

การพัฒนาเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีโดยการบันทึกภาพบนฉากรังสีด้วยกล้อง  
ดิจิตอล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY TECHNIQUE BY USING  
FLUOROSCOPIC IMAGES RECORDED WITH DIGITAL CAMERA



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีโดยการ
	บันทึกภาพบนฉากเรืองรังสีด้วยกล้องดิจิตอล
โดย	นายพนพน สาวีโรจน์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา นิลสุพรรณโฆษิต)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)	

พจนพณ สารวิโรจน์ : การพัฒนาเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีโดยการบันทึกภาพ  
บนฉากเรืองรังสีด้วยกล้องดิจิทัล. ( DEVELOPMENT OF X-RAY COMPUTED  
TOMOGRAPHY TECHNIQUE BY USING FLUOROSCOPIC IMAGES RECORDED  
WITH DIGITAL CAMERA ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.สมยศ ศรีสถิตย์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์โดยใช้ฉากเรืองรังสีและ  
พัฒนาเทคนิคการสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน ระบบบันทึกภาพประกอบด้วยฉากเรืองรังสี  
กล้องถ่ายภาพดิจิทัล และแท่นวางชิ้นงานที่หมุนได้ การหมุนของแท่นวางชิ้นงานถูกควบคุม  
โดยสเตปปีงมอเตอร์และซอฟต์แวร์ที่เขียนด้วย Visual basic 6.0 ในขณะที่การตั้งค่าและการ  
ถ่ายภาพของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านทางสายยูเอสบี ได้ทำการศึกษา  
ผลของการตั้งค่าต่างๆ ของกล้องถ่ายภาพและของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของภาพที่  
ได้ จากนั้นได้ทดสอบชิ้นงาน 6 ชิ้นที่มีองค์ประกอบและลักษณะต่างกัน โดยทำการถ่ายภาพแต่ละ  
ชิ้นงานทุกๆ 1.8 องศา รวมทั้งหมด 100 ภาพ เมื่อนำไปสร้างภาพซีทีแล้วพบว่ามีความน่าพอใจ  
มาก เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ และสร้างภาพแต่ละตัวอย่างรวมทั้งสิ้นประมาณ 7 นาที อย่างไรก็ตาม  
ตามสำหรับตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูงอาจต้องปรับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับ  
การตั้งค่าของกล้องถ่ายภาพและของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ รวมทั้งชนิดของฉากเรืองรังสี งานวิจัยนี้  
ชี้ให้เห็นการนำระบบและเทคนิคที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานในการตรวจสอบชิ้นงานในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีนิวเคลียร์  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070247921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD: Computed tomographic image Profile data Digital camera

Panapon Savirod : DEVELOPMENT OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY  
TECHNIQUE BY USING FLUOROSCOPIC IMAGES RECORDED WITH DIGITAL  
CAMERA . Advisor: Assoc. Prof. Somyot Srisatit

This research aims to develop an x-ray fluoroscopic system and a data acquisition technique for reconstruction of the computed tomographic (CT) images of test specimens. The image viewing system consisted of a fluorescent screen, a digital camera and a specimen turn table. Rotation of the turn table is controlled by a stepping motor and the developed software written in Visual basic 6.0 while the camera settings and operation are controlled by a computer via USB cable. Factors affecting the image quality are also investigated, including the camera and the x-ray machine settings, to obtain desired image quality. Up to 6 specimens of different materials and having different configurations are tested by taking fluoroscopic image each specimen every 1.8 degrees for a total of 100 images. The obtained CT image quality is found to be very satisfactory. The total processing time for each test specimen is approximately 7 minutes. However, for thicker specimens and specimens containing high density materials the processing time may be adjusted depending on the camera and the x-ray machine settings as well as type of the fluorescent screen. This research indicates future use of the developed system and technique for inspection of specimens.

Field of Study: Nuclear Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ที่ได้ให้ความรู้ ความคิดเห็น และข้อแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์การเก็บข้อมูลในการสร้างภาพด้วยรังสี, การเขียนโปรแกรม, อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยเหลือในเวลาที่ปัญหาต่างๆ ในขณะการดำเนินงาน พร้อมทั้งช่วยตรวจดูเนื้อหาของการทำวิจัยตลอด จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์เดโช ทองอร่าม และอาจารย์ ดร.กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง ที่ได้ให้คำแนะนำการทำระบบหมุนสเตปปีงมอเตอร์ อุปกรณ์ต่างๆในการทำวิจัย ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว ที่ได้ให้คำแนะนำการเก็บภาพทางรังสี อุตสาหกรรม พารามิเตอร์ของกล้องและเครื่องกำเนิดรังสีการเก็บข้อมูลการทำวิจัย และเป็นกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา นิลสุวรรณโฆษิต ที่เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และแนะแนวทางการสอบวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุ่นพานิช เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่คอยให้คำแนะนำอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์การทำวิจัยเมื่อเวลามีปัญหา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนการศึกษาในตลอดเวลาที่ได้ศึกษาการเรียนที่นี้ และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมารดา ครอบครัว และเพื่อน พี่ๆ น้องๆ และบุคคลรอบข้างทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

พนพน สาวีโรจน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	16
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	17
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	18
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	22
2.1 พื้นฐานฟิสิกส์ทางรังสีเอกซ์ <sup>[9]</sup> .....	22
2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลาง <sup>[9]</sup> .....	23
2.3 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ <sup>[9]</sup> .....	29
2.4 การผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray Production).....	31
2.5 รังสีที่ออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	33
2.6 ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีในทางอุตสาหกรรม (Industrial X-ray computed tomography) <sup>[11]</sup> .....	36

2.7	ข้อดีของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีในทางอุตสาหกรรม (CT) <sup>[11]</sup> .....	40
2.8	องค์ประกอบของภาพโทโมกราฟี (Computed Tomography Image) <sup>[13]</sup> .....	40
2.9	กระบวนการสร้างภาพ (Tomographic Reconstruction) <sup>[13]</sup> .....	44
2.10	รูปภาพ (Image) และระบบสี (RGB) <sup>[15]</sup> .....	52
2.11	ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี <sup>[13]</sup> .....	53
2.12	คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Computed Tomography Image Quality) <sup>[13]</sup> .....	54
2.13	ฉากเรืองรังสีรับภาพ (Fluorescence screen) <sup>[16]</sup> .....	62
2.14	โปรแกรม Visual basic 6.0 <sup>[17]</sup> .....	63
2.15	กล้องดิจิตอล (Digital camera).....	64
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....		68
3.1	การออกแบบระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ .....	68
3.2	การใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง .....	73
3.3	วิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และบันทึกภาพจากฉากเรืองรังสีเอกซ์ .....	74
3.4	การออกแบบวัตถุตัวอย่าง .....	74
3.5	การทดสอบหาช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์ .....	78
3.6	การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยกล้องดิจิตอล.....	78
3.7	การพัฒนาโปรแกรมเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุ .....	79
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย .....		83
4.1	ผลการทดสอบหาช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์ .....	83
4.2	ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ารับแสง (F) ของกล้องดิจิตอล .....	85
4.3	ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องดิจิตอลที่ความเร็วชัดเตอร์ต่างๆ.....	87
4.4	ผลจากการทดสอบหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี.....	89
4.5	ผลการทดสอบหาความสม่ำเสมอของเลขชี้ที่ (Spatial Uniformity).....	90
4.6	ผลจากการทดสอบหาค่า Probability Distribution Function (PDF) จากภาพซีที.....	91



4.7	ผลสร้างภาพซีทีของการทดลองวัตถุในอุตสาหกรรม .....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....		100
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	100
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	101
ภาคผนวก .....		103
บรรณานุกรม .....		124
ประวัติผู้เขียน .....		126



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มของภาพจากการทดสอบความสว่างของฉากเรืองรังสี $F = 4$ , $t = 2s$ และ 84	
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพที่ค่าความกว้างของรูรับแสงต่างๆ .....	86
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพที่ความเร็วชัดเตอร์ต่างๆ .....	87
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity) .....	91
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉดสี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 4 .....	93
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉดสี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 5 .....	94
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉดสี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 6 .....	96
ตารางที่ 6.1 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 2.0 และ t 2	
วินาที.....	104
ตารางที่ 6.2 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400 , F 4.0 และ t 2	
วินาที.....	106
ตารางที่ 6.3 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 5.0 และ t 2	
วินาที.....	107
ตารางที่ 6.4 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 1	
วินาที.....	108
ตารางที่ 6.5 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 2.5	
วินาที.....	109
ตารางที่ 6.6 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 3.2	
วินาที.....	110
ตารางที่ 6.7 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 2 เพื่อหา Resolution ของภาพโทโมกราฟี.....	111

ตารางที่ 6.8 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหาความสม่ำเสมอของเลขชี้กำลัง (Spatial Uniformity) ..... 114

ตารางที่ 6.9 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF) ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 4..... 115

ตารางที่ 6.10 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF) ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 5..... 118

ตารางที่ 6.11 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF) ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 6..... 121



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดกระบวนการ Photoelectric effect <sup>[10]</sup> .....	24
รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีเชิงมวล ( $\mu/m$ ) ของตะกั่ว (Pb) บิสมัท (Bi) และดีบุก (Sn) ที่โฟตอนพลังงานต่างๆ <sup>[9]</sup> .....	25
รูปที่ 2.3 การเกิดกระบวนการ Compton scattering <sup>[10]</sup> .....	27
รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดแพร์โปรดักชัน (Pair Production) <sup>[10]</sup> .....	29
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray generator) <sup>[10]</sup> .....	29
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray Spectrum) <sup>[9]</sup> .....	34
รูปที่ 2.7 กระบวนการเก็บภาพโทโมกราฟี <sup>[11]</sup> .....	36
รูปที่ 2.8 กระบวนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายด้วยรังสีในแต่ละมุมของวัตถุสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟี <sup>[11]</sup> .....	37
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนและกระบวนการสร้างภาพซีที (CT image) .....	37
รูปที่ 2.10 การลดทอนความเข้มรังสีที่ผ่านวัตถุคนละชนิดภายในตัวกลางเดียวกัน <sup>[12]</sup> .....	38
รูปที่ 2.11 ภาพแบบเรย์ซัม (Ray -Sum) <sup>[14]</sup> .....	42
รูปที่ 2.12 โปรไฟล์ (Profile) <sup>[13]</sup> .....	43
รูปที่ 2.13 ภาพโปรเจกชัน และซินแกรม <sup>[12]</sup> .....	43
รูปที่ 2.14 วิธีการสร้างภาพแบบแบ็กโปรเจกชัน (Back-Projection Method) <sup>[13]</sup> .....	45
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการคำนวณสร้างภาพแบบแบ็กโปรเจกชัน (Back-Projection Method) <sup>[13]</sup> .....	46
รูปที่ 2.16 โปรไฟล์ (Profile) 1 มีส่วนทำให้เซลล์ที่อยู่นอกวัตถุที่ตำแหน่ง X แสดงค่าสูง แต่ โปรไฟล์ (Profile) 2 และ 3 จะมีส่วนในการทำให้ค่าลดลง <sup>[13]</sup> .....	50
รูปที่ 2.17 การประมวลผลภาพแบบ Iteration <sup>[10]</sup> .....	50
รูปที่ 2.18 การคำนวณสร้างภาพแบบอิตเทอเรชัน (Iteration Method) <sup>[13]</sup> .....	51
รูปที่ 2.19 ระดับเฉดสีเทา (Gray scale image) ทั้งหมด 256 ชั้น .....	53

รูปที่ 2.20 การหาค่าพิกเซลนอยส์ (Pixel noise) จากวัตถุตัวอย่าง.....	55
รูปที่ 2.21 การหา Spatial resolution แบบ edge spread function .....	58
รูปที่ 2.22 การหา Spatial Uniformity.....	61
รูปที่ 2.23 โปรแกรม Visual basic 6 <sup>[18]</sup> .....	63
รูปที่ 2.24 โครงสร้างและองค์ประกอบของกล้องดิจิตอล <sup>[16]</sup> .....	64
รูปที่ 2.25 ภาพถ่ายกล้องดิจิตอล F/5.6 <sup>[20]</sup> .....	67
รูปที่ 2.26 ภาพถ่ายกล้องดิจิตอล F/16 <sup>[20]</sup> .....	67
รูปที่ 3.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	68
รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	69
รูปที่ 3.3 การทำงานสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor) <sup>[21]</sup> .....	69
รูปที่ 3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor).....	70
รูปที่ 3.5 ฉากรังสีรับภาพ (Fluorescence screen).....	71
รูปที่ 3.6 กล้องที่บแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีประกบด้วยฉากเรืองรังสี.....	71
รูปที่ 3.7 กล้องบันทึกภาพดิจิตอล EOS1100D.....	72
รูปที่ 3.8 สาย USB (Universal Serial Bus).....	72
รูปที่ 3.9 สาย USB Hub.....	73
รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้งานของ Canon EOS Utilities.....	73
รูปที่ 3.11 วัตถุตัวอย่างที่ 1.....	75
รูปที่ 3.12 วัตถุตัวอย่างที่ 2.....	75
รูปที่ 3.13 วัตถุตัวอย่างที่ 3.....	76
รูปที่ 3.14 วัตถุตัวอย่างที่ 4.....	76
รูปที่ 3.15 วัตถุตัวอย่างที่ 5.....	77
รูปที่ 3.16 วัตถุตัวอย่างที่ 6.....	77
รูปที่ 3.17 การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ (Profile) จากภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ .....	79

รูปที่ 3.18 โปรแกรมสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุ .....	80
รูปที่ 3.19 หน้าต่างเมื่อคลิก PDF .....	81
รูปที่ 3.20 ฟอรั่ม (Form) กราฟระหว่างแอดดสีและความถี่ของแอดดสี .....	82
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพ .....	84
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่ $F = 4.0$ , $t = 2$ วินาที และ $ISO = 400$ .....	86
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า Pixel noise ของค่ารูรับแสง (F) ต่างๆที่, ความเร็วชัตเตอร์ 2 วินาที และความไวแสง ISO 400 .....	86
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า Pixel noise ของความเร็วชัตเตอร์ ต่างๆ .....	88
รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 2 .....	89
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number .....	89
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 3 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV .....	90
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 4 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV .....	92
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของ ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 4 .....	92
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 5 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV .....	93
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของ ภาพตัดขวางตัวอย่างที่ 5 .....	94
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 6 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV .....	95
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของ ภาพตัดขวางตัวอย่างที่ 6 .....	95
รูปที่ 4.14 ลำโพงบลูทูธ .....	97
รูปที่ 4.15 โปรไฟล์ของลำโพงบลูทูธ .....	97
รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางของลำโพงบลูทูธ .....	97
รูปที่ 4.17 ตัวชาร์จแบตเตอรี่ .....	98

รูปที่ 4.18 โพรไฟล์ของตัวชาร์จแบตเตอรี่.....	98
รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของตัวชาร์จแบตเตอรี่.....	98
รูปที่ 4.20 ตัว Adapter.....	99
รูปที่ 4.21 โพรไฟล์ของตัว Adapter.....	99
รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของตัว Adapter.....	99
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV.....	112
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV....	112
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV....	112
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV....	113
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV....	113
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV.....	116
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV.....	116
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV.....	117
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV.....	117
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV.....	117
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV.....	119
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV.....	119
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV.....	120
รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV.....	120
รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV.....	120
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV.....	122
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV.....	122
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV.....	123
รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV.....	123

รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV..... 123





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นกระบวนการหนึ่งของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัตถุ (Non Destructive Testing, NDT) เป็นที่นิยมอย่างมากในด้านการรังสีวินิจฉัยทางการแพทย์ และในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยอาศัยเทคนิครังสีเอกซ์ทะลุผ่านวัตถุที่ต้องการจะตรวจสอบ เพื่อตรวจหาความผิดปกติของวัตถุ เช่น รอยแตก และความไม่ต่อเนื่องของวัตถุ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า โดยปกติจะใช้แผ่นฟิล์มมารับภาพ หลังจากนั้นจะนำฟิล์มไปล้างแล้วนำกลับมาดูภาพที่ส่องมิติเกิดขึ้น ว่ามีลักษณะของวัตถุทั้งภายนอกและภายในเป็นอย่างไร ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการสร้างภาพสามมิติในรูปแบบต่างๆ ทำให้ในด้านการแพทย์สามารถวินิจฉัยรอยโรคได้แม่นยำมากขึ้น และในทางอุตสาหกรรมสามารถตรวจสอบลักษณะต่างๆ ของวัตถุได้ถูกต้องมากขึ้น โดยอาศัยหลักการซ้อนทับกันของภาพ การมองภาพในลักษณะสามมิติ โดยมีกระบวนการซับซ้อนที่ต้องมีการล้างฟิล์มเป็นจำนวนมาก อีกทั้งกระบวนการนี้ใช้เวลาานาน ต่อมาจึงมีการใช้ฉากเรืองรังสีรับภาพ (fluorescence screen) ทำให้ได้ภาพรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยสามารถลดขั้นตอนที่ยุ่งยาก และใช้เวลาสั้นลง จึงสะดวกกว่าการใช้ฟิล์มรับภาพ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างภาพสามมิติเข้ามามีบทบาทมากการดำเนินชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น เทคโนโลยีจอแสดงภาพสามมิติ โดยการมองด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องสวมแว่น เทคโนโลยีมัลติมีเดีย เช่น การสร้างภาพการ์ตูนแอนิเมชัน การสร้างเกมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในทางด้านการแพทย์การสร้างภาพสามมิติในด้านรังสีวินิจฉัยเพื่อการตรวจรอยโรค เช่น การตรวจเอกซเรย์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI), การตรวจโรคด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT Scan) โดยภาพที่ได้สามารถบอกรอยโรค ชนิดของโรคต่างๆได้ เพื่อนำสู่การวินิจฉัยของผู้ป่วยให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น เทคนิคการสร้างภาพสามมิติแบบเดิม ด้วยการถ่ายภาพสองรูป โดยมุมในการสร้างภาพที่แตกต่างกัน แล้วนำฟิล์มทั้งสองมาซ้อนทับกันเป็นแนวเส้นตรง และใช้ตัวกั้น (Barrier) บังสายตาค้างค้ำให้ตาทั้งสองข้างมองจอเดี่ยวแต่ได้ภาพจากทั้ง 2 แตกต่างกันจึงเกิดภาพสามมิติ เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียคือ มุมมองคือต้องมองตรงหนึ่งมุม หรือมองเอียงให้ได้มุมพอดีเท่านั้น นิยมใช้ในกล้องถ่ายรูปและเครื่องเล่นเกมบางชนิดเท่านั้น

การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในหัวข้อการวิจัยนี้ จะเป็นการบันทึกภาพในแต่ละมุมโดยใช้เป็นหมุนวัตถุ (Stepping motor) เป็นแทนวางวัตถุในการหมุนแต่ละมุมแล้วบันทึกภาพโดยกล้องดิจิทัล จนครบทุกระนาบของวัตถุ แล้วนำภาพทั้งหมดมาสร้างภาพด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเป็นภาพตัดขวางของวัตถุ โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ภาพมีรายละเอียดและความคมชัดของทุกระนาบทุกมุมได้ดีขึ้นด้วย ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะต่างๆของภาพ มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ระบบถ่ายภาพที่สร้างขึ้นทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดทำได้มากขึ้น เนื่องจากนำเอาอุปกรณ์ที่มีอยู่และหาได้ง่ายมาจัดทำระบบการสร้างภาพ อีกทั้งสามารถนำกระบวนการมาเพิ่มเติมต่อภายหลังได้ดีมากขึ้นด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีโดยการบันทึกภาพบนฉากเรืองรังสีด้วยกล้องดิจิทัล

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 พัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยระบบหมุนตัวอย่าง ระบบบันทึกภาพและโปรแกรมการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.3.2 ทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากวัตถุตัวอย่าง จากเงื่อนไขต่างๆ จากการใช้งานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล
- 1.3.3 ประเมินคุณภาพของภาพโทโมกราฟี เช่น ค่า Resolution และ pixel noise เป็นต้น

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างภาพจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และการเทคนิคการรับภาพสองมิติจากกล้องดิจิทัล
- 1.4.2 ออกแบบระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่ โดยประกอบด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์, เป็นหมุนวัตถุ (Stepping motor), ฉากรังสี และกล้องดิจิทัล
- 1.4.3 พัฒนาเทคนิคการสร้างภาพโทโมกราฟีจากภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ ด้วยโปรแกรมการสร้างภาพโทโมกราฟีที่พัฒนาขึ้น
- 1.4.4 ทดลองการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จากวัตถุตัวอย่าง

- 1.4.5 บันทึกภาพ และประเมินคุณภาพของภาพโทโมกราฟี เช่น ค่า Resolution และ pixel noise เป็นต้น
- 1.4.6 ประมวลผล และสรุปผลการทำวิจัย
- 1.4.7 เขียนเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพจากฉากเรืองรังสี
- 1.5.2 ได้โปรแกรมวิเคราะห์และสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพจากฉากเรืองรังสี

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1.6.1 รัตติยา คุณากร ได้ศึกษาเรื่อง การพัฒนาระบบสแกนสำหรับการสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เทคนิคการกระเจิงของรังสีแกมมา<sup>[1]</sup>

เป็นการพัฒนาระบบสแกนสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เทคนิคการกระเจิงของรังสีแกมมา โดยออกแบบให้ระบบสแกนสามารถเก็บข้อมูลโปรไฟล์ของรังสีแกมมา แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างภาพตัดขวางของชิ้นงาน ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Am-241) ปริมาณ 100 mCi หัววัดรังสีแกมมาแบบ Scintillation ชนิด NaI(Tl) ขนาด 2×2 นิ้ว จัดระบบวัดรังสีโดยมีอุปกรณ์บังคับลำรังสีให้เป็นลำแคบ ขนาดลำรังสี 2 mm เก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยวที่ควบคุมการทำงานโดยไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ โดยการคำนวณการสร้างภาพนั้นใช้เทคนิคฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน (Filter back-projection) ระบบนี้ใช้สามารถใช้กับขนาดของชิ้นงานไม่เกิน 20 cm และหนักไม่เกิน 2 kg สำหรับขีดความสามารถในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากชิ้นงานทดสอบมีขนาด 16×16 cm ซึ่งจำนวนโปรไฟล์ที่เพียงพอต่อการคำนวณการสร้างภาพเท่ากับ 50 Profile มุมที่เปลี่ยนไปที่ละ  $7.2^{\circ}$  ระยะห่างระหว่างเรย์ซัม (Ray sum) ที่มีการเคลื่อนที่นั้นเท่ากับ 2 mm ใช้เวลาในการสแกนเก็บข้อมูลเท่ากับ 12 ชั่วโมง ข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บได้จะอยู่บนหน่วยความจำของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์อย่างอัตโนมัติ เพื่อนำไปคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีต่อไป

จากการทดสอบด้วยชิ้นงานทดสอบต่างๆ พบว่าการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี จากเทคนิคการกระเจิงของรังสีแกมมาให้ภาพที่มีผลตอบสนองต่อชิ้นงานที่เป็นธาตุเบา ดีกว่าธาตุหนัก โดยมีค่า Resolution = 1 cm

- 1.6.2 นารายณ์ รัตนไพโรจน์ขจี ได้ศึกษาเรื่อง การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน<sup>[2]</sup>

ได้พัฒนาการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนเพื่อคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี ซึ่งออกแบบชุดอุปกรณ์ 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ระบายถ่ายภาพนิวตรอน ประกอบด้วยชุดหมุนชิ้นงานควบคุมระยะไกล และกล้องภาพนิวตรอน ส่วนที่สองคือ ระบบแสดงภาพ และเก็บบันทึกสัญญาณภาพประกอบด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ พร้อมด้วยระบบเชื่อมโยงสัญญาณภาพ และเครื่องบันทึกวีดิทัศน์ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์นั้นกำหนดให้ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3 cm หมุนด้วยมุมละ 1.8 หรือ 3.6 องศา โดยใช้ Thermal neutron จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปวว-1/1 เดินเครื่องที่กำลัง 1200 kWt พบว่าคุณภาพของข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนการเก็บแบบรวมเฟรม และภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเลือกเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมตั้งแต่ 300 เฟรมขึ้นไป มีค่า Resolution = 200 ไมโครเมตร

- 1.6.3 ฉัตรชัย ชูดีรัตนานันท์ ได้ศึกษาเรื่อง การปรับค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟี<sup>[3]</sup>

ได้ศึกษาวิเคราะห์หาค่าเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีที่สร้างจากเทคนิคฟิล์ม ซึ่งได้ข้อมูลจากข้อมูลโปรไฟล์ที่บันทึกบนฟิล์ม เลขซีทีคำนวณโดยใช้วิธีการ Filter back-projection นำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระดับสีเทาและแสดงเป็นภาพโทโมกราฟีบนไมโครคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมปรับเทียบข้อมูลซีที (CT number analysis program) ที่พัฒนาขึ้น เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขซีทีกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ค่า exposure ต่างๆ ซึ่งพบว่า วัสดุชนิดเดียวกันขนาดเท่ากันเลขซีทีจะใกล้เคียงกัน วัสดุชนิดเดียวกันขนาดต่างกัน วัสดุขนาดเล็กจะมีค่าเลขซีทีมากกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุต่างชนิดกันขนาดเท่ากันวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีค่าเลขซีทีมากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก

- 1.6.4 เกரியไกร ธัญธนกุล ได้ศึกษาเรื่อง การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี โดยใช้ซีไอเอสแบบแถว<sup>[4]</sup>

ได้พัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี โดยใช้ CIS แบบแถวจากเครื่อง Scanner แบบตั้งโต๊ะที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ร่วมกับโปรแกรมควบคุมเพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านชิ้นงานตัวอย่างออกมา แล้วเปลี่ยนให้

เป็นแสงโดยใช้ฉากรังสีที่อยู่ติดด้านหน้าของอุปกรณ์รับภาพ CIS บนเครื่อง Scanner ข้อมูลโปรไฟล์ทั้งหมดซึ่งแปรผันสัมพันธ์กับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผ่านวัตถุตัวอย่างออกมาในทุกๆมุม จะถูกเก็บรวบรวมโดยการหมุนวัตถุตัวอย่างไปที่ละ  $0.438^\circ$  แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข 256 ระดับ โดยใช้เวลาทั้งสิ้น 45 s ซึ่งระบบนี้สามารถใช้ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างที่มีความกว้างสูงสุดได้ไม่เกิน 215 mm

จากการทดสอบเก็บข้อมูลโปรไฟล์ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ออกแบบขึ้น และในตัวอย่างในทางอุตสาหกรรมบางชนิด พบว่ามีค่า Resolution = 0.705 mm โดยคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการรายละเอียดสูงมากนัก แต่ต้องการความสะดวกและรวดเร็วในการทำงานได้

- 1.6.5 มงคล ไร่นุ่น ได้ศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บบันทึกโดยแผ่นบันทึกภาพ<sup>[5]</sup>

เป็นการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ (Profile) ที่เก็บบันทึกภาพด้วย image plate ซึ่งในการสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นจะใช้วิธีการเช่นเดียวกับการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มการสร้างภาพโทโมกราฟีจากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดย image plate สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆได้ ได้แก่ ค่าความเปรียบต่าง ค่าความสว่าง และขนาดของ Pixel เป็นต้น นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์

ผลการวิจัยพบว่า การปรับเปลี่ยนค่าความสว่าง ค่าความเปรียบต่าง ขนาดของพิกเซล (Pixel) และค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่ากระแสที่ใช้ในการถ่ายภาพ ส่งผลให้คุณภาพของภาพโทโมกราฟีจากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดย image plate เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ

- 1.6.6 สุรกิจ ขาวแผ้ว ได้ศึกษาเรื่อง การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้ห้รับค่านวณสร้างภาพโทโมกราฟี<sup>[6]</sup>

ได้พัฒนาระบบสแกนเก็บข้อมูล Profile ด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ชนิดเคลื่อนย้ายได้ สำหรับการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี เพื่อใช้งานการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้แกมมาพลังงานต่ำ 59.5 keV จาก gamma source Am-241 ความแรง 100 mCi และหัววัดรังสีแกมมา CdTe ขนาด 5 mm และระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ระบบวัดรังสีแกมมา ระเบบกลสำหรับสแกนเก็บข้อมูล Profile และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยสามารถ

สแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ ชิ้นงานที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 20 cm จากการเก็บข้อมูล Profile ตัวอย่าง เสาไม้ ท่อปูนซีเมนต์ และท่ออลูมิเนียม พบว่าพบว่าภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพของอยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยมีความคมชัดเท่ากับ 4.53 mm

- 1.6.7 D.V. Rao, R. Cesareo, A. Brunetti ได้ศึกษาเรื่อง Computed tomography with image intensifier imaging and characterization of material<sup>[7]</sup>

เป็นการสร้างภาพโทโมกราฟีเพื่อหาคุณลักษณะของวัสดุชนิดต่างๆ เช่น เซรามิก ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ไม้ เป็นต้น โดยได้มีการนำเอาฉากเพิ่มความเข้มแสงมาใช้ในระบบการสแกน และทำการพัฒนาโปรแกรมด้วยโปรแกรม PASCAL ในการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี ผลจากการศึกษาที่พลังงานต่างๆ กับแผ่นกรองรังสีใช้ค่าที่ดีที่สุด ได้ภาพโทโมกราฟีของวัสดุรายละเอียดดี

- 1.6.8 D.H. Phillips, J.J. Lannutti ได้ศึกษาเรื่อง Measuring physical density with X-ray computed tomography<sup>[8]</sup>

ได้ทำการศึกษารวัดความหนาแน่นทางกายภาพของภาพโทโมกราฟีในวัสดุ ซึ่งจะ สามารถหาได้จากการแปลงค่าเลขซีที (CT number) ให้เป็นค่าความหนาแน่นโดยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัสดุ พัฒนาและสร้างความหนาแน่นมาตรฐาน เพื่อนำค่าเลขซีทีมาเป็นตัวหาค่าความหนาแน่นในวัสดุ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พื้นฐานฟิสิกส์ทางรังสีเอกซ์<sup>[9]</sup>

รังสีเอกซ์ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงสามารถเกิดขึ้นจากสองกรณี คือ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดเป็นรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-ray) หรืออิเล็กตรอนเข้าทำอันตรกิริยากับแรงคูลอมป์ของนิวเคลียส เกิดเป็นรังสีเอกซ์ชนิดเบรมส์ชตราลุง (bremsstrahlung) ในปัจจุบันสามารถแบ่งช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ตามแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้<sup>[1]</sup>

- 0.1-20 kV รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft X-ray หรือ grenz)
- 20-120 kV รังสีเอกซ์ในช่วงวินิจฉัย (diagnostic)
- 120-300 kV รังสีเอกซ์พลังงาน orthovoltage
- 300 kV-1 MV รังสีเอกซ์พลังงาน intermediate
- 1 MV ขึ้นไป รังสีเอกซ์พลังงาน megavoltage ใช้ในงานรังสีรักษา

พลังงานของรังสีเอกซ์คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงที่ของ Planck มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  Js

$c$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

เมื่อ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) =  $1.602 \times 10^{-19}$  J ดังนี้

$$\begin{aligned} hc &= (1.99 \times 10^{-25}) \times \frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV} \\ \text{ดังนั้น} \quad E &= \frac{1.24}{\lambda} \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )

## 2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลาง<sup>[9]</sup>

อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลางที่สำคัญมีอยู่ 3 อันตรกิริยา

1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)
2. ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering)
3. ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair Production)

โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) , ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) และปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair Production) ขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอนหรือเลขอะตอมของตัวกลางที่เข้ามาทำอันตรกิริยา ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ ปรากฏการณ์คอมป์ตันเกิดเมื่อโฟตอนมีพลังงานปานกลาง ส่วนปรากฏการณ์แพร์โปรดักชันเกิดเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง

### 2.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

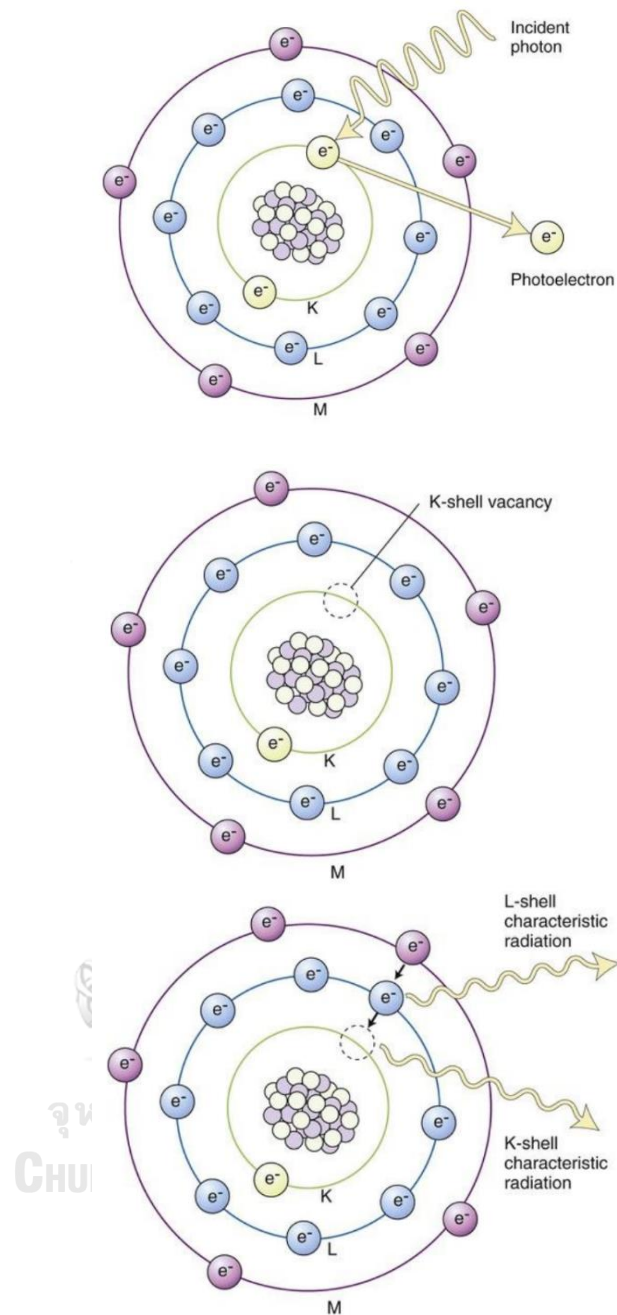
กระบวนการโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนวงใน (K-shell) ของอะตอมของตัวกลาง โดยในการเข้าทำอันตรกิริยาแต่ละครั้ง โฟตอนจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน เพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หลุดจากอะตอม อิเล็กตรอนนี้ถูกเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งจะวิ่งออกจากอะตอมด้วยพลังงานจลน์ที่มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟตอนที่เข้าทำอันตรกิริยากับพลังงานยึดเกาะของอิเล็กตรอนกับอะตอม

$E_K$  มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานของโฟตอนกับพลังงานยึดเหนี่ยว ( $E_B$ ) ที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมดังสมการที่ 2.3

$$E_K = hv - E_B \quad (2.3)$$

เมื่อ	$E_K$	คือ	พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)
	$hv$	คือ	พลังงานของโฟตอน (Photon)
	$E_B$	คือ	พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับอะตอม





รูปที่ 2.1 การเกิดกระบวนการ Photoelectric effect<sup>[10]</sup>

อันตรกิริยาแบบนี้มักเกิดขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนมากกว่าพลังงานยึดเกาะของอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อย โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ที่เกิดขึ้นอาจจะไปทำอันตรกิริยากับอะตอมอื่นๆ อีกจนกระทั่งพลังงานจลน์ของมันหมดจึงถูกดูดกลืนไว้ในวัตถุ

เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนถูกขับออกจากอะตอมจะเกิดช่องว่างขึ้นในชั้นของอิเล็กตรอนนั้นทำให้อะตอมอยู่ในสถานะไม่เสถียร อิเล็กตรอนจากชั้นที่อยู่นอกออกไปจะวิ่งเข้าไปแทนที่

