ์การทดสอบดังรูปที่ 4.10 และใช้ชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 4.9 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

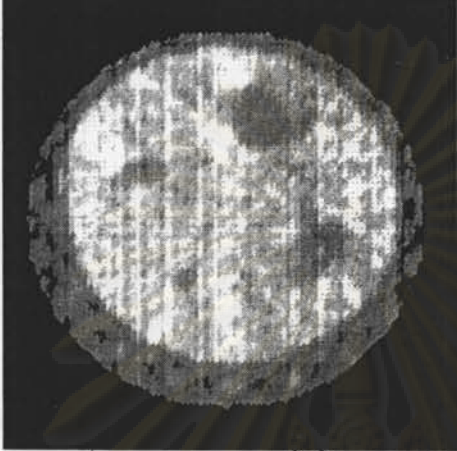
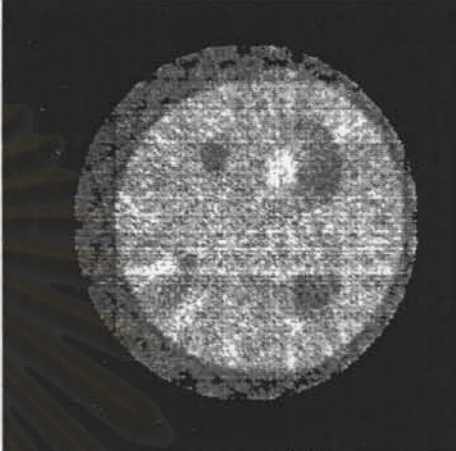

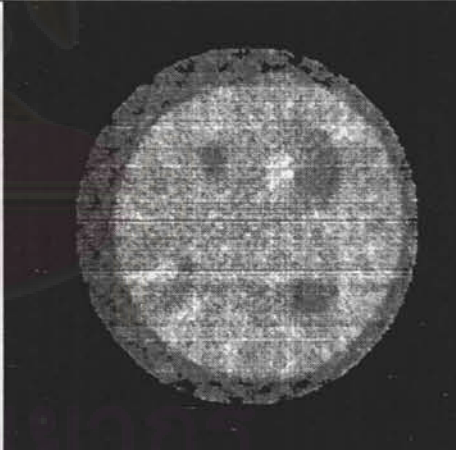
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซึ่มต่างๆ

เวลา (วินาที/เรย์ซึ่ม)	จำนวนเรย์ซึ่ม / 1 โปรไฟล์	
	82	164
1	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 30 นาที</p>	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 60 นาที</p>
<p>จากภาพโทโมกราฟีทั้งสองภาพ จะพบวงกลมสีดำจำนวน 4 วง ซึ่งก็คือ รูที่เจาะที่ชิ้นงานทดสอบ ขนาดต่าง ๆ สามารถเห็นขนาดเล็กที่สุดได้ สังเกตจากภาพโทโมกราฟีด้านขวาพบบริเวณส่วนที่มีลักษณะเป็นวงกลมสีขาวใกล้กับรูขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างบริเวณนั้นมีความหนาแน่นสูงกว่าบริเวณโดยรอบ และเกิด artifact ในลักษณะเป็นเส้น ที่โดยเกิดจากความผิดพลาดของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทั้งสองภาพ ที่ภาพโทโมกราฟีที่มีจำนวนเรย์ซึ่ม 82 เรย์ซึ่มต่อหนึ่งโปรไฟล์ จะพบว่ามี ความคมชัดน้อยกว่าภาพโทโมกราฟีที่มีจำนวนเรย์ซึ่ม 164 เรย์ซึ่มต่อหนึ่งโปรไฟล์ค่อนข้างมาก</p>		

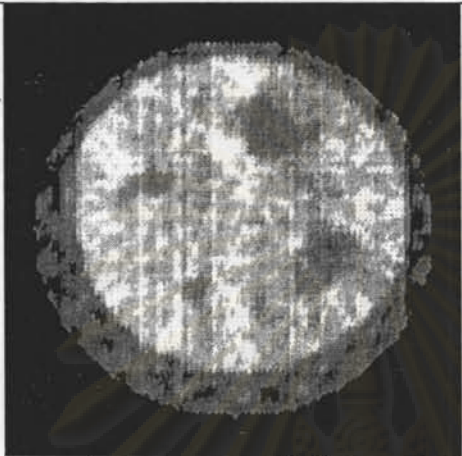
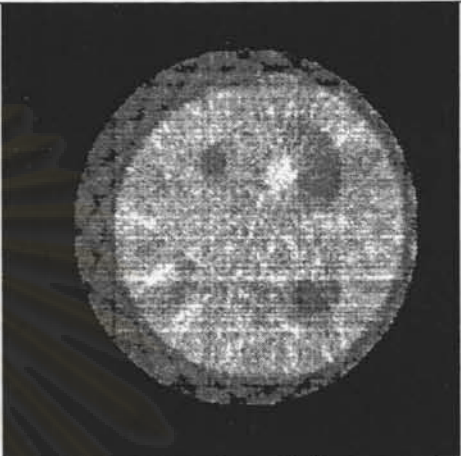
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซั่มต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (วินาที/เรย์ซั่ม)	จำนวนเรย์ซั่ม / 1 โปรไฟล์	
	82	164
2		
	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 45 นาที	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 90 นาที
<p>จากภาพโทโมกราฟี พบวงกลมสีดำจำนวน 4 วง คือ รูที่ขึ้นงานทดสอบ มีรายละเอียดที่ชัดเจนกว่าภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูล 1 วินาทีต่อเรย์ซั่ม เห็นรูขนาดเล็กที่สุดได้ เกิด artifact เป็นเส้น จากความผิดพลาดของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ และภาพที่มีจำนวนเรย์ซั่ม 82 เรย์ซั่มต่อโปรไฟล์ ความคมชัดน้อยกว่าภาพที่มีจำนวนเรย์ซั่ม 164 เรย์ซั่มต่อโปรไฟล์ ค่อนข้างมาก</p>		
3		
	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 60 นาที	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 120 นาที
<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่ามีรายละเอียดที่ชัดเจนกว่าภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูล 2 วินาทีต่อเรย์ซั่ม เห็นรูขนาดเล็กที่สุดได้ และเกิด artifact ในลักษณะเป็นเส้น โดยเกิดจากความผิดพลาดของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทั้งสองภาพ แต่เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณภาพโทโมกราฟีค่อนข้างนาน</p>		