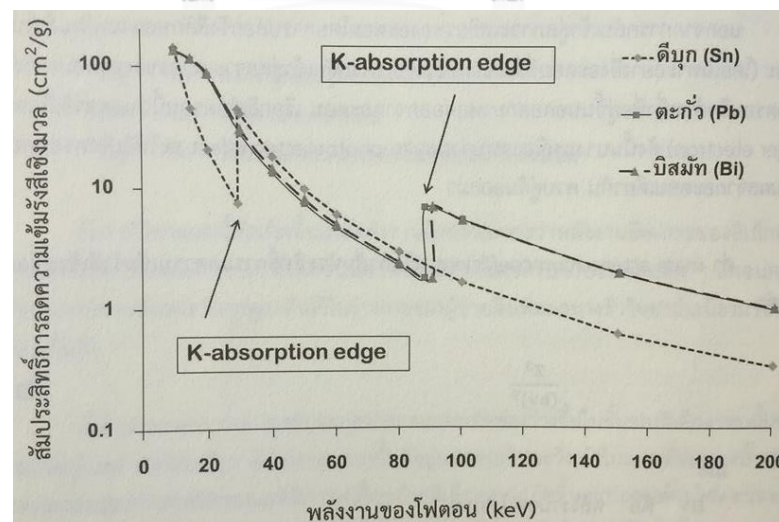
ช่องว่างนั้นเพื่อให้อะตอมกลับมาสู่สภาวะเสถียรขณะที่มีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจะปลดปล่อยโฟตอนออกมา โดยพลังงานโฟตอนนี้มีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยว ของอิเล็กตรอนในชั้นทั้งสองจากสมการ 2.3 โฟตอนที่ปล่อยออกมานี้เรียกว่าโฟตอนลักษณะเฉพาะ และมีชื่อเรียกตามชื่ออิเล็กตรอนที่เกิดช่องว่างนั้น เช่น เข้าไปแทนที่ช่องว่างในชั้นเค (K-shell) จะเรียกว่า K-radiation สำหรับวัตถุที่มีเลขอะตอมสูงจะมีโอกาสเกิดโฟตอนลักษณะเฉพาะได้มาก

นอกจากการกลับเข้าสู่สภาวะเสถียรของอะตอมโดยการปล่อยรังสีเฉพาะแล้วในบางสภาวะ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะตอมที่มีเลขอะตอมต่ำ) การกลับเข้าสู่สภาวะเสถียรของอะตอมอาจทำให้อิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่อยู่ชั้นนอกออกมาหลุดออกจากอะตอม เรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า ไอเจ็อิเล็กตรอน (Auger electron) ดังนั้นบางกรณีอาจพบว่าผลจากขบวนการโฟโตอิเล็กทริกจะให้อิเล็กตรอน 2 ตัว ที่เป็นผลจากอะตอมเดียวกัน ควบคู่กันออกมา

ค่า mass attenuation coefficient ( $\mu$ ) หรือค่าสัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีเชิงมวลแปรตามค่า

$$\mu = \frac{Z^3}{(hv)^3} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $hv$  คือ พลังงานของโฟตอน (Photon)  
 $Z$  คือ เลขอะตอม



รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีเชิงมวล ( $\mu/m$ ) ของตะกั่ว (Pb) บิสมัท (Bi) และดีบุก (Sn) ที่โฟตอนพลังงานต่างๆ<sup>[9]</sup>

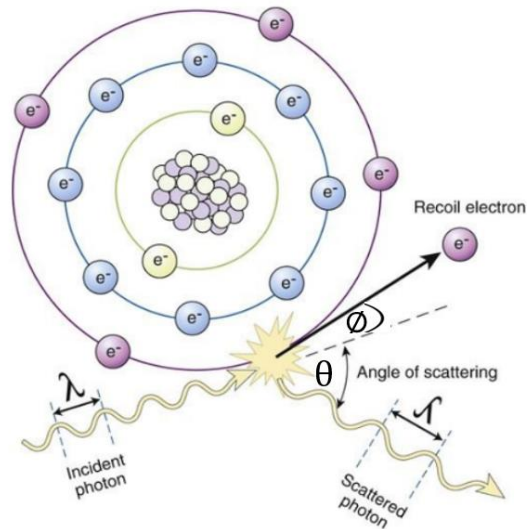
จากรูปที่ 2.2 ที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีเชิงมวลของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น เรียกว่า absorption edge เกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่พลังงานโฟตอนมีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรด้านใน และเนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน (binding energy) หรือมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นอิเล็กตรอน K จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้น K ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นอิเล็กตรอน K จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้น L ในทำนองเดียวกันโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นอิเล็กตรอน L จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้น M

อาจกล่าวได้ว่าโฟตอนจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวใกล้เคียงกับพลังงานของโฟตอน เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีต่อมวลของตัวกลางมากขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิด absorption edge ณ จุดที่พลังงานของโฟตอนเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีสำหรับตะกั่ว (เลขอะตอม = 82) จะสูงเมื่อรังสีพลังงาน 88 keV ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการถ่ายภาพเอกซเรย์ และเป็นเหตุผลสำคัญที่ตะกั่วถูกนำมาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี

## 2.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering)

ในอันตรกิริยาแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) โฟตอนของรังสีเอกซ์ที่เข้ามาทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบนอกๆ ของอะตอม หรืออิเล็กตรอนที่มีแรงยึดเกาะกับอะตอมน้อย ในขบวนการนี้โฟตอนของรังสีเอกซ์จะถ่ายทอดพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเล็กตรอนนั้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หลุดจากอะตอมเรียกว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนโฟตอนที่เหลือจะกระเจิง (scattered photon) และมีพลังงานลดลง จากรูปที่ 2.3 อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจะหลุดออกจากอะตอม ทำมุม  $\phi$  กับทิศทางของโฟตอนที่เข้ามา ส่วนโฟตอนกระเจิงภายหลังการเกิดอันตรกิริยา จะมีทิศทางเป็นมุม  $\theta$  มีพลังงานและความถี่ลดลงและความยาวคลื่นมากขึ้นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดกระบวนการ Compton scattering<sup>[10]</sup>

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไป (Recoil electron) จะมีค่าเท่ากับพลังงานส่วนที่หายไปภายหลังการเกิดอันตรกิริยาโฟตอนจะกระเจิงไปโดยมุม  $\theta$  ใดๆ ก็ได้ แต่สำหรับคอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) จะมีมุม  $\theta \leq 90^\circ$  เมื่อเทียบกับทิศทางของโฟตอนที่เข้ามา ทั้งมุม  $\theta$  และ  $\theta$  จะลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยามีค่าสูงขึ้น (โฟตอนมีพลังงานสูงจะพุ่งไปด้านหน้า)

ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิงไป ( $\lambda'$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\lambda'$  คือ ความยาวคลื่นโฟตอนที่กระเจิง  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นโฟตอนที่เข้าทำอันตรกิริยา  
 $\Delta\lambda$  คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของโฟตอน

ดังนั้นผลจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) ทำให้ค่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่เข้าทำอันตรกิริยาเปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta\lambda$ ) เท่ากับ

$$\Delta\lambda = 0.00243(1 - \sin \theta) \quad (2.6)$$

โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) แต่ลดลงตามพลังงานของโฟตอน และโอกาสเกิดอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) ไม่ขึ้นกับเลขอะตอม (Atomic number) ทั้งนี้เพราะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนวงนอกๆ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) แปรตามค่า

$$\frac{\text{Electron Density}}{hv}$$

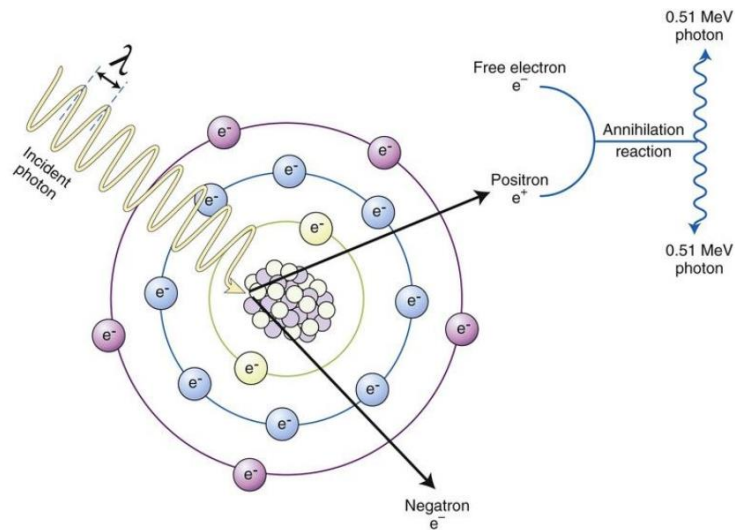
เนื่องจากอะตอมส่วนใหญ่มีจำนวนโปรตอน (Proton) และนิวตรอน (Neutron) เท่ากัน อัตราส่วนของเลขอะตอมต่อเลขมวลมีค่าเท่ากับ 0.5 แต่สำหรับไฮโดรเจน (H) ซึ่งเป็นอะตอมที่มีโปรตอนเพียงตัวเดียวอัตราส่วนของเลขอะตอมต่อเลขมวลมีค่าเท่ากับ 1

สรุปผลผลิตที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์คอมป์ตัน คือ

- คอมป์ตันอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกไป (Compton scatter electron)
- โฟตอนที่กระเจิงออกไป (Scatter x-ray photon) ซึ่งมีพลังงานลดลง โดยโฟตอนกระเจิงนี้อาจทำให้คุณภาพของภาพเอกซเรย์ลดลง

### 2.2.3 ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair Production)

อันตรกิริยาชนิดนี้มักไม่ค่อยเกิดขึ้นกับโฟตอนที่ใช้ในงานเอกซเรย์ทั่วไป เพราะจะเกิดได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.022 MeV ผ่านเข้าไปในตัวกลางโดยไม่ทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอม แต่จะทำอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์รอบนิวเคลียส โฟตอนจะถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์และเปลี่ยนเป็นอนุภาค 2 ตัว คือ อิเล็กตรอนและโพซิตรอน ซึ่งมีมวลและประจุเท่ากันแต่ประจุตรงกันข้าม โพซิตรอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแพร์โปรดักชัน (Pair Production) ไม่สามารถอยู่ได้ในธรรมชาติ ขณะที่เคลื่อนที่ไปพลังงานจลน์ของมันจะสูญเสียไปเรื่อยๆ นั่นคือ ช้าลงเรื่อยๆ ขณะใกล้หยุดถ้าโพซิตรอนเข้าร่วมกับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่อยู่นิ่ง (เนื่องจากโพซิตรอนเสมือนเป็นอิเล็กตรอนที่มีประจุบวกจึงพยายามรวมกับกับอิเล็กตรอน) มวลของอิเล็กตรอนและโพซิตรอน จะเปลี่ยนเป็นโฟตอน (photon) 2 ตัว ที่เคลื่อนที่ออกในทิศทางตรงกันข้าม และเนื่องจากโพซิตรอนที่ใกล้หยุด และอิเล็กตรอนที่หยุดนิ่งมีพลังงานรวม คือ ผลรวมของมวลหยุดนิ่งของทั้ง 2 ตัว (1.022 MeV) ดังนั้นพลังงานของโฟตอนแต่ละตัวจึงมีค่าเท่ากับ 0.511 MeV ซึ่งถ่ายทอดมาจากมวลหยุดนิ่งดังกล่าว ขบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แอนนิhilेशन (annihilation) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดแพร์โปรดักชัน (Pair Production)<sup>[10]</sup>

ในการเกิดอันตรกิริยาชนิดนี้ พลังงานของโฟตอนส่วนที่เกินจาก 1.022 MeV จะถูกปลดปล่อยในรูปของพลังงานจลน์ ( $E_K$ ) ของอิเล็กตรอน 2 ตัว

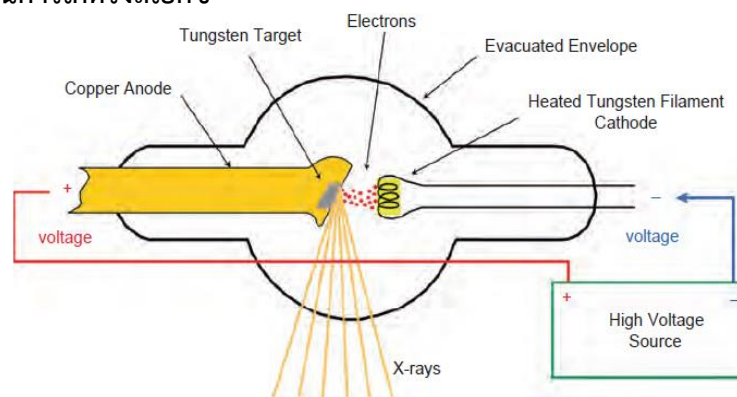
$$h\nu(\text{MeV}) = 1.02 + E_{K_{e^-}} + E_{K_{e^+}} \quad (2.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลจะเพิ่มขึ้นโดยตรงกับเลขอะตอมของตัวกลาง (Z) และเพิ่มขึ้นซ้ำๆ ตามพลังงานของโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่เข้าทำอันตรกิริยา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.3 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์<sup>[9]</sup>

### 2.3.1 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray generator)<sup>[10]</sup>

จากรูปที่ 2.5 หลอดเอกซเรย์มีผนังเป็นแก้วและอยู่ใน Housing โดยภายในหลอดต้องเป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการชนระหว่างโมเลกุลของอากาศ และอิเล็กตรอนที่กำลังถูกเร่งระหว่างไส้หลอด และเป้า Housing มีลักษณะเป็นถังหุ้มหลอดเอกซเรย์ มีหน้าที่ป้องกันมิให้รังสีทะลุออกไปอย่างไร้ทิศทาง และบรรจุน้ำมันซึ่งช่วยป้องกัน Housing จากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ไส้หลอด และช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่เป้าหลอดเอกซเรย์

### 2.3.2 เครื่องกำเนิดเอกซเรย์ (X-ray generator)

เป็นเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดสูงสุด (kVp) และค่ากระแสหลอด (mA) ให้กับหลอดเอกซเรย์ (X-ray Tube) ได้

### 2.3.3 หลอดเอกซเรย์ (X-ray Tube)

เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยหลังจากที่เครื่องกำเนิดเอกซเรย์ (X-ray generator) จ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสหลอดให้กับไส้หลอด ทำให้ไส้หลอด (Filament) เกิดความร้อนและเผาไหม้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาแล้วอิเล็กตรอนก็ถูกเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้าทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นและพุ่งไปชนกับเป้าที่เป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นรังสีเอกซ์ในที่สุด

### 2.3.4 คอลลิเมเตอร์ (Collimator)

เป็นส่วนที่กำหนดขนาดของลำรังสีที่ออกมาจาก X-ray Tube

### 2.3.5 การกรองรังสี (Filtration)

เป็นวัสดุส่วนที่เพิ่มเข้ามาในเครื่อง ใช้เพื่อลดทอนรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำออกจากลำรังสีวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเป็น Filtration คือ อลูมิเนียมหรือทองแดง

### 2.3.6 ฉากรังสีรับภาพ (fluorescence screen)

เป็นส่วนที่เปลี่ยนจากรังสีเอกซ์ไปเป็นแสง (Visible light) โดยความเข้มของแสงแปรเป็นความเข้มของรังสีเอกซ์

## 2.4 การผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray Production)

การผลิตรังสีเอกซ์ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron generator)
2. เป้า (Target)
3. แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

### 2.4.1 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron generator)

หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ในยุคแรกๆ ใช้กระแสไฟฟ้าในการทำให้อะตอมของก๊าซแตกตัวเกิดเป็นคู่อิออน ประจุบวกจะวิ่งไปยังขั้วไฟฟ้าลบหรือแคโทด (Cathode) เมื่อประจุบวกชนขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา และถูกเร่งไปยังขั้วไฟฟ้าบวกหรือแอโนด (Anode) และจากนั้นรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกดูดกลืนในเป้า ซึ่งการผลิตรังสีเอกซ์ด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพต่ำมาก ต่อมาในปี ค.ศ.1913 หลอดเอกซเรย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับไส้หลอดที่เป็นขดลวด ทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นมากมายที่บริเวณผิวหน้าของไส้หลอด กระบวนการที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากไส้หลอดที่ได้รับความร้อนนี้เรียกว่า “Thermionic emission” หรือ “Edison effect” อิเล็กตรอนที่รวมตัวกันอยู่นี้จะถูกผลักด้วยความเป็นขั้วไฟฟ้าลบของไส้หลอดและถูกเร่งไปยังเป้าซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนชนเป้า

ไส้หลอดเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับขั้วแคโทดต้องทำจากโลหะที่มีจุดหลอมละลายสูง เช่น ทังสเตน ซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ  $3370^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ยังมีการใช้ทอเรียมเป็นไส้หลอดได้ด้วยเพราะให้ประสิทธิภาพของการเกิดอิเล็กตรอนค่อนข้างสูง ไส้หลอดต้องได้รับกระแสไฟฟ้า (filament current) เข้าไปจำนวน 2-3 A เพื่อให้อุณหภูมิของไส้หลอดสูงขึ้นและปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าของไส้หลอด

เป้าของหลอดเอกซเรย์ที่อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าไปชนนั้นเป็นขั้วแอโนด พื้นที่ของเป้าที่อิเล็กตรอนเข้าไปชนเรียกว่า “focal spot” จะดูดกลืนอิเล็กตรอนไว้และเกิดเป็นรังสีเอกซ์โดยทั่วไป focal spot มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก และสัมพันธ์กับขนาดของไส้หลอด การใช้ไส้หลอดหรือ focal spot ที่มีขนาดเล็กทำให้ภาพเอกซเรย์ที่ได้มีคุณภาพสูงกว่าการใช้ focal spot ที่มีขนาดใหญ่ แต่ต้องใช้เวลาเวลาในการถ่ายภาพนาน



## 2.4.2 เป้า (Target)

ประสิทธิภาพในการผลิตรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป็นเป้า และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดเอกซเรย์ อย่างไรก็ตามการผลิตรังสีเอกซ์ในปัจจุบันก็ยังถือว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพต่ำ

ประสิทธิภาพของการผลิตรังสีเอกซ์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.8

$$\text{Efficiency} = 0.9 \times 10^{-9} ZV \quad (2.8)$$

เมื่อ  $Z$  คือ เลขอะตอมของเป้า  
 $V$  คือ ความแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

เป้าของหลอดมีคุณสมบัติดังนี้

1. เลขอะตอมสูง
2. จุดหลอมเหลวสูง
3. การนำพาความร้อนสูง
4. ราคาไม่แพง

ในปัจจุบันนิยมใช้ทั้งสแตน (เลขอะตอม = 74) เป็นเป้าของหลอดเอกซเรย์ เพราะมีคุณสมบัติครบถ้วนทั้ง 4 ประการ อัตราความร้อนที่เกิดในเป้าของหลอดเอกซเรย์จะสูงมาก เนื่องจากมีอิเล็กตรอนจำนวนมากวิ่งชนเป้าในเวลาอันสั้น ดังนั้นเป้าของหลอดจำเป็นต้องมีจุดหลอมละลายค่อนข้างสูง และต้องมีการนำพาความร้อนสูงด้วยเพื่อช่วยระบายความร้อนออกไปให้เร็วที่สุด รังสีเอกซ์ที่ถูกผลิตขึ้นโดยการยิงอิเล็กตรอนพลังสูงจากไส้หลอดที่ร้อนไปชนเป้าโลหะของหลอดเอกซเรย์จะเกิดเป็นร้อนสูงถึง 99% และเกิดรังสีเอกซ์เพียง 1%

ชนิดของเป้าที่ใช้ในหลอดเอกซเรย์ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรก คือ ชนิดอยู่นิ่งกับที่ (Stationary target) ประกอบด้วยทั้งสแตนหนา 0.1 นิ้ว ฝังอยู่ในโลหะทองแดงซึ่งเป็นฉนวน ความร้อนที่เกิดขึ้นในเป้าจะระบายความร้อนออกได้หลายทาง เช่น ใช้น้ำมัน น้ำ เย็น หรืออากาศไหลเวียนผ่านโลหะทองแดงที่เป็นฉนวน ชนิดที่สอง คือ ชนิดที่สามารถหมุนได้รอบแกน (Rotating anode) โดยเชื่อมกับมอเตอร์ หมุนได้ไม่เกิน 1000 รอบต่อนาที เป้าชนิดนี้อาจทำจากทั้งสแตนบริสุทธิ์ หรือสารผสมระหว่างทั้งสแตน, โรเดียมและโมลิบดีนัม

### 2.4.3 แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

พลังงานของโฟตอนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วหลอด พลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในหลอดเอกซเรย์จะเรียกเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (electric voltage : eV) รังสีเอกซ์ที่ผลิตขึ้นจึงต้องมีพลังงานสูงขึ้น และเนื่องจากพลังงานที่ต้องออกมาไม่ได้มีเพียงค่าเดียวจึงนิยมใช้ peak kilovoltage หรือ kVp เป็นตัวแทน หากอิเล็กตรอน 1 ตัววิ่งผ่านแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ จะถูกเรียกว่า 1 eV ดังนั้นหากต้องการตั้งค่าเทคนิคในการถ่ายภาพเอกซเรย์เท่ากับ 100 keV ซึ่งเอกซเรย์หรือโฟตอนที่ถูกผลิตออกมาพลังงานมากมาย แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีพลังงานไม่มากกว่า 100 keV

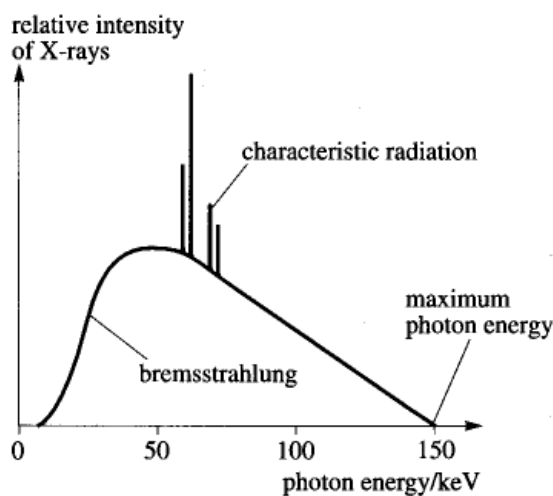
โดยปกติแล้วเครื่องเอกซเรย์จะผลิตรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ  $1/3$  ของพลังงานโฟตอนที่มากที่สุด ดังนั้นหากตั้งค่าการถ่ายภาพเอกซเรย์เท่ากับ 150 kVp จะได้โฟตอนที่พลังงานสูงสุดเท่ากับ 150 keV หรือน้อยกว่าโดยมีพลังงานเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 50 keV

## 2.5 รังสีที่ออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

### 2.5.1 เบรมส์ชตราลุง (Bremsstrahlung)

สืบเนื่องจากการให้ค่าแรงดันไฟฟาระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด อิเล็กตรอนวิ่งเข้าสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของเป้า อิเล็กตรอนถูกเบี่ยงเบนทิศทางโดยแรงคูลอมบ์ที่เกิดจากนิวเคลียสของอะตอมหนัก (ทั้งสแตน) ทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลง และที่ความเร็วของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงมันจะสูญเสียพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า เบรมส์ชตราลุง (Bremsstrahlung) ซึ่งการเบี่ยงเบนทิศทางนี้ขึ้นอยู่กับแรงนิวเคลียส (เลขอะตอม) ของแอโนด

## 2.5.2 สเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray Spectrum)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray Spectrum)<sup>[9]</sup>

จากรูปที่ 2.6 ความเร็วของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของขั้วหลอด พลังงานของเบรมส์ตราลุง (Energy of Bremsstrahlung) จะหลากหลายตั้งแต่ค่าสูงสุด (เมื่ออิเล็กตรอนเข้าใกล้สนามไฟฟ้าของนิวเคลียสอย่างมาก) ไปจนกระทั่งพลังงานต่ำสุด (เมื่ออิเล็กตรอนเบี่ยงเบนบนเส้นทางเพียงเล็กน้อยเท่านั้น)

## 2.5.3 รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-ray)

หากอิเล็กตรอนที่เข้ามาภายในอะตอมเกิดการชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น (K และ L shell) ของเป้า ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานนั้นๆ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปและอิเล็กตรอนวงโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และให้พลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีเอกซ์เรย์ ซึ่งมีค่าพลังงานเฉพาะตามธาตุที่เป็นเป้า และเกิดรังสีที่มีพลังงานแน่นอนเรียกว่ารังสีเอกซ์เฉพาะ หากเป้าเป็นทังสเตน พลังงานของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะประมาณ 59 keV และ 69 keV ซึ่งเรียกว่า  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.6

โดยสรุป คือ รังสีเอกซ์ถูกผลิตขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนพุ่งชนเป้าที่เป็นโลหะหนัก (Bombard) ประสิทธิภาพของการผลิตรังสีเอกซ์ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า และเลขอะตอมของเป้า โดยรังสีเบรมส์ตราลุงมีพลังงานต่อเนื่องซึ่งมีพลังงานสูงสุดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วหลอด ส่วนพลังงานต่ำสุดจะถูกดูดกลืนไปภายในหลอดเอกซเรย์ และรังสีเอกซ์

ลักษณะเฉพาะจะเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนจากไส้ หลอดวิ่งไปชนอิเล็กตรอนในวงโคจร K และ L ของเป้าทำให้อิเล็กตรอนของเป้าหลุดจากวงโคจรและ อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอก (L หรือ M) เข้ามาแทนที่พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสี โดยมีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในทั้งสองของวงโคจรดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$K_{\alpha} = E_K - E_L = 59.3 \text{ keV} \quad (2.9)$$

$$K_{\beta} = E_K - E_M = 69.5 \text{ keV} \quad (2.10)$$

#### 2.5.4 สรุปรูปการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนจากไส้หลอดและเป้า

กรณีที่ 1 การเกิดอันตรกิริยาที่วงโคจรด้านนอก

อิเล็กตรอนที่วิ่งมาจะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรด้านนอกของอะตอมของเป้า ทำให้อะตอม อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นหรือไอออน เป็นผลให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานต่ำ ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน

กรณีที่ 2 การเกิดอันตรกิริยาที่วงโคจรด้านใน

อิเล็กตรอนที่วิ่งมาจะชนกับอิเล็กตรอนในของอะตอมของเป้าและสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมของเป้า และเกิดเป็นรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ

กรณีที่ 3 การเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส

อิเล็กตรอนที่วิ่งมาจะเข้าไปทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสเกิดเป็นรังสีเบรมส์ชตราลุง (Energy of Bremstrahlung)

จากกรณีข้างต้น อาจทำให้เกิดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ เพราะฉะนั้นจะมีวิธีการกำจัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำดังนี้<sup>[9]</sup>

- ความลึกของการเกิดอันตรกิริยาในเป้าทำให้อิเล็กตรอนพลังงานต่ำถูกดูดกลืนเข้าไป
- ความหนาของหลอดเอกซเรย์ซึ่งเป็นแก้ว จะสามารถกรองโฟตอนพลังงานต่ำระหว่าง 0 ถึงประมาณ 20 keV ออกไปได้ เรียกว่า inherent beam filtration ทั้งนี้เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานต่ำเหล่านี้ ไม่สามารถนำไปใช้ในการสร้างภาพได้
- การใส่การกรองเพิ่ม (fixed หรือ added filtration) เพื่อกำจัดโฟตอนพลังงานต่ำโดย inherent และ fixed filtration รวมกันเรียกว่า total filtration โดยปกติ inherent filtration จะมีความหนาเทียบเท่ากับบอลูมิเนียม 0.5 mm แต่ถ้าหาก

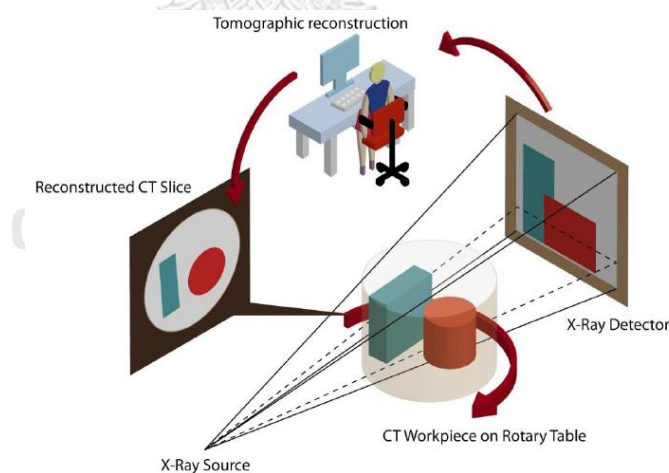
เครื่องเอกซเรย์ที่มีการใช้งานมานานหรือหลอดเอกซเรย์ที่เก่าอาจต้องเพิ่ม added filtration เข้าไปประมาณ 1.5 ถึง 2.0 mm เทียบเท่าอลูมิเนียม เพื่อชดเชย inherent filtration ที่เสื่อมสภาพ

พลังงานสเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งค่า แรงดันไฟฟ้า เป็นตัวกำหนดอำนาจการทะลุทะลวงวัตถุและคุณภาพของภาพเอกซเรย์ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำทำให้เกิดภาพ High contrast ในทางกลับกันค่าแรงดันไฟฟ้าสูงทำให้เกิดภาพ Low contrast

## 2.6 ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีในทางอุตสาหกรรม (Industrial X-ray computed tomography)<sup>[11]</sup>

ภาพเอกซเรย์โทโมกราฟีเขียนย่อเป็น XCT หรือ CT โดยการใช้รังสีเอกซ์ (X-ray) ในการสร้างภาพ 2 มิติ โดยการเก็บภาพในแต่ละมุม หลังจากนั้นนำภาพที่ได้มาผ่านกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาสร้างภาพเป็นภาพตัดขวางของวัตถุที่ต้องการภายใต้หลักการทางคณิตศาสตร์

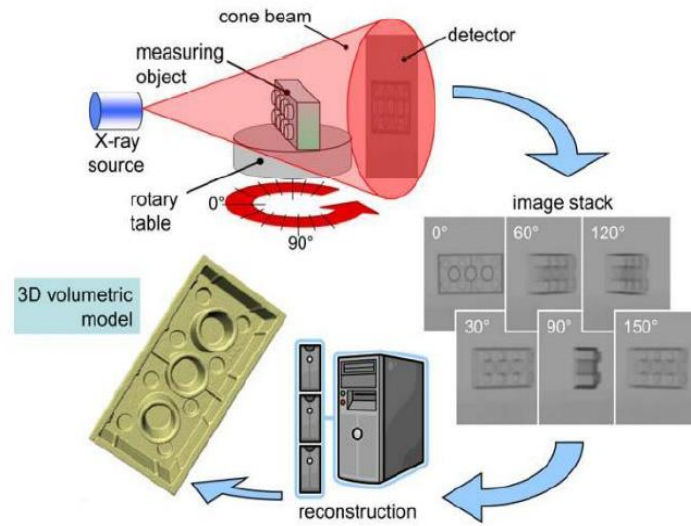
เนื่องจากงานวิจัยนี้เครื่องเอกซเรย์ที่ให้ลำรังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นรูปกรวย (A typical cone beam scanner)



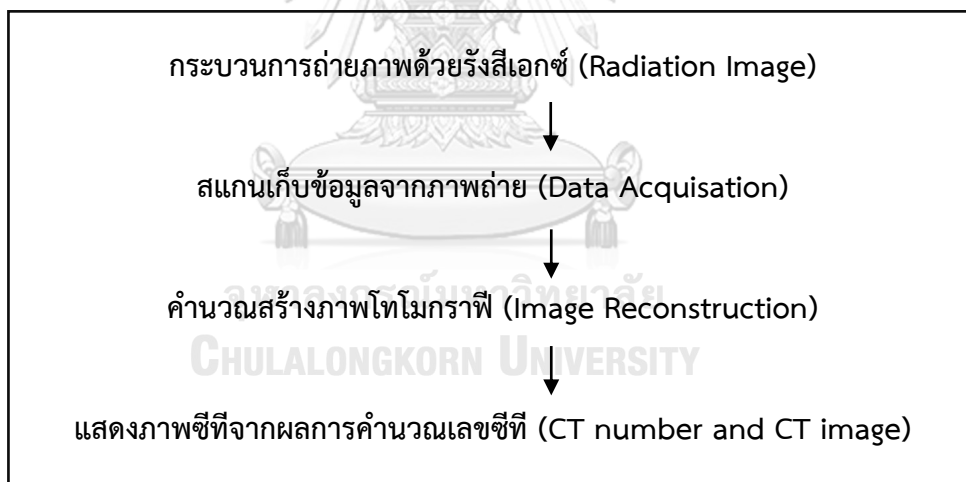
รูปที่ 2.7 กระบวนการเก็บภาพโทโมกราฟี<sup>[11]</sup>

การสแกนเก็บข้อมูลแบบลำรังสีเอกซ์รูปกรวย (cone beam scanner) เป็นการสแกนแบบเก็บข้อมูลโดยใช้ลำรังสีเอกซ์แบบลำรังสีรูปกรวย (cone beam) การเก็บภาพของวัตถุที่ต้องการ โดยการยึดวัตถุให้อยู่นิ่งบนแป้นหมุนแล้วใช้ลำรังสีเอกซ์ทะลุผ่านวัตถุ แล้วหมุนวัตถุด้วยมุมน้อยๆ โดยการเก็บภาพในแต่ละมุม ซึ่งมีตัวรับภาพเก็บภาพเอาไว้ แล้วนำมาสร้างภาพเป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่

ต้องการ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยวิธีนี้ จึงเป็นวิธีที่ใช้เวลาน้อยที่สุด แสดงหลักการและขั้นตอนในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 กระบวนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายด้วยรังสีในแต่ละมุมของวัตถุสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟี<sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนและกระบวนการสร้างภาพซีที (CT image)

เทคนิคการเก็บข้อมูลภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ (Radiation Image) สำหรับการสร้างภาพโทโมกราฟี ในงานวิจัยเรื่องนี้ เริ่มจากกระบวนการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (Radiation Image) โดยมีองค์ประกอบ คือ เครื่องกำเนิดเอกซเรย์ (X-ray Generator) ปล่อยลำรังสีเอกซเรย์ออกมาทะลุผ่านวัตถุตัวอย่างที่นำมาทดสอบที่วางอยู่บนสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor) ทำการสแกนเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย (Data Acquisition) หมุนและเก็บภาพทุกระนาบของวัตถุที่นำมาทดสอบ โดย

ภาพจะเกิดจากรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุผ่านฉากเรืองรังสี (fluorescence screen) ซึ่งจะเปลี่ยนจากรังสีเอกซ์เป็นแสง และมีอุปกรณ์รับภาพจากฉากเรืองรังสีคือ กล้องดิจิทัล (Digital camera) แล้วเก็บภาพผ่านโปรแกรมของกล้องดิจิทัลหน้าจocomพิวเตอร์ จนได้ภาพทุกระนาบของวัตถุที่นำมาทดสอบ และนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี (Image Reconstruction) ผ่านโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำไปคำนวณเลขซีที เมื่อโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณเสร็จแล้วจะแสดงภาพซีทีจากผลการคำนวณเลขซีที (CT number and CT image) จนได้ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่นำมาทดสอบตามต้องการ

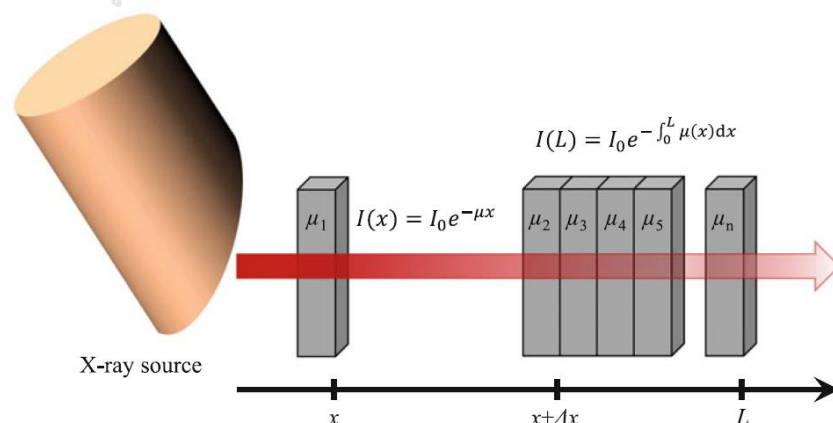
### รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นค่าเดียว (Monochromatic X-ray)

ความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง จะเป็นไปตามสมการ Beer's Law สำหรับรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นค่าเดียว คือ

The Beer-Lambert law

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนทะลุผ่านตัวกลาง  
 $I$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์สุดท้ายที่ทะลุผ่านแล้ว  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) หรือสัดส่วนในการลดลงของความเข้มของรังสีต่อความหนาของตัวกลางที่รังสีเดินทางผ่าน



รูปที่ 2.10 การลดทอนความเข้มรังสีที่ผ่านวัตถุคนละชนิดภายในตัวกลางเดียวกัน<sup>[12]</sup>

จากรูปที่ 2.10 เป็นการลดทอนความเข้มรังสีที่ผ่านวัตถุคนละชนิดภายในตัวกลางเดียวกัน โดยแต่ละวัตถุแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสีเชิงเส้น คือ  $\mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \dots, \mu_n$  โดยความเข้มของรังสีเอกซ์สุดท้ายที่ทะลุผ่านแล้วจะได้ตามสมการนี้คือ

$$I(L) = I_0 e^{-\int_0^L \mu(x) dx} \quad (2.12)$$

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สามารถทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงได้ และเป็นรังสีที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวขณะที่มันเคลื่อนที่ผ่านในตัวกลางนั้น ในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับวัตถุได้แก่ อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก, แบบคอมป์ตัน และแบบแฟร์โรดักชัน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง โดยมีความสัมพันธ์กับสมการที่ 2.11

จากความสัมพันธ์จะเห็นว่า ความเข้มของปริมาณรังสีเอกซ์ที่เดินทางผ่านตัวกลางออกมา จะขึ้นกับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี, ความหนา และชนิดของตัวกลางนั้นๆ ซึ่งแสดงการลดทอนในเทอมของ  $e^{-\mu x}$

ถ้ากรณีที่ตัวกลางประกอบไปด้วยสมการ 2 ชนิดหนา  $X_1$  และ  $X_2$  ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ของตัวกลางทั้งสองเป็น  $\mu_1, \mu_2$  ตามลำดับเป็นไปตามสมการ 2.13

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)} \quad (2.13)$$

แต่ถ้าตัวกลางประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดในการคำนวณการดูดกลืนรังสี จำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นส่วนๆ ขนาดความหนา  $dx$  เท่าๆกัน ความหนาของส่วนที่แบ่งออกนั้นจนสามารถสมมติได้ส่วนเล็กๆ ที่แบ่งออกนั้น ประกอบด้วยเนื้อเดียวตลอด กรณีนี้ความสัมพันธ์  $I, I_0, \mu$  และความหนา ( $X$ ) ของตัวกลางจะเป็นตามสมการที่ 2.14

$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \quad (2.14)$$



## 2.7 ข้อดีของภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีในทางอุตสาหกรรม (CT)<sup>[11]</sup>

- เป็นวิธีการและกระบวนการของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายของวัตถุ (Non-destructive testing)
- เป็นวิธีการที่รวดเร็วและถูกต้องในการตรวจดูภายในและภายนอกของวัตถุ
- เป็นการวิเคราะห์ที่แม่นยำในการตรวจวัดภายในของวัตถุโดยไม่ทำลาย (Non-destructive testing)
- ผู้จัดสามารถทำระบบและองค์ประกอบของการจัดวางวัสดุต่างๆได้
- สามารถแสดงผลได้ในหลายระนาบของภาพตัดขวางของวัตถุ

## 2.8 องค์ประกอบของภาพโทโมกราฟี (Computed Tomography Image)<sup>[13]</sup>

### 2.8.1 เลขซีที (CT number)

ภาพซีทีเป็นภาพลักษณะเฉพาะที่มีความแตกต่างจากภาพเอกซเรย์ทั่วไป เพราะภาพซีทีเป็นภาพที่แสดงการกระจายเชิงเส้นในระนาบหนึ่งของวัตถุ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของส่วนต่างๆ โดยนิยามตามเลขซีทีดังนี้

$$HN = k \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (2.15)$$

เมื่อ	HN	คือ	เลขซีทีหรือเลขเฮาสฟิลด์(Hounsfield number)
	$\mu$	คือ	สัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของตัวกลางใดๆ
	$\mu_w$	คือ	สัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของน้ำ
	k	คือ	แฟคเตอร์สเกล (factor scale)

จากสมการจะเห็นว่าเลขซีทีของน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่า การเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของตัวกลางใดๆ ให้เป็นเลขซีทีจะใช้น้ำเป็นบรรทัดฐาน ตัวกลางใดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจะมีเลขซีทีเป็นบวกหรือมีค่ามากกว่าศูนย์ ในทางกลับกัน ตัวกลางใดที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจะมีเลขซีทีเป็นลบหรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์

เมื่อพิจารณาเลขซีทีในเฮาสฟิลด์ (Hounsfield number) จะมีค่าในช่วงตั้งแต่ -1000 ถึง +1000 ในขณะที่อากาศมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -1000 และน้ำมีเลขซีทีอยู่ตรงกลางเท่ากับ 0

## 2.8.2 ภาพซีที (CT image)

เป็นการคำนวณหาค่าการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นในระนาบที่สนใจ ได้แสดงถึงขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการสร้างภาพซีที เริ่มด้วยการสแกนเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย (Data Acquisition) ตามด้วยขั้นตอนวิธีการคำนวณสร้างภาพ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นให้เป็นเลขซีทีด้วย

## 2.8.3 พิกเซล (Pixel)

การสร้างภาพด้วยการคำนวณค่าเลขซีทีของตัวกลางในระนาบที่สนใจ ทำโดยการนำเลขซีทีมาเรียงกันตามตำแหน่งที่เหมาะสม ภาพซีทีที่สร้างขึ้นจึงประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ และเป็นภาพดิจิทัล เซลล์เหล่านั้นมีลักษณะเป็นระนาบ 2 มิติ เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจำนวนมาก เรียงเป็นระเบียบทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง และภายในเซลล์เล็กๆเหล่านั้นจะบรรจุค่าเลขซีทีซึ่งสามารถแสดงภาพเป็นเลขซีที และเมื่อเปลี่ยนค่าเลขซีทีให้เป็นความดำความขาวก็จะปรากฏเป็นภาพเหมือนภาพเอกซเรย์ทั่วไป โดยทั่วไปบริเวณที่มีเลขซีทีสูงมากที่สุดจะแสดงความขาวมากที่สุด ในทางกลับกันบริเวณที่มีเลขซีทีต่ำที่สุดจะแสดงความดำมากที่สุดเมื่อมองลงไปตามแนวตั้งฉากกับระนาบของภาพซีที เซลล์เล็กๆแต่ละเซลล์ที่เห็นเรียกว่า พิกเซล (pixel)

## 2.8.4 วอกเซล (Voxel)

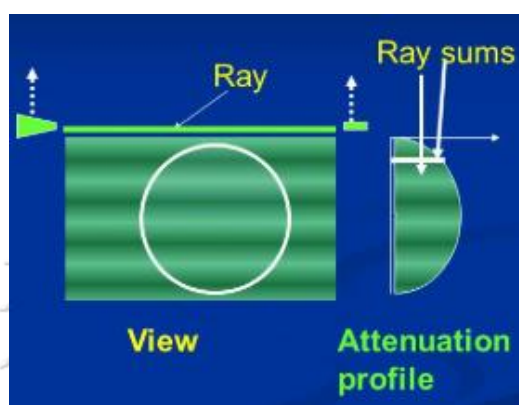
โดยทั่วไปภาพซีทีที่มีความหนาขนาดหนึ่ง พิจารณาจากเรขาคณิตของการสแกนเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย (Data Acquisition) ลำเอกซเรย์ที่ทะลุผ่านวัตถุขนาดหนึ่ง ดังนั้นขนาดความหนาของลำเอกซเรย์จึงควรเท่ากับขนาดความหนาของชิ้นงานภาพซีที เมื่อดึงพิกเซลใดพิกเซลหนึ่งออกมา จะพบลักษณะใน 3 มิติเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่มีผิวปิดล้อมด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปทรงทางเรขาคณิตนี้เรียกว่า วอกเซล (Voxel)

## 2.8.5 เรย์ซัม (Ray-Sum)

จากสมการที่ 2.14 เป็นสมการที่มีความสำคัญต่อการสร้างภาพ เพื่อความสะดวกจึงเขียนสมการที่ 2.14 โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm) ดังสมการที่ 2.16

$$P(r, \phi) = -\ln \frac{I}{I_0} = \int_{r, \phi} \mu \, dx \quad (2.16)$$

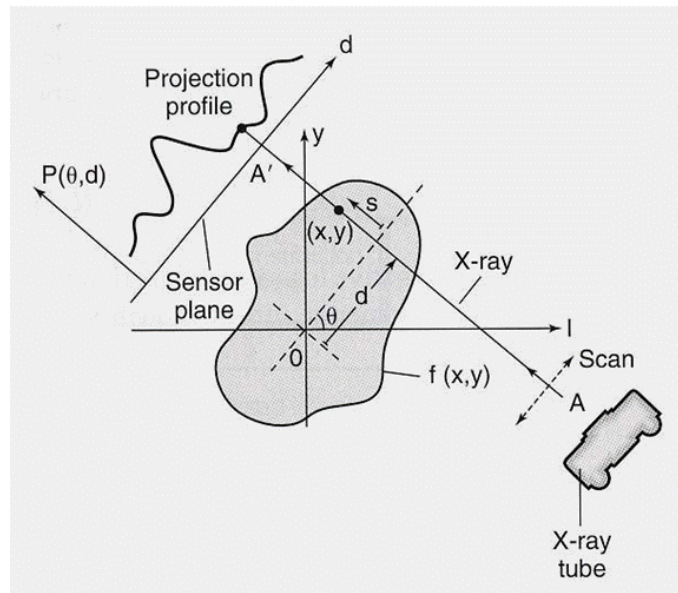
เมื่อ  $P$  คือ เรย์ซัมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเรย์โปรเจกชัน (Ray-projection) หมายถึง อินทิกรัลเชิงเส้นตามเส้นทางของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านเข้าไปในวัตถุ เรย์ซัมสะท้อนให้เห็นถึงการดูดกลืนเรย์ซัมของตัวกลางตามเส้นทางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านไป ถ้าเรย์ซัมมีค่ามากแสดงว่ามีการดูดกลืนรังสีเอกซ์มาก และในทางกลับกันถ้าเรย์ซัมมีค่าน้อยแสดงว่ามีการดูดกลืนรังสีเอกซ์น้อย เรย์ซัมเป็นค่าที่สามารถวัดได้ในขั้นตอนการสแกนเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย (Data Acquisition) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพแบบเรย์ซัม (Ray -Sum)<sup>[14]</sup>

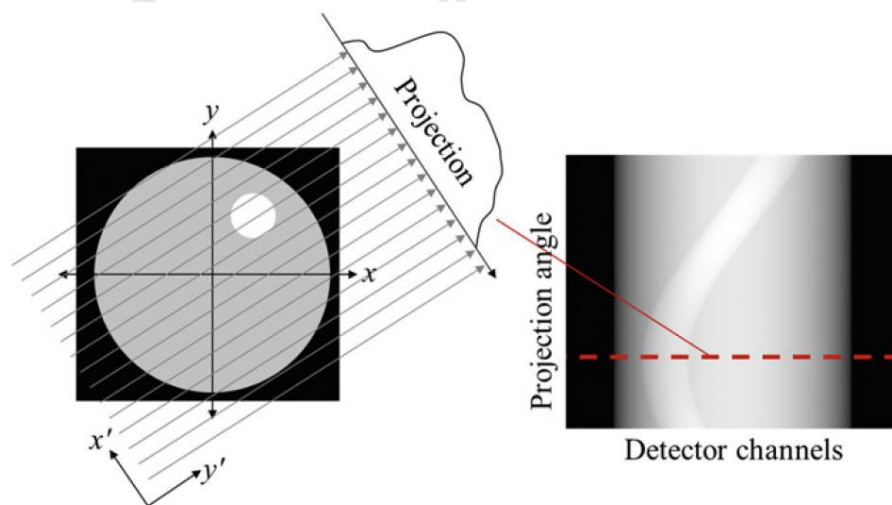
### 2.8.6 โปรไฟล์ (Profile)

เมื่อนำค่าเรย์ซัมที่ได้มาพิจารณาเทียบกับระยะทางที่ลอดเอกซเรย์และหัววัดเอกซเรย์เคลื่อนที่ ณ มุมของหลอดเอกซเรย์ตำแหน่งนั้น ๆ จะได้ความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเซต เมื่อนำเซตของเรย์ซัมมาเรียงกัน เรียกว่า โปรไฟล์หรือโปรเจกชันโปรไฟล์ (Projection profile)

รูปที่ 2.12 โปรไฟล์ (Profile)<sup>[13]</sup>

ภาพถ่ายที่ได้ในแต่ละมุมจะเรียกว่า โปรเจกชัน (Projection) ซึ่งจะเป็นภาพ 2 มิติ (Planar images) ในมุมต่างๆ ภาพถ่ายหรือข้อมูลที่ได้นำมาแสดงได้ 2 รูปแบบคือ

1. โปรเจกชัน เป็นการเก็บข้อมูลโดยที่ในแต่ละมุมจะแสดงภาพถ่ายเหมือนภาพ 2 มิติ ดังรูปที่ 2.12
2. ซิโนแกรม (Sinogram) หรือภาพแท่งความถี่ (Histogram) เป็นการนำเอาสภาพในแนวแกน X มาแสดงกับมุมต่างๆ ที่หัววัดรังสีหมุนไปแกน Y ดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.13 ภาพโปรเจกชัน และซิโนแกรม<sup>[12]</sup>

## 2.9 กระบวนการสร้างภาพ (Tomographic Reconstruction)<sup>[13]</sup>

แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method)
2. การสร้างภาพแบบฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน (Filtered back-projection Method)
3. การสร้างภาพแบบอิตเทอเรชัน (Iteration Method)

### 2.9.1 การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method)<sup>[5]</sup>

การคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีมีหลายวิธี ขั้นตอนวิธีการคำนวณสร้างภาพอันดับแรกที่จะกล่าวถึงเรียกว่า การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด มีความยุ่งยากทางคณิตศาสตร์น้อย

การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชันเป็นการแสวงหาข้อมูลจะประกอบด้วยการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่และการเคลื่อนที่แบบหมุน แสดงให้เห็นว่ามี การเก็บข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์ใน 2 ทิศทาง หรือเก็บข้อมูลที่เป็นโปรไฟล์ (Profile) ได้ 2 โปรไฟล์ คือ โปรไฟล์ 1 และ โปรไฟล์ 2 ข้อมูลนี้ได้จากการยิงรังสีเอกซ์ทะลุผ่านชิ้นวัตถุบางๆ (Slice) และสมมติว่าวงกลมเล็กสี่เหลี่ยมเป็นบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\mu$ ) สูง ดังนั้นในแต่ละโปรไฟล์ที่ได้ตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับวงกลมเล็กสี่เหลี่ยมจะมีค่าเรย์ซัมสูงและมีค่าเป็นบวก

การที่รังสีเอกซ์ลำแคบเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงไปในระนาบของตัวกลางใดๆ 1 ครั้งจะได้ 1 โปรไฟล์ ซึ่งประกอบด้วยเรย์ซัม หรือ  $P(r, \theta)$  จำนวนหนึ่ง ถ้าบิดแนวรังสีเอกซ์ไปจากแนวเดิมทีละ 1 องศา จบครบ 180 องศา โดยที่แต่ละองศาให้รังสีเอกซ์ลำแคบเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงผลลัพธ์จะได้ 180 โปรไฟล์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับนำไปสร้างภาพ

การคำนวณสร้างภาพตามวิธีการนี้ไม่ได้คำนวณการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดทอนในระนาบที่สนใจ แต่เป็นการคำนวณการจำแนกของ  $\mu$  แทนโดยที่

$$\mu(X, Y) = \sum_{j=1}^m p(r_j, \theta_j) \Delta \theta \quad (2.17)$$

เมื่อ

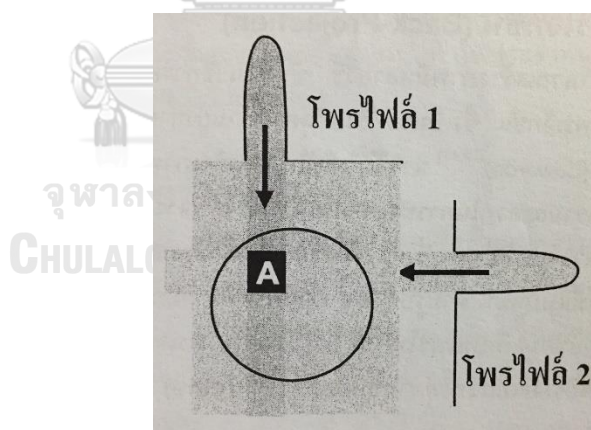
$$r_j = x \cos \theta_j + y \sin \theta_j$$

จากสมการ 2.17  $m$  คือ จำนวนโปรไฟล์ทั้งหมด  $\theta_j$  คือมุมของโปรไฟล์ที่  $j$ ,  $\Delta \theta$  เรียกว่า ระยะห่างเชิงมุม (angular distance) ระหว่างโปรไฟล์ที่ค่าเท่ากับ  $\frac{\pi}{m}$  ส่วน  $\mu(X, Y)$

ไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวกลางจริงๆ แต่การพิจารณาการจำแนกของมันบนระนาบ  $x,y$  ที่เกิดขึ้นจะสามารถจำลองภาพขึ้นได้เหมือนจริงมาก

เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้น สมมติว่าการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครึ่งแรกมุม  $\theta = 0^\circ$  จะได้โปรไฟล์ 1 ชุด หรือได้  $P(r,90^\circ)$  เมื่อโปรไฟล์ทั้งสองมาซ้อนทับกันอย่างเหมาะสม จะเห็นว่าตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุ  $P(r,0^\circ)$  และ  $P(r,90^\circ)$  ที่มีค่าสูงมาก จะรวมกันหรือเสริมกันทำให้เห็นเด่นเป็นภาพของวัตถุขึ้น แนวความคิดแบบนี้จึงเกิดเป็นสมการ 2.17 ซึ่งนำเอา  $P(r,\theta)$  ที่มี  $r$  และ  $\theta$  ที่เหมาะสมมารวมกันตรงตำแหน่ง  $(X,Y)$  ใดๆ ในระนาบ  $XY$  ที่จะสร้างภาพ

การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชันไม่ใช่วิธีการที่ดีในการนำข้อมูลที่หัววัดรังสีเอกซ์บันทึกไว้มาสร้างภาพ เพราะแต่ละเรย์ซึ่มไม่ได้นำไปรวมกันเฉพาะตรงจุดที่มีความหนาแน่นสูงเท่านั้น แต่จะนำมารวมกันบนทุกๆ จุดตามเส้นทางของลำรังสีเอกซ์ เหตุนี้เองทำให้ภาพที่สร้างขึ้นไม่คมชัดเท่าที่ควร โดยตรงขอบภาพจะเห็นแฉกรูปดาว เรียกว่า Star artifact จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่า จุดที่อยู่นอกภาพวัตถุจะมีความหนาแน่นสูงซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากโปรไฟล์ A อย่างไรก็ตามแม้วิธีนี้จะมีข้อบกพร่องอยู่บ้างแต่ก็เป็นพื้นฐานของวิธีการสร้างภาพแบบที่ต้องการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงเข้าช่วย

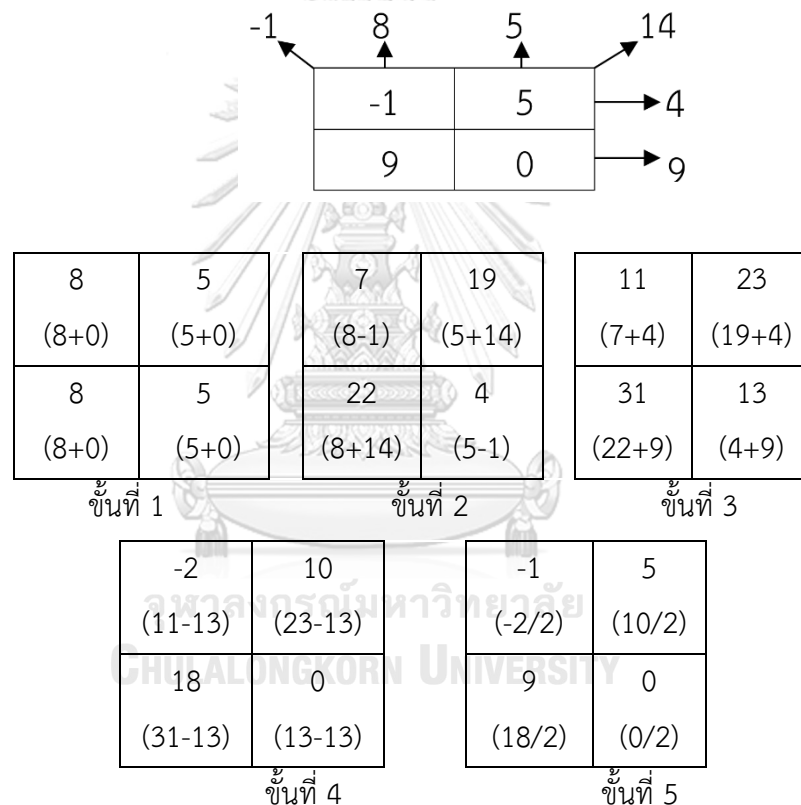


รูปที่ 2.14 วิธีการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method)<sup>[13]</sup>

ในการคำนวณสร้างภาพตามวิธีการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน สามารถแสดงให้เห็นหลักการตามรูปที่ 2.14 กล่าวคือ ค่าเรย์ซึ่มจากโปรไฟล์ 1 และโปรไฟล์ 2 จะถูกนำมา รวมกันบนระนาบของภาพที่เตรียมไว้ บริเวณที่สอดคล้องกับวงกลมเล็กสีเข้มจะได้ค่าผลรวม

เรย์ซึ่มสูงมาก ในทางตรงข้ามบริเวณที่อยู่นอกวงกลมเล็กสีเข้ม จะได้ค่าของผลรวมของเรย์ซึ่มต่ำ ซึ่งเมื่อมองภาพโดยรวมจะเห็นความสอดคล้องกันระหว่างภาพที่สร้างกับวัตถุ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น สามารถพิจารณาการคำนวณสร้างภาพแบ็กโพรเจกชันได้ตามรูป 2.15 โดยสมมติว่า มีวัตถุเป็นชิ้นบางๆ ประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ จำนวน 4 เซลล์ ภายในแต่ละเซลล์มีค่า  $-1, 5, 9$  และ  $0$  ตามลำดับ สมมติว่าค่าเหล่านี้แปรผันโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของวัตถุ เมื่อสแกนในทิศทางต่างๆ จะได้ข้อมูลเรย์ซึ่มเท่ากับ  $-1, 8, 5, 14, 4$  และ  $9$  ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลเรย์ซึ่มเหล่านี้สามารถวัดได้ แต่ค่าภายในแต่ละเซลล์ไม่สามารถวัดได้ต้องใช้วิธีการคำนวณ



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการคำนวณสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method)<sup>[13]</sup>

จากรูปที่ 2.15 แบ่งการคำนวณออกเป็น 5 ชั้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ชั้นที่ 1 กำหนดให้ระนาบของภาพที่ต้องการสร้างประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ 4 เซลล์ เท่ากับวัตถุ กำหนดให้แต่ละเซลล์มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 จากนั้นนำค่าเรย์ซึ่มที่วัดได้ในแนวตั้งรวมเข้าไปในแต่ละเซลล์ให้สอดคล้องตามแนวตั้ง

ขั้นที่ 2 นำค่าเรย์ซิมที่วัดได้ในแนวทแยงมุมทั้ง 2 แนว ไปรวมกับค่าที่ได้ในแต่ละเซลล์จากขั้นที่ 1 โดยให้สอดคล้องตามแนวทแยงมุมด้วย

ขั้นที่ 3 นำค่าเรย์ซิมที่วัดได้ในแนวราบทั้งหมด ไปรวมกับค่าที่ได้ในแต่ละเซลล์จากขั้นที่ 2 โดยให้สอดคล้องตามแนวราบของแต่ละแถว

ขั้นที่ 4 ค่าที่ได้ในแต่ละเซลล์จากขั้นที่ 3 นำมาลบด้วย  $k$  มีค่าเป็นตามสมการ

$$k = \frac{\sum p}{n} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\sum p$  คือ ผลรวมของค่าเรย์ซิมที่วัดได้ทั้งหมดทุกทิศทาง (ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ  $1+8+5+14+4+9 = 39$ )  $n$  คือ จำนวนทิศทางที่มีการสแกนเก็บข้อมูลเรย์ซิมหรือหมายถึงจำนวนโปรไฟล์ทั้งหมด (ซึ่งกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 3 โปรไฟล์) ดังนั้น  $K$  จึงมีค่าเท่ากับสมการ 2.18

ขั้นที่ 5 ค่าที่ได้ในแต่ละเซลล์จากขั้นที่ 4 จะถูกหารด้วยตัวเลขที่ทำให้ค่าในแต่ละเซลล์ลดลงอย่างเหมาะสมซึ่งในที่นี้นำไปหารด้วย 2

หลังจากการคำนวณในขั้นตอนที่ 5 เสร็จแล้ว จะได้ค่าภายในแต่ละเซลล์สอดคล้องหรือตรงกับวัตถุ หมายความว่าเมื่อแปลงเป็นภาพจะได้ภาพที่เหมือนวัตถุนั่นเอง ที่กล่าวมานี้คือ ขั้นตอนวิธีของการคำนวณสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน อย่างไรก็ตามการคำนวณการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน มีข้อเสีย คือ Star artifact กล่าวคือ เนื่องจากการคำนวณการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน ได้นำค่าเรย์ซิมที่วัดได้ย้อนกลับมารวมกันตามเส้นทางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านไปวัตถุ ดังนั้นตำแหน่งที่อยู่นอกบริเวณที่มีความหนาแน่นสูง ก็จะปรากฏให้เห็นบนภาพว่ามีความหนาแน่นสูงไปด้วย ตามรูปที่ 2.14 บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ คือ ตำแหน่งที่อยู่นอกบริเวณจุด A จะปรากฏว่ามีความหนาแน่นสูงด้วย เหตุนี้ทำให้ขอบภาพของวัตถุไม่คมชัดมีลักษณะแฉกดาวกระจายออกไป

## 2.9.2 การสร้างภาพแบบฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน (Filtered Back-projection)

เป็นการสร้างภาพคล้ายการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method) แต่จะทำการกรองข้อมูลโปรไฟล์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อนทำการแบ็กโพรเจกชัน ทำให้สามารถแก้ปัญหาของการเกิด star artifact ในจากการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชันได้



เมื่อเก็บข้อมูลแล้วข้อมูลจะถูกกรองเชิงคณิตศาสตร์ทำให้ข้อมูลโปรไฟล์มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ถ้าเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ถูกรองและไม่ถูกรองเชิงคณิตศาสตร์แล้ว จะเห็นข้อแตกต่างคือ ข้อมูลที่ถูกรองเชิงคณิตศาสตร์จะมีทั้งข้อมูลที่เป็นทั้งค่าบวกและค่าลบ ส่วนข้อมูลที่ไม่ถูกรองเชิงคณิตศาสตร์จะมีเฉพาะค่าที่เป็นบวกเท่านั้น ซึ่งการกรองเชิงคณิตศาสตร์มีหลายวิธี เช่น การกรองแบบฟูเรียร์ (Fourier filtering) การกรองแบบราดอน (Radon filtering) การกรองแบบคอนโวลูชัน (convolution filtering) หรือคอร์เนล (Kernel) เป็นต้น หลังจากการกรองเชิงคณิตศาสตร์แล้ว การสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน จะเกิดขึ้นโดยการนำเรย์ซิมที่เหมาะสมมารวมกันตรงตำแหน่งที่ต้องการคำนวณแต่ครั้งนี้ออบของวัตถุจะมีความคมชัดมากขึ้น

การสร้างภาพโทโมกราฟีส่วนมากนิยมใช้การกรองแบบคอนโวลูชัน ซึ่งการกรองแบบคอนโวลูชันมีให้เลือกถึง 20 แบบ เช่น การกรองแบบ high-frequency convolution จะกรองสัญญาณที่มีความถี่สูง มีผลทำให้ได้ภาพที่มีความนุ่มนวล และมีคอนทราสต์ที่ดีขึ้น ส่วนการกรองแบบ low-frequency convolution จะกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ทำให้ภาพของวัตถุแสดงขอบของวัตถุคมชัดขึ้น

ในงานวิจัยเรื่องนี้จะเลือกวิธีแบบฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน ซึ่งเป็นวิธีการสร้างภาพโทโมกราฟีวิธีหนึ่งที่ใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นพื้นฐาน พิจารณาฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติ  $F(x,y)$  ของฟังก์ชัน  $f(x,y)$

กำหนดว่า  $P(\theta, x) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$  ซึ่งมุม  $\theta$  เป็นมุมที่หมุนวัตถุ และเรียกว่า “ข้อมูลโปรไฟล์ (profile data or projection data)” ดังนั้น

$$P(\theta, x) = \int f(x,y) ds \quad (2.19)$$

เมื่อประยุกต์การแปลงฟูเรียร์สองมิติ (two-dimensional Fourier transform) จะได้

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-i(Xx+Yy)} dx dy \quad (2.20)$$

เขียนฟังก์ชัน  $F(X, Y)$  ให้อยู่ในพิกัด  $(r, s)$  โดยแกน  $r$  ทำมุม  $\theta$  กับแกน  $x$  จะได้ฟังก์ชันของการแปลงฟูเรียร์เป็น

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i(X(r \cos \theta - s \sin \theta) + Y(r \sin \theta + s \cos \theta))} dr ds \quad (2.21)$$

เมื่อ  $R$  และ  $S$  คือ  $X \cos \theta + Y \sin \theta$  และ  $Y \cos \theta - X \sin \theta$  ตามลำดับ และแปลงฟูรีเยร์แบบผกผันจะได้ฟังก์ชัน  $f(x,y)$  เป็นดังสมการด้านล่าง

$$f(X, Y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(R, \theta) e^{iR(X \cos \theta + Y \sin \theta)} dr d\theta \quad (2.22)$$

ฟังก์ชัน  $F(R, \theta)$  ก็คือ  $F_\theta(R, S)|_{s=0}$  หรือ  $P(\theta, R)$

$$f(X, Y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta, R) e^{iRr} |R| dR d\theta \quad (2.23)$$

แทนค่า  $|R|$  ด้วย  $H(R)$ , โดย  $h(r)$  เป็นการแปลงฟูรีเยร์แบบผกผันของ  $H(R)$

$$f(X, Y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta, R) \otimes h(r - r') dr' d\theta \quad (2.24)$$

เมื่อ  $h(r-r')$  คือ ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน (filter function) ในที่นี้เลือกใช้ “Shepp and Logan filter function” วิธีการคำนวณแบบนี้เรียกว่า คอนโวลูชันฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน (convolution filter backprojection)

สำหรับการกรองข้อมูลโปรไฟล์ด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันนั้น เป็นการนำข้อมูลโปรไฟล์ในแต่ละโปรไฟล์มาปรับด้วยการคำนวณจากสมการของ Shepp and Logan ดังนี้ โดย

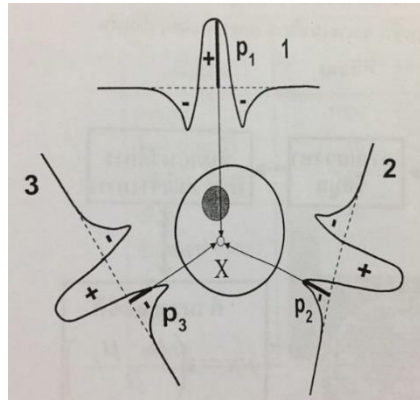
กำหนดให้  $k = r - r'$

$$h(k) = \frac{2}{\pi^2 a(1-4k^2)} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$a$	=	ระยะห่างระหว่าง Ray-sum
$k$	=	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots, \pm \frac{N}{2}$
$N$	=	จำนวนเรย์ในหนึ่งโปรไฟล์ (Profile)

ดังนั้นเมื่อปรับข้อมูลโปรไฟล์  $P(\theta, x)$  โดยการคูณด้วยสมการ 2.25 แล้วจึงนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยวิธีแบบแบ็กโพรเจกชันต่อไป

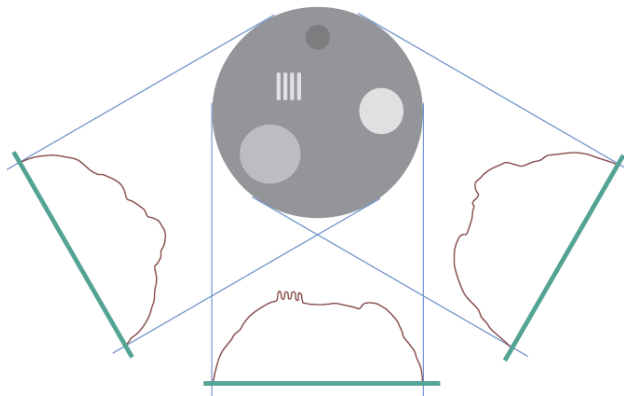


รูปที่ 2.16 โพรไฟล์ (Profile) 1 มีส่วนทำให้เซลล์ที่อยู่นอกวัตถุที่ตำแหน่ง X แสดงค่าสูง แต่โพรไฟล์ (Profile) 2 และ 3 จะมีส่วนในการทำให้ค่าลดลง<sup>[13]</sup>

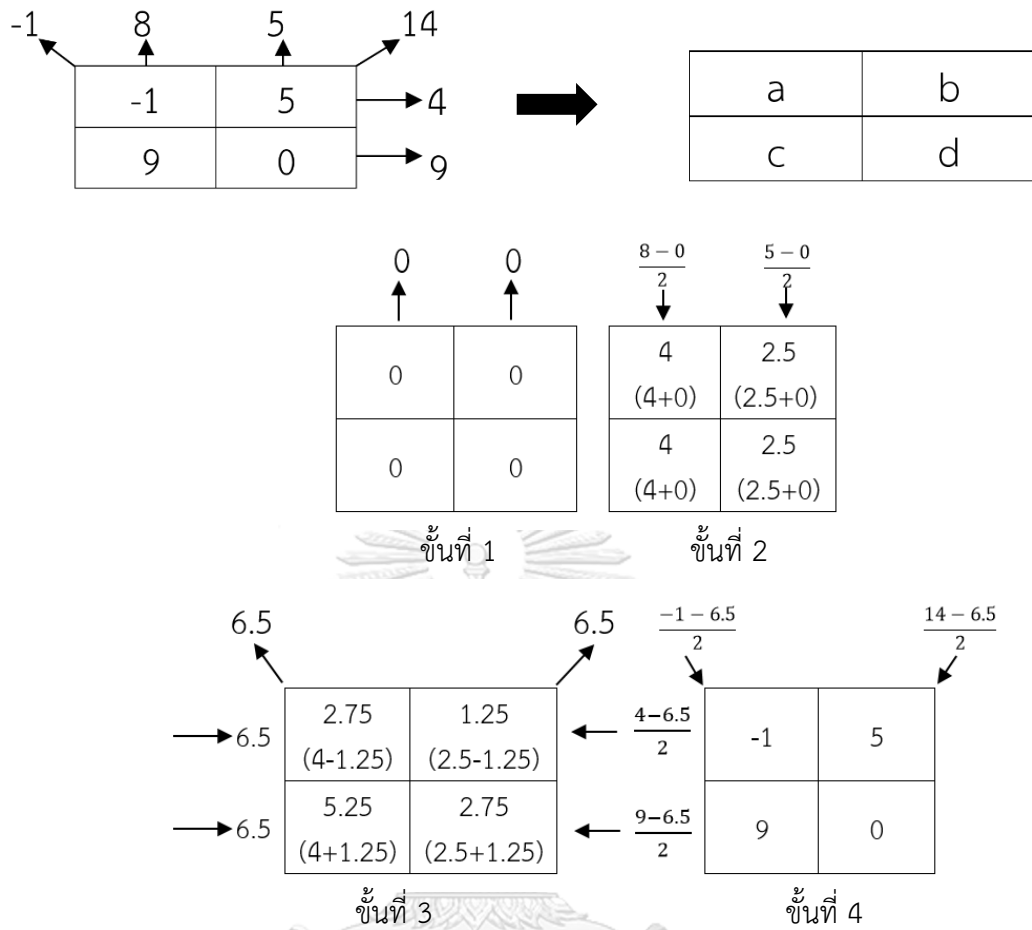
จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าในการคำนวณค่าความหนาแน่นตรงตำแหน่ง X ซึ่งอยู่นอกวัตถุ และเป็นตำแหน่งที่ไม่ควรจะมีค่าความหนาแน่นเลย การคำนวณค่าจะนำค่าเรย์ซิม  $p_1$ ,  $p_2$  และ  $p_3$  มารวมกัน เนื่องจาก  $p_1$  มีค่าเป็นบวก แต่  $p_2$  และ  $p_3$  มีค่าเป็นลบ ดังนั้นเมื่อรวมกันแล้วจึงทำให้ค่าความหนาแน่นของตำแหน่ง X ต่ำมาก จึงทำให้ภาพขอบของวัตถุมีความคมชัดขึ้น ไม่เกิด Star Artifact เหมือนการคำนวณการสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน

### 2.8.3 การสร้างภาพแบบอิตเทอเรชัน (Iteration Method)<sup>[13]</sup>

เป็นการสร้างภาพที่คำนวณปริมาณรังสีที่มีความใกล้เคียงมากที่สุดโดยอาศัยสมการที่ซับซ้อนทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลต่ำ ได้ภาพที่มีความเหมือนจริงมากที่สุด แต่ใช้เวลานานจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณการสร้างภาพของซีที



รูปที่ 2.17 การประมวลผลภาพแบบ Iteration<sup>[10]</sup>



รูปที่ 2.18 การคำนวณสร้างภาพแบบอิตเทอเรชัน (Iteration Method)<sup>[13]</sup>

สมมติว่ามีวัตถุที่เป็นชิ้นบางๆ ประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ จำนวน 4 เซลล์ ภายในแต่ละเซลล์มีค่า  $-1, 5, 9$  และ  $0$  ตามลำดับเหมือนกับที่ได้กำหนดมาแล้วในการคำนวณสร้างภาพแบบแบ็กโพรเจกชัน เมื่อสแกนในทิศทางต่างๆ จะได้ข้อมูลเรย์ซัมเท่ากับ  $-1, 8, 5, 14, 4$  และ  $9$  ตามลำดับ เทคนิคของอิตเทอเรชัน (Iteration Method) มีกระบวนการดังรูปที่ 2.18 ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดให้มีจำนวนเซลล์สอดคล้องกับวัตถุดังรูปที่ 2.18 และเริ่มต้นด้วยการสมมติให้แต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ  $a = 0, b = 0, c = 0, d = 0$  จากนั้นคำนวณค่าเรย์ซัมในแนวตั้งซึ่งจะได้  $0, 0$

ขั้นที่ 2 นำค่าเรย์ซัมที่วัดได้  $8, 5$  ไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ กรณีนี้จะได้  $+8, +5$  เครื่องหมายบวกแสดงว่าค่าที่วัดได้มากกว่าค่าที่คำนวณได้ แล้วหาค่าเฉลี่ยที่แตกต่าง

กัน นำค่าเฉลี่ยไปรวมกับค่าเดิมในคอลัมน์แรกและคอลัมน์สอง สุดท้ายคำนวณค่าเฉลี่ยในแถวราบจะได้ 6.5, 6.5 ตามลำดับ

ขั้นที่ 3 นำค่าเฉลี่ยที่วัดได้ในแถวราบ 4, 9 ไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ในแถวราบ 6.5, 6.5 แล้วหาค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน นำค่าเฉลี่ยไปรวมกับค่าเดิมในแถวแรกและแถวที่สอง สุดท้ายของขั้นตอนนี้คือคำนวณค่าเฉลี่ยในแนวทแยงมุมจะได้ 6.5, 6.5

ขั้นที่ 4 นำค่าเฉลี่ยที่วัดได้ในแนวทแยงมุม -1, 14 ไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ในแนวทแยงมุม 6.5, 6.5 แล้วหาค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน นำค่าเฉลี่ยไปรวมกับค่าเดิมในแนวทแยงมุม ซึ่งจะได้ค่าในแต่ละเซลล์ตรงกับค่าในแต่ละเซลล์ของวัตถุ

เมื่อการคำนวณทั้ง 4 ขั้นตอนเรียกว่า อิทเทอเรชัน (Iteration) ครั้งที่ 1 จบลงอย่างสมบูรณ์และจะเห็นว่าค่าในแต่ละเซลล์ตรงกับค่าในแต่ละเซลล์ของวัตถุการคำนวณจะหยุดแค่นี้

ปัจจุบันการคำนวณการสร้างภาพแบบอิตเทอเรชัน (Iteration Method) ไม่นิยมใช้ในกระบวนการสร้างภาพซีที เพราะใช้เวลาการคำนวณสร้างภาพนานมาก เนื่องจากการคำนวณการสร้างภาพจะเริ่มต้นเมื่อได้มีการสแกนเก็บข้อมูลครบถ้วนแล้ว

## 2.10 รูปภาพ (Image) และระบบสี (RGB)<sup>[15]</sup>

รูปภาพจะประกอบไปด้วยหน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่าเม็ดสีหรือจุดภาพ (Pixel) ซึ่งจะเป็นพื้นที่เล็กๆ จุดหนึ่งในภาพ โดยในแต่ละจุดนั้นจะมีเลขกำกับ ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะมาจากค่าของแม่สีสามสี สีแดง (R), สีเขียว (G) และสีฟ้า (B) ใช้บอกระดับความเข้มของแต่ละเฉดสี หากมีจุดหลายๆ จุดภาพมาต่อกันก็จะกลายเป็นภาพที่มีขนาดและความยาวเกิดขึ้น อย่างเช่น มีรูปภาพขนาด 320×240 นั้นหมายความว่าภาพนี้มีขนาดความกว้างของภาพคือ 320 พิกเซล และความยาวของภาพคือ 240 พิกเซล เป็นต้น

โดยรูปภาพที่พบเจอโดยทั่วไปมี 4 รูปแบบ คือ

- ภาพสีจริง (True color image) คือ ภาพที่เกิดจากการรวมกันของแม่สีสามสีนั้นคือ เวกเตอร์ที่แสดงค่าสีแดง (R) เขียว (G) และน้ำเงิน (B) ซึ่งมีจำนวนภาพที่เป็นได้ทั้งหมด 16,777,216 สี
- ภาพระดับสีเทา (Gray scale image) คือภาพที่มีสีอยู่ในระดับโทนสีเทา ถ้าเป็นภาพ 8 บิต จะมีจำนวนสีที่เป็นได้ทั้งหมด 256 สี ตั้งแต่สี ดำ (0) ถึงขาว (255)

- ภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) คือ ภาพที่ประกอบด้วยสีเฉพาะสีขาวและสีดำ ซึ่งค่าในแต่ละจุดภาพของภาพขาวดำจะมีได้เพียง 2 ค่า คือ สีดำ (0) และสีขาว (1 หรือ 255)
- ภาพแท่งความถี่ (Histogram) คือ กราฟที่แสดงจำนวนจุดภาพทั้งหมดในภาพที่ความเข้มต่างของภาพ โดยที่แกนนอนจะแสดงระดับความเข้มที่แบ่งระดับเป็น 256 ระดับ ซึ่งมีค่าตั้งแต่สี 0 ถึง 255 ซึ่งระดับสีเทาที่มีค่าต่ำ ก็หมายถึงความเข้มที่มีค่าสีน้อยจะมองเห็นเป็นสีดำ แต่ในทางกลับกันหากค่าระดับสีเทามาก หมายถึงมีความเข้มมากจะมองเห็นเป็นสีขาว และแกนตั้งของกราฟจะแสดงจำนวนจุดภาพที่มีค่าในแต่ละช่วงระดับความเข้ม



รูปที่ 2.19 ระดับเฉดสีเทา (Gray scale image) ทั้งหมด 256 ชั้น

## 2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี<sup>[13]</sup>

### 2.11.1 ปัจจัยที่เกิดจากข้อมูลที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน

ในการสร้างภาพโทโมกราฟี ถ้าไม่ได้ปรับปรุงข้อมูลด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันก่อนการคำนวณสร้างภาพแล้ว จะทำให้ภาพโทโมกราฟีที่เกิดความมัวมากขึ้น ซึ่งความมัวดังกล่าวจะอยู่ในรูปการกระจายตัวของค่าเลขซีที ถ้าการกระจายตัวสูงก็คือ ภาพจะมีความมัวมาก โดยอาจจะวัดได้จากค่าพิกเซลนอยส์ (Pixel noise) การใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชันก็เพื่อให้ลดความมัวของภาพโทโมกราฟีลง

### 2.11.2 ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ไม่เพียงพอ

การหมุนวัตถุตัวอย่างในการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟี ไม่ครบครึ่งรอบหรือ 180 องศา จะทำให้ข้อมูลขาดรายละเอียดที่เพียงพอ ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้ไม่สมบูรณ์ เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงต้องสแกนเก็บข้อมูลให้ได้อย่างน้อย 180 องศา

### 2.11.3 ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนเรย์ซั่มต่อภาพโทโมกราฟี

เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลทำให้ภาพโทโมกราฟีไม่คมชัดและขาดรายละเอียดดังนี้ จำนวนเรย์ซั่มที่ภาพน้อยเกินไป หรืออาจมีเหตุผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำรังสีที่เข้าสู่หัววัดโตเกินไป ทำให้เก็บรายละเอียดได้เพียงพอ ความคมชัดของภาพโทโมกราฟีจึงต่ำ เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงควรสร้างภาพโทโมกราฟีจากจำนวนเรย์ซั่มที่มากเพียงพอ

### 2.11.4 ปัจจัยที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนจุดหมุน

ความคลาดเคลื่อนจุดหมุน คือ การที่จุดกึ่งกลางของจุดหมุนตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ การที่จุดหมุนผิดตำแหน่งนั้นจะส่งผลให้การแบ็กโปรเจกชันเกิดการผิดพลาด ภาพโทโมกราฟีที่ได้จึงผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ยิ่งความคลาดเคลื่อนจุดหมุนของข้อมูลมีมากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้ก็จะมีส่วนโค้งเว้ามากขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีควรจัดวางจุดหมุนให้ตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ ก่อนนำข้อมูลโปรไฟล์ไปสร้างภาพ

## 2.12 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Computed Tomography Image Quality)<sup>[13]</sup>

จุดประสงค์ของการสร้างภาพโทโมกราฟี ก็เพื่อสร้างภาพตัดขวางที่สามารถแสดงองค์ประกอบภายในของวัตถุได้โดยไม่ทำลาย ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงหมายถึงภาพที่สามารถแสดงรายละเอียดภายในของวัตถุได้ถูกต้องและชัดเจน การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบ่งบอกถึงภาพโทโมกราฟีที่ดี ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีนี้มีอยู่หลายแบบ ดังนี้

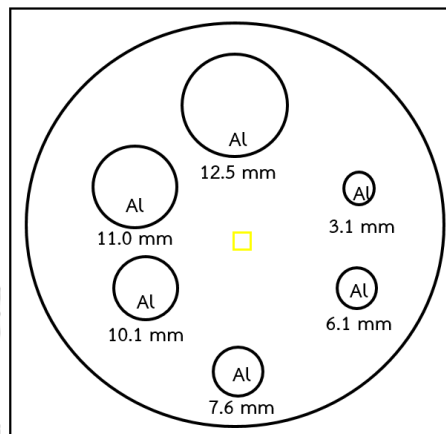
### 2.12.1 การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยพิกเซลนอยส์ (Pixel noise)

พิกเซลนอยส์ (Pixel noise) เป็นค่าความแปรปรวนอย่างอิสระของเลขซีทีเมื่อสแกนผ่านเนื้อเดียวกัน ซึ่งเกิดจากความแปรปรวนทางสถิติของจำนวนโฟตอนที่ถูกตรวจจับรังสีที่ได้รับ noise จึงเป็นปริมาณที่สะท้อนถึงส่วนของภาพซีทีที่มีคุณภาพของภาพไม่ดี ทำให้เกิดเม็ดภาพปรากฏบนภาพซีที ถ้าภาพที่ปรากฏเป็นจุด (spotty) เป็นหย่อมๆ (blotchy) แสดงว่ามีระดับนอยส์ (noise) สูงๆ ส่วนภาพที่มีระดับความดำความขาวสม่ำเสมอแสดงว่ามีระดับ noise ต่ำ เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างระบบที่ปราศจากสิ่งรบกวนเลย และสิ่งรบกวนก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้ที่คุณภาพลดลง การวัดค่าสิ่งรบกวนของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการหาสิ่งรบกวนในระบบสามารถคำนวณได้จากค่าความเบี่ยงเบน

มาตรฐานของเลขชี้ที่บริเวณหนึ่งของภาพโทโมกราฟีที่สารเนื้อเดียวกัน โดยแสดงอยู่ในรูปค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}{m-1}} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของเลขชี้ที่ ณ บริเวณที่เลือก  
 $X_i$  = ค่าเลขชี้ที่ต่างๆ ที่เลือก  
 $m$  = จำนวนข้อมูลที่เลือก  
 $\sigma$  = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเลขชี้ที่ หรือพิกเซลนอยส์ที่เลือก



รูปที่ 2.20 การหาค่าพิกเซลนอยส์ (Pixel noise) จากวัตถุตัวอย่าง

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าพิกเซลนอยส์ที่สามารถบอกถึงคุณสมบัติของระบบได้เมื่อ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเลขชี้ที่ค่ามากแสดงว่าภาพโทโมกราฟีขาดความคมชัด ในทางกลับกันถ้าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเลขชี้ที่มีค่าน้อย แสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดดี



## ปัจจัยที่มีผลต่อค่า noise

### 1. แรงดันไฟฟ้าของหลอด

ค่าแรงดันไฟฟ้าของหลอดมีผลต่อพลังงานเฉลี่ยของลำรังสีเอกซ์ โดยที่เพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า จะเป็นการเพิ่มพลังงานเฉลี่ยของลำรังสีเอกซ์ ทำให้ฟลักซ์โฟตอนของลำรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น จึงทำให้นอยส์ลดลง ช่วยทำให้คุณภาพของภาพซีทีเพิ่มขึ้น

### 2. กระแสหลอด

ค่ากระแสหลอดคือ อัตราการที่อิเล็กตรอนวิ่งไปชนเป้าเพื่อผลิตรังสีเอกซ์ ปกติอิเล็กตรอน 1 ตัว จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ 1 โฟตอน ดังนั้นค่ากระแสหลอดจึงแสดงถึงจำนวนโฟตอนของรังสีเอกซ์ การเพิ่มค่ากระแสหลอดจึงเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนของรังสีเอกซ์ หัววัดเอกซเรย์สามารถวัดเอกซเรย์ได้ดีขึ้นนอยส์จึงลดลงซึ่งช่วยให้คุณภาพของภาพซีทีดีขึ้น แต่การที่ค่ากระแสหลอดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นด้วย

### 3. เวลา

เวลาที่สแกนหรือความเร็วของการสแกนที่มีผลต่อปริมาณโฟตอนรังสีเอกซ์หรือค่ากระแสหลอด-เวลา (mA-s) นั่นคือถ้าใช้เวลาในการสแกนนาน จะได้ค่ากระแสหลอด-เวลามาก โฟตอนรังสีเอกซ์ที่มีปริมาณมากจะช่วยให้ นอยส์ลดลง ให้คุณภาพของภาพซีทีดีขึ้น

### 4. ขนาดของจุดโฟกัส

การใช้จุดโฟกัสขนาดเล็กจะได้ภาพซีทีที่มีความคมชัดคือให้ Resolution สูง เนื่องจากมีเงามัวน้อยกว่า แต่ไม่สามารถใช้ค่ากระแสหลอดสูงๆได้ เนื่องจากจะทำให้ความร้อนที่ขั้วบวกสูง ดังนั้นปริมาณโฟตอนรังสีเอกซ์เมื่อใช้ขนาดของจุดโฟกัสเล็กจึงมีจำนวนนอยส์น้อยกว่าเมื่อใช้จุดโฟกัสขนาดใหญ่

### 5. ขนาดของ Pixel

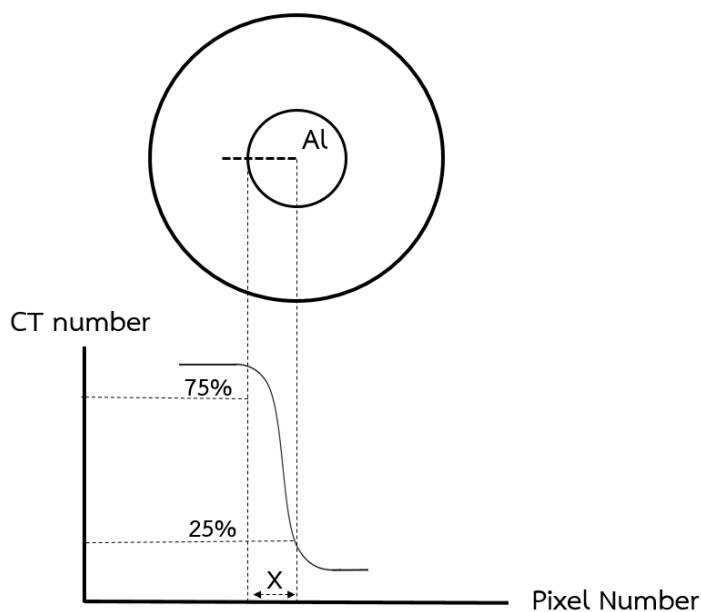
ถ้าพิกเซลขนาดเล็กมากๆ ภาพซีทีที่จะมีความละเอียดมาก เนื่องจากในภาพประกอบด้วยพิกเซลจำนวนมากจึงให้ Resolution ดี แต่การที่พิกเซลมีขนาดเล็กให้ปริมาณโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยของพิกเซลน้อย นอยส์ในพิกเซลที่มีขนาดเล็กจึงเกิดมาก แต่ในทางปฏิบัติงานไม่ควรใช้ขนาดของพิกเซล

ใหญ่จนเกินไป เนื่องจากตัวกลางไม่ได้เป็นสารประกอบเนื้อเดียว ทำให้ค่าเลขชี้กำลังของบางส่วนคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง

### 2.12.2 การทดสอบเพื่อหาความคมชัดของภาพโทโมกราฟี

ภาพซีทีที่เป็นภาพที่แสดงรายละเอียดของภาพตัดขวาง เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขชี้กำลังและระยะทาง จะแสดงความมัวหรือไม่คมชัดบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลาง เนื่องจากค่าเลขชี้กำลังมีการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อย การวัดความมัวบนภาพเนื่องจากตัวกลางมีความหนาแน่นแตกต่างกันมากคือ การวัด Spatial resolution หมายถึง การวัดความสามารถในการแยกรายละเอียดที่เล็กที่สุดบนภาพ เมื่อ Contrast ระหว่างตัวกลางและบริเวณรอบมีความแตกต่างกันมากหรือเท่ากับ 10% การวัด Spatial resolution นั้นมีหลายวิธี เช่น point spread function, line spread function และ edge spread function แต่ในงานวิจัยเรื่องนี้จะใช้วิธี edge spread function ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายที่สุดในหา resolution

การหา Spatial resolution สามารถทำได้โดยการอ่านค่าโปรไฟล์ของค่าเลขชี้กำลังจากภาพโทโมกราฟี ณ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานกับอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานตัวอย่างคือ แท่งอลูมิเนียมโดยใช้วิธี edge Spread function ในการตรวจสอบ ซึ่งอธิบายด้วยกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขชี้กำลังกับค่าเลขพิกเซลของภาพโทโมกราฟีพบว่าที่เป็นบริเวณอากาศ และบริเวณค่าเลขชี้กำลังของชิ้นงานตัวอย่างบริเวณรอยต่อนั้น การตรวจสอบค่าความคมชัดของภาพโทโมกราฟี สามารถทำได้โดยการกำหนดความกว้างของเลขพิกเซลระหว่างค่าเลขชี้กำลังจาก 25% และ 75% ของค่าเลขชี้กำลังสูงสุด อ่านค่าความคมชัดในแนวแกนเลขพิกเซล



รูปที่ 2.21 การหา Spatial resolution แบบ edge spread function

จากรูป 2.21 เมื่อเราหาค่า X คือ จำนวนเลขพิกเซล (Pixel number) ในช่วง 25% - 75% นำค่าที่ได้ไปคูณกับขนาดของพิกเซล (Pixel size) จะได้ค่า resolution ขนาดเล็กที่สุดที่สามารถเห็นได้ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้น

### ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Spatial resolution

1. ขนาดระยะห่างระหว่างหัววัดเอกซเรย์กับวัตถุ

เนื่องจากมีผลต่อความละเอียดของการเก็บข้อมูล การลดขนาดหรือระยะห่างของหัววัดเอกซเรย์ลง จึงช่วยเพิ่ม resolution ของภาพตัดขวางได้

2. จำนวนของข้อมูลที่เก็บรวบรวมในแต่ละครั้ง

จำนวนข้อมูลที่เก็บรวบรวมในมุมหนึ่งๆ มีผลต่อ resolution ในแนวกลางภาพถึงขอบภาพ เมื่อจำนวนข้อมูลที่เก็บรวบรวมในแต่ละครั้งปริมาณมากจะช่วยเพิ่ม resolution

3. จำนวนมุมของการเก็บรวบรวมข้อมูล

มีผลต่อคุณภาพของภาพตัดขวาง กล่าวคือ ถ้ามุมของการเก็บรวบรวมข้อมูลให้ครบรอบจำนวนมากๆ เมื่อนำมาคำนวณการสร้างภาพ เช่น

360° ย่อมดีกว่าการสแกนข้อมูลบางส่วน (partial scan) ซึ่งมีจำนวนมุมของการเก็บรวบรวมข้อมูลน้อยกว่า

#### 4. ขั้นตอนวิธีการคำนวณการสร้างภาพ

ขั้นตอนวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณการสร้างภาพมีหลายวิธี การนำมาใช้จึงต้องพิจารณาที่ความเร็วและความถูกต้อง นอกจากนี้ตัวกรองที่ใช้เพิ่มขึ้นมาอีกในขบวนการคำนวณการสร้างภาพ จะมีผลต่อการเพิ่มลด resolution ได้

#### 5. ขั้นตอนวิธีการกรองในการสร้างภาพ

ขั้นตอนวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การคำนวณการกรองรังสีในขบวนการสร้างภาพ หรือการกรองแบบ convolution มีผลต่อ spatial resolution ของภาพตัดขวางที่สร้างขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดหรือกำจัดความมัวบนภาพที่เกิดขึ้นในขบวนการสร้างภาพ ระดับความมัวของภาพที่หลงเหลือ จะถูกควบคุมโดย frequency spatial ในข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์ การใช้ high spatial resolution จะช่วยให้เห็นขอบเขตชัดเจนขึ้น ความมัวลดลง ภาพจึงคมชัดขึ้น แต่จะทำให้เพิ่ม noise มากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้การกรองแบบ convolution ในทางปฏิบัติจะต้องตัดสินใจโดยพิจารณาที่ความคมชัด , นอยส์ (noise) และ resolution บนภาพที่ต้องการ

### 2.12.3 การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีแบบ Probability Distribution Function (PDF)

Probability Distribution Function (PDF) เป็นกราฟแสดงการแจกแจงความถี่ของเลขชี้ที่ กราฟ PDF ในทางทฤษฎีเห็นได้ว่าคุณสมบัติของเลขชี้ที่มีเพียง 2 ค่า ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่เลขชี้ที่ของวัตถุ (feature ;  $\mu_{\text{feature}}$ ) และ background ( $\mu_{\text{background}}$ ) ข้อมูลทั้งสองสามารถนำมาคำนวณค่าความเปรียบต่าง (contrast ;  $\Delta\mu$ ) ได้ดังสมการ 2.27

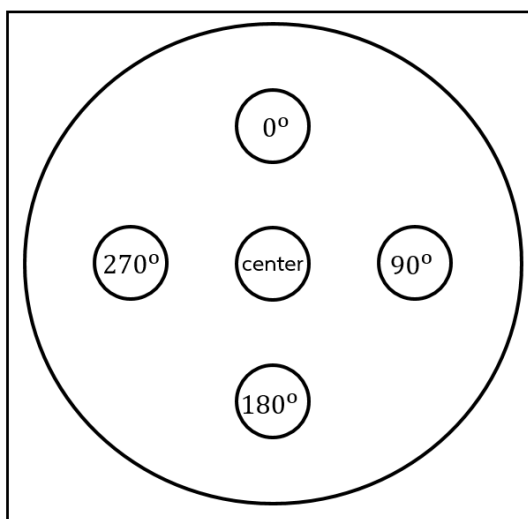
$$\Delta\mu = \mu_{\text{feature}} - \mu_{\text{background}} \quad (2.27)$$

ในทางปฏิบัติกราฟ PDF ไม่ได้เหมือนทฤษฎี เนื่องจากกระบวนการต่างๆ ในการสร้างภาพโทโมกราฟี ทำให้เกิดความมัวของภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้นด้วยปัจจัยต่างๆ ทำให้

ภาพโทโมกราฟีและกราฟ PDF จึงเป็นการแจกแจงความถี่ของค่าเลขซีที ที่กระจายอยู่ในภาพซีที ซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบกราฟ แทนการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การลดลงที่บอกรูปร่างของวัตถุ ในทางปฏิบัติภาพซีทีที่ได้จะเกิดความมัวบริเวณรอยต่อ ทำให้เกิดค่าเลขซีทีหลายค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเลขซีทีของวัตถุ

#### 2.12.4 ความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity)

ความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity) หมายถึง ความสามารถของเครื่องซีที ในการการแสดงค่าเลขซีทีของตัวกลางที่เท่ากันตลอด โดยไม่คำนึงถึงตำแหน่งสำหรับทางอุดมคติแล้วเมื่อสแกนตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกันตลอด เช่น น้ำ เลขซีทีของน้ำควรมีค่าเท่ากับ 0 ทุกๆ ตำแหน่ง สำหรับในทางปฏิบัติพบว่าเลขซีทีของน้ำ ที่อ่านได้มีค่าไม่เป็น 0 ตลอดไป แต่จะได้ค่าที่มีการกระจายตัวอย่างอิสระ โดยเป็นช่วงของค่าที่มากกว่า น้อยกว่า หรือเท่ากับศูนย์ ที่เป็นดังนี้เนื่องจากลำรังสีเอกซ์ที่ใช้มีพลังงานหลายค่า การกรองรังสีจึงไม่เท่ากัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ลำรังสีมีพลังงานสูงขึ้น หรืออิทธิพลความกระด้างของลำรังสีเอกซ์ (beam hardening effect) เลขซีทีที่ได้จากการสแกนแฟนทอม (Phantom) ของน้ำ จึงมีค่าไม่เป็น 0 ในทุกๆ ตำแหน่ง หรือกล่าวได้ว่าเลขซีทีมีค่าไม่สม่ำเสมอ หรือถ้าบริเวณกึ่งกลางแฟนทอมเกิดการดูดกลืนจำนวนโฟตอนรังสีเอกซ์มากกว่าบริเวณรอบๆ ทำให้ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางมีค่ามากกว่าบริเวณรอบๆ เรียกว่า แคปปิง (Capping) บริเวณกึ่งกลางภาพจึงขาวกว่าบริเวณรอบนอก ข้อเสียของการใช้ลำรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานหลายค่าในซีที คือ ทำให้เกิดสิ่งแปลกปลอมหรือ Artifact ปรากฏบนภาพ หรือทำให้เลขซีทีคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง จากสาเหตุดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาความสม่ำเสมอของเลขซีทีได้โดยการคำนวณการกรองรังสีในขั้นตอนการสร้างภาพ หรือใช้ตัวกรองรังสีเอกซ์ช่วยทำให้การกระจายของรังสีเอกซ์มีความสม่ำเสมอขึ้น อ่านค่าเลขซีทีวัดที่จุดกึ่งกลาง 1 ตำแหน่ง และบริเวณรอบนอกอีก 4 ตำแหน่งที่  $0^\circ$   $90^\circ$   $180^\circ$   $270^\circ$  ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 2.22 ถ้าเลขซีทีบริเวณใดๆ มีค่าแตกต่างจากค่าเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่งดังกล่าวไม่เกิน 3 แสดงว่าเลขซีทีมีค่าสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.22 การหา Spatial Uniformity

#### 2.12.5 เรโซลูชันชนิดคอนทราสต์ต่ำ (Low contrast resolution)

ความหมายของ contrast ในการถ่ายภาพเอกซเรย์ทั่วไป จะรวมถึง subject contrast และ film contrast ซึ่ง subject contrast หมายถึง ความแตกต่างของความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านตัวกลางหนึ่ง และ film contrast หมายถึง ความแตกต่างของความดำระหว่างสองบริเวณบนภาพ contrast ทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่คำนึงขนาดและรูปร่างของตัวกลางสำหรับในซีที ภาพที่ปรากฏบนจอแสดงภาพมีการจัด window เพื่อขยายช่วงของการแสดงรายละเอียดและ contrast บนภาพ ทำให้ภาพซีทีที่สามารถแสดงรายละเอียดและความแตกต่างของอวัยวะที่มี Low contrast ได้ดีกว่าภาพเอกซเรย์ทั่วไป ความแตกต่างของความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ หรือการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวกลางชนิดต่างๆ จะแสดงด้วยค่าเลขซีที ดังนั้น subject contrast ของภาพในซีทีจึงอธิบายในเทอมของความแตกต่างระหว่างเลขซีทีของตัวกลาง

$$\text{Contrast} = CT_1 - CT_2 \quad (2.28)$$

$$\% \text{Contrast} = \frac{CT_1 - CT_2}{K} \times 100 \quad (2.29)$$

เมื่อ  $CT_1$  หมายถึง ค่าเลขซีทีของวัตถุหรือตัวกลางที่เราสนใจ  
 $CT_2$  หมายถึง ค่าเลขซีทีของบริเวณรอบนอกวัตถุ (background)

K คือ ค่าคงตัวเรียกว่า factor scale มีเท่ากับ 1000 ค่า factor scale อ้างอิงจากนิยามของเลขซีทีใช้เพื่อให้ค่าเลขซีทีของสารตัวกลางทุกชนิดแสดงว่าได้ตามมาตรฐาน เช่น เลขซีทีของอากาศ น้ำ และกระดูก ต้องมีค่าเท่ากับ -1000 , 0 และ 1000 ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น สารตัวกลางสองชนิดที่มีค่าเลขซีทีต่างกันเท่ากับ 1 หมายความว่า เปอร์เซ็นต์ Contrast ของตัวกลางทั้งสองมีค่าต่างกันเท่ากับ 0.1 เป็นต้น

การวัด contrast resolution ทำให้ได้สแกนแฟนทอม (Phantom) ที่มีลักษณะเป็นช่องแบบทดสอบ resolution ซึ่งทำให้ Low contrast มักทำด้วยแผ่น Polystyrene หนาเจาะเป็นรูช่องกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดหลั่นกันเป็นลำดับเรียงเป็นแถว ลักษณะการจัดเรียงของช่องแบบทดสอบอาจมีรูปแบบแตกต่างกันไปบ้างขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละบริษัท ภายในช่องกลมที่เจาะรูบรรจุของเหลวเป็นสารบริสุทธิ์ เช่น น้ำ หรือสารละลาย เช่น น้ำผสมแอลกอฮอล์ หรือน้ำผสมสารละลาย Sucrose เพื่อให้คุณสมบัติการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวกลางทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเปอร์เซ็นต์ contrast มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 0.5% นอกจากนี้อาจเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ให้มีค่าลดหลั่นไปตามลำดับบรรจุในช่องให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ contrast ได้ หลายค่าเช่น 0.1% , 0.3% , 0.5% และ 1% ตามลำดับ

### 2.13 ฉากรังสีรับภาพ (Fluorescence screen)<sup>[16]</sup>

ฉากรังสีรับภาพเป็นอุปกรณ์สำคัญมากในงานถ่ายภาพด้วยรังสี เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นรังสีหรือใช้วัสดุใด ๆ ที่ทำปฏิกิริยาต่อรังสีโดยตรงแล้วทำให้เกิดภาพอย่างสมบูรณ์ได้ การสร้างภาพถ่ายด้วยรังสีที่ใช้เทคนิคฟิล์มซึ่งฟิล์มเอกซเรย์ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาตอบสนองต่อรังสีได้ แต่ก็ไม่อาจเพียงพอสำหรับการสร้างภาพถ่ายด้วยรังสีที่สมบูรณ์ได้ ยังคงต้องใช้ฟิล์มควบคู่กับแผ่นเรืองรังสีด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานจากรังสีให้กลายเป็นภาพที่สมบูรณ์มากที่สุด

ฉากรังสีรับภาพทำจากสารประกอบบางอย่าง เช่น โซเดียมไอโอดด์ สารฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของแผ่นเรืองรังสีก็คือ จะดูดซับโฟตอนรังสีเอกซ์แล้วเปลี่ยนให้เป็นแสงสว่างที่ตามองเห็นได้

โครงสร้างของแผ่นเรืองรังสี มีดังนี้

1. ฐาน (base)
2. ชั้นสะท้อน (reflecting layer/absorptive layer)
3. ชั้นฟอสฟอรัส (phosphor)
4. ชั้นป้องกันความเสียหาย (protective layer)

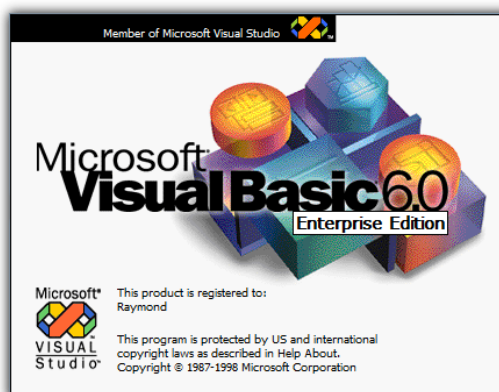
ในส่วนของสารฟอสฟอรัสจะมีหลายชนิด ได้แก่

1. ชนิดแคลเซียมทังสเตต (calcium tungstate ( $\text{CaWO}_4$ )) : ให้แสงสีน้ำเงิน
2. ชนิดแลนทานัม ออกซีโบรไมด์ (lanthanum oxybromide ( $\text{LaOBr}$ )) : ให้แสงสีน้ำเงิน
3. ชนิดแกดโกลินเนียม ออกซีซัลไฟด์ (gadolinium oxysulfide ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ )) : ให้แสงสีเขียว

## 2.14 โปรแกรม Visual basic 6.0<sup>[17]</sup>

โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานพัฒนาโปรแกรมบนระบบ Windows เนื่องจากเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้เทคโนโลยีในลักษณะ Visualize นั่นคือ สะดวกในการหยิบเครื่องมือที่โปรแกรมได้จัดเตรียมไว้ให้สำหรับออกแบบหน้าจอและสิ่งต่างๆ สำหรับในการเขียนโปรแกรมให้เรียบร้อย

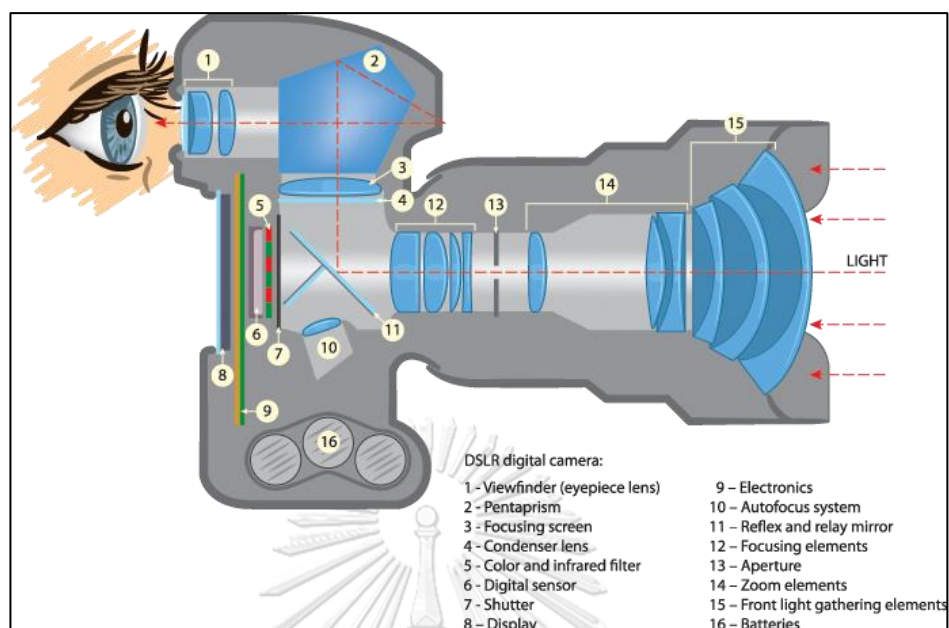
งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมนี้ในเขียนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อนำมาสร้างภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่าง วิเคราะห์องค์ประกอบและปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี



รูปที่ 2.23 โปรแกรม Visual basic 6<sup>[18]</sup>



## 2.15 กล้องดิจิทัล (Digital camera)



รูปที่ 2.24 โครงสร้างและองค์ประกอบของกล้องดิจิทัล<sup>[16]</sup>

กล้องดิจิทัลเป็นกล้องถ่ายรูปที่ใช้ระบบดิจิทัล โดยเก็บรูปภาพลงในสื่ออิเล็กทรอนิกส์ เช่น SD card หรือ คอมแพ็คต์แฟลช เป็นกล้องที่เก็บบันทึกภาพโดยไม่ใช้ฟิล์ม ผู้ใช้สามารถดูผลการถ่ายภาพที่จอภาพได้ทันที สามารถลบรูปที่ถ่ายไปแล้วและถ่ายใหม่ได้อีก และสามารถปรับแต่งภาพถ่ายได้ เช่น ถ่ายภาพในเวลากลางคืน, ปรับสี และย่อขยายภาพ เป็นต้น เมื่อต้องการย้ายข้อมูลรูปภาพจากกล้องดิจิทัลไปเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องใช้สายเชื่อมต่อระหว่างกล้องดิจิทัลกับช่อง USB ที่เครื่องซีพียู หรือถอด Memory card ออกมาใส่เครื่องอ่าน แล้วเชื่อมต่อเข้ากับซีพียูด้วยสาย USB เป็นสื่อกลางในการเคลื่อนย้าย โดยงานวิจัยเรื่องนี้จะใช้กล้องดิจิทัลในการรับภาพจากฉากเรื่องรังสีเพื่อบันทึกภาพที่ได้จากการสแกนผ่านวัตถุ

### ส่วนประกอบของกล้องดิจิทัล<sup>[19]</sup>

จากรูปที่ 2.24 โครงสร้างและองค์ประกอบของกล้องดิจิทัล ส่วนประกอบของกล้องดิจิทัลมีดังนี้

1. เลนส์ถ่ายภาพ (lens) ทำหน้าที่รับภาพและรับแสงจากภายนอกตัวกล้องไปยังวัสดุไวแสง
2. ตัวกล้อง มีลักษณะเป็นกล่องทึบ ด้านหน้าสำหรับติดตั้งเลนส์ ด้านหลังมีช่องมอง ด้านบนมีปุ่มกดบันทึกภาพ หรือปุ่มกดชัตเตอร์ ภายในมีหน่วยรับภาพอยู่ส่วนหลัง กล้อง

ประเภทสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (SLR) มีกระจกและปริซึมสำหรับสะท้อนแสงจากเลนส์ ไปสู่ช่องมองภาพ ภายในยังมีหน่วยวัดแสง ช่องเก็บแบตเตอรี่ (Battery) และแผงวงจรไฟฟ้า หน่วยความจำ นอกจากนี้ตัวกล้องยังมีอุปกรณ์วัดระยะห่างจากวัตถุ, แฟลช, ปุ่มปรับต่าง ๆ และช่องเสียบสำหรับใช้งานต่าง ๆ ตัวกล้องมีโครงสร้างที่แข็งแรงทำจากวัสดุที่ต่าง ๆ กันสำหรับกล้องแต่ละรุ่นตั้งแต่พลาสติกจนถึงโลหะผสมที่มีน้ำหนักเบา

3. ไดอะแฟรม เป็นแผ่นโลหะสีดำเล็ก ๆ หลาย ๆ แผ่นประกบกัน ติดตั้งอยู่ระหว่างชุดของเลนส์ทำหน้าที่ในการ เปิด-ปิด ช่องตรงกลางเรียกว่า รูรับแสง (Aperture) เพื่อควบคุมปริมาณแสงที่จะผ่านเข้าไปในกล้องได้มากน้อยตามความต้องการ โดยมีปุ่มหรือก้านบังคับติดอยู่ที่กรอบรูปวงแหวนรอบกระบอกเลนส์
  4. ชัตเตอร์ (Shutter) ทำหน้าที่เสมือนประตูเปิดรับแสงให้กับหน่วยรับภาพ อยู่ในตัวกล้องด้านหน้าของหน่วยรับภาพ ผู้ใช้สามารถปรับตั้งระยะเวลาในการเปิดรับแสงให้กับหน่วยรับภาพ ในสภาวะแสงปกติ เวลาในการเปิดรับภาพเป็นเศษส่วนของวินาที ช่วงเวลาที่มีการเปิดรับแสงเรียกว่า Shutter Speed
  5. ช่องมองภาพ เป็นช่องสำหรับมองภาพก่อนทำการบันทึกภาพ กล้องประเภทสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (SLR) สามารถมองเห็นภาพในมุมเดียวกับภาพที่จะทำการบันทึก เนื่องจากใช้กระจกสะท้อนแสงจากเลนส์ขึ้นไปปรากฏภาพบนกระจกฝ้าด้านบน แล้วสะท้อนภายในปริซึมห้าเหลี่ยม (Pentaprism) เข้าสู่ช่องมองแสงที่อยู่ด้านหลังของกล้อง พารามิเตอร์หลักของกล้องดิจิทัลที่ผลต่อคุณภาพของภาพ ได้แก่ ค่ารูรับแสง (F) , ความเร็วชัตเตอร์ (t) และค่าความไวแสง (ISO)
- ค่ารูรับแสง (F)

เป็นพารามิเตอร์แรกที่ต้องพิจารณาเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลคือ ผลกระทบของรูรับแสงที่มีต่อภาพถ่าย การเปิดรูรับแสงให้กว้างขึ้นหรือแคบลงจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ค่ารูรับแสงมากขึ้น (ค่า F ต่ำลง) และค่ารูรับแสงต่ำลง (ค่า F มากขึ้น) ปริมาณแสงที่เข้าสู่เซนเซอร์จะถูกควบคุมด้วยขนาดของรูรับแสงที่กว้างขึ้นหรือแคบลงรูรับแสงช่วยให้สามารถควบคุมปริมาณแสงที่เข้าสู่เลนส์ได้ โดยเมื่อรูรับแสงกว้างขึ้น ปริมาณแสงจะเข้าสู่เลนส์มากขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อรูรับแสงแคบลง ปริมาณแสงจะเข้าสู่เลนส์ได้น้อยลง ค่าตัวเลขของขนาดรูรับแสงที่แตกต่างกันเรียกว่า ค่า F ซึ่งค่า F มาตรฐาน ได้แก่ F/1, F/2,

F/2.8, F/4, F/5.6, F/8 เป็นต้น การเพิ่มขนาดรูรับแสงให้กว้างขึ้นจะเป็นการลดค่า F ให้น้อยลง ขณะที่การลดขนาดรูรับแสงลงจะเป็นการเพิ่มค่า F ให้สูงขึ้น เมื่อค่า F เปลี่ยนแปลงไป ไม่เพียงปริมาณแสงที่เข้าสู่กล้องจะเปลี่ยนไปเท่านั้น แต่ขนาดของพื้นที่ภาพที่อยู่ในระยะโฟกัสยังเปลี่ยนไปด้วย และยิ่งค่า F ต่ำลงมากเท่าใด พื้นที่ภาพในระยะโฟกัสจะมีขนาดเล็กกลางเช่นกัน ในทางกลับกัน หากค่า F มากขึ้นพื้นที่ภาพที่อยู่ในระยะโฟกัสจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลภาพที่ได้จะมีความคมชัดจนถึงส่วน Background

- ความเร็วชัตเตอร์ (t)

ความเร็วชัตเตอร์ คือ ระยะเวลาที่ชัตเตอร์ของกล้องเปิดออกเพื่อรับแสง เข้ามายังเซนเซอร์ภาพในตัวกล้อง โดยความเร็วชัตเตอร์จะระบุเป็น 1 s, 2 s, 2.5 s, 3.2 s เป็นต้น เมื่อความเร็วชัตเตอร์เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเปิดรับแสงจะลดลง และเมื่อความเร็วชัตเตอร์ลดลง ระยะเวลาการเปิดรับแสงจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความเร็วชัตเตอร์ลดต่ำลง ปริมาณแสงที่เข้าสู่กล้องจะเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ความเร็วชัตเตอร์ที่เร็วขึ้นจะหยุดตัวแบบที่กำลังเคลื่อนไหว, ความเร็วชัตเตอร์ที่ช้าลงจะสร้างเอฟเฟกต์ภาพเบลอจากการเคลื่อนไหว ดังนั้นสามารถปรับปริมาณแสงโดยการเปิดหรือปิดชัตเตอร์

- ความไวแสง (ISO)

ความไวแสงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปิดรับแสงพอๆ กับรูรับแสงและความเร็วชัตเตอร์ ความไวแสง คือ ความสามารถในการรับแสงของเซนเซอร์ภาพ ซึ่งสะท้อนออกมาเป็นค่าตัวเลข กล่าวคือการเปิดรับแสงจะเป็นตัวกำหนดว่าการถ่ายภาพของคุณประสบความสำเร็จหรือล้มเหลว แต่ความไวแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดการเปิดรับแสงเช่นกัน ซึ่งในช่วงความไวแสงปกติ เมื่อลดความไวแสงลง คุณภาพของภาพจะสูงขึ้น การเพิ่มความไวแสงทำให้กล้องสามารถตั้งค่าความเร็วชัตเตอร์ให้สูงขึ้นได้ จุดสีรบกวนจะเกิดขึ้นเมื่อความไวแสงสูงขึ้นไปนั่นก็คือ นอยส์บนภาพนั่นเอง ดังนั้นจึงควรตั้งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับการบันทึกภาพที่ได้มา

ดังนั้นการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จึงมีผลต่อคุณภาพของภาพที่บันทึกมา เพราะฉะนั้นการเลือกพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า คือ ค่ารูรับแสง (F), ความเร็วชัตเตอร์ (t) และค่าความไวแสง (ISO) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบันทึกภาพออกมา



รูปที่ 2.25 ภาพถ่ายกล้องดิจิทัล F/5.6<sup>[20]</sup>



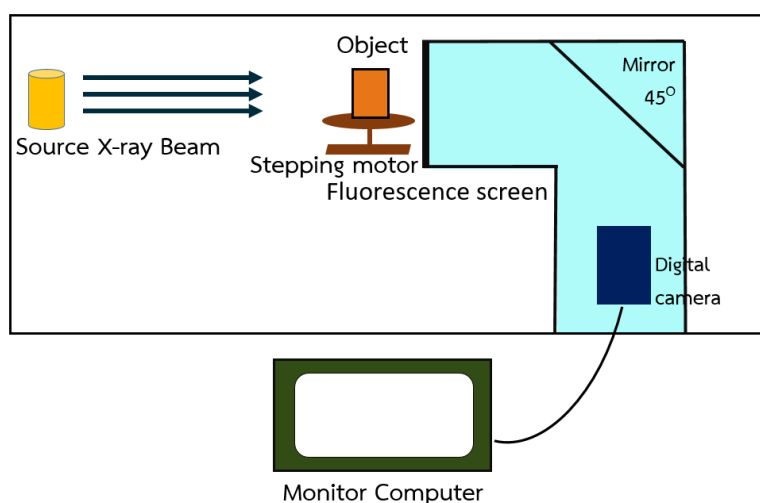
รูปที่ 2.26 ภาพถ่ายกล้องดิจิทัล F/16<sup>[20]</sup>

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การออกแบบระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

ระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ , สเตปปีงมอเตอร์ , ฉากเรืองรังสีรับภาพ และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

#### 3.1.1 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์เรย์ (X-ray Generator)

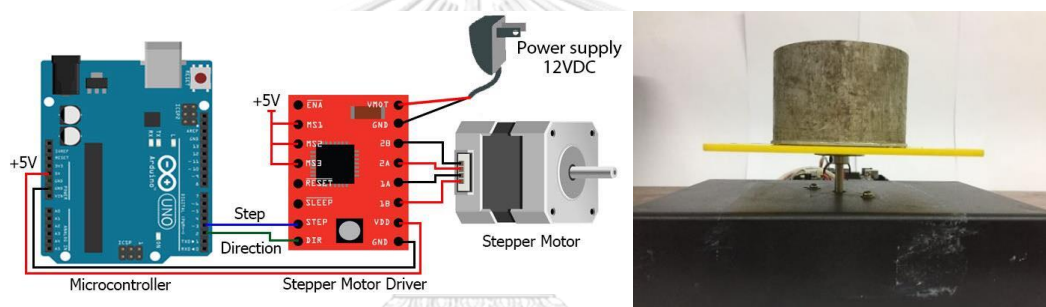
เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Rigaku Radioflex รุ่น RF-200EGM2 ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถทำได้ด้วยตัวควบคุม คือ

- ปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 70-200 kV
- ความเข้มของรังสีตามมาตรฐานของเครื่อง คือ 5 mA
- หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) เป็น Ceramic X-ray tube ซึ่งมี Focal spot size (nominal) 2.0 mm × 2.0 mm

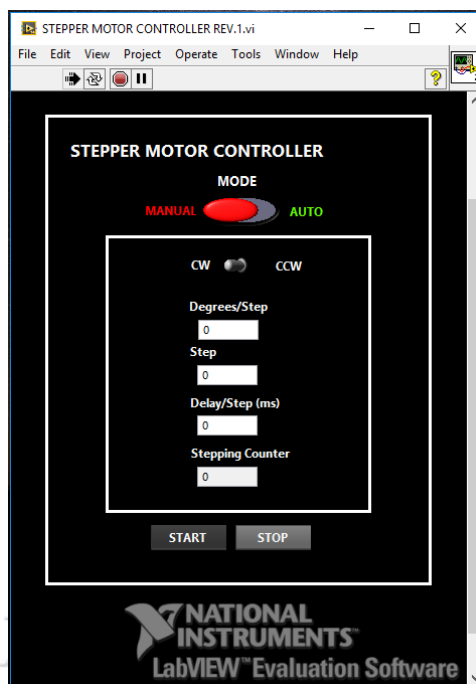


รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซเรย์

### 3.1.2 สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor)

รูปที่ 3.3 การทำงานสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor)<sup>[21]</sup>

มีลักษณะเป็นแป้นวางวัตถุในการหมุนวัตถุ โดยใช้สเตปปีงมอเตอร์ (Steeping motor) ซึ่งใช้ไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า 12 โวลต์ (12VDC) สำหรับการทำงานของมอเตอร์ สเตปปีงมอเตอร์ถูกควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (UNO) ผ่านวงจรขับมอเตอร์แบบสเตป (Stepper Mottor Driver) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่ง (องศา) และทิศทางในการหมุนวัตถุตัวอย่าง โดยมีความละเอียดต่อการหมุนต่อ 1 สเตป เท่ากับ  $1.8^{\circ}$  จากโปรแกรม LabView ที่พัฒนาขึ้นบนคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.4 ผ่านการเชื่อมโยงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (UNO) ทางพอร์ต USB



รูปที่ 3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor)

### 3.1.3 ฉากเรืองรังสีรับภาพ (Fluorescence screen)

ฉากเรืองรังสีรับภาพ (Fluorescence screen) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฉากเรืองรังสีชนิด  $Gd_2O_2S$  รุ่น GRZ STD ของ Mitsubhishi มีลักษณะคล้ายแผ่นพลาสติกสีขาว มีขนาดความหนาประมาณ 1 mm และมีขนาดความกว้าง 15 cm มีคุณสมบัติคือ จะดูดกลืนพลังงานจากรังสีที่ถูกลดทอนผ่านชิ้นงานแล้วเปลี่ยนรังสีเอกซ์ให้เป็นแสง ทำให้เห็นรายละเอียดของโครงสร้างวัตถุ

ฉากเรืองรังสีรับภาพจะถูกติดตั้งอยู่ในกล่องทึบแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี ดังนั้นจึงสามารถใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพที่เกิดจากฉากเรืองรังสีรับภาพนี้ได้โดยตรง



รูปที่ 3.5 ฉากเรืองรังสีรับภาพ (Fluorescence screen)

#### 3.1.4 ส่วนการเก็บข้อมูลภาพ

ในระบบของส่วนนี้ทำการรับภาพที่เกิดขึ้น จากการเกิดอันตรกิริยาของฉากเรืองรังสี หลังจากเครื่องกำเนิดรังสีปล่อยลำรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งประกอบด้วย กล้องทึบแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี, กล้องถ่ายภาพ, กระจกวางทำมุม  $45^{\circ}$ , สาย USB และฉากเรืองรังสี ซึ่งส่วนการเก็บภาพจะเก็บภาพที่ได้และส่งไปแสดงผลที่คอมพิวเตอร์

##### 3.1.4.1 กล้องทึบแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี

การถ่ายภาพทางรังสีเอกซ์จำเป็นต้องทำในห้องมืดจึงจะเห็นการเรืองรังสีที่ฉากได้ จึงต้องมีกล้องทึบแสงที่เป็นระบบปิดที่สามารถใส่อุปกรณ์การรับภาพ จึงได้สร้างกล้องทึบแสงทำจากไม้อัดมีขนาดความหนา 11.4 mm เพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก และภายในมีการบุด้วยตะกั่วขนาด 3.8 mm เพื่อป้องกันการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่จะเกิดการรบกวนกับการรับภาพ



รูปที่ 3.6 กล้องทึบแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีประกอบด้วยฉากเรืองรังสี



### 3.1.4.2 กล้องถ่ายภาพดิจิทัล

ใช้กล้องบันทึกภาพดิจิทัล EOS1100D ขนาด APS-C ความละเอียด 12.2 ล้านพิกเซล โดยวางทำมุมกับเลนส์ด้วย Angle Lens ซึ่งจะเป็นกระจกวางตัวเฉียง  $45^{\circ}$  เพื่อสะท้อนภาพที่ปรากฏขึ้นบนฉากเรืองรังสีเข้าสู่กล้องดิจิทัล และลดการรบกวนจากรังสีเอกซ์ที่เข้ามารบกวนต่อเซ็นเซอร์รับภาพ



รูปที่ 3.7 กล้องบันทึกภาพดิจิทัล EOS1100D

### 3.1.4.3 สาย USB

สาย USB (Universal Serial Bus) ความยาว 5 เมตร เพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ใช้เชื่อมต่อกล้องและคอมพิวเตอร์ เนื่องจากสาย USB มีความยาวจึงจำเป็นต้องใช้ USB Hub เพิ่มแรงดันไฟฟ้า 5 Volt ให้กับสาย USB

จุพาลง  
CHULALO



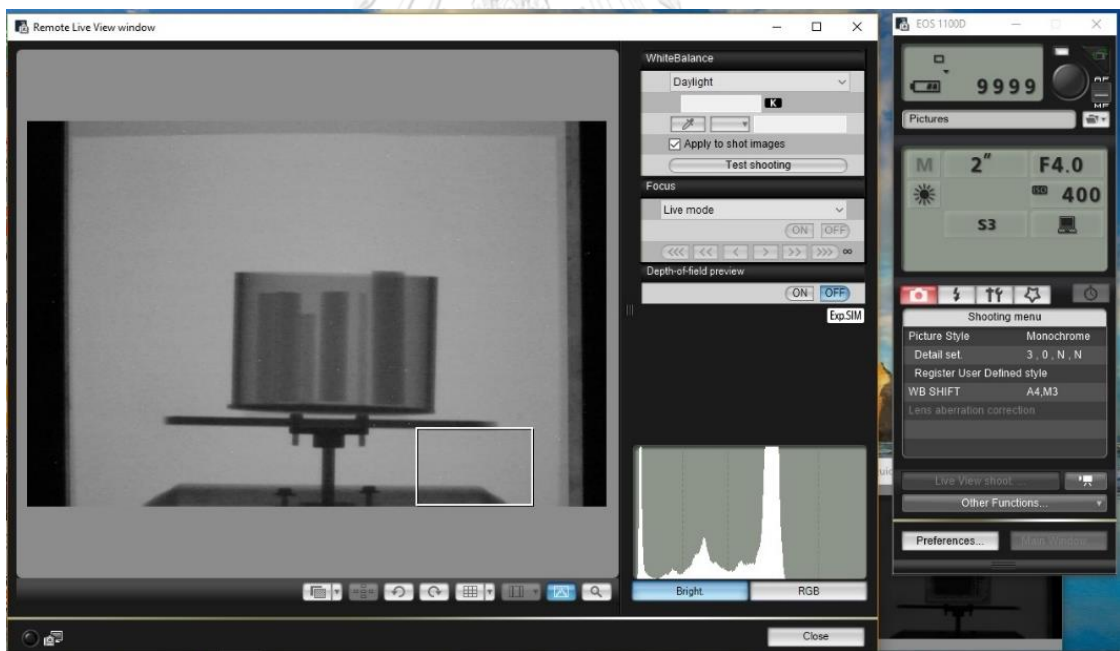
รูปที่ 3.8 สาย USB (Universal Serial Bus)



รูปที่ 3.9 สาย USB Hub

### 3.2 การใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรม Canon EOS Utilities เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานกล้องดิจิทัล Canon ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการเชื่อมต่อผ่านทางสาย USB สามารถปรับตั้งค่าคุณสมบัติของกล้องได้ทันทีทันใด และแสดงภาพที่ได้จากการรับภาพจากการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์ได้ทันทีดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้งานของ Canon EOS Utilities

### 3.3 วิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และบันทึกภาพจากฉากเรืองรังสีเอกซ์

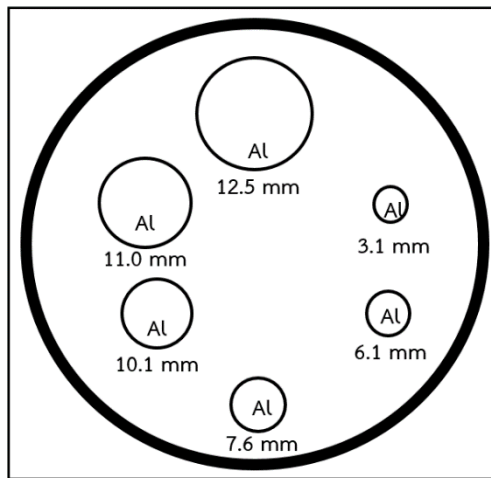
การทำงานของระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ จะเริ่มจากการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) ที่ใช้ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์และเวลาเดินเครื่องผ่านทางเครื่องควบคุม (Controller) หลังจากนั้นจึงเป็นการเริ่มการทำงานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ เมื่อเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาจะถูกลดทอนลงด้วยวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานและรูปร่างภายใน ที่วางบนแผ่นวางวัตถุในการหมุนวัตถุแต่ละองศาด้วยสเตปปีงมอเตอร์ ความเข้มที่ทะลุผ่านชิ้นงานไปกระทบฉากเรืองรังสีรับภาพ ซึ่งจะทำให้สารเรืองรังสีเปล่งแสงออกมาทำให้เกิดเป็นภาพโครงสร้างภายในและภายนอกของชิ้นงานปรากฏขึ้นบนฉาก หลังจากนั้นจึงเป็นการเก็บภาพด้วยการสั่งงานและควบคุมกล้องด้วยโปรแกรม Canon EOS Utilities ผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งปลายเลนส์จะติด Angle Mirror lens เพื่อสะท้อนภาพที่เกิดขึ้นเข้าสู่กล้องและไม่ให้กล้องดิจิทัลถูกรบกวนจากรังสีโดยตรง ภาพที่ได้จะถูกส่งมาแสดงผลยังคอมพิวเตอร์ แล้วโปรไฟล์ถัดไปก็หมุนสเตปปีงมอเตอร์หมุนครั้งละ  $1.8^{\circ}$  ไปเรื่อยๆจนครบทุกระนาบ 100 โปรไฟล์ของวัตถุ  $180^{\circ}$  หลังจากนั้นนำโปรไฟล์ทั้งหมดมาเข้าสู่กระบวนการสร้างภาพตัดขวาง (Computed tomography image)

### 3.4 การออกแบบวัตถุตัวอย่าง

ในเบื้องต้นจะต้องออกแบบวัตถุตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟี โดยจะออกแบบวัตถุออกมาทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ประกอบด้วยดังนี้

#### 3.4.1 วัตถุตัวอย่างที่ 1

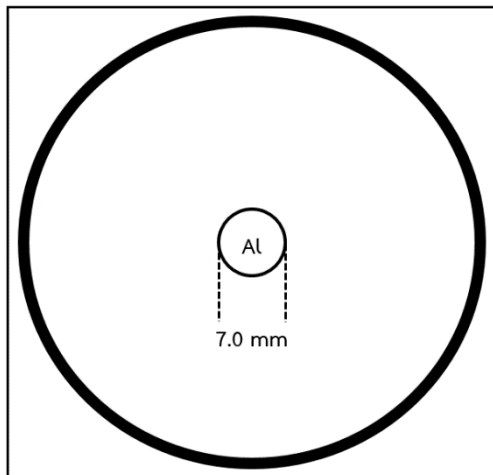
วัตถุตัวอย่างที่ 1 เพื่อทดสอบหาค่า Pixel noise มีลักษณะเป็นแท่งอลูมิเนียมทั้งหมด 6 ขนาด วางเรียงกันเป็นวงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5, 11.0, 10.1, 7.6, 6.1 และ 3.1 mm ภายในท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.4 mm และมีความหนา 3.1 mm ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วัตถุตัวอย่างที่ 1

## 3.4.2 วัตถุตัวอย่างที่ 2

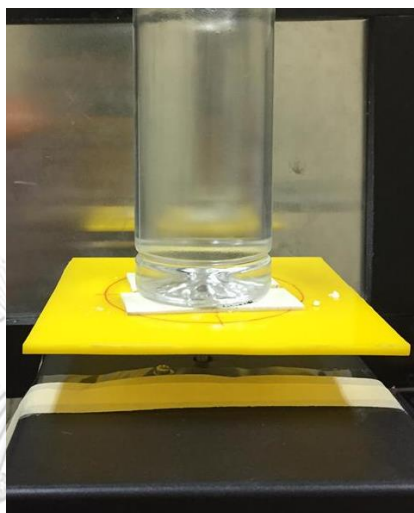
วัตถุตัวอย่างที่ 2 เพื่อหาค่า Resolution มีลักษณะเป็นแท่งอลูมิเนียม 1 แท่ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 mm ภายในท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.4 mm และมีความหนา 3.1 mm ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วัตถุตัวอย่างที่ 2

### 3.4.3 วัตถุตัวอย่างที่ 3

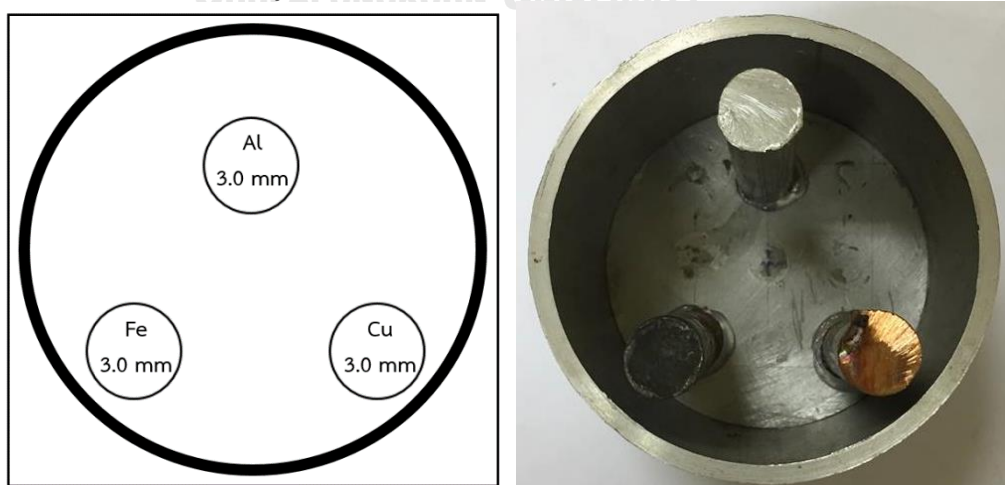
วัตถุตัวอย่างที่ 3 เพื่อหาค่า Spatial Uniformity โดยมีลักษณะเป็นขวดบรรจุน้ำเปล่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52.5 mm สแกนเลือกช่วงโปรไฟล์ผ่านในระนาบแนวนอนที่ต้องการดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วัตถุตัวอย่างที่ 3

### 3.4.4 วัตถุตัวอย่างที่ 4

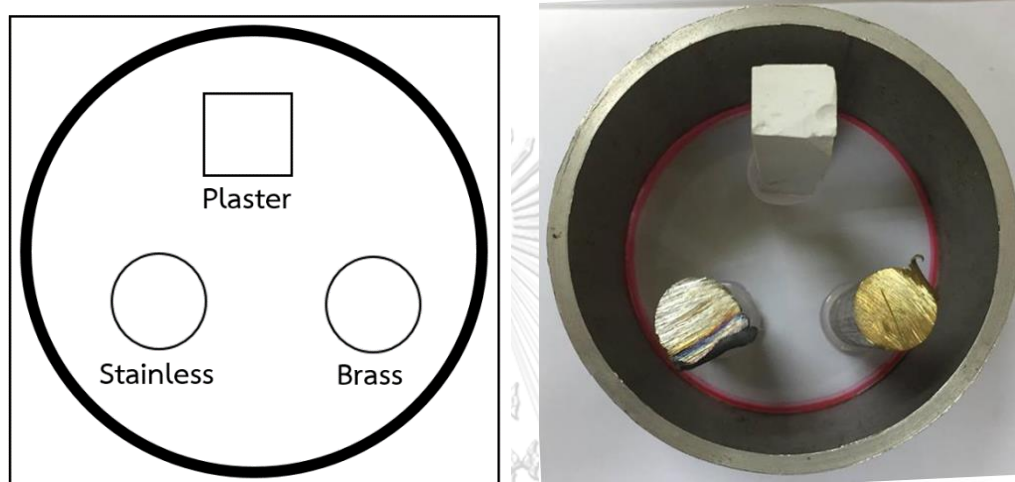
วัตถุตัวอย่างที่ 4 เพื่อหาค่า PDF มีลักษณะเป็นแท่งโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 mm คือ แท่งอลูมิเนียม (Aluminium), เหล็ก (Iron) และทองแดง (Copper) ภายในท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.4 mm และมีความหนา 3.1 mm ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วัตถุตัวอย่างที่ 4

### 3.4.5 วัตถุตัวอย่างที่ 5

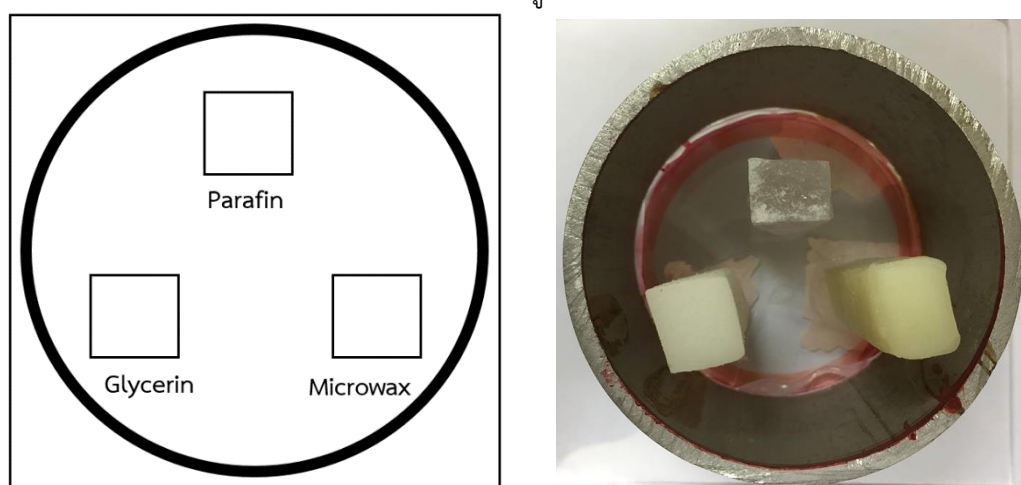
วัตถุตัวอย่างที่ 5 เพื่อหาค่า PDF มีลักษณะเป็นแท่ง คือ ปูนพลาสเตอร์ (Plaster) มีขนาดความกว้าง 11.0 mm, สแตนเลส (Stainless) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 mm และทองเหลือง (Brass) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 mm ภายในท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.4 mm และมีความหนา 3.1 mm ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วัตถุตัวอย่างที่ 5

### 3.4.6 วัตถุตัวอย่างที่ 6

วัตถุตัวอย่างที่ 6 เพื่อหาค่า PDF มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมมีขนาดตามแนวทแยงมุม 12.0 mm คือ แท่งพาราฟิน (Paraffin) , แท่งกลีเซอริน (Glycerin) และแท่ง Microwax ตามลำดับดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วัตถุตัวอย่างที่ 6

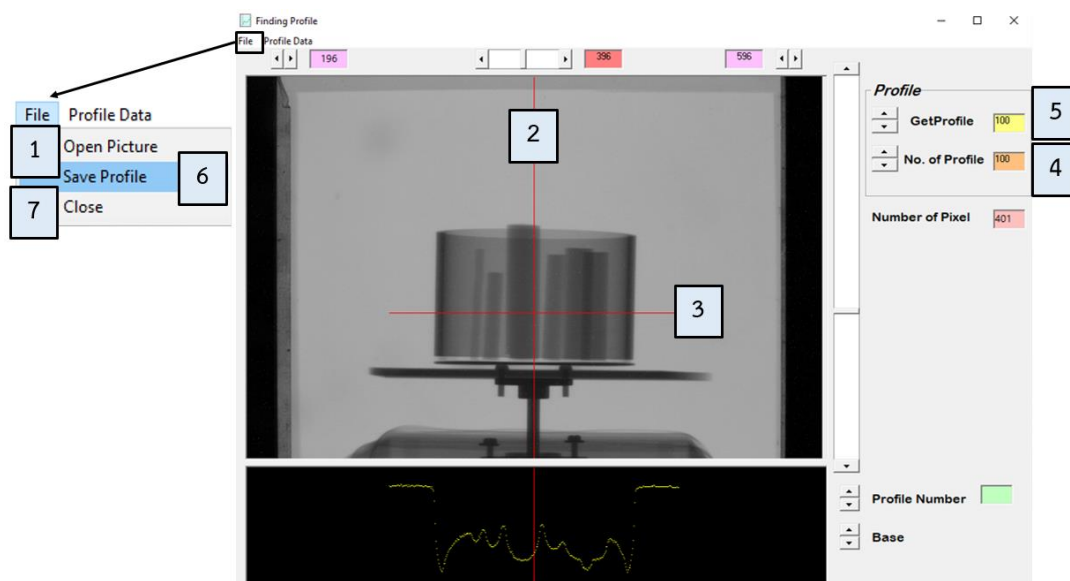
### 3.5 การทดสอบหาช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์