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซั่มต่าง ๆ (ต่อ)

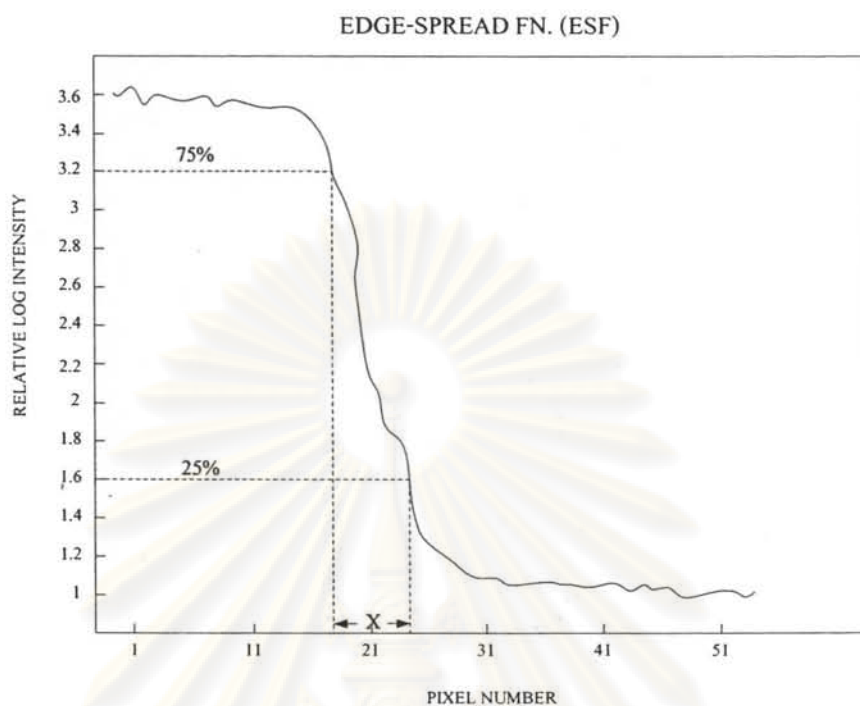
เวลา (วินาที/เรย์ซั่ม)	จำนวนเรย์ซั่ม / 1 โปรไฟล์	
	82	164
4	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 75 นาที</p>	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 150 นาที</p>
<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่ามีรายละเอียดที่ใกล้เคียงกับภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูล 3 วินาทีต่อหนึ่งเรย์ซั่ม สามารถเห็นขนาดเล็กที่สุดได้ และเกิด artifact ในลักษณะเป็นเส้นเช่นเดียวกัน แต่เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ค่อนข้างนาน</p>		
5	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 90 นาที</p>	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 180 นาที</p>
<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่ามีรายละเอียดที่ใกล้เคียงกับภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูล 4 วินาทีต่อหนึ่งเรย์ซั่ม สามารถเห็นขนาดเล็กที่สุดได้ และเกิด artifact ในลักษณะเป็นเส้น โดยเกิดจากความผิดพลาดของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทั้งสองภาพ เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณภาพโทโมกราฟีนาน</p>		

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ที่เวลา และจำนวนเรย์ซั่มต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (วินาที/เรย์ซั่ม)	จำนวนเรย์ซั่ม / 1 โปรไฟล์	
	82	164
6	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 105 นาที</p>	 <p>เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 210 นาที</p>
<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่ามีรายละเอียดที่ใกล้เคียงกับภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูล 5 วินาทีต่อหนึ่งเรย์ซั่ม สามารถเห็นขนาดเล็กที่สุดได้ และเกิด artifact ในลักษณะเป็นเส้น โดยเกิดจากความผิดพลาดของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทั้งสองภาพ แต่เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณภาพโทโมกราฟีนานมาก</p>		

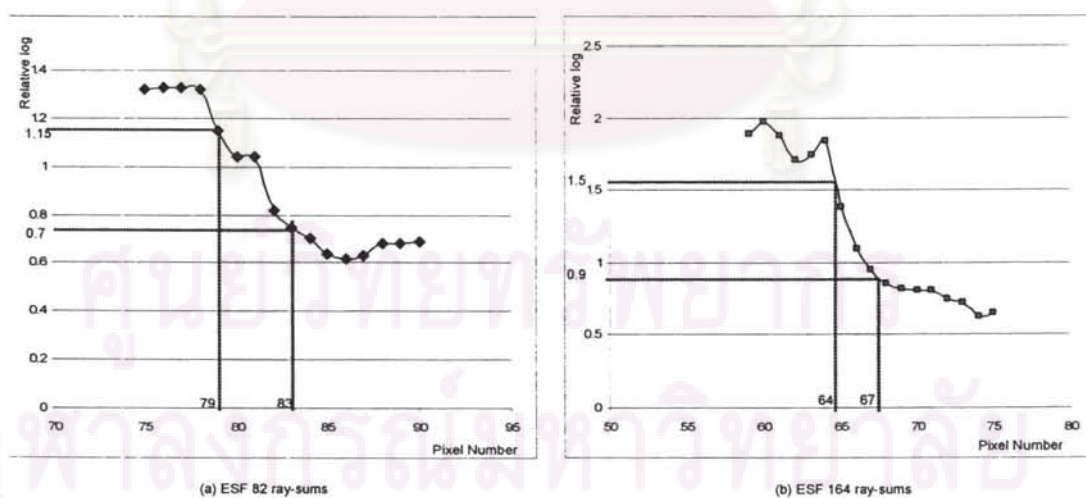
4.5 การทดสอบเพื่อหาความคมชัดของภาพโทโมกราฟี

การหาค่าความคมชัดของภาพโทโมกราฟี สามารถทำได้โดยการอ่านค่า โปรไฟล์ของค่า CT-Number จากภาพโทโมกราฟี ณ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานตัวอย่างกับอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง คือ ไม้ โดยใช้วิธี Edge-Spread Function ในการตรวจสอบ ซึ่งสามารถอธิบายโดยกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative logarithm กับค่า Pixel Number ของภาพโทโมกราฟีพบว่าที่เป็นบริเวณที่เป็นอากาศ และบริเวณค่า CT-Number ของชิ้นงานตัวอย่าง บริเวณรอยต่อนั้น การจะตรวจสอบค่าความคมชัดของภาพโทโมกราฟี สามารถทำได้โดยการกำหนดความกว้างของ Pixel Number ระหว่างค่า CT-Number จาก 25% และ 75% ของค่า CT-Number สูงสุด อ่านค่าความคมชัดในแนวแกน Pixel Number ดังภาพที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการทดสอบแบบ Edge-Spread Function

ในการทดลองกับชิ้นงานทดสอบพบว่าค่าความคมชัดของภาพโทโมกราฟี เมื่อ สแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดยกำหนดขนาดของลำรังสีที่กระทบหัววัดรังสี เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และ จำนวนข้อมูล 82 และ 164 เรย์ซัม มีค่าเท่ากับ 6.05 และ 4.53 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14

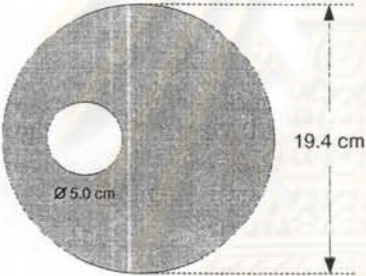

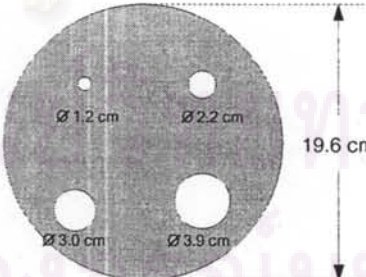
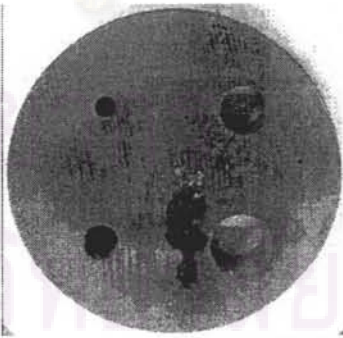


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่าความคมชัด

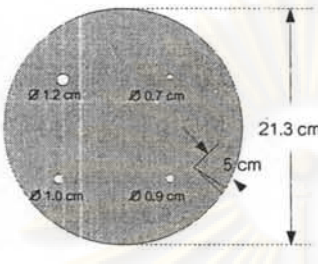
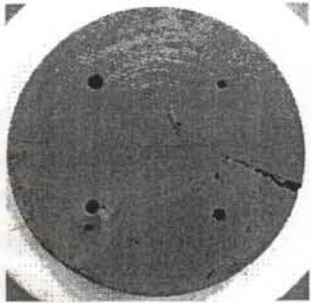
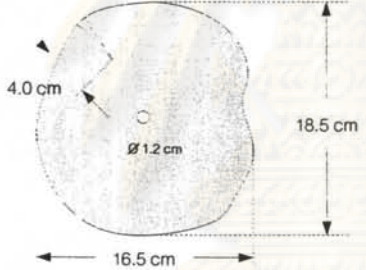
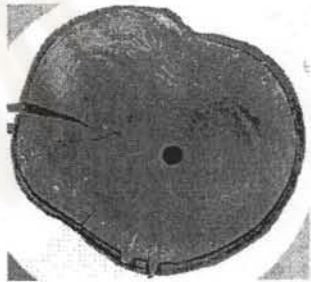
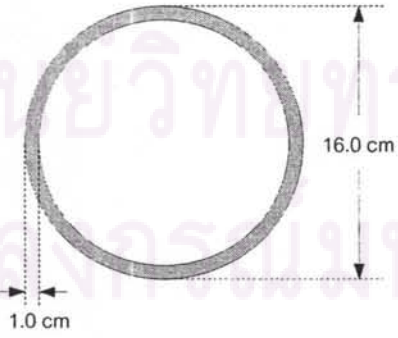

4.6 การออกแบบชิ้นงานทดสอบ และผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ

ในการทดสอบระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำนั้น ได้ออกแบบชิ้นงานทดสอบโดยมีจุดมุ่งหมายที่วัสดุที่เป็น ไม้ ที่มีขนาดรัศมีไม่เกิน 10 เซนติเมตร เจาะรูขนาดต่างๆ เพื่อตรวจสอบว่าขีดความสามารถของระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์นั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งได้ออกแบบชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ชิ้นงานทดสอบสำหรับระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์