ฉากเรืองรังสีรับภาพ (Fluorescence screen) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติ ดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอกซ์ที่ถูกลดทอนผ่านชิ้นงานแล้วเปลี่ยนรังสีเอกซ์ให้เป็นแสง ทำให้เห็นรายละเอียดของโครงสร้างวัตถุ แต่ด้วยขีดจำกัดจากการอิมิตัวของปริมาณของรังสีปริมาณหนึ่ง เมื่อมีรังสีตกกระทบสูงเกินกว่าขีดจำกัดนั้น ความสว่างของฉากเรืองรังสีที่เรืองแสงขึ้นมาก็จะไม่แปรผันตามปริมาณรังสีนั้นอีกต่อไป สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 70-200 kV ดังนั้นเพื่อความแน่นอนของแสงที่เกิดจากฉากเรืองรังสีควรใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วงแผ่นเรืองรังสีให้มีแนวโน้มการตอบสนองของรังสีอย่างเป็นเชิงเส้นมากที่สุดจากการฉายรังสี โดยการฉายรังสีไปที่แผ่นเรืองรังสีซึ่งไม่มีวัตถุปรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 70-200 kV มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดแผ่นเรืองรังสีไว้ในภายในกล่องทึบแสงสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีรูปตัวแอล (L) สร้างโดยมีกล่องดิจิตอลและคอมพิวเตอร์เป็นชุดบันทึกภาพ
2. ปรับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์กับฉากเรืองรังสีเท่ากับ 100 cm (ระยะห่างค่านี้อาจใช้ตลอดในงานวิจัยนี้) สาเหตุที่เลือกระยะ 100 cm เนื่องจากป้องกันปริมาณรังสีเกินกว่าขีดจำกัดของการตอบสนองของฉากเรืองรังสี และเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากลำรังสีรูปกรวย (Cone beam) ซึ่งเป็นปัญหาเรื่องลำรังสีไม่สม่ำเสมอในกรณีที่ต้นกำเนิดรังสีอยู่ใกล้กับฉากเรืองรังสีมากเกินไป
3. ฉายรังสีไปยังฉากเรืองรังสีรับภาพ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 70-200 kV แต่ทุกครั้ง ตั้งค่าพารามิเตอร์ของกล่องดิจิตอล F 4.0, ISO 400 และ Shutter time 2 วินาที แล้วบันทึกภาพในแต่ละพารามิเตอร์
4. นำภาพทั้งหมดที่บันทึกได้มาอ่านค่าความเข้ม (Brightness) ของภาพ ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
5. นำค่าทั้งหมดที่อ่านได้ในขั้นตอนที่ 4 มาสร้างภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความสว่าง (Brightness)

### 3.6 การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยกล่องดิจิตอล

หลังจากที่ทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์แล้ว เมื่อได้ข้อมูลโปรไฟล์ในแต่ละมุมครบทุกโปรไฟล์ นำข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ไปคำนวณสร้างภาพตัดขวาง (reconstruction) โดยมีขั้นตอนทั้งหมดตามรูปที่ 3.17 ดังนี้



รูปที่ 3.17 การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ (Profile) จากภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

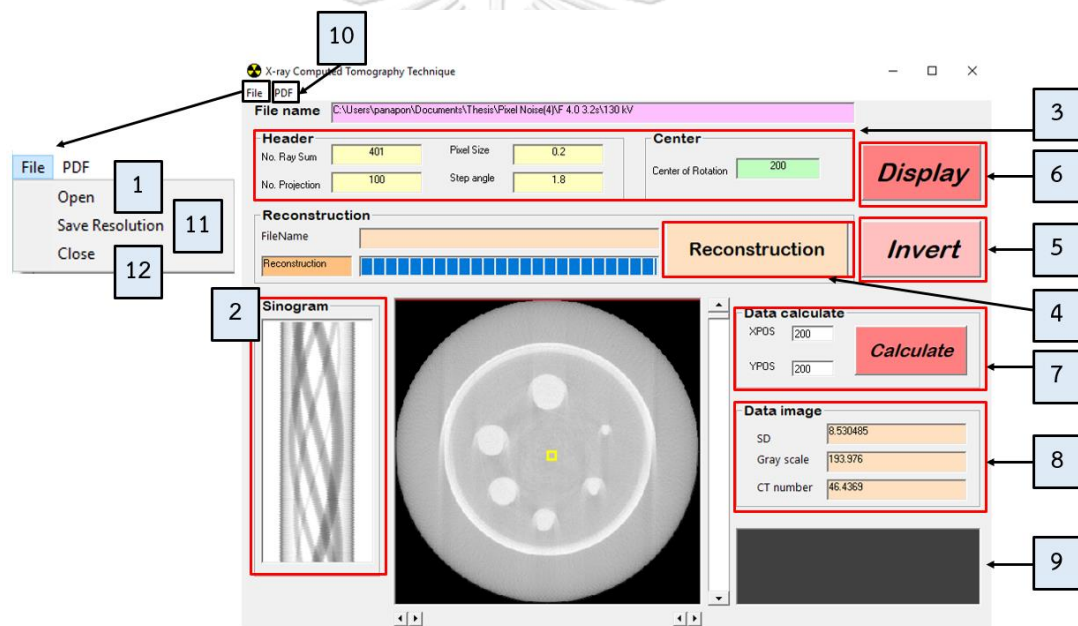
1. เปิดภาพในโปรไฟล์ที่ต้องการสร้างภาพตัดขวางมา 1 รูป
2. เลือกเส้นกำหนดระนาบแนวตั้งให้ตรงกับจุดกึ่งกลางของแกน Stepping motor
3. เลือกระนาบแนวนอนที่ต้องการสร้างภาพตัดขวางด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น กำหนดช่วงที่ต้องการอ่านให้ด้านซ้ายและด้านขวาเท่ากัน ระนาบแนวนอนที่ต้องการอ่านค่าความเข้มของภาพจะอ่านในช่วงที่กำหนด โดยโปรแกรมจะอ่านค่าด้านบนของ pixel 1 ชั้น และด้านล่างของ pixel 1 ชั้น แล้วนำทั้ง 3 ค่ามาเฉลี่ยหาค่าความเข้ม (Brightness) ของภาพ
4. กำหนดจำนวนโปรไฟล์ของภาพทั้งหมดที่จะนำมาสร้างภาพโทโมกราฟี
5. หมุนภาพให้ครบทุกโปรไฟล์ที่เราต้องการบันทึกโดยค่าที่บันทึกนั้นเป็นระดับความเข้มของเฉดสีเทามีค่าระหว่าง 0-255 จำนวน 256 ระดับ
6. บันทึกค่าทั้งหมดของโปรไฟล์ที่ต้องการ
7. คลิก Close เพื่อปิดโปรแกรมทั้งหมดเมื่อเสร็จสิ้นของการหาค่าต่างๆ

### 3.7 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุ

นำข้อมูลทั้งหมดที่หาค่าความเข้มสีของโปรไฟล์และบันทึกมาแล้วจากขั้นตอนที่ 3.6 ที่ได้มาหาค่าเลขชี้กำลังด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อศึกษาความแตกต่างของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อภาพโทโมกราฟีจากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยกล้องดิจิตอล โดยจะแสดงผลค่า



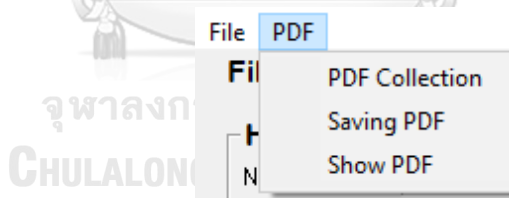
เลขซีที่สัมพันธ์กับค่าข้อมูลโปรไฟล์ ซึ่งวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก รังสีเอกซ์ทะลุผ่านได้น้อย ค่า เลขซีที่ก็จะอ่านค่าได้น้อย ในทางกลับกันถ้าวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อย รังสีเอกซ์ทะลุผ่านได้มากค่าเลขซีที่ก็จะอ่านค่าได้มาก โปรแกรมอ่านค่าเลขซีที่พัฒนาต่อเนื่องมาจาก โปรแกรมคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่มีอยู่แล้ว โดยอาศัยการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ด้วยวิธีคอนโวลูชันฟิลเตอร์แบ็กโพรเจกชัน (Convolution filter back projection) ข้อมูล จะถูกปรับให้เหมาะสมด้วยฟังก์ชันของ Shepp-Logan filter ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จะถูก คำนวณให้เป็นข้อมูลเลขซีที่ด้วยวิธีแบ็กโพรเจกชัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนรังสีเอกซ์ของวัตถุนั้นๆ จากนั้นนำข้อมูลภาพโทโมกราฟีที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูล เลขซีที่ในจุดที่สนใจ โปรแกรมอ่านเลขซีที่ที่พัฒนาขึ้นเขียนด้วยโปรแกรม Visual Basic 6.0 หน้าต่างของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.18 ขั้นตอนและองค์ประกอบของโปรแกรม ที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้



รูปที่ 3.18 โปรแกรมสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุ

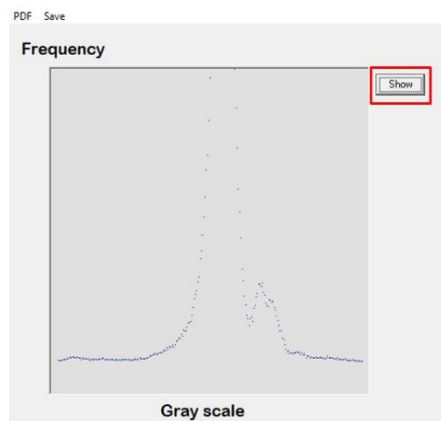
1. คลิก File ตามด้วย Open เพื่อเปิด File ข้อมูลที่บันทึกได้จากขั้นตอนที่ 3.6
2. File ข้อมูลที่ถูกเปิดจะนำมาสร้างภาพ Sinogram
3. Header จะแสดงจำนวนเรย์ซัม (Ray-sum) , โปรเจกชัน (Projection) , ขนาดของ พิกเซล (Pixel) และ Step angle และในส่วนของ Center จะแสดงจุดกึ่งกลางของ เรย์ซัมเป็นจุดกึ่งกลางที่จะนำมาสร้างภาพโทโมกราฟี

4. Reconstruction จะเป็นส่วนการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี Convolution filter back projection ข้อมูลจะถูกปรับให้เหมาะสมด้วยฟังก์ชันของ Shepp - Logan filter ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จะถูกคำนวณให้เป็นข้อมูลภาพด้วยวิธีแบบแบ็กโพรเจกชัน (Back-Projection Method) เมื่อคำนวณเสร็จจะปรากฏภาพโทโมกราฟีที่ต้องการด้านล่าง
5. Invert คือ ปุ่มที่แสดงเฉดสีตรงข้ามของภาพโทโมกราฟีกับภาพซีทีจากการคำนวณการสร้างภาพในขั้นตอนที่ 4
6. Display คือ ปุ่มที่แสดงภาพโทโมกราฟีจากการ Reconstruction ในขั้นตอนที่ 4
7. ในส่วนนี้จะเป็นการเลือกตำแหน่งของกรอบสี่เหลี่ยมที่ต้องการหาค่าต่างๆ โดย XPOS คือ ตำแหน่งในแนวแกน X และ YPOS คือ ตำแหน่งในแนวแกน Y เมื่อเลือกตำแหน่งแล้ว คลิกปุ่ม Calculate เพื่อจะคำนวณค่าต่างๆ
8. Data image ส่วนนี้เป็นผลจากการคำนวณได้จากขั้นตอนที่ 7 ซึ่งจะแสดงค่า SD , Gray scale และ CT number
9. คลิก PDF แล้วจะเปิดอีกหน้าต่างหนึ่งตามรูป 3.19 โดยปุ่ม PSF Collection จะคำนวณความถี่ของเฉดสีของภาพโทโมกราฟี , Saving PDF บันทึกทุกค่าความถี่ของเฉดสี และ Show PDF จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฉดสีและความถี่ของเฉดสีนั้น



รูปที่ 3.19 หน้าต่างเมื่อคลิก PDF

เมื่อคลิก Show PDF จะแสดงอีกฟอร์ม (Form) หนึ่งของโปรแกรมตามรูป 3.20 คลิก Show จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฉดสีและความถี่ของเฉดสีนั้น ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ฟอรัม (Form) กราฟระหว่างเขตสีและความถี่ของเขตสี

10. ขั้นตอนนี้จะเป็นการบันทึกค่าเลขซีทีเพื่อจะหาค่า Spatial resolution โดยเลือกช่วง  
ระนาบแนวนอนเลื่อน Scroll bar ทั้งแนวตั้งและแนวนอน กรอบสี่เหลี่ยมด้านข้างจะ  
ปรากฏภาพโปรไฟล์ที่ได้เลือกช่วงต้องการหาค่า Spatial resolution
11. คลิก Save resolution เพื่อบันทึกค่าที่ได้จากการหาในขั้นตอนที่ 10
12. คลิก Close เพื่อปิดโปรแกรมทั้งหมดเมื่อเสร็จสิ้นของการหาค่าต่างๆ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

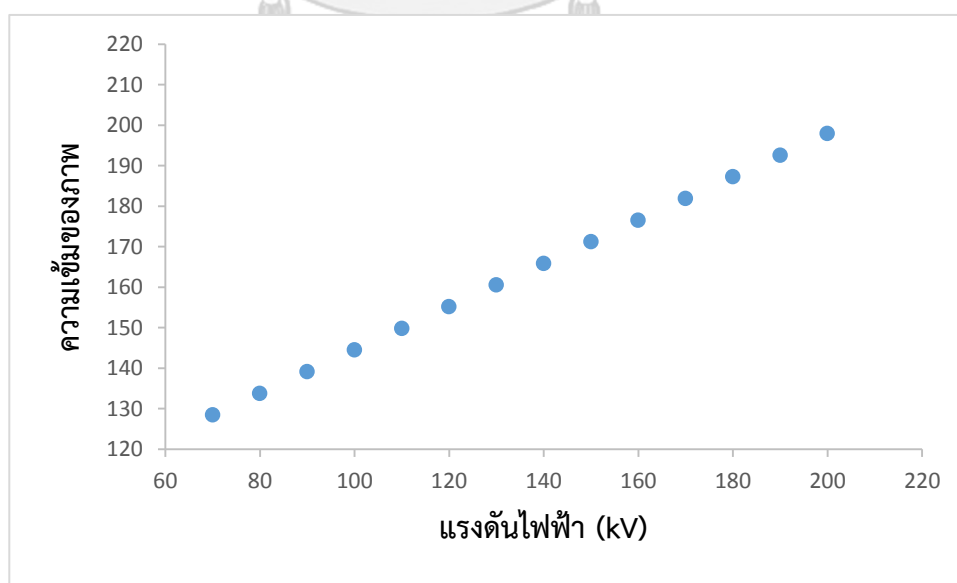
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยแบ่งการทดสอบการทำงานของระบบเป็นสองส่วน คือ การทดสอบหาช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์ และการทดสอบหาคุณภาพของภาพโทโมกราฟี

#### 4.1 ผลการทดสอบหาช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์

จากการทดลองถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 70 – 200 kV ลงบนฉากเรืองรังสี และอ่านค่าความเข้มของภาพด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ ROI ตำแหน่งตรงกลางของภาพอ่านค่า ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ที่ผลิตโดยแรงดันไฟฟ้าในช่วง 70 – 200 kV เป็นแบบเชิงเส้น และจากคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์มีค่ามาตรฐานของกระแสไฟฟ้า 5 mA และแรงดันไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 90 kV ดังนั้นในงานวิจัยเรื่องนี้ จึงเลือกแรงดันไฟฟ้าในช่วง 90 – 130 kV

ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มของภาพจากการทดสอบความสว่างของฉากเรืองรังสี  $F = 4$ ,  $t = 2s$  และ  $ISO = 400$

แรงดันไฟฟ้า(kV)	ความเข้มของภาพ
70	126
80	132
90	139
100	144
110	152
120	156
130	162
140	168
150	173
160	178
170	182
180	187
190	191
200	195



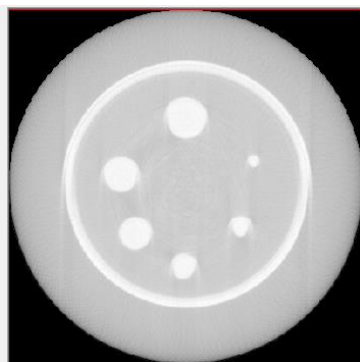
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพ

เนื่องจากพารามิเตอร์หลักของกล้องดิจิตอลที่มีผลต่อคุณภาพของภาพ ได้แก่ ค่ารับแสง (F), ความเร็วชัตเตอร์ (t) และค่าความไวแสง (ISO) การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่ง จะมีผลต่อความเข้มของภาพ จากการทดลองจึงกำหนด ค่ารับแสง 4.0 , ความเร็วชัตเตอร์ 2 วินาที และค่าความไวแสง 400 จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงความแตกต่างของความเข้มของภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นค่าความเข้มของภาพก็จะมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อแรงดันไฟฟ้าน้อยลงค่าความเข้มของภาพก็จะลดลง

จากการทดลองวัดความสว่างของฉากเรืองรังสีในช่วงของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดเอกซเรย์ คือ 70 – 200 kV ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าฉากเรืองรังสีที่ใช้นี้มีช่วงการตอบสนองที่กว้าง และเป็นเชิงเส้น สามารถตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานที่กว้างได้เป็นอย่างดี แต่ถึงอย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้วัตถุตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีขนาดไม่หนามาก จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงๆ เพื่อผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงๆ เพื่อให้ทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง ดังนั้นจากการพิจารณากราฟความสว่างของฉากเรืองรังสีแล้วช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้ คือ 70 – 200 kV เป็นช่วงที่ฉากเรืองรังสีให้ความเข้มของภาพเป็นเชิงเส้น ถือว่าเป็นช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 4.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ารับแสง (F) ของกล้องดิจิตอล

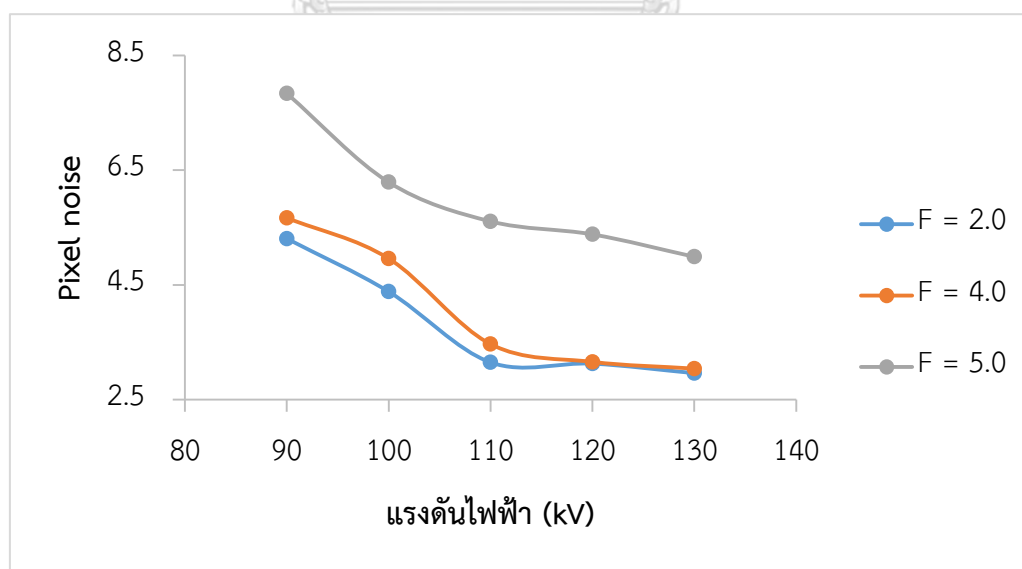
ในการทดลองได้เลือกวัตถุตัวอย่างที่ 1 เพื่อถ่ายภาพและสร้างภาพโทโมกราฟีจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพ เลือกใช้แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้คือ 90, 100, 110, 120 และ 130 kV ศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าประกอบกับค่าพารามิเตอร์ของกล้องคือ ค่ารับแสง 2.0, 4.0 และ 5.0 ความเร็วชัตเตอร์เท่ากับ 2 วินาที, ความไวแสงเท่ากับ 400 และระยะทางแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ไปถึงตัวรับภาพ (SID) เท่ากับ 100 cm จากค่าพารามิเตอร์ค่ารับแสงเพื่อศึกษาหาค่า Pixel Noise จากภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเก็บข้อมูลโปรไฟล์หมุนที่ละเอียด 1.8° ทั้งหมด 100 โปรไฟล์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่  $F = 4.0$ ,  $t = 2$  วินาที และ  $ISO = 400$

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพที่ค่าความกว้างของรูรับแสงต่างๆ

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Pixel noise		
	F = 2.0	F = 4.0	F = 5.0
90	5.30658	5.66741	7.83759
100	4.38188	4.95842	6.29025
110	3.1469	3.46734	5.60666
120	3.12661	3.15681	5.38047
130	2.96091	3.03998	4.98998



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า Pixel noise ของค่ารูรับแสง (F) ต่างๆที่, ความเร็วชัตเตอร์ 2 วินาที และความไวแสง ISO 400

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ค่ารับแสงที่ 2.0, 4.0 และ 5.0 ของกล้องดิจิตอล ซึ่งกำหนดระยะทางแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ไปถึงตัวรับภาพ 100 cm, ค่าความไวแสง 400 และความเร็วชัตเตอร์ 2 วินาที โดยการหาค่า Pixel noise พบว่าที่ค่ารับแสง 5.0 ภาพโทโมกราฟีมีค่า Pixel noise มากที่สุด และเมื่อใช้ค่ารับแสง 2.0 และ 4.0 ภาพโทโมกราฟีมีค่า Pixel noise ใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า Pixel noise น้อยลง

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่ารับแสง และแรงดันไฟฟ้า (kV) ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ พบว่าที่ค่ารับแสง 2.0 และ 4.0 ค่า Pixel noise มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความคมชัดของภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ที่ค่ารับแสง 5.0 ค่า Pixel noise มีค่ามาก แสดงว่าความคมชัดของภาพที่ได้มีความลดลง และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) มากขึ้น ค่า Pixel noise มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดของภาพมากขึ้น

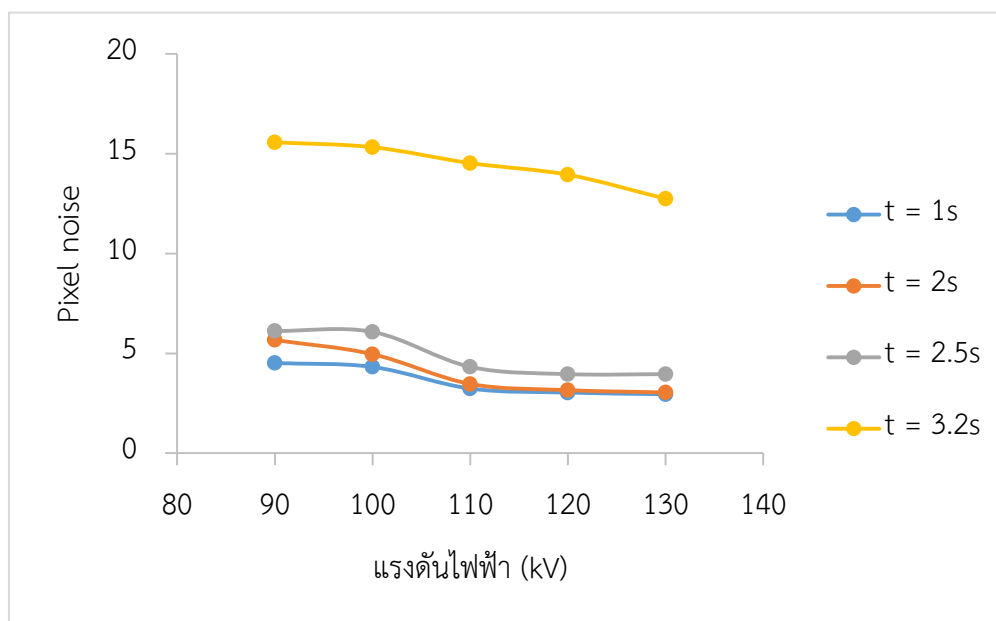
#### 4.3 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องดิจิตอลที่ความเร็วชัตเตอร์ต่างๆ

ใช้วัตถุตัวอย่างที่ 1 สร้างภาพโทโมกราฟีโดยเปลี่ยนความเร็วชัตเตอร์เป็น 1 วินาที, 2.5 วินาที และ 3.2 วินาที ตามลำดับ และตั้งค่ารับแสงเป็น 4.0 และ ISO 400 ได้ผลการทดลองหาค่า Pixel noise ของวัตถุตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเข้มของภาพที่ความเร็วชัตเตอร์ต่างๆ

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Pixel noise			
	1 s	2 s	2.5 s	3.2 s
90	4.51525	5.66741	6.11964	15.5696
100	4.31968	4.95842	6.07533	15.3242
110	3.23476	3.46734	4.32244	14.5279
120	3.03524	3.15681	3.95904	13.9446
130	2.95215	3.03998	3.95801	12.7458





รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า Pixel noise ของความเร็วชัตเตอร์  
ต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความเร็วชัตเตอร์ของกล้องดิจิทัลที่ 1.0, 2.0, 2.5 และ 3.2 วินาที ซึ่งกำหนดระยะทางแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ไปถึงตัวรับภาพ 100 cm และ ISO 400 โดยการหาค่า Pixel noise พบว่าที่ความเร็วชัตเตอร์ที่ 1.0, 2.0 และ 2.5 วินาที มีค่า Pixel noise ใกล้เคียงกัน ความเร็วชัตเตอร์ที่ 3.2 วินาที มีค่า Pixel noise มากที่สุด และเมื่อความเร็วชัตเตอร์ที่ 1.0, 2.0 และ 2.5 มีค่า Pixel noise ใกล้เคียงกัน และภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า Pixel noise น้อยกว่าความเร็วชัตเตอร์ที่ 3.2 วินาที และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้มี Pixel noise ลดลง

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของภาพในระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน จะเห็นว่าเมื่อความเร็วชัตเตอร์มากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า Pixel noise มากขึ้น และในอีกทางหนึ่ง ถ้าเปิดความเร็วชัตเตอร์ค่าใดค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) มากขึ้นจะพบว่า Pixel noise ลดลง

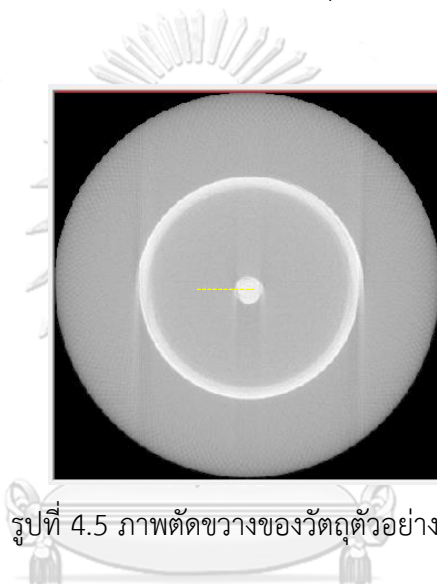
จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วชัตเตอร์ และแรงดันไฟฟ้า (kV) ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ พบว่าความเร็วชัตเตอร์ที่ 1.0, 2.0 และ 2.5 วินาที มีค่า Pixel noise ใกล้เคียงกัน แสดงว่าความคมชัดของภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วชัตเตอร์ 3.2 วินาที ภาพโทโมกราฟีมีค่า Pixel noise มาก แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเร็วชัตเตอร์ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์มากขึ้น ภาพโทโมกราฟีก็จะมีค่า Pixel noise มากขึ้น ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดลดลง และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า

แรงดันไฟฟ้า (kV) เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้า (kV) มากขึ้น ค่า Pixel noise มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดของภาพมากขึ้น

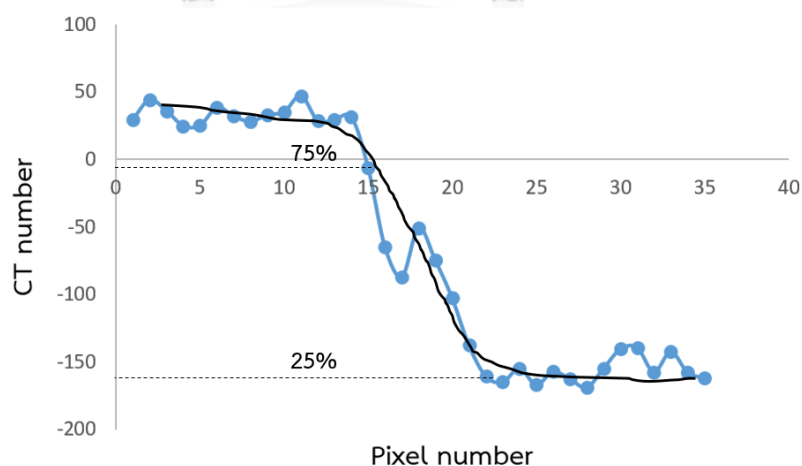
ดังนั้นการพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเลือกค่าการเปิดหน้ากล้อง และความเร็วชัตเตอร์นั้น จะต้องประเมินจากค่า Pixel noise ที่มีค่าน้อย ๆ จึงจะได้ภาพตัดขวางที่มีคุณภาพดี

#### 4.4 ผลจากการทดสอบหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟี

การทดลองในขั้นตอนที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ควรเลือกใช้คือ ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่ 2 เพื่อศึกษาหาค่า Resolution ของภาพโทโมกราฟีดังนี้



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 2



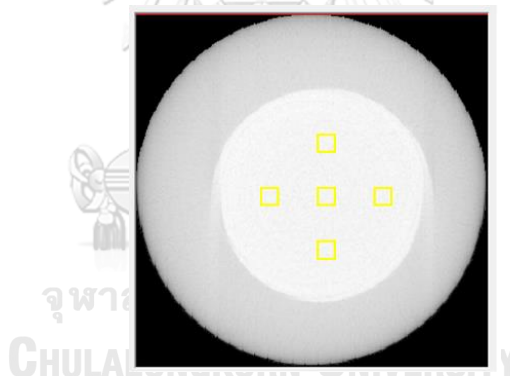
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number

จากตารางที่ 6.7 (ภาคผนวก) ได้เลือกช่วงของพิกเซลระหว่างรอยต่อของแท่งอลูมิเนียมกับอากาศ และนำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่าเลขซีที ดังรูปที่ 4.6 หากความเข้มในช่วง 25% ถึง 75% มีทั้งหมด 8 จุดพิกเซล (Pixel) และขนาดของพิกเซล (Pixel size) เท่ากับ 0.2 mm แสดงว่า Resolution เท่ากับ  $8 \times 0.2$  mm เท่ากับ 1.6 mm

ในขั้นตอนนี้จะหา Spatial Resolution ซึ่งจะหา Resolution แบบ Edge Spread Function Method จากแท่งอลูมิเนียม พบว่าสามารถอ่านค่าได้ 1.6 mm ทุกค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 90-130 kV แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะใช้แรงดันไฟฟ้าค่าใดจะไม่มีผลต่อ Resolution ของภาพโทโมกราฟี

#### 4.5 ผลการทดสอบหาความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity)

การทดลองในขั้นตอนที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ควรเลือกใช้ คือ ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่ 3 เพื่อศึกษาหาค่าความสม่ำเสมอของเลขซีทีของภาพโทโมกราฟีดังนี้



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 3 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

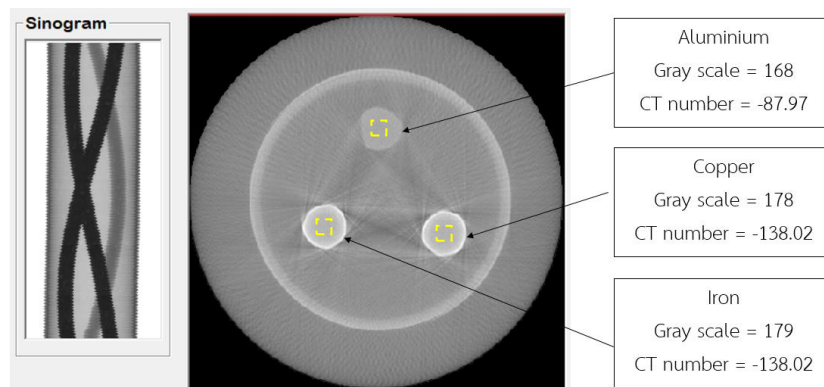
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	เลขซีที (CT number)				
	Center	0°	90°	180°	270°
90	-11.82	-13.71	-12.81	-12.44	-11.88
100	-9.17	-10.85	-10.59	-10.64	-11.41
110	-9.48	-10.61	-10.10	-9.64	-9.34
120	-8.32	-8.54	-7.16	-7.18	-8.60
130	-7.18	-6.55	-4.76	-6.35	-7.60

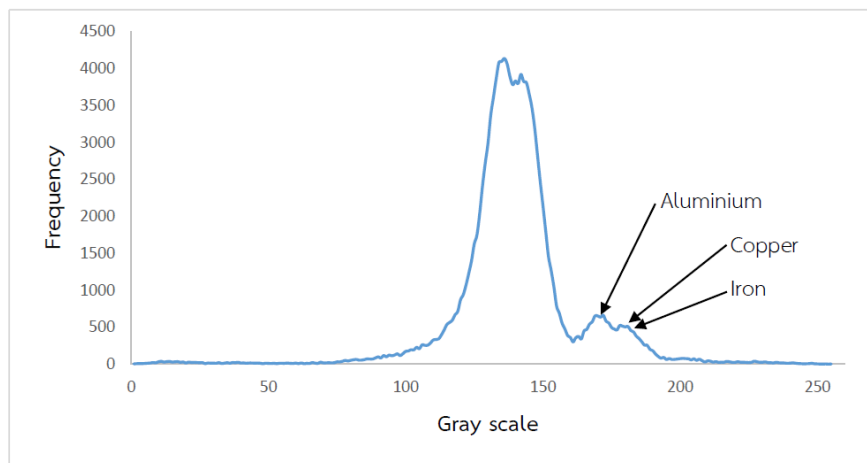
ในขั้นตอนนี้จะหาค่าความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity) โดยใช้วัตถุตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นขดบรรจุน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52.5 mm สแกนเลือกช่วงโปรไฟล์ผ่านในระนาบแนวนอน เพื่อหาความสม่ำเสมอของเลขซีทีทุกค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 90-130 kV จากข้อกำหนดที่ว่า ถ้าเลขซีที บริเวณใดๆ มีค่าแตกต่างจากค่าเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่งดังกล่าวไม่เกิน 3 แสดงว่าเลขซีทีสม่ำเสมอ ผลจากการทดลองในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่ง และทุกค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 90-130 kV ช่วงดังกล่าวไม่เกิน 3 แสดงว่าค่าเลขซีทีมีค่าสม่ำเสมอในภาพโทโมกราฟี

#### 4.6 ผลจากการทดสอบหาค่า Probability Distribution Function (PDF) จากภาพซีที

การทดลองในขั้นตอนที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ควรเลือกใช้คือ ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่ 4-6 เพื่อศึกษาหาค่าความค่า Probability Distribution Function (PDF) ของภาพโทโมกราฟี โดยวัดค่า Gray scale และเลขซีทีตรงกลางของภาพตัดขวางของวัตถุแต่ละแท่งดังรูปที่ 4.8, 4.10 และ 4.12 และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency



รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 4 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

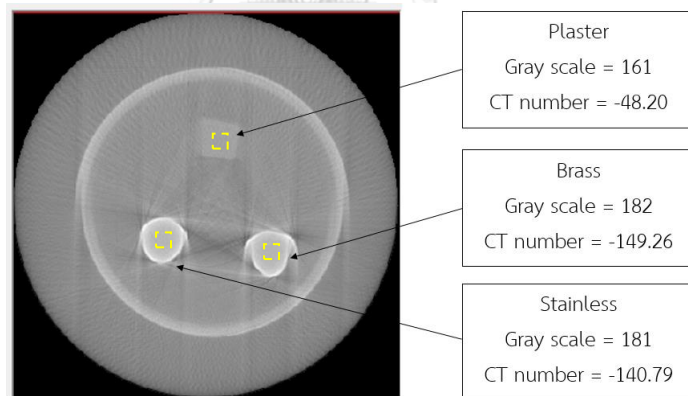


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 4

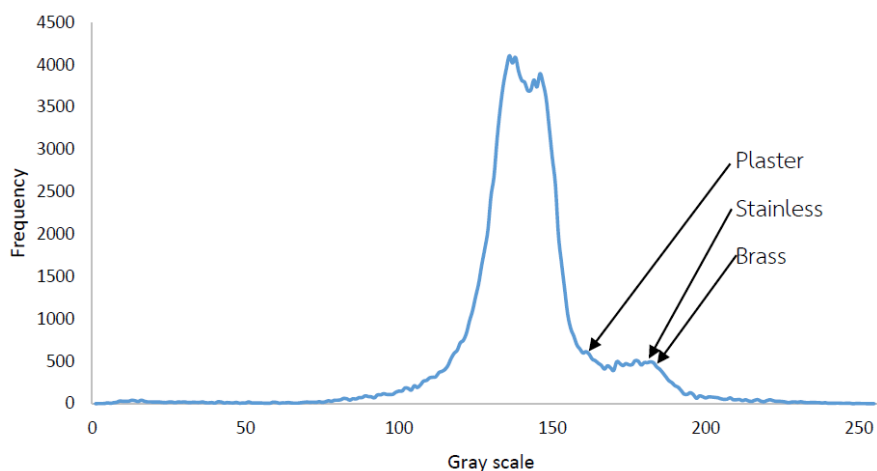
ในขั้นตอนนี้จะหา Probability Distribution Function (PDF) ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงความถี่ตามเฉดสีที่กระจายตัวอยู่ในภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นมา แทนการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การลดลงที่บอกชนิดของวัตถุในทางปฏิบัติภาพโทโมกราฟีจะเกิดความมัวบริเวณรอยต่อ โดยวัตถุตัวอย่างที่ 4 ในการหา Probability Distribution Function (PDF) ขั้นตอนนี้คือ Aluminium, Iron และ Copper จากรูปที่ 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 และ 6.10 (ภาคผนวก) สามารถแสดงการกระจายตัวตามความถี่ของเฉดสี (Gray scale) ได้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งมีค่าเฉดสี และเลขซีที ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉดสี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 4

แรงดันไฟฟ้า(kV)		Aluminium	Iron	Copper
90	Gray scale	170	181	180
	CT number	-75.72	-121.13	-116.40
100	Gray scale	172	182	181
	CT number	-77.22	-118.10	-116.58
110	Gray scale	164	175	174
	CT number	-80.98	-129.49	-125.13
120	Gray scale	163	174	172
	CT number	-84.81	-138.80	-131.80
130	Gray scale	168	179	178
	CT number	-87.97	-142.60	-138.02



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 5 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

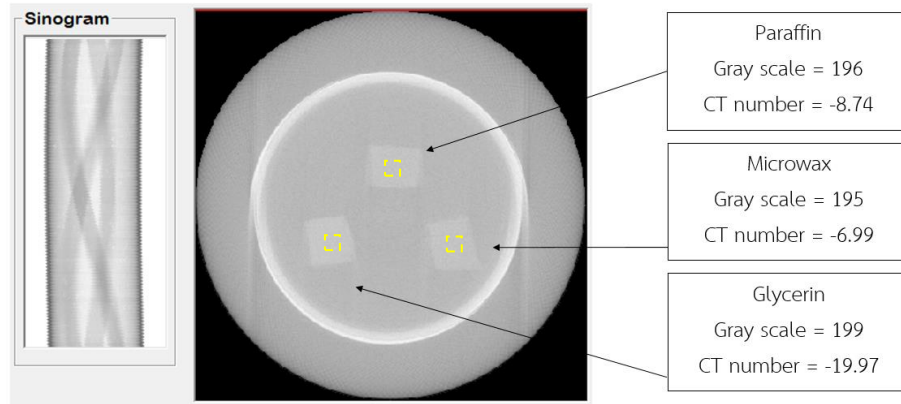


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของภาพตัดขวางตัวอย่างที่ 5

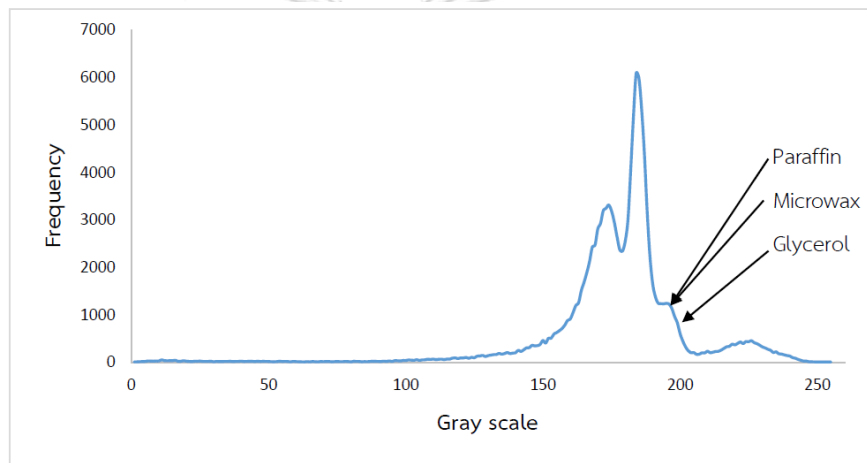
จากรูปที่ 4.10 เป็นวัตถุตัวอย่างที่ 5 ประกอบด้วยพลาสติก (Plaster), เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) และทองเหลือง (Brass) จากรูปที่ 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 และ 6.15 (ภาคผนวก) สามารถแสดงการกระจายตัวตามความถี่ของแอดซีได้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งมีค่าแอดซีและเลขซีที ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ค่าแอดซี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 5

แรงดันไฟฟ้า(kV)		Plaster	Stainless	Brass
90	Gray scale	165	182	182
	CT number	-40.89	-109.17	-107.16
100	Gray scale	161	179	178
	CT number	-43.84	-118.45	-114.42
110	Gray scale	162	181	178
	CT number	-46.43	-130.13	-119.4
120	Gray scale	164	184	182
	CT number	-46.81	-139.02	-131.09
130	Gray scale	161	182	181
	CT number	-48.21	-149.27	140.793



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 6 ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV ของภาพตัดขวางตัวอย่างที่ 6

จากรูปที่ 4.12 เป็นวัตถุตัวอย่างที่ 6 ประกอบด้วย Paraffin , Glycerin และ Microwax จากรูปที่ 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 และ 6.20 (ภาคผนวก) สามารถแสดงการกระจายตัวตามความถี่ของเฉดสีได้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งมีค่าเฉดสี และเลขซีที ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 4.7 ดังนี้



ตารางที่ 4.7 ค่าเฉดสี (Gray scale) และเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ 6

แรงดันไฟฟ้า(kV)		Paraffin	Glycerin	Microwax
90	Gray scale	191	195	191
	CT number	-10.582	-23.301	-10.526
100	Gray scale	192	196	192
	CT number	-9.9189	-20.97	-10.767
110	Gray scale	195	198	195
	CT number	-9.7994	-20.772	-9.8034
120	Gray scale	197	200	196
	CT number	-9.2236	-20.924	-7.1616
130	Gray scale	196	199	195
	CT number	-8.7448	-19.972	-6.9928

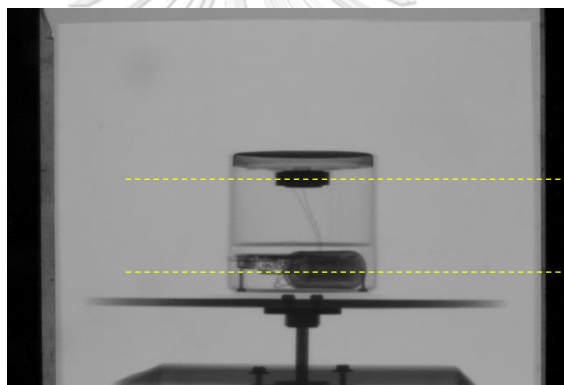
จากการทดสอบหาค่า Probability Distribution Function (PDF) จากภาพซีทีภาพโทโมกราฟีหรือภาพตัดขวางที่มีคุณภาพดีนั้น จะต้องมีความคมชัดและแยกรายละเอียดของภาพได้ดี วัตถุชนิดเดียวกันในภาพควรมีค่าเลขซีทีที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพของภาพตัดขวางจึงสามารถพิจารณาจากการแจกแจงความถี่ของค่าเลขซีที

#### 4.7 ผลสร้างภาพซีทีของการทดลองวัตถุในอุตสาหกรรม

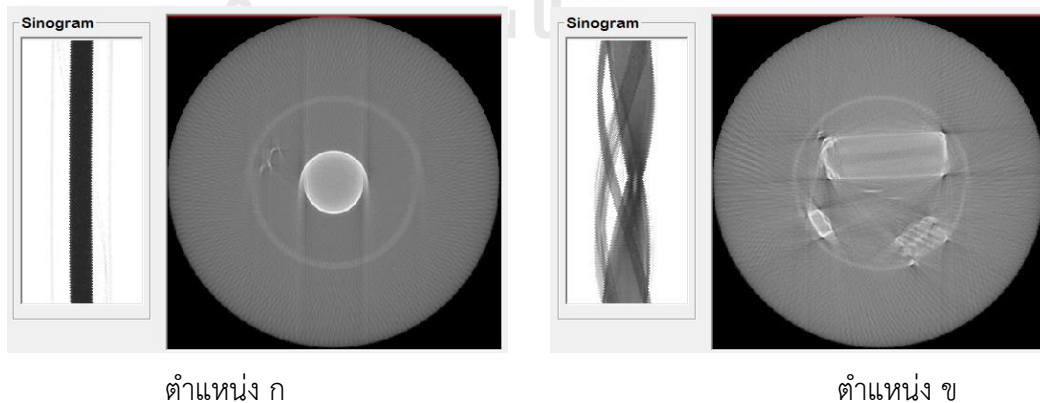
ในขั้นตอนนี้ทดลองถ่ายภาพวัตถุในอุตสาหกรรมได้แก่ ลำโพงบลูทูธ, ตัวชาร์จแบตเตอรี่ และ ตัว Adapter เพื่อดูองค์ประกอบภายใน โดยใช้พารามิเตอร์ของกล้องดิจิตอล ISO 400, F 4.0 และ ความเร็วชัตเตอร์ 2 วินาที และแรงดันไฟฟ้า 130 kV ได้ภาพตัดขวางดังนี้



รูปที่ 4.14 ลำโพงบลูทูธ



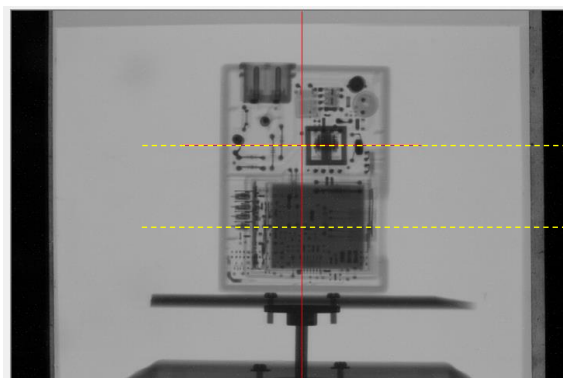
รูปที่ 4.15 โปรไฟล์ของลำโพงบลูทูธ



รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางของลำโพงบลูทูธ



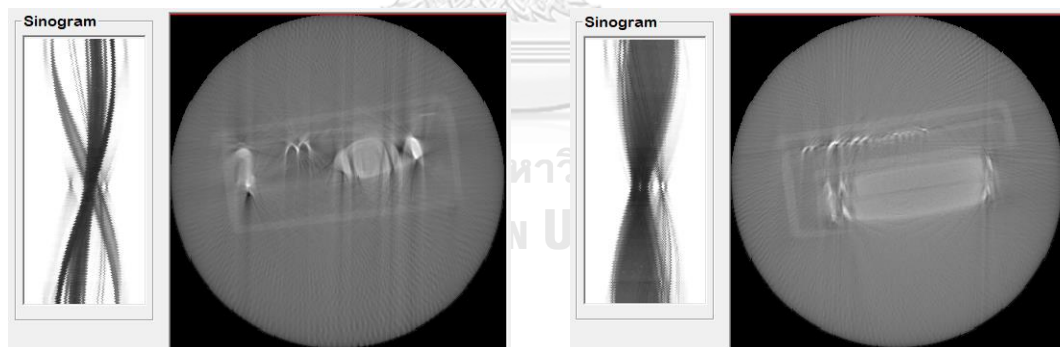
รูปที่ 4.17 ตัวชาร์จแบตเตอรี่



ตำแหน่ง ก

ตำแหน่ง ข

รูปที่ 4.18 โปรไฟล์ของตัวชาร์จแบตเตอรี่



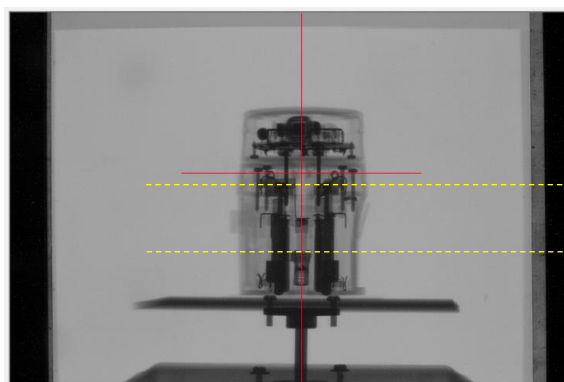
ตำแหน่ง ก

ตำแหน่ง ข

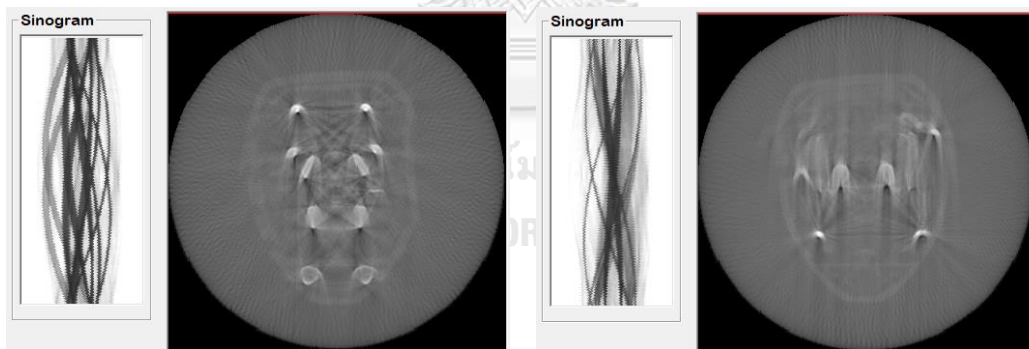
รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของตัวชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.20 ตัว Adapter



รูปที่ 4.21 โปรไฟล์ของตัว Adapter



ตำแหน่ง ก

ตำแหน่ง ข

รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของตัว Adapter

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การออกแบบระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

จากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ (Profile) ซึ่งใช้กล้องดิจิทัล (Digital camera) เป็นอุปกรณ์รับภาพจากฉากเรืองรังสี (Fluorescence screen) พบว่าระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ออกแบบที่สามารถถ่ายภาพและเก็บข้อมูลโปรไฟล์ได้สะดวกรวดเร็ว มีความคมชัด และให้รายละเอียดของภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์เป็นที่น่าพอใจอย่างมาก แต่มีข้อจำกัดที่ขนาดของวัตถุตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากชุดอุปกรณ์ฉากเรืองรังสีสามารถรับภาพขนาดได้ไม่เกิน 15 cm และวัตถุตัวอย่างที่ใช้ต้องมีความหนาแน่นที่มีค่าไม่มากจนเกินไป แต่ถ้าหากต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นสำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่นนั้นมาก จึงควรเลือกใช้ชนิดของฉากเรืองรังสีให้เหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทะลุผ่านของวัตถุ

##### 5.1.2 โปรแกรมวิเคราะห์และการสร้างภาพตัดขวาง

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้โปรแกรมนี้ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อนำมาสร้างภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการ และวิเคราะห์หองค์ประกอบและปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี ทำให้ทราบว่าโปรแกรมสามารถอ่านค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของภาพตัดขวางได้ เช่น Pixel noise, Resolution, Spatial Uniformity และ PDF จากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยบันทึกภาพจากกล้องดิจิทัล บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของงานวิจัย

##### 5.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้องดิจิทัล

โปรแกรมสามารถอ่านค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของภาพตัดขวางได้ จากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดยบันทึกภาพจากกล้องดิจิทัล บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของงานวิจัยดังนี้

###### 5.1.3.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่า Pixel noise จากการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อเพิ่มค่ารับแสง (F) และความเร็วชัดเตอร์ (t) จะทำให้ค่า Pixel noise มากขึ้น ทำให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดลดลง และเมื่อเพิ่มค่า

แรงดันไฟฟ้า (kV) มากขึ้น จะทำให้ค่า Pixel noise น้อยลง ทำให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดมากขึ้น

#### 5.1.3.2 Spatial resolution

ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 90-130 kV มีค่า resolution 1.6 mm เท่ากันทุกแรงดันไฟฟ้า และยังมีค่าน้อยในทุกแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงยอมรับได้

#### 5.1.3.3 ความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity)

ค่าเลขซีทีทั้ง 5 ตำแหน่ง และทุกค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 90-130 kV ช่วงดังกล่าวไม่เกิน 3 แสดงว่าค่าเลขซีทีมีค่าสม่ำเสมอในภาพโทโมกราฟี

#### 5.1.3.4 Probability Distribution Function (PDF)

เมื่อวิเคราะห์แต่ละเฉดสี (Gray scale) ของวัตถุตัวอย่างทำให้สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุตัวอย่างตัวตามเฉดสีได้ดีเป็นที่น่าพอใจ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายอย่าง แต่เนื่องจากสาย USB ในการต่อสเตปปิงมอเตอร์ (Stepping motor) ไปยังหน้าจคอมพิวเตอร์มีความยาวมาก ทำให้ในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์บางช่วงขนาดหายไป ดังนั้นจึงควรเลือกใช้กล้องดิจิตอลที่มีระบบใช้สัญญาณแบบไร้สาย (wireless) ในการเชื่อมต่อสัญญาณผ่านการควบคุมทางคอมพิวเตอร์
- 5.2.2 เนื่องจากขั้นตอนในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ก่อนที่จะนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้น อาจมีความผิดพลาดในขั้นตอนการเลือกจุดหมุนของภาพถ่ายรังสี เมื่อเทียบการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีในแบบอื่นๆ เพราะฉะนั้นผู้วิจัยต้องมีความแม่นยำในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ เพื่อให้ภาพที่ได้มีความถูกต้องและคุณภาพที่ดีที่สุด
- 5.2.3 งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ สำหรับวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 15 cm เนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำการทดลองมีขนาดจำกัด ดังนั้นเมื่อต้องการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิควิธีนี้กับวัตถุตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงควรออกแบบอุปกรณ์ใหม่ให้เหมาะสมกับขนาดของวัตถุ
- 5.2.4 ระบบเก็บข้อมูลภาพสำหรับงานวิจัยนี้เหมาะกับการคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก หากต้องการเลือกใช้วัตถุตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งต้องใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น จึงควรเลือกใช้ชนิดของฉากรังสีให้เหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทะลุผ่านของวัตถุ เช่น PI-200 ที่สามารถใช้งานได้ในช่วงพลังงาน MeV ของรังสี

เอกซ์ ซึ่งหากใช้งานกับต้นกำเนิดรังสีพลังงานสูง จะเป็นทางเลือกที่สำคัญสำหรับงานถ่ายภาพด้วยรังสีเพื่อการตรวจสอบวัตถุโดยไม่ทำลาย<sup>[22]</sup>

- 5.2.5 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณและสร้างภาพโทโมกราฟีในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างภาพตัดขวางในระนาบแนวนอนที่เราเลือกช่วงของโปรไฟล์ที่นำมาสร้างภาพเท่านั้น ยังไม่สามารถสร้างภาพเป็นสามมิติได้ ถ้าหากต้องการสร้างภาพวัตถุตัวอย่างที่แสดงผลเป็นสามมิติครบทุกระนาบนั้น จึงควรพัฒนาต่อยอดในการเขียนโปรแกรมให้ดีขึ้นกว่าได้



ภาคผนวก


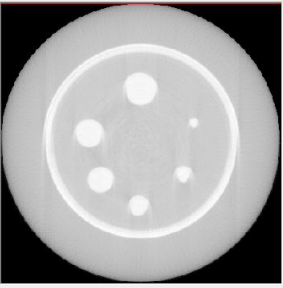

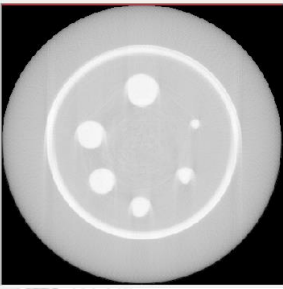

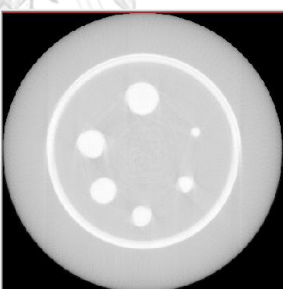

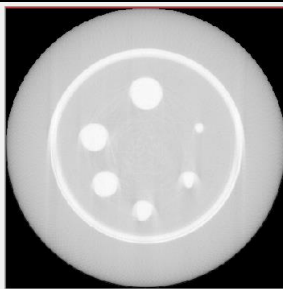


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**


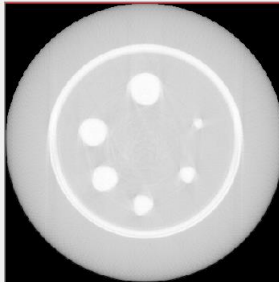


ผลการวิจัยและอภิปรายผลวิจัย

ตารางที่ 6.1 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 2.0 และ t 2 วินาที

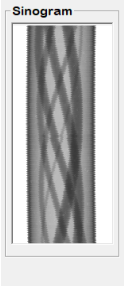
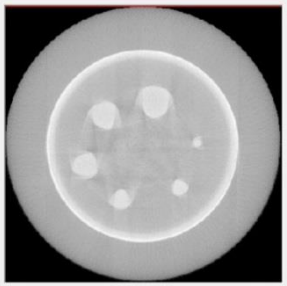
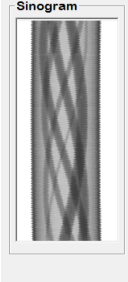
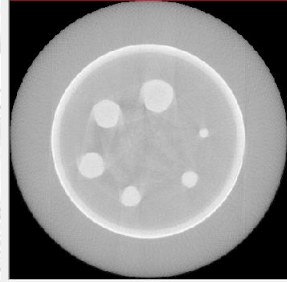
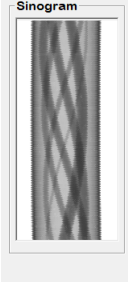
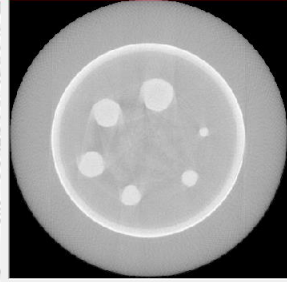
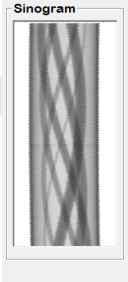
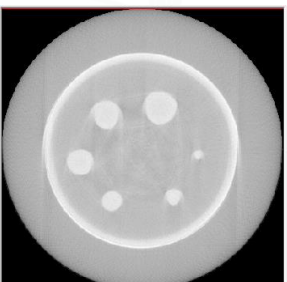
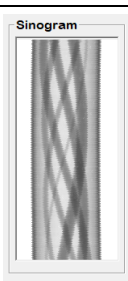
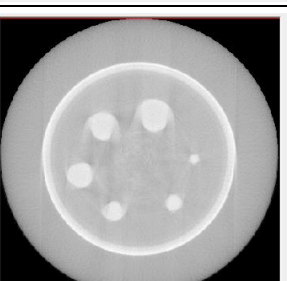
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			5.30658
100			4.38188
110			3.1469
120			3.12661

ตารางที่ 6.1 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 2.0 และ t 2 วินาที (ต่อ)


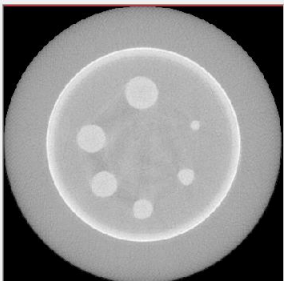
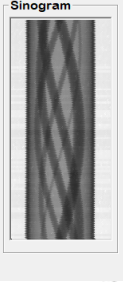
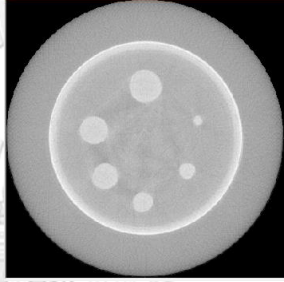
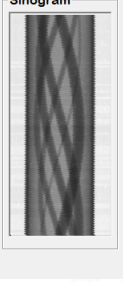
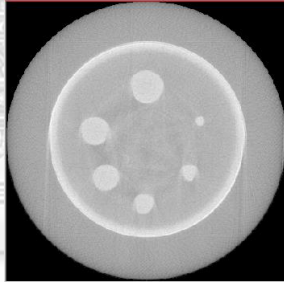

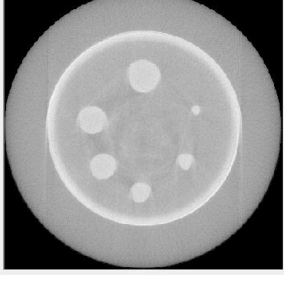

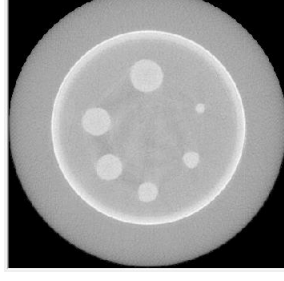
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
130			2.96091




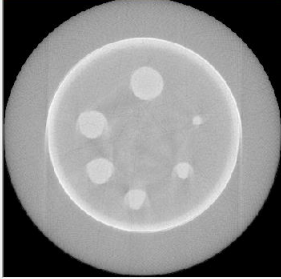

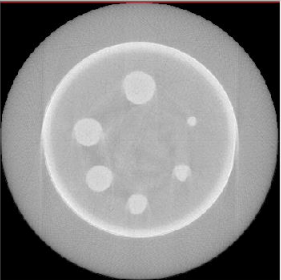

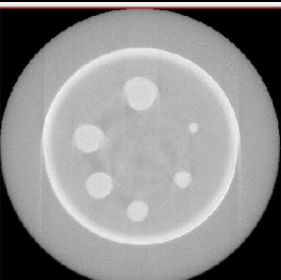
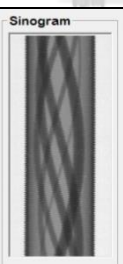
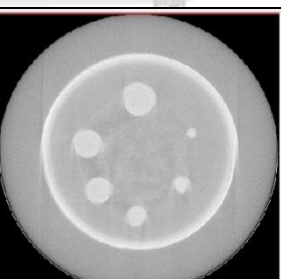

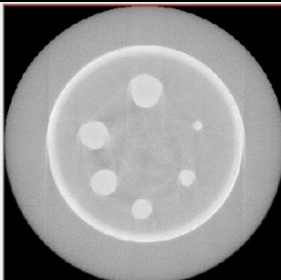
ตารางที่ 6.2 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400 , F 4.0 และ t 2 วินาที

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			5.66741
100			4.95842
110			3.46734
120			3.15681
130			3.03998

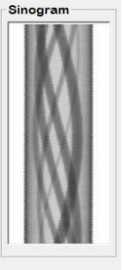
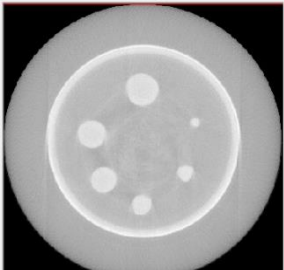

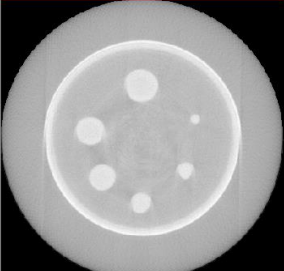
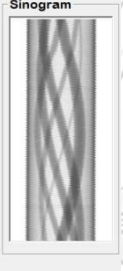
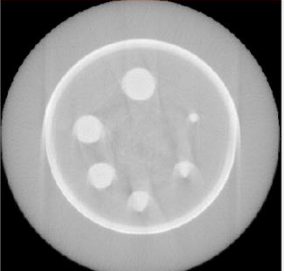

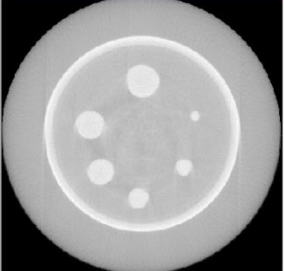
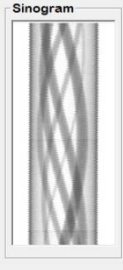
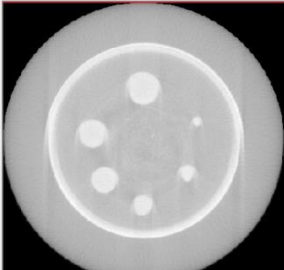
ตารางที่ 6.3 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 5.0 และ t 2 วินาที

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			7.83759
100			6.29025
110			5.60666
120			5.38047
130			4.98998

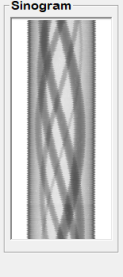
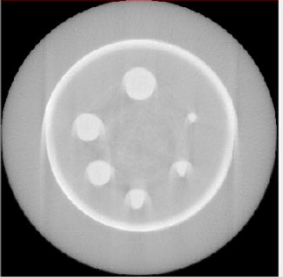
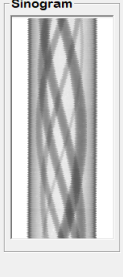
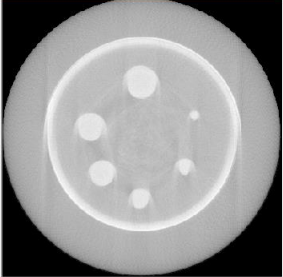
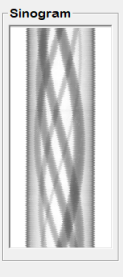
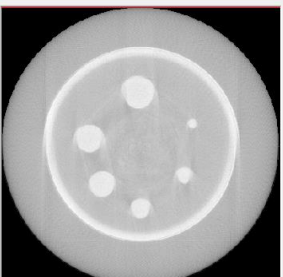
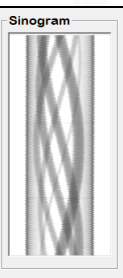
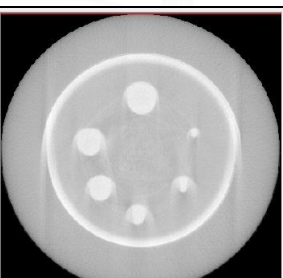
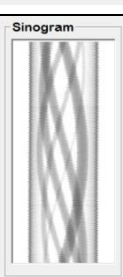
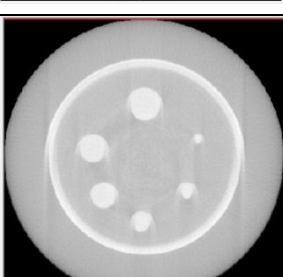
ตารางที่ 6.4 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 1 วินาที

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			4.51525
100			4.31968
110			3.23476
120			3.03524
130			2.95215

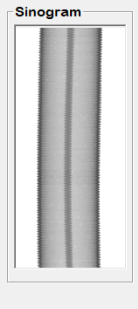
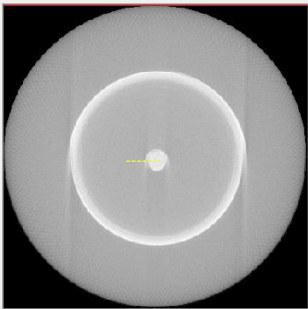

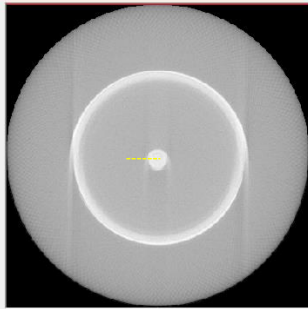

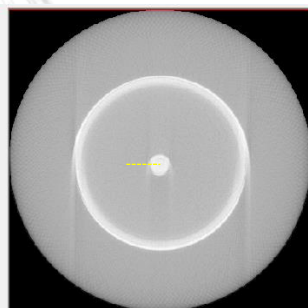

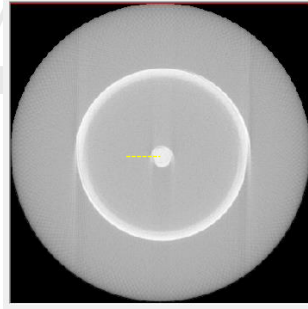

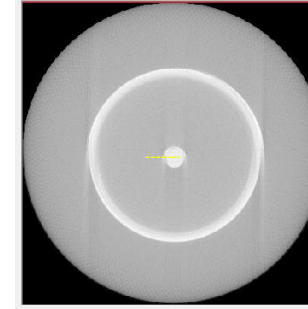
ตารางที่ 6.5 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 2.5 วินาที

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			6.11964
100			6.07533
110			4.32244
120			3.95904
130			3.95801

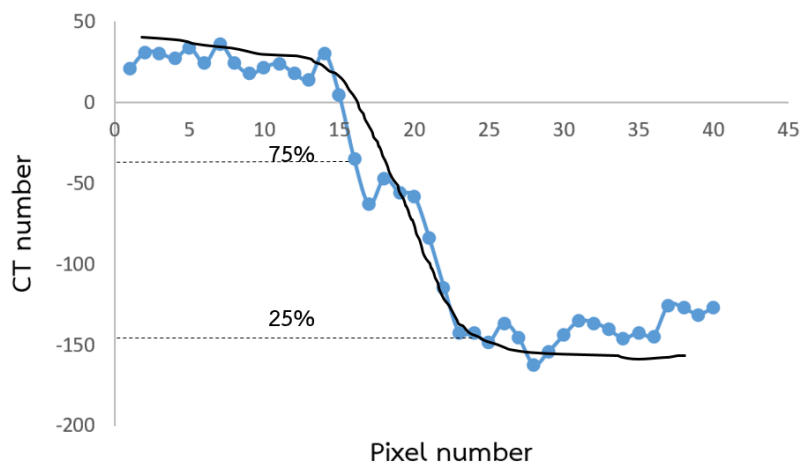
ตารางที่ 6.6 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 1 ที่พารามิเตอร์ของกล้อง ISO 400, F 4.0 และ t 3.2 วินาที

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image	Pixel noise
90			15.5696
100			15.3242
110			14.5279
120			13.9446
130			12.7458

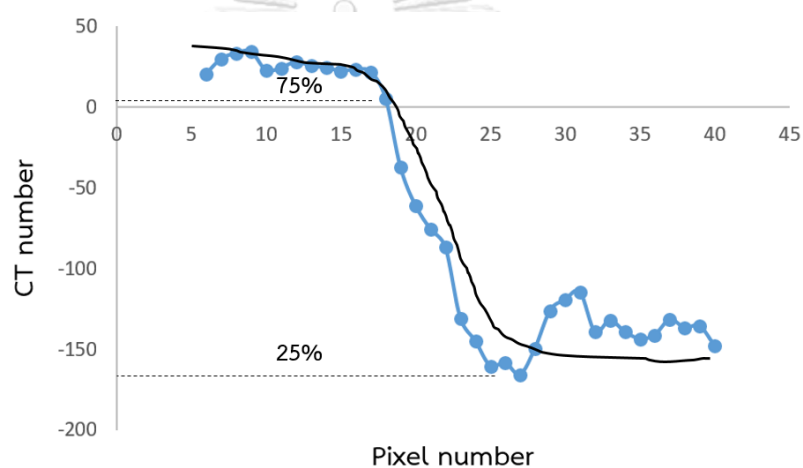
ตารางที่ 6.7 ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ 2 เพื่อหา Resolution ของภาพโทโมกราฟี

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	CT image
90		
100		
110		
120		
130		

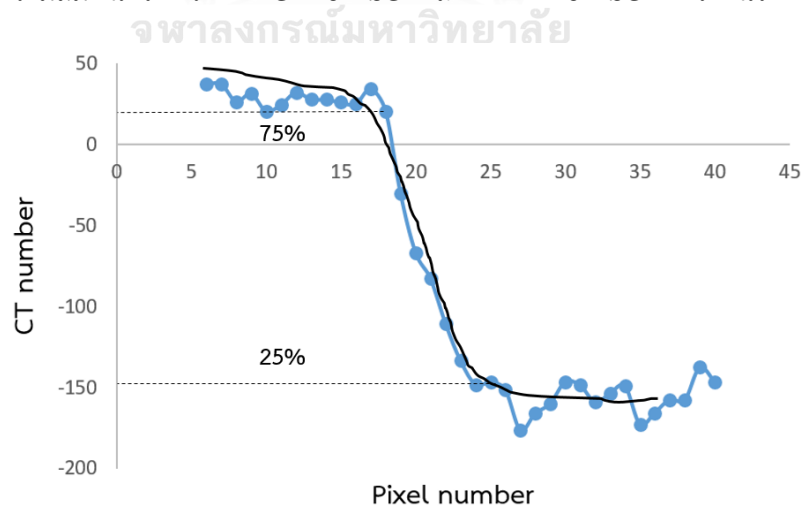




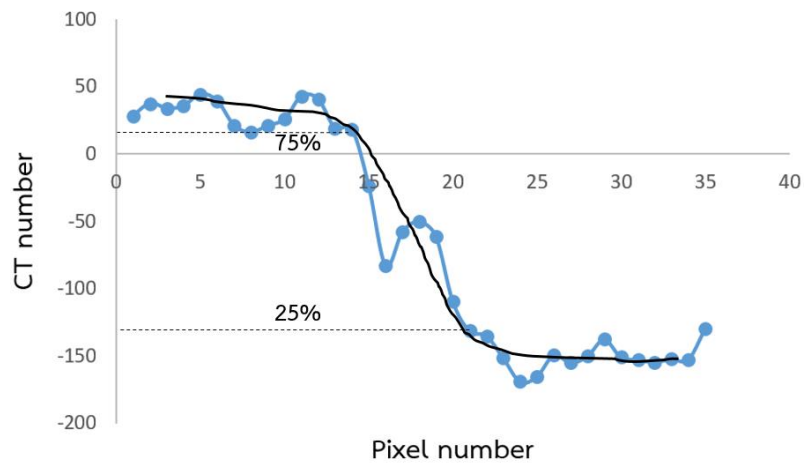
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV



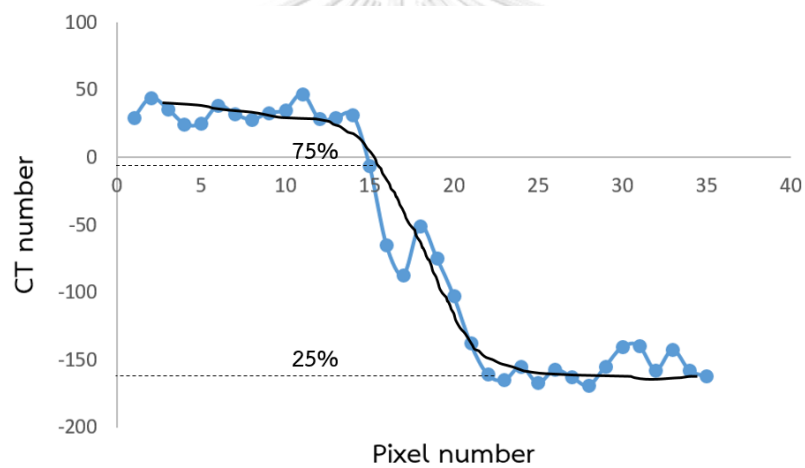
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV

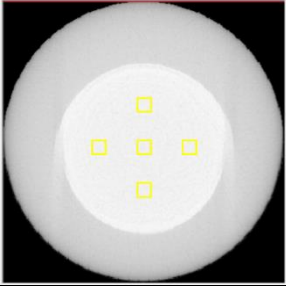
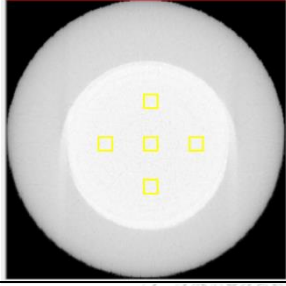
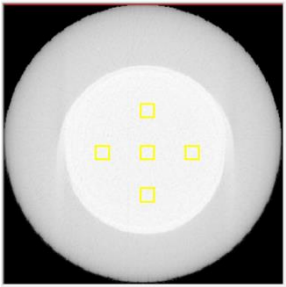
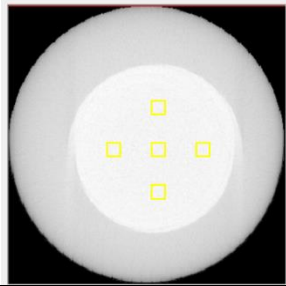
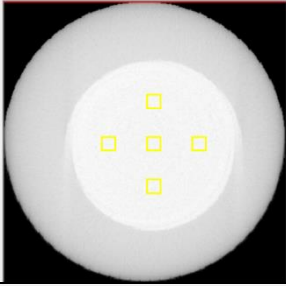


รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV




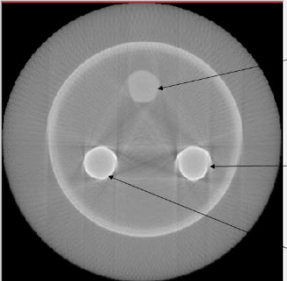

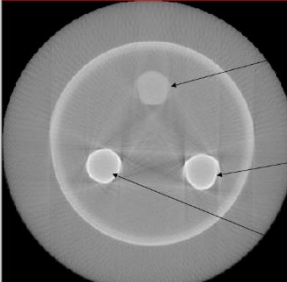

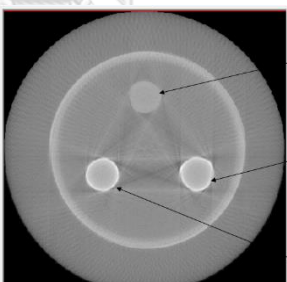

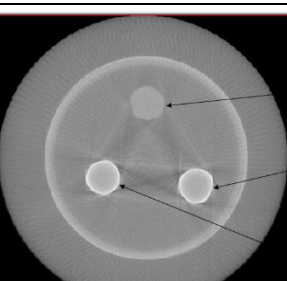
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pixel Number และค่า CT number ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

ตารางที่ 6.8 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหาความสม่ำเสมอของเลขซีที (Spatial Uniformity)


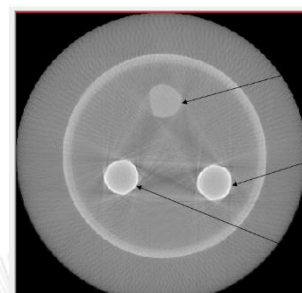
แรงดันไฟฟ้า (kV)	ภาพตัดขวางของวัตถุ	เลขซีที (CT number)				
		center	0°	90°	180°	270°
90		-11.82	-13.71	-12.81	-12.44	-11.88
100		-9.17	-10.85	-10.59	-10.64	-11.41
110		-9.48	-10.61	-10.10	-9.64	-9.34
120		-8.32	-8.54	-7.16	-7.18	-8.60
130		-7.18	-6.55	-4.76	-6.35	-7.60

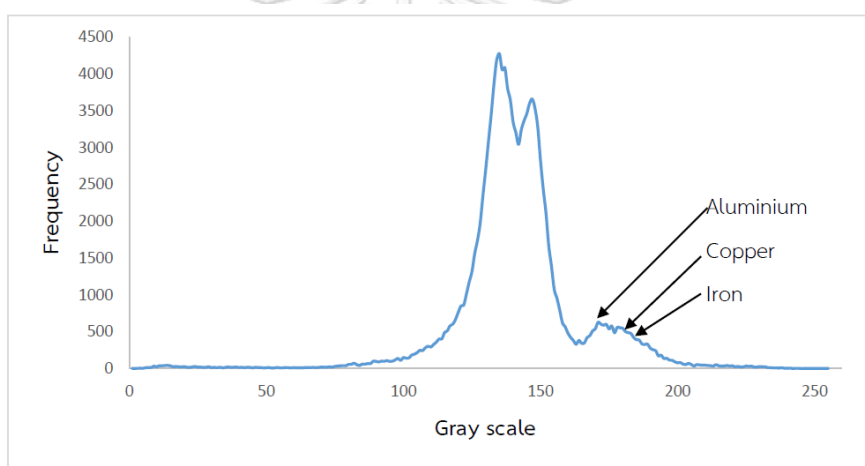
ตารางที่ 6.9 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF)

ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 4

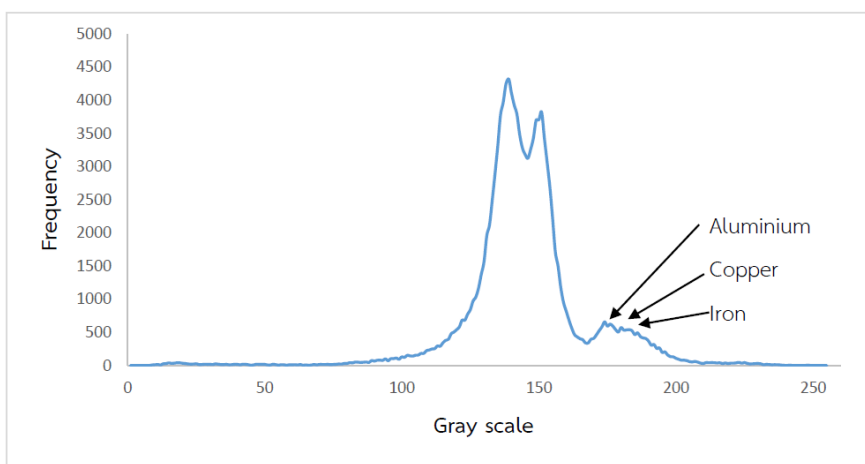
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
90		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminium Gray scale = 170 CT number = -75.72</li> <li>Copper Gray scale = 180 CT number = -116.40</li> <li>Iron Gray scale = 181 CT number = -121.13</li> </ul>
100		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminium Gray scale = 172 CT number = -77.22</li> <li>Copper Gray scale = 181 CT number = -116.58</li> <li>Iron Gray scale = 182 CT number = -118</li> </ul>
110		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminium Gray scale = 164 CT number = -80.98</li> <li>Copper Gray scale = 174 CT number = -125.13</li> <li>Iron Gray scale = 175 CT number = -129.49</li> </ul>
120		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminium Gray scale = 163 number = -84.81</li> <li>Copper Gray scale = 172 CT number = -131.80</li> <li>Iron Gray scale = 174 CT number = -138.14</li> </ul>

ตารางที่ 6.9 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF)  
ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 4 (ต่อ)

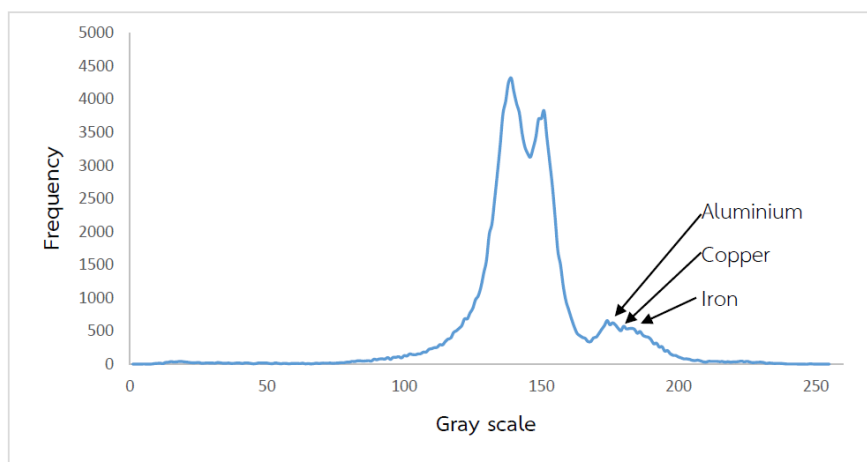
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
130		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminium Gray scale = 168 CT number = -87.97</li> <li>Copper Gray scale = 178 CT number = -138.02</li> <li>Iron Gray scale = 179 CT number = -138.02</li> </ul>



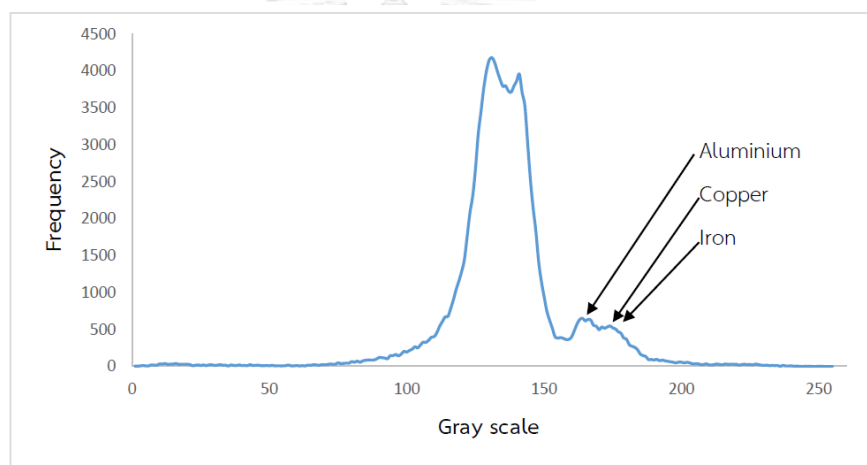
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV



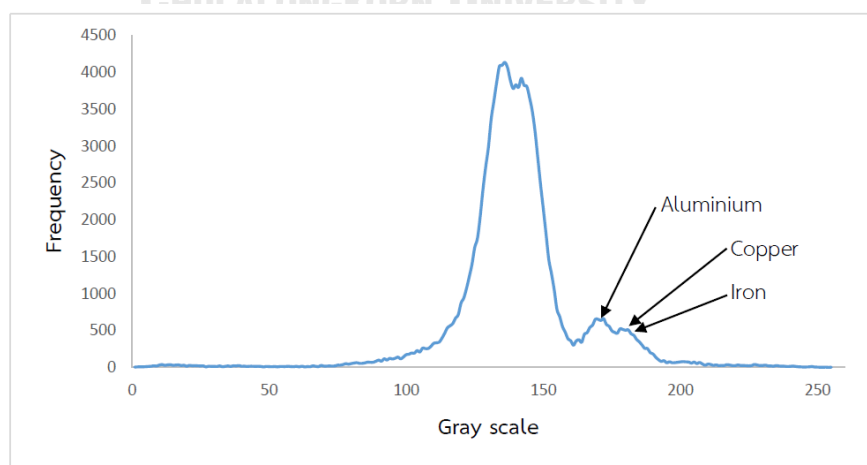
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV


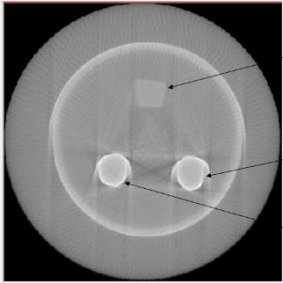

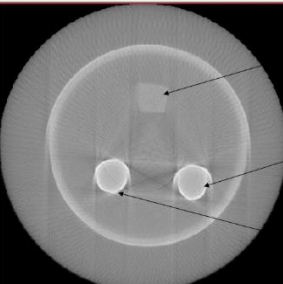

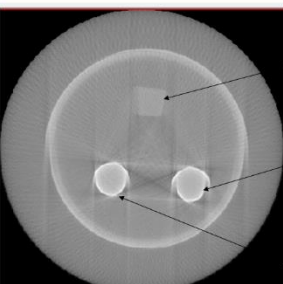

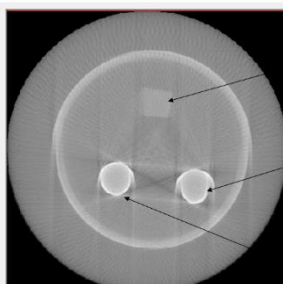


รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV


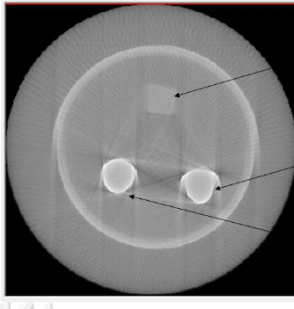


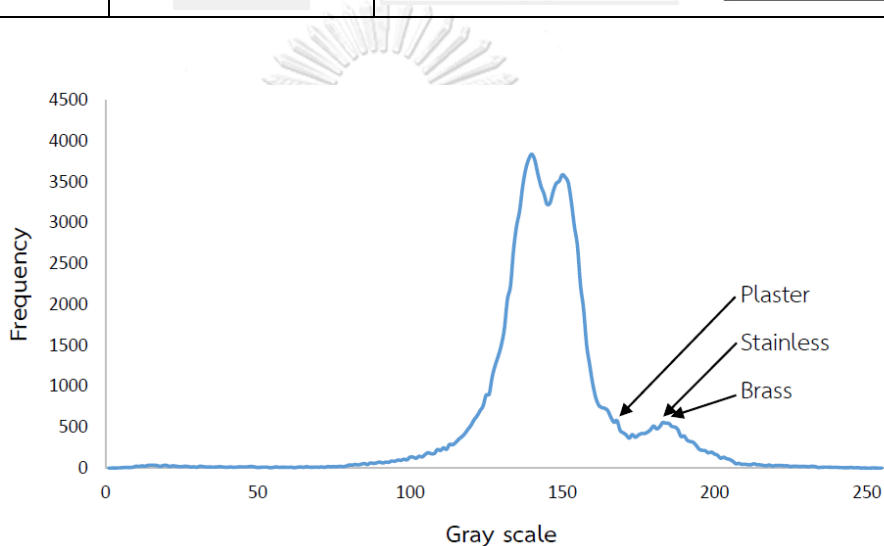
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

ตารางที่ 6.10 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF)  
ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 5

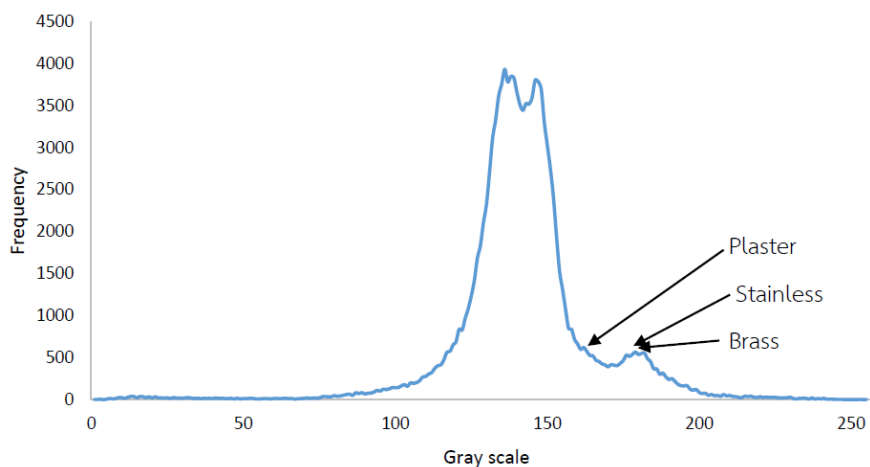
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
90		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Plaster Gray scale = 165 CT number = -40.88</li> <li>Brass Gray scale = 183 CT number = -109.17</li> <li>Stainless Gray scale = 182 CT number = -107.16</li> </ul>
100		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Plaster Gray scale = 161 CT number = -43.83</li> <li>Brass Gray scale = 179 CT number = -118.44</li> <li>Stainless Gray scale = 178 CT number = -114.41</li> </ul>
110		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Plaster Gray scale = 162 CT number = -46.42</li> <li>Brass Gray scale = 181 CT number = -130.13</li> <li>Stainless Gray scale = 178 CT number = -119.39</li> </ul>
120		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Plaster Gray scale = 164 CT number = -46.81</li> <li>Brass Gray scale = 184 CT number = -139.01</li> <li>Stainless Gray scale = 182 CT number = -131.08</li> </ul>

ตารางที่ 6.10 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF) ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 5 (ต่อ)

แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
130		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Plaster Gray scale = 161 CT number = -48.20</li> <li>Brass Gray scale = 182 CT number = -149.26</li> <li>Stainless Gray scale = 181 CT number = -140.79</li> </ul>

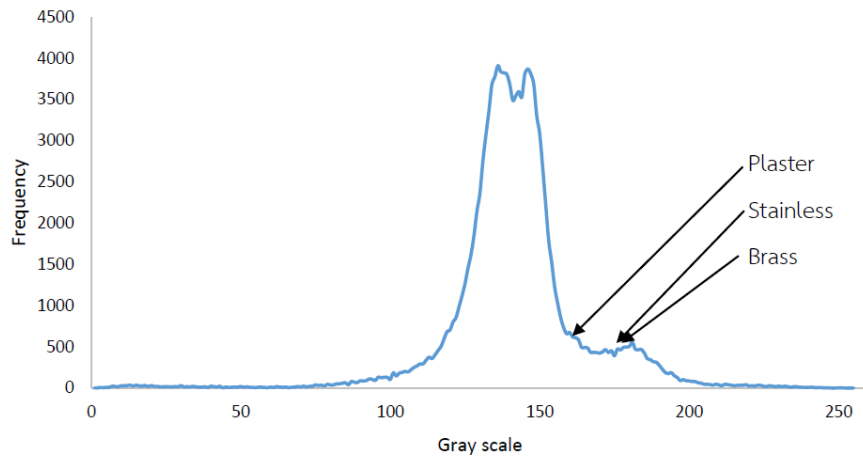


รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV

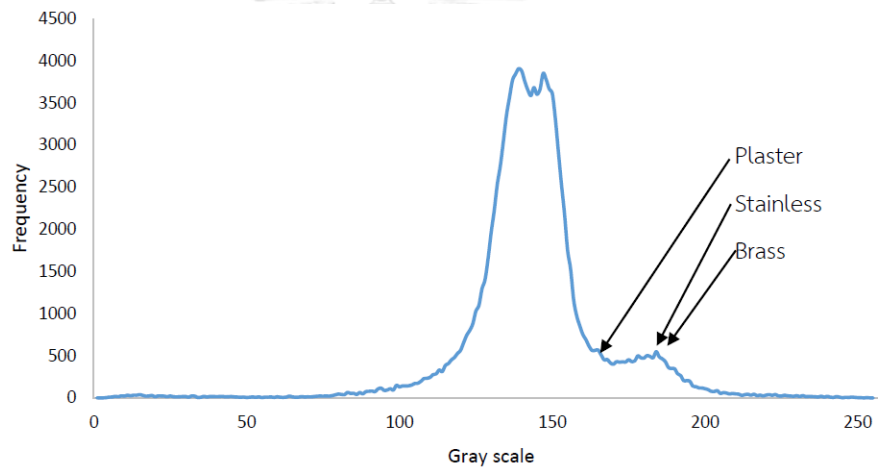


รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV

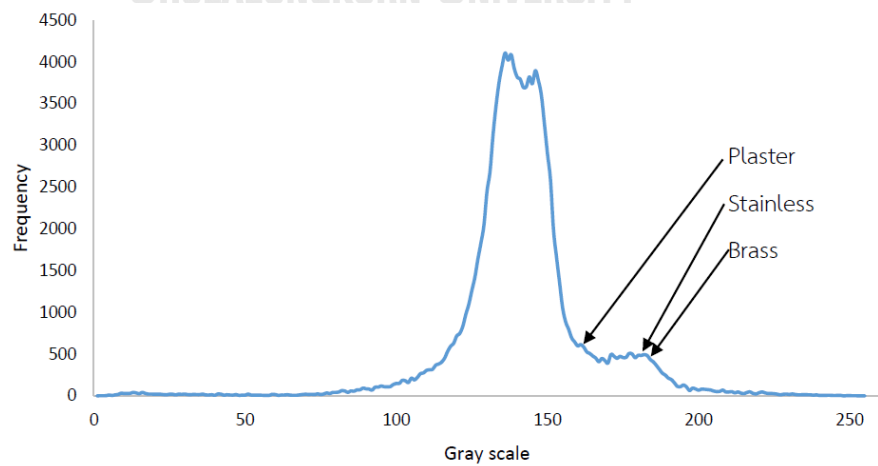




รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV


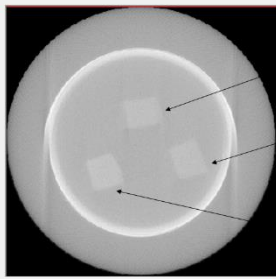

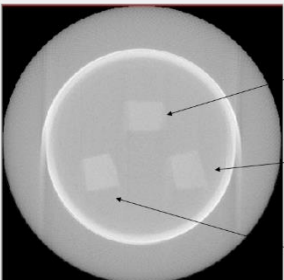

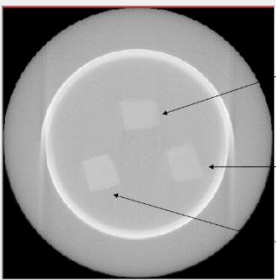

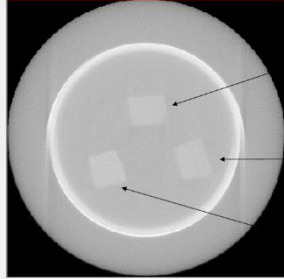


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV


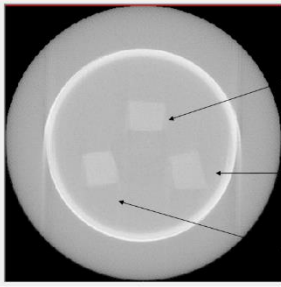


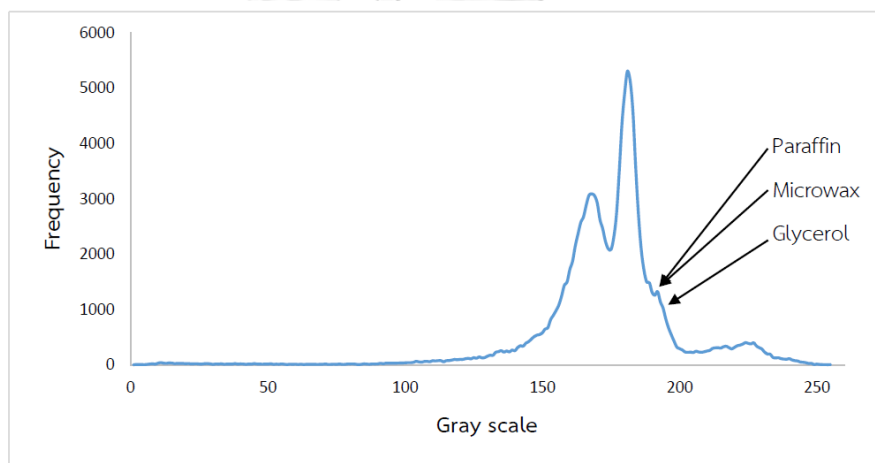
รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

ตารางที่ 6.11 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF)  
ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 6

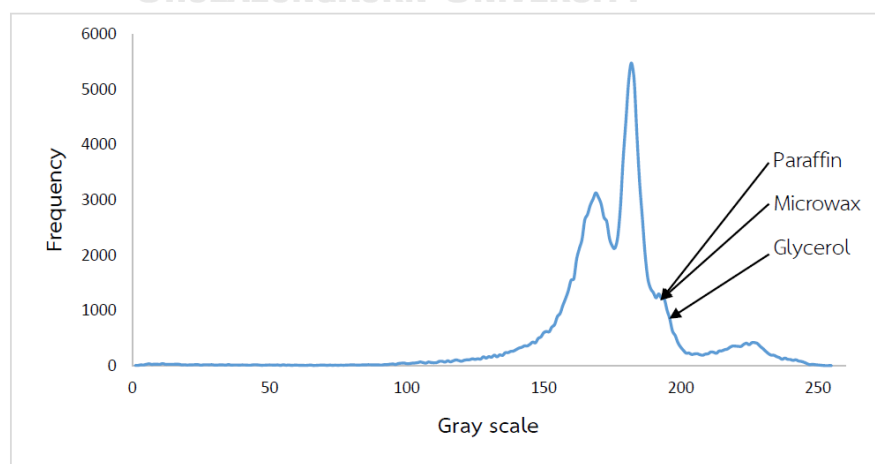
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
90		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Paraffin Gray scale = 191 CT number = -10.58</li> <li>Microwax Gray scale = 191 CT number = -10.52</li> <li>Glycerin Gray scale = 195 CT number = -23.30</li> </ul>
100		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Paraffin Gray scale = 192 CT number = -9.91</li> <li>Microwax Gray scale = 192 CT number = -10.76</li> <li>Glycerin Gray scale = 196 CT number = -20.97</li> </ul>
110		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Paraffin Gray scale = 195 CT number = -9.79</li> <li>Microwax Gray scale = 195 CT number = -9.80</li> <li>Glycerin Gray scale = 198 CT number = -20.77</li> </ul>
120		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Paraffin Gray scale = 197 CT number = -9.22</li> <li>Microwax Gray scale = 196 CT number = -7.16</li> <li>Glycerin Gray scale = 200 CT number = -20.92</li> </ul>

ตารางที่ 6.11 การทดสอบหาคุณภาพของภาพเพื่อหา Probability Distribution Function (PDF)  
ISO 400, F 4.0 และ t 2 วินาที ของวัตถุตัวอย่างที่ 6 (ต่อ)

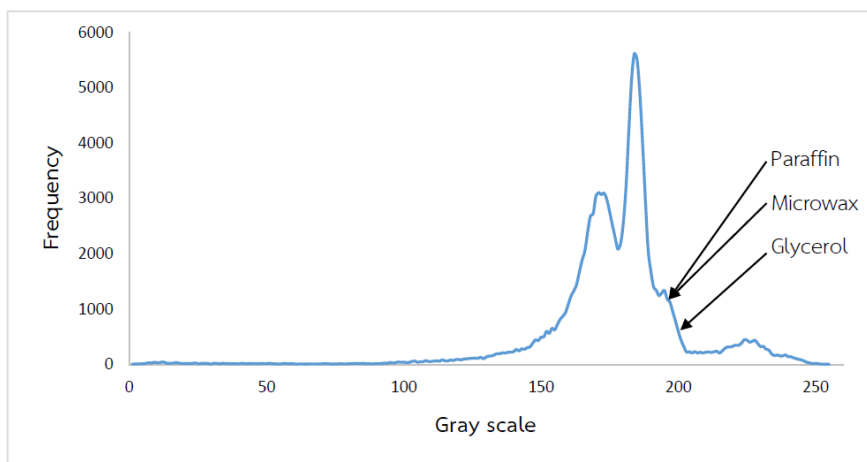
แรงดันไฟฟ้า(kV)	Sinogram	ภาพตัดขวางของวัตถุ
130		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Paraffin Gray scale = 196 CT number = -8.74</li> <li>Microwax Gray scale = 195 CT number = -6.99</li> <li>Glycerin Gray scale = 199 CT number = -19.97</li> </ul>



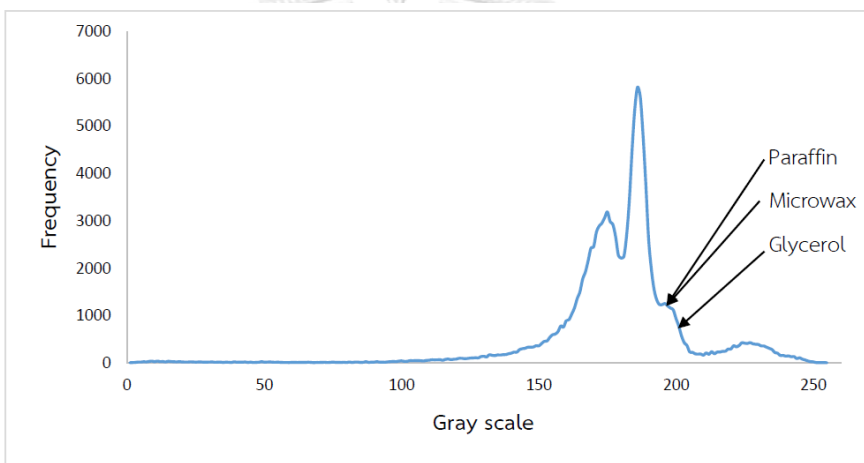
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 90 kV



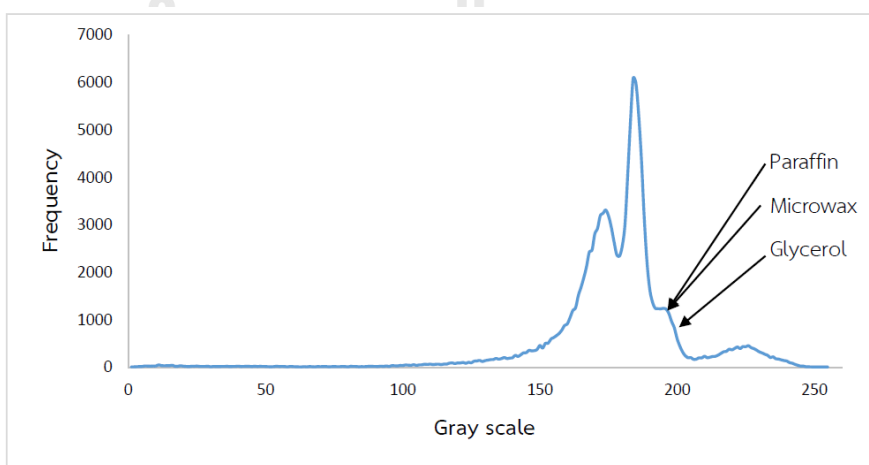
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 110 kV



รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 120 kV



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gray Scale และค่า Frequency ที่แรงดันไฟฟ้า 130 kV

## บรรณานุกรม

1. รัตติยา คุณากร, การพัฒนาระบบสแกนสำหรับการสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เทคนิคการกระเจิงของรังสีแกมมา. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. นารานัน รัตน์ไพโรจน์ขจี, การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน. 2544, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ฉัตรชัย ชูติรัตนานันท, การปรับค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. เกรียงไกร ธัญธนกุล, การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยใช้ซีไอเอสแบบแถว. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. มงคล ไธนุ่น, การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บบันทึกโดยแผ่นบันทึกภาพ. 2553, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. สุรกิจ ขาวแผ้ว, การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาพลังงานต่ำชนิดเคลื่อนย้ายได้สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. Rao, D.V., R. Cesareo, and A. Brunetti, *Computed tomography with imageintensifier imaging and characterization of material* 1999.
8. Phillips, D.H. and J.J. Lannutti, *Measuring physical density with X-ray computed tomography*. 1997.
9. ศุภวิภู สุขเพ็ญ, การวัดปริมาณรังสีเอกซ์จากการตรวจวินิจฉัย และแนวทางการใช้รังสีอย่างเหมาะสม. 2559, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
10. JT, B., et al., *The essential physics of medical imaging, Third edition, Lippincott Williams & Wilkins*. 2012, USA: Wolters Kluwers business.
11. Sun W, Brown S B, and Leach R K, *An overview of industrial X-ray computed tomography*. 2557. p. 1-9.
12. Carmignato, S., W. Dewulf, and R.L. Leach, *Industrial X-ray Computed Tomography*. Gewerbestrasse. 2018, Switzerland.
13. มานัส มงคลสุข, เอกซเรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟี หลักการทางฟิสิกส์ เทคนิค และการควบคุมคุณภาพ. 2546, ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังน่านาวิทยา.
14. V.G.Wimalasena. *raysum in CT*. 2018 [cited 2018 14 November].
15. ศิวะ สุวรรณมณี, การหาความเร็วในการไหลและเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเลือดจุลภาคโดยกระบวนประมวลผลภาพและวีดีโอ. 2557, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

16. นพรัตน์ แก้วใหม่, การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่บันทึกภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลสำหรับการคัดกรองของเหลว. 2560, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
17. วิฑูลย์ งามขำ. โปรแกรม *Visual basic* 6. 2561 [cited 2561 14 พฤศจิกายน]; Available from: <http://www.chaiwit.ac.th/krutoon/vb6/a1.html>.
18. โปรแกรม *Visual basic* 6. 2018 [cited 2018 14 November]; Available from: <http://hackdee.biz/community/index.php?threads/lingkhdaonohld-visual-basic-6-0-enterprise-edition.374/>.
19. Takahashi , R. ส่วนประกอบของกล้องดิจิทัล. 2018 [cited 2018 31 October]; Available from: <https://snapshot.canon-asia.com/thailand/article/th/lesson-2-knowing-the-different-parts-of-the-camera>.
20. Suzuki, T. รูรับแสง. 2018 [cited 2018 28 October]; Available from: <https://snapshot.canon-asia.com/thailand/article/th/camera-basics-1-aperture>.
21. *Arduino*. 2561 [cited 2018 18 December]; Available from: <https://reference.wolfram.com/language/ref/device/Arduino.html>.
22. กิตติวินท์ เอี่ยมสำอางค์, การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 โดยใช้ฉากรื่องรังสีชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายพนพน สาวีโรจน์
วัน เดือน ปี เกิด	23 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลมิตรภาพสามัคคี อำเภอนาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย ปริญญาตรี : วิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสีเทคนิค) เกียรตินิยมอันดับ 2 ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล และวิทยาศา สตรบัณฑิต (อาหาร โภชนาการและการประยุกต์) สาขาวิชามนุษยนิเวศ ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ปริญญาโท : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีนิวเคลียร์) ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	94 ซอยราษฎร์สันติ ถนนกาญจนวนิช ตำบลคอหงส์ อำเภอนาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110