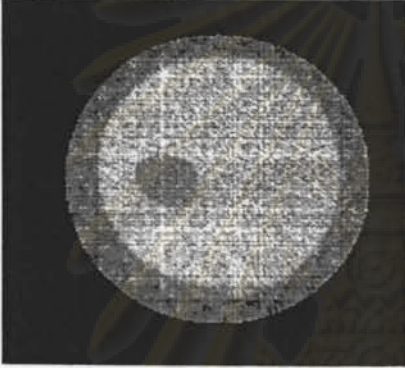
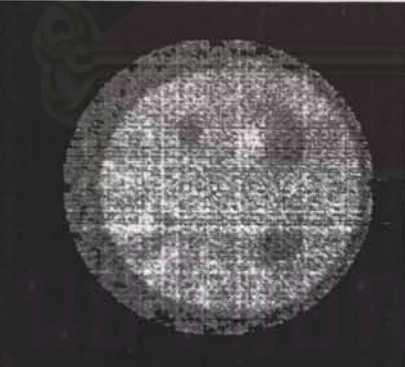
ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงานทดสอบ	คำอธิบายลักษณะชิ้นงานทดสอบ
1		
	<p>ชิ้นงานมีลักษณะเป็นไม้เนื้อแข็งทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 19.4 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร เจาะรูในลักษณะของโพรงไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร</p>	
2		
	<p>ชิ้นงานมีลักษณะเป็นไม้เนื้อแข็งทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 19.6 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร เจาะรูในลักษณะของโพรงไม้ 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน คือ 1.2, 2.2, 3.0 และ 3.9 เซนติเมตร ตามลำดับ</p>	

ตารางที่ 4.3 ชิ้นงานทดสอบสำหรับระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์ (ต่อ)

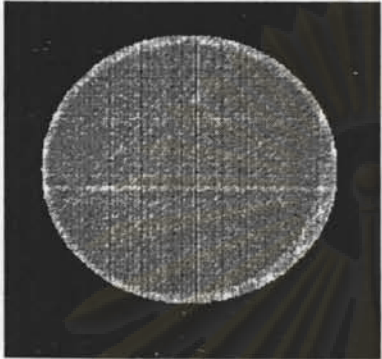

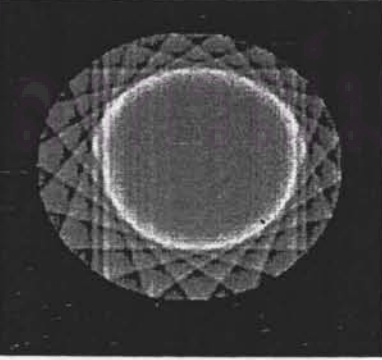
ชิ้นงาน ทดสอบ	แผนภาพชิ้นงานทดสอบ	คำอธิบายลักษณะชิ้นงานทดสอบ
3		 <p>ชิ้นงานมีลักษณะเป็นไม้เนื้อแข็งทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 21.3 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร เจาะรูในลักษณะของโพรงไม้ 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน คือ 0.7, 0.9, 1.0 และ 1.2 เซนติเมตร ตามลำดับ</p>
4		 <p>ชิ้นงานเป็นท่อนไม้เนื้อแข็ง ขนาดประมาณ 18.5 x 16.5 เซนติเมตร มีรอยแตกตามธรรมชาติ ยาว 4.0 เซนติเมตร และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร</p>
5		 <p>ชิ้นงานมีลักษณะเป็นท่อปูนซีเมนต์ ภายในกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 เซนติเมตร หนา 1.0 เซนติเมตร สูงประมาณ 30 เซนติเมตร</p>

ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ โดย ปริมาณรังสีเข้าสู่หัววัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร กำหนดเวลา 2 วินาทีต่อหนึ่งเรย์ซิม จำนวน 164 เรย์ซิมต่อหนึ่งโปรไฟล์ เก็บข้อมูล 11 โปรไฟล์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบภาพโทโมกราฟีด้วยระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ

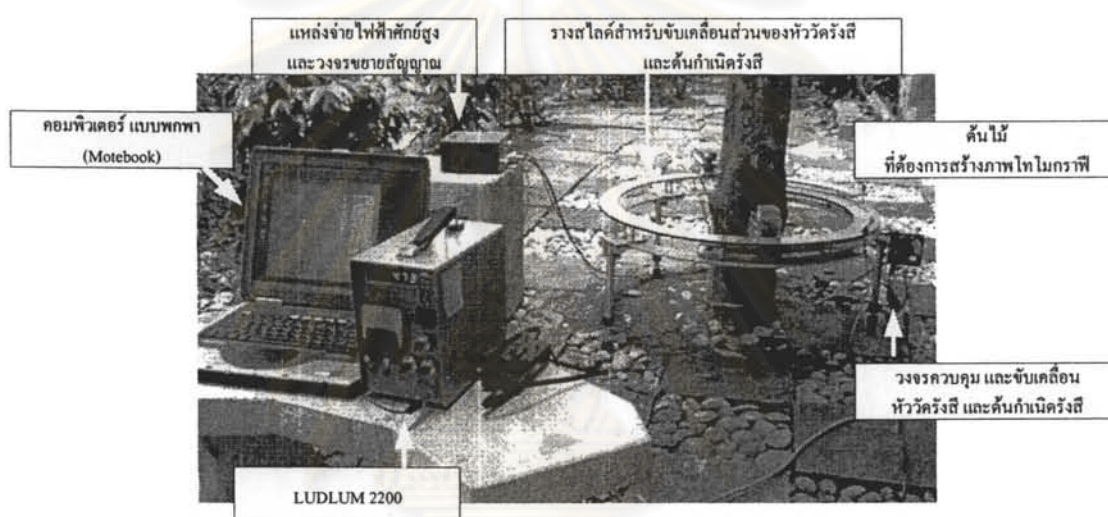
ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ	คำอธิบายลักษณะภาพโทโมกราฟี
1		จากภาพโทโมกราฟี พบว่าภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ โดยมีวงกลมสีดำ ซึ่งก็คือ รูขนาด 5 เซนติเมตร ภาพโทโม-กราฟีที่ได้สามารถบอกขนาด รูปร่าง และตำแหน่งคร่าว ๆ ของชิ้นงานทดสอบได้เป็นอย่างดี ส่วน artifact ที่พบเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเกิดได้จากความหนาแน่นของเนื้อไม้ที่ไม่สม่ำเสมอ ความคลาดเคลื่อนของระบบกลที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ และอาจเกิดจากการปรับเทียบด้วยค่า I_0 และค่า Background
2		จากภาพโทโมกราฟี พบว่าภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ โดยมีวงกลมสีดำ 4 วง ซึ่งก็คือ รูขนาดแตกต่างกัน คือ 1.2, 2.2, 3.0 และ 3.9 เซนติเมตร ภาพโทโมกราฟีที่ได้สามารถบอกขนาด รูปร่าง และตำแหน่งคร่าว ๆ ของชิ้นงานทดสอบได้เป็นอย่างดีซึ่งบริเวณโดยรอบชิ้นงาน ส่วน artifact ที่พบมีลักษณะเป็นเส้นตรง และรอยสีขาวบริเวณใกล้ ๆ รูขนาด 3.0 เซนติเมตร ซึ่งสามารถเกิดได้จากความหนาแน่นของเนื้อไม้ที่ไม่สม่ำเสมอ และความคลาดเคลื่อนของระบบกล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบภาพโทโมกราฟีด้วยระบบสแกนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ	คำอธิบายลักษณะภาพโทโมกราฟี
3		<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่าภาพชิ้นงานทดสอบพบเห็นเพียงวงกลมสีดำขนาดเล็ก 1 วง ซึ่งก็คือรูขนาด 1.2 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยสามารถบอกขนาดรูปร่าง และตำแหน่งของชิ้นงานได้ไม่เกิน 1.2 เซนติเมตร ส่วน artifact ที่พบมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเกิดได้จากความหนาแน่นของเนื้อไม้ที่ไม่สม่ำเสมอ และความคลาดเคลื่อนของระบบกล ที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์</p>
4		<p>จากภาพโทโมกราฟี พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ สามารถเห็นรูขนาด 1.2 เซนติเมตรได้ แต่ไม่สามารถเห็น รอยแตกตามธรรมชาติได้ เนื่องจาก ขนาดความกว้างของรอยแยกเล็กเกินกว่าขีดจำกัดของระบบสแกน และยังคงมี artifact ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเกิดได้จาก ความหนาแน่นของเนื้อไม้ที่ไม่สม่ำเสมอ และความคลาดเคลื่อนของระบบกล ที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์</p>
5		<p>จากภาพโทโมกราฟี จะพบว่าภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็นท่อนทั้งขนาด และรูปร่าง และยังพบเห็น artifact ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงบางส่วนบริเวณขอบภาพ ซึ่งสามารถเกิดได้จากความคลาดเคลื่อนของระบบกล ที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์</p>

4.7 การทดสอบการใช้งานภาคสนาม และผลการสร้างภาพโทโมกราฟี

วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี นั้นก็คือ การใช้งานภาคสนาม เน้นไปที่การตรวจสอบเสาไม้โบราณ ต้นไม้ และวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ สามารถติดตั้งใช้งานภาคสนาม ได้ดังรูปที่ 4.15 ถอดส่วนของร่างสไลด์ ประกอบให้ครอบคลุมส่วนของเสาไม้ที่ต้องการสร้างภาพโทโมกราฟี เชื่อมต่อเข้ากับระบบควบคุม และส่วนขับเคลื่อนระบบกล แล้วเปิดโปรแกรม สำหรับควบคุมการเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งใช้งานระบบสแกนภาคสนาม



รูปที่ 4.16 แสดงการใช้งานภาคสนาม

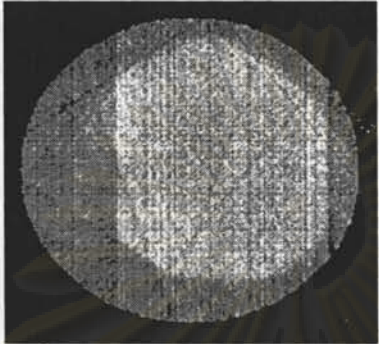
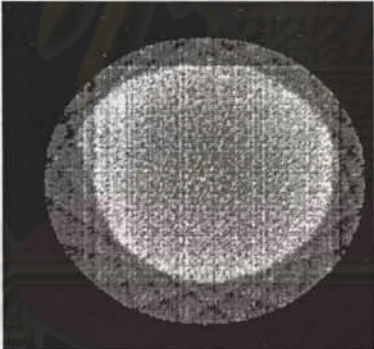
ผลการทดสอบการใช้งาน ในการเคลื่อนย้ายติดตั้งรางสไลด์สามารถทำได้ค่อนข้างสะดวก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สามารถประกอบติดตั้งได้ง่าย การสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ใช้เวลาประมาณ 90 นาทีต่อการสแกนหนึ่งภาพโทโมกราฟี ทำการทดสอบกับต้นไม้ และเสาไม้ แสดงในตารางที่ 4.5 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างงานภาคสนาม

ชั้นงานที่	ภาพชั้นงานภาคสนาม	คำอธิบายลักษณะชั้นงานภาคสนาม
1		เป็นท่อนไม้ตามธรรมชาติ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 เซนติเมตร รูปทรงไม่กลมมากนัก ภาคตัดขวางที่ต้องการทดสอบ อยู่สูงจากพื้นราบประมาณ 30 เซนติเมตร
2		เป็นไม้ต้นหมาก ลำต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 เซนติเมตร ภาคตัด ขวางที่ต้องการทดสอบ อยู่สูงจากพื้นราบประมาณ 35 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟี ในการใช้งานภาคสนาม

ชิ้นงานที่	ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน	คำอธิบายลักษณะภาพโทโมกราฟี
1		<p>จากภาพโทโมกราฟี จะพบว่าภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานภาคสนาม ทั้งขนาด และรูปร่าง ภายในภาพไม่พบลักษณะของความบกพร่อง ซึ่งระบบสแกนตรวจสอบความละเอียดได้ถึง 1.2 เซนติเมตร แต่พบ artifact ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงบางส่วนบริเวณโดยรอบ ซึ่งสามารถเกิดได้จากความคลาดเคลื่อนของระบบกล ที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์</p>
2		<p>จากภาพโทโมกราฟี จะพบว่าภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานภาคสนาม ภายในภาพไม่พบลักษณะของความบกพร่อง บริเวณแกนกลางของต้นหมาก มีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณโดยรอบ สังเกตได้จากภาพโทโมกราฟีบริเวณที่มีสีเข้มกว่า และอาจออกมาที่บริเวณรอบนอก ส่วน Artifact ที่เกิดขึ้นอาจเกิดได้จากการปรับแก้ด้วย I_0 และ Background</p>

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยของการพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ระบบกลควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน และรับข้อมูลโปรไฟล์จากระบบวัดรังสีแกมมา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 พลังงาน 59.5 keV หัววัดรังสีแกมมาชนิดกึ่งตัวนำ CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตร รุ่น XR-100T แหล่งจ่ายไฟศักดาสูง วงจรขยายสัญญาณ โมเดล PX2T CdTe ของบริษัท AMPTEK เครื่อง Scaler Ratemeter โมเดล 2200 ของบริษัท Ludlum ผ่านทางพอร์ตอนุกรม บันทึกและจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำภายในไมโครคอมพิวเตอร์ โดยระบบกลสามารถตรวจสอบวัตถุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 20 เซนติเมตร

5.1.2 จากการทดสอบระบบกล เลือกใช้การกระตุ้นเฟสของสเตปป์มอเตอร์แบบ one-two phase จากการทดสอบพบว่า การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ มีความถูกต้องและแม่นยำ

5.1.3 จากการทดสอบการเก็บข้อมูลโปรไฟล์และการปรับแก้ข้อมูลโปรไฟล์ พบว่าข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้เมื่อนำมาปรับแก้ด้วยข้อมูล I_0 จะสามารถแยกแยะรายละเอียดได้ดีขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลโปรไฟล์จากรูปที่ 4.11 และ 4.12

5.1.4 จากการทดสอบหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการวัด และจำนวนเรย์ซึ่มในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีพบว่า การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ 164 เรย์ซึ่ม 11 โปรไฟล์ ให้ภาพโทโมกราฟีที่มีความละเอียดที่ดี โดยใช้เวลาในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ 90 นาที ได้ค่าความคมชัดเท่ากับ 4.53 มิลลิเมตร

5.1.5 จากการทดสอบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ขึ้นงานทดสอบที่เป็นเสาไม้และท่อปูนซีเมนต์ โดยกำหนดให้เก็บข้อมูลโปรไฟล์ 164 เรย์ซึ่ม 11 โปรไฟล์ ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ทั้งสิ้น 90 นาที พบว่าสำหรับตัวอย่างเสาไม้จะเห็นรูภายในที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด 1.0 เซนติเมตร ส่วนตัวอย่างท่อปูนซีเมนต์ สามารถคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้อย่างชัดเจน ซึ่งถ้าต้องการให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่มีคุณภาพดี สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวน

โปรไฟล์และจำนวนเรย์ซั่ม ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ แต่จะทำให้ใช้เวลาในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์นานขึ้น

5.1.6 จากการทดสอบการใช้งานภาคสนาม พบว่า การติดตั้งระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ใช้เวลา 15 นาที และใช้เวลาในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ตัวอย่างละ 90 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีขีดจำกัดของการใช้งาน จึงขอเสนอแนะแนวทางปรับปรุง และพัฒนาเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนี้

5.2.1 ควรใช้หัววัดรังสีแบบอาร์เรย์ เพื่อลดเวลาการทำงานของระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์

5.2.2 ควรเพิ่มระบบตรวจสอบหาจุดศูนย์กลางของวัตถุ ก่อนการสแกนเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบให้วัตถุอยู่ในขอบเขตการสแกน และอยู่ตรงกลางพอดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] มงคล วรรณประภา. การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- [2] สมยศ ศรีสถิตย์, อรรถพร ภัทรสุมันต์. การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย. กรุงเทพมหานคร สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [3] ประสิทธิ์ สิริทิพย์วิเศษ. การพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] Hounsefield, G.N., Reconstruction Tomography in Diagnostic Radiography and Nuclear Medicine. (n.p.). 1977, pp.217-223.
- [5] อีระศักดิ์ สุโชติพันธ์, ประยุทธ์ อินแบน. โปรแกรมเมอร์มือใหม่หัดเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Basic 6 Enterprise Edition. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [6] อภิชาติ ภูพลับ. การเขียนโปรแกรม Hardware Interface ด้วย VB6. นนทบุรี : ไอดีซี อินโฟ ดิสทริบิวเตอร์ เซ็นเตอร์, 2548.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมควบคุมการทำงาน และรับข้อมูลโปรไฟล์

Option Explicit

Private Declare Function Inp Lib "inpout32.dll" Alias "Inp32" (ByVal PortAddress As Integer) As Integer

Private Declare Sub Out Lib "inpout32.dll" Alias "Out32" (ByVal PortAddress As Integer, ByVal Value As Integer)

Private Declare Sub Sleep Lib "kernel32" (ByVal dwMilliseconds As Long)

Private pread As Integer 'parallel port control read data

Private pwrite As Integer 'parallel port control write data

Private STP_T As Integer 'time of stepping

Private SCAN_T As Integer 'time of main scan

Private Cnt_Io(2000) As Double 'counts of Io

Private Cnt_I(1000, 1000) As Double 'counts of raw

Private Cnt_ICR(1000, 1000) As Double 'counts of data correct

Private RTN As Integer 'return stepping

Private Lap_S As Integer 'distance of source stepping

Private RS_S As Integer

Private Angle_S As Integer

Private Io As Integer

Private c(3) As Integer

Private b As Integer

Private i As Integer

Private j As Integer

Private k As Integer

Private l As Integer

Private m As Integer

Private n As Integer

Private BG As Integer

Private profile As Integer

```
Private raysum As Integer
```

```
Private RSV As Integer
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    Shape1.BackColor = vbRed
```

```
    Timer1.Enabled = True    'active prepare scan for start main manu
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
    Shape2.BackColor = vbRed
```

```
    '-----
```

```
    For i = 1 To lo
```

```
        MSC1.Output = "SS" + Chr(10) ' for Start LUDLUM
```

```
        Sleep (SCAN_T)
```

```
        MSC1.Output = "SS" + Chr(10) ' for Stop LUDLUM
```

```
        Sleep (100)
```

```
        MSC1.Output = "RS" + Chr(10) ' for Read Count
```

```
        Sleep (100)
```

```
        Sht1.Cells(i, 3) = MSC1.Input
```

```
        MSC1.Output = "RS" + Chr(10) ' for Read Count
```

```
        Sleep (100)
```

```
        Sht1.Cells(i, 3) = Int(MSC1.Input)
```

```
        Cnt_lo(i) = Sht1.Cells(i, 3)
```

```
    Call DT_R
```

```
    Call DT_R
```

```
Next i
```

```
    '-----
```

```
    Timer1.Enabled = True
```

```
    Shape2.BackColor = vbGreen
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
Dim loFile As String
```

```
On Error GoTo Err
```

```
CD1.ShowSave
```

```
loFile = CD1.FileName
```

```
Open loFile For Output As #1
```

```
Print #1, lo
```

```
Print #1, SCAN_T
```

```
For i = 1 To lo
```

```
Print #1, Cnt_lo(i)
```

```
Next i
```

```
Close #1
```

```
Shape3.BackColor = vbGreen
```

```
Frame4.Enabled = True
```

```
Text3.Enabled = False
```

```
Text4.Enabled = False
```

```
Text5.Enabled = False
```

```
Err:
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click()
```

```
'-----
```

```
RTN = Int((raysum - ((246 - raysum) / (profile - 2))) + 3)
```

```
Lap_S = Int(240 / (profile - 1))
```

```
'-----
```

```
k = 1
```

```
For i = 1 To profile
```

```
'-----
```

```

If i = 1 Then
    GoTo NxT
End If
-----
For m = 1 To Lap_S
    Call SR_R
Next m
-----
For l = 1 To RTN
    Call DT_L
    Call DT_L
Next l
NxT:

For j = 1 To raysum
    MSC1.Output = "SS" + Chr(10) ' for Start LUDLUM
    Sleep (SCAN_T)
    MSC1.Output = "SS" + Chr(10) ' for Stop LUDLUM
    Sleep (100)
    MSC1.Output = "RS" + Chr(10) ' for Read Count
    Sleep (100)
    Sht1.Cells(k, 4) = MSC1.Input
    MSC1.Output = "RS" + Chr(10) ' for Read Count
    Sleep (100)
    Sht1.Cells(k, 4) = Int(MSC1.Input)
    Cnt_I(i, j) = Sht1.Cells(k, 4)
    Sht1.Cells(k, 1) = i
    Sht1.Cells(k, 2) = j
    k = k + 1
    b = b + 1

```

```

Call DT_R
*****

Call DT_R 'if step = 164 'not active'
*****

Next j
Next i
'-----
Shape4.BackColor = vbGreen
Timer1.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command5_Click()
Dim T_File As String
On Error GoTo ErrH
CD2.ShowSave
T_File = CD2.FileName
Open T_File For Output As #1
Print #1, T_File
Print #1, raysum
Print #1, profile
Print #1, RS_S
Print #1, Angle_S
For i = 1 To profile
For j = 1 To raysum
Print #1, Cnt_I(i, j)
Next j
Next i
Close #1
Shape5.BackColor = vbGreen
ErrH:
End Sub

```

```
Private Sub Command6_Click()
```

```
    End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command7_Click()
```

```
    Dim a As Integer
```

```
    Dim SFile As String
```

```
    CD1.ShowOpen
```

```
    SFile = CD1.FileName
```

```
    Open SFile For Input As #1
```

```
    i = 1
```

```
        Input #1, a
```

```
        Text5.Text = a
```

```
        lo = Text5.Text
```

```
        Text3.Text = a
```

```
        raysum = Text3.Text
```

```
        Input #1, a
```

```
        Text4.Text = a
```

```
        SCAN_T = Text4.Text
```

```
    Do Until EOF(1)
```

```
        Input #1, a
```

```
        Sht1.Cells(i, 3) = Val(a)
```

```
        Cnt_lo(i) = Sht1.Cells(i, 3)
```

```
        i = i + 1
```

```
    Loop
```

```
    Close #1
```

```
    Shape6.BackColor = vbGreen
```

```
    Frame4.Enabled = True
```

```
    Text3.Enabled = False
```



```
Text4.Enabled = False
```

```
Text5.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command8_Click()
```

```
Dim T_File_CR As String
```

```
'On Error GoTo ErrHCR
```

```
CD2.ShowSave
```

```
T_File_CR = CD2.FileName
```

```
Open T_File_CR For Output As #1
```

```
Print #1, T_File_CR
```

```
Print #1, raysum
```

```
Print #1, profile
```

```
Print #1, RS_S
```

```
Print #1, Angle_S
```

```
*****
```

```
b = 1
```

```
*****
```

```
For i = 1 To profile
```

```
For j = 1 To raysum
```

```
    Cnt_ICR(i, j) = Log((Cnt_Io(b) - BG) / (Cnt_I(i, j) - BG)) / Log((Exp(1)))
```

```
    Sht1.Cells(b, 5) = Cnt_ICR(i, j)
```

```
    Print #1, Cnt_ICR(i, j)
```

```
    b = b + 1
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
Close #1
```

```
Shape7.BackColor = vbGreen
```

```
'ErrHCR:
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
'-----
```

```
    pread = &H379
```

```
    pwrite = &H378
```

```
'-----
```

```
    STP_T = 20
```

```
    SCAN_T = 1000
```

```
'-----
```

```
    MSC1.CommPort = 1
```

```
    MSC1.PortOpen = True
```

```
'-----
```

```
    lo = 82
```

```
    profile = 11
```

```
    raysum = 82
```

```
    RS_S = 5
```

```
    Angle_S = 18
```

```
    BG = 4
```

```
'-----
```

```
End Sub
```

```
Private Sub HScroll1_Change()
```

```
    STP_T = HScroll1.Value    'choose time for delay drive stepping motor
```

```
    Text1.Text = STP_T      'display time delay stepping motor
```

End Sub

Private Sub Text2_Change()

 profile = Text2.Text

End Sub

Private Sub Text3_Change()

 raysum = Text3.Text

End Sub

Private Sub Text4_Change()

 SCAN_T = Text4.Text

 SCAN_T = SCAN_T * 1000

End Sub

Private Sub Text5_Change()

 lo = Text5.Text

End Sub

Private Sub Text6_Change()

 BG = Text6.Text

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

 RSV = Inp(pread) 'recieve data from sensor for pointer

 '-----

 If RSV = 199 Then 'Source to point complete

```

    Call DT_L          'rotate stepping detector
    GoTo EndStep
End If
'-----
If RSV = 167 Then    'detector to point complete`
    Call SR_L        'rotate stepping source
    GoTo EndStep
End If
'-----
If RSV = 231 Then    'Source and detector to point complete
    Shape1.BackColor = vbGreen 'display status to complete
    Out pwrite, &H0      'stop both stepping
    Timer1.Enabled = False 'prepare complete
End If
'-----
    Call SR_DT_L      'rotate both stepping
'-----
EndStep:

End Sub
Sub SR_L()
    Out pwrite, &H90 '10010000
    Sleep (STP_T)
    Out pwrite, &H10 '00010000
    Sleep (STP_T)
    Out pwrite, &H30 '00110000
    Sleep (STP_T)
    Out pwrite, &H20 '00100000
    Sleep (STP_T)
    Out pwrite, &H60 '01100000

```

```
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H40 '01000000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &HC0 '11000000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H80 '10000000
Sleep (STP_T)
End Sub
```

```
Sub SR_R()
Out pwrite, &HC0 '11000000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H40 '01000000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H60 '01100000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H20 '00100000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H30 '00110000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H10 '00010000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H90 '10010000
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H80 '10000000
Sleep (STP_T)
End Sub
```

```
Sub DT_L()
Out pwrite, &HC '00001100
```

```
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H4 '00000100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H6 '00000110
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H2 '00000010
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H3 '00000011
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H1 '00000001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H9 '00001001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H8 '00001000
Sleep (STP_T)
```

End Sub

Sub DT_R()

```
Out pwrite, &H9 '00001001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H1 '00000001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H3 '00000011
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H2 '00000010
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H6 '00000110
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H4 '00000100
Sleep (STP_T)
```

```
Out pwrite, &HC '00001100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H8 '00001000
Sleep (STP_T)
End Sub
```

```
Sub SR_DT_L()
Out pwrite, &H9C '1001 1100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H14 '0001 0100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H36 '0011 0110
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H22 '0010 0010
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H63 '0110 0011
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H41 '0100 0001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &HC9 '1100 1001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H88 '1000 1000
Sleep (STP_T)
End Sub
```

```
Sub SR_DT_R()
Out pwrite, &HC9 '1100 1001
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H41 '0100 0001
Sleep (STP_T)
```

```
Out pwrite, &H63 '0110 0011
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H22 '0010 0010
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H36 '0011 0110
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H14 '0001 0100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H9C '1001 1100
Sleep (STP_T)
Out pwrite, &H88 '1000 1000
Sleep (STP_T)
End Sub
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรกิจ ชาวแผ้ว เกิดเมื่อวันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปี พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิวเคลียร์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย