

การเปรียบเทียบค่าเลขซีที่จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม



นายฉัตรชัย ชูศิริตนานันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CALIBRATION OF CT NUMBER FROM TOMOGRAPHIC IMAGE
USING FILM TECHNIQUE



Mr. Chatchai Chutirattananant

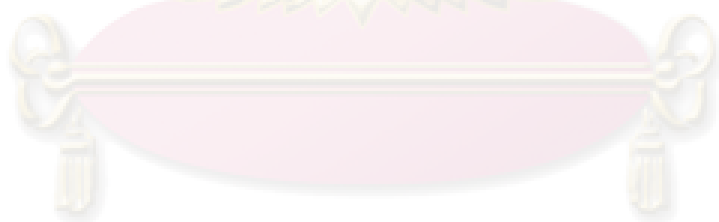
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology
Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

ฉัตรชัย ชุตีรัตนานันท : การปรับเทียบค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม.
(CALIBRATION OF CT NUMBER FROM TOMOGRAPHIC IMAGE USING FILM
TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.สมยศ ศรีสถิตย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม: ศศ.อรรณพร ภัทรสุมันต์, 61 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์หาค่าเลขซีที (CT number) ของภาพโทโมกราฟีที่สร้างจากเทคนิคฟิล์ม ซึ่งได้ข้อมูลจากข้อมูลโปรไฟล์ที่บันทึกบนฟิล์ม ค่าเลขซีทีคำนวณโดยใช้วิธีคอนโวลูชันฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน(convolution filter backprojection) นำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระดับสีเทาและแสดงเป็นภาพโทโมกราฟีบนจอโมโครคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมปรับเทียบข้อมูลซีที (CT number analysis program) ที่พัฒนาขึ้น เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขซีทีกับค่า kVp ที่ค่าเอกซ์โพเชอร์ต่าง ๆ ซึ่งพบว่า วัสดุชนิดเดียวกันขนาดเท่ากันค่าเลขซีทีจะใกล้เคียงกัน วัสดุชนิดเดียวกันขนาดต่างกันวัสดุขนาดเล็กจะมีค่าเลขซีทีมากกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุต่างชนิดกันขนาดเท่ากันวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีค่าเลขซีทีมากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก.



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิสิต.....ฉัตรชัย ชุตีรัตนานันท.....
สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....สมยศ ศรีสถิตย์.....
ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970267721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: CT NUMBER

CHATCHAI CHUTIRATTANANANT: CALIBRATION OF CT NUMBER FROM TOMOGRAPHIC IMAGE USING FILM TECHNIQUE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR: ASSOC. PROF SOMYOT SRISATIT, THESIS COADVISOR: ASST. PROF. ATTAPORN PATTARASUMUNT, 61 pp.

In this research, analysis of CT number from a tomographic image using film technique was investigated. A CT image was reconstructed from profile data recorded on the film. The CT numbers were calculated from the convolution filter backprojection method. These numbers were converted to grey scale color and displayed as a CT image on a microcomputer monitor. The CT number analysis program was developed and used to analyze the relationship between CT number and kVp at different exposures. It was found that, for the same type and equal size of material, the CT number was similar. For the same type but different sizes of material, the CT number of the smaller size was higher than the bigger one. In addition, for the different types of material, the one with less density has higher CT number than the one with higher density.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Nuclear Technology... Student's signature..... *ชัชชัย ชุตินันท์*.....
Field of study....Nuclear Technology....Principal Advisor's signature..... *สมยศ สริสัติ*.....
Academic year.....2008.....Co-advisor's signature..... *Attaporn Pattarasumunt*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จลงได้หากปราศจากคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และการถ่ายทอดวิทยาการความรู้จาก รศ. สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผศ.อรรถพร ภัทรสุมันต์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งได้ตรวจทาน แก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ รศ.ศิวลี สุริยาปี ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องสแกนฟิล์ม Vdar VXR-16 DosimetryPro film scanner

ขอขอบคุณ ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อาจารย์จเด็จ เย็นใจ ภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณคุณนันทวัฒน์ อุดี คุณสุรกิจ ขาวแผ้ว และคุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลต่างๆ รวมทั้งคำแนะนำเกี่ยวกับ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นิสิตในภาคนิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกท่านที่มีส่วนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคุณเขมะจิตติ เขมะโยธินที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณมารดาที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน และให้การสนับสนุนทางการศึกษา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจจะศึกษา และทำการพัฒนาต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 หลักการเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	4
2.1.1 วิธีการสแกนแบบรังสีลำแคบ (narrow beam)	4
2.1.2 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (fan beam).....	5
2.1.3 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (cone beam)	5
2.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	6
2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์.....	6
2.2.2 เรย์ซัม (Ray-sum)	8
2.2.3 โปรไฟล์ (Profile)	8
2.2.4 แบคโปรเจกชัน (Back-Projection)	9
2.2.5 ฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน (Filtered Back-Projection)	11
2.2.6 วิธีการกรองด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Shepp-Logan.....	12
2.3 ภาพโทโมกราฟีหรือภาพซีที.....	13
2.3.1 เลขซีที (CT number)	13
2.3.2 การแสดงผลของภาพซีที.....	15

3. วัสดุอุปกรณ์ และการพัฒนาโปรแกรมเปรียบเทียบข้อมูลซีทีจากภาพโทโมกราฟี	16
3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี.....	16
3.1.1 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	16
3.1.2 ชุดกำบังรังสีสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	17
3.1.3 เครื่องสแกนฟิล์มVdar VXR-16 DosimetryPro film scanner.....	18
3.2 การพัฒนาโปรแกรมเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....	19
3.2.1 รายละเอียดโปรแกรมเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....	21
4. วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัย.....	23
4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	23
4.1.1 ออกแบบวัตถุตัวอย่างเพื่อทำการทดลอง.....	23
4.1.2 การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	26
4.1.3 กระบวนการล้างฟิล์ม.....	28
4.2 ผลการวิจัย.....	31
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างที่มีวัสดุชนิดเดียวกัน และขนาดเท่ากัน.....	31
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน และขนาดต่างกัน....	38
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานต่างชนิดกันและขนาดเท่ากัน.....	40
4.3 การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมเปรียบเทียบค่าเลขซีทีจากผลการทดลอง.....	48
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเท่ากัน.....	52
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกัน.....	52
5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุต่างชนิดกันที่มีขนาดเท่ากัน.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	61

ตาราง

หน้า

2.1 ตัวอย่างเลขซีทีของเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ ในทางการแพทย์.....	14
4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุ.....	27
4.2 ค่าเฉลี่ยบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง A	35
4.3 ค่าเฉลี่ยบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง B	36
4.4 ค่าเฉลี่ยบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง C	37
4.5 แสดงค่าเลขซีทีของแท่งทองแดงที่มีขนาดต่างกัน ที่ 160 kVp 270 mAs	39
4.6 แสดงค่าเลขซีทีของแท่งทองแดงที่มีขนาดต่างกัน ที่ 160 kVp 315 mAs	39
4.7 แสดงค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ 140 kVp และค่า Exposure ต่างๆของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper).....	43
4.8 แสดงค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ 150 kVp และค่า Exposure ต่างๆของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper).....	45
4.9 แสดงค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ 160 kVp และค่า Exposure ต่างๆของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper).....	47



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพประกอบ

หน้า

2.1	วิธีการสแกนแบบรังสีลำแคบ.....	4
2.2	วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปพัด.....	5
2.3	วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย.....	5
2.4	แสดงรูปของทางเดินรังสีเอกซ์ที่ผ่านตัวกลาง 3 ชนิด ก) ตัวกลางที่มีชนิดเดียว ข) ตัวกลางที่มี 2 ชนิด ค) ตัวกลางที่มีหลายชนิด.....	7
2.5	แสดงการเกิดภาพตามวิธีการเบคโปรเจกชัน ก.) โพรไฟล์ของวัตถุที่บันทึกได้ในสองทิศทางคือ $0^0(1)$ และ $90^0(2)$ วัดเทียบแกน Y ข.) โพรไฟล์ในรูป ก. นำมาซ้อนกันอย่างเหมาะสมเพื่อสร้างภาพ.....	10 10
2.6	แสดงการเกิดอาทิแฟลคต์ ก) โพรไฟล์ของวัตถุรูปวงกลมในสองทิศทาง ข) โพรไฟล์ A และ D มีส่วนทำให้ความหนาแน่นของจุดที่อยู่นอกภาพของวัตถุ มีค่าสูงขึ้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่คมชัด.....	11 11
2.7	แสดงการปรับปรุงโปรไฟล์ ก) โพรไฟล์ของวัตถุรูปวงกลมที่ปรับปรุงแล้ว ข) โพรไฟล์ A, B และ D มีส่วนทำให้ฟิสิกเซลล์ที่อยู่นอกวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้นแต่ โปรไฟล์ C จะทำให้ความหนาแน่นลดกลับมาสู่สภาพเป็นจริงทำให้ขอบภาพคมชัดขึ้น.....	12 12
2.8	แสดงขั้นตอนสำคัญของกระบวนการสร้างภาพซีที.....	13
2.9	แสดงการกำหนดเจดสีให้ข้อมูลเพื่อนำไปแสดงผล.....	15
3.1	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	16
3.2	แผนภาพหลักการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยเทคนิคฟิล์ม.....	17
3.3	ชุดอุปกรณ์กำบังรังสีเพื่อการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	18
3.4	เครื่องสแกนฟิล์ม V-dar VXR-16 Dosimetry Pro film scanner	18
3.5	แผนภาพขั้นตอนการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีและวิเคราะห์เลขซีที.....	20
3.6	เมนูหลักของโปรแกรมเปรียบเทียบข้อมูลเลขซีที.....	21
4.1	ตัวอย่าง A.....	23
4.2	ตัวอย่าง B.....	24
4.3	ตัวอย่าง C.....	24
4.4	ตัวอย่าง D.....	25

4.5 ตัวอย่าง E..... 25

4.6 การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์..... 26

4.7 ฟิล์มเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม..... 29

4.8 ตัวอย่างข้อมูลโปรไฟล์ ณ มุมหนึ่ง.....30

4.9 ภาพโทโมกราฟี.....30

4.10 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง A (Steel) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก)140 kVp 150 mAs (ข) 150 kVp 150 mAs (ค) 160 kVp 150 mAs.....32

4.11 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง B (Brass) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก)140 kVp 150 mAs (ข) 150 kVp 150 mAs (ค) 160 kVp 150 mAs.....33

4.12 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง C (Copper) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก)140 kVp 150 mAs (ข) 150 kVp 150 mAs (ค) 160 kVp 150 mAs.....34

4.13 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง E (Copper) ที่ 160 kVp 270 mAs.....38

4.14 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง E (Copper) ที่ 160 kVp 315 mAs..... 38

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ ขนาดของวัตถุ.....39

4.16 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก)140 kVp 240 mAs (ข) 140 kVp 260 mAs (ค) 140 kVp 270 mAs
(ง) 140 kVp 292 mAs.....41

4.17 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก) 150 kVp 240 mAs (ข) 150 kVp 260 mAs (ค) 150 kVp 270 mAs
(ง) 150 kVp 292 mAs.....41

4.18 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper) เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น
(ก)160 kVp 240 mAs (ข) 160 kVp 260 mAs (ค) 160 kVp 270 mAs
(ง) 160 kVp 292 mAs.....42

4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 140 kVp43

4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 150 kVp.....45

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 160 kVp.....47

4.22 เมนู Load data ของโปรแกรมการเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....49

4.23 เมนู Displayของโปรแกรมการเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....49

4.24 เมนู Displayของโปรแกรมการเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....50

4.25 เมนู Load pictureของโปรแกรมการเปรียบเทียบข้อมูลซีที.....50

4.26 แสดงผลการคำนวณเมื่อคลิกซ้ายที่เมาส์.....51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคนิคนิวเคลียร์เพื่อพัฒนางานทางด้านอุตสาหกรรมและด้านการแพทย์กำลังมีใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น การถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายให้ผลรวดเร็วถูกต้องและแม่นยำ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นผู้ตรวจสอบต้องจะมีความรู้ความชำนาญรวมทั้งมีความรู้เกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสี ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ผลการตรวจสอบได้ด้วย การถ่ายภาพวัตถุด้วยรังสีจากหลายๆระนาบ เมื่อนำข้อมูลความค่าที่อ่านได้จากภาพถ่ายมาคำนวณสร้างภาพ ภาพที่ได้จะเป็นภาพตัดขวางของวัตถุเราเรียกภาพนั้นว่า “ภาพโทโมกราฟี (tomography)” หรือภาพตัดขวาง ภาพโทโมกราฟีที่ได้จะเป็นลักษณะของความค่าที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งต่างๆบนภาพตามความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุตัวอย่างมา ค่าความเข้มภายในภาพตัดขวางนั้นเรียกว่า “ค่าเลขซีที (CT number)” ซึ่งค่าเลขซีทีจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเราสามารถกำหนดใช้ค่าเลขซีทีต่ำสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวกลางที่มีค่าสูงได้ เหตุผลที่เราต้องนำเลขซีทีมาใช้ในการแสดงภาพแทนการแสดงด้วยสัมประสิทธิ์การลดทอน ก็เพื่อต้องการให้ความแตกต่างกันของวัตถุที่มีความหนาแน่นต่างกันน้อยๆ ให้สามารถแสดงความแตกต่างออกมาให้เห็นเด่นชัดขึ้น การที่เราจะวิเคราะห์ภาพโทโมกราฟีที่ได้ว่าเป็นชนิดของธาตุใดๆจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเปรียบเทียบค่าเลขซีทีกับความหนาแน่นของของวัตถุเพื่อที่จะนำภาพถ่ายที่ได้มาเปรียบเทียบกับวัตถุชนิดที่นำมาถ่ายภาพนั้นๆเป็นชนิดใด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากเทคนิคฟิล์มเพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างชิ้นงานทดสอบเพื่อการเปรียบเทียบ
- 1.3.3 ทดสอบและสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขซีทีกับตัวแปรและพลังงานต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น และขนาดของวัตถุ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดเตรียมและทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 1.4.3 ออกแบบชิ้นงานและถ่ายภาพเพื่อเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยเทคนิคฟิล์ม
- 1.4.4 สร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขซีทีกับตัวแปรและพลังงานต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น และขนาดของวัตถุ
- 1.4.5 ทดสอบความถูกต้องของกราฟเปรียบเทียบโดยใช้ชิ้นงานที่ออกแบบบางชนิด
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคในการสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าเลขซีทีเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของวัตถุจากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 สมยศ ศรีสถิตย์ และ อรรถพร ภัทรสุมันต์ [1] ได้ศึกษาเรื่อง การคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ลงบนฟิล์มที่ละลายๆระนาบ โดยแต่ละระนาบหมายถึงการหมุนวัตถุด้วยมุมที่ละ 3.6 องศา จาก 0 จนถึง 180 องศาเป็นอย่างต่ำ ภาพเอกซเรย์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการล้างฟิล์มแล้ว จะถูกนำไปอ่านความดำด้วยเครื่องอ่านความดำอัตโนมัติที่ออกแบบให้ทำงานโดยอัตโนมัติ ความคุมด้วยระบบไมโครคอมพิวเตอร์และข้อมูลโปรไฟล์ที่อ่านได้ จะถูกบันทึกไว้บนแผ่นดิสก์ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC รุ่น 80486 จอภาพสี VGA วิธีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้น ใช้หลักการคอนโวลูชัน ฟิลเตอร์ แบคโปรเจกชัน(Convolution Filter Back-Projection) โดยเลือกใช้ฟิลเตอร์ของ Shepp-Logan ผลการวิจัยพบว่าภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่ได้มีความคมชัดและให้รายละเอียดเป็นที่น่าพอใจ

1.6.2 สุเมธ ทิพย์ไกรสร [8] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบสแกนอ่านค่าความดำรายละเอียดสูงสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบสแกนอ่านค่าความดำรายละเอียดสูงสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ซึ่งทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบที่มีความบกร่องขนาดเล็กได้

1.6.3 นีวร ศรีคุณ [7] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจากสแกนเนอร์มือถือเจดิสเทท ข้อมูลความค่านฟิล์มที่อ่านได้จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มของรังสี และจะถูกเปลี่ยนให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข แล้วบันทึกลงฮาร์ดดิสก์ของไมโครคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติ ระบบนี้สามารถเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มที่มีขนาดไม่เกิน 8.4 ซม. x 17 ซม. ด้วยความละเอียดของข้อมูลและระดับความเข้มไม่น้อยกว่า 100 จุด ต่อนิ้ว และ 64 ระดับตามลำดับ

1.6.4 วิชรพงษ์ ปถมพานิชย์ [9] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนา ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้ประยุกต์วิธี การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยมีเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นแหล่งกำเนิดรังสี และเส้นใยพลาสติกนำแสงเคลือบปลายด้วยสารซินทิลเลเตอร์เป็นหัววัดรังสีเอกซ์ สามารถสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากวัตถุตัวอย่างที่มีขนาดไม่เกิน 10 ซม. x 10 ซม. ด้วยโหมดการหมุนด้วยมุมทีละ 1.8, 3.6 หรือ 7.2 องศา และสเถ็ปของการสแกนเท่ากับ 0.6 และ 1 มม. ตามลำดับ จากการทดลองเก็บข้อมูลโปรไฟล์ของวัตถุตัวอย่าง 7 ชนิดแล้วนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี พบว่าภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจ

1.6.5 นารายณ์ รัตนไพโรจน์จจิ [10] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนา ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองนิวตรอน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ซึ่งออกแบบชุดอุปกรณ์เป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ระบบถ่ายภาพนิวตรอนประกอบด้วยชุดหมุนชิ้นงานควบคุมระยะไกล และกล้องมองภาพนิวตรอน ส่วนที่สองคือ ระบบแสดงภาพ และเก็บบันทึกสัญญาณภาพประกอบด้วยไมโครคอมพิวเตอร์พร้อมด้วยระบบเชื่อมโยงสัญญาณภาพ และเครื่องบันทึกวีดิทัศน์ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์นั้นกำหนดให้ชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3 เซนติเมตร หมุนด้วยมุมทีละ 1.8 หรือ 3.6 องศา โดยใช้เทอร์มัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 เคนเครื่องที่ก้าง 1200 กิโลวัตต์ พบว่าคุณภาพของข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนการเก็บแบบรวมเฟรม และภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเลือกเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมตั้งแต่ 300 เฟรมขึ้นไป ได้ค่ารีโซลูชันของภาพโทโมกราฟีเท่ากับ 200 ไมครอน

บทที่ 2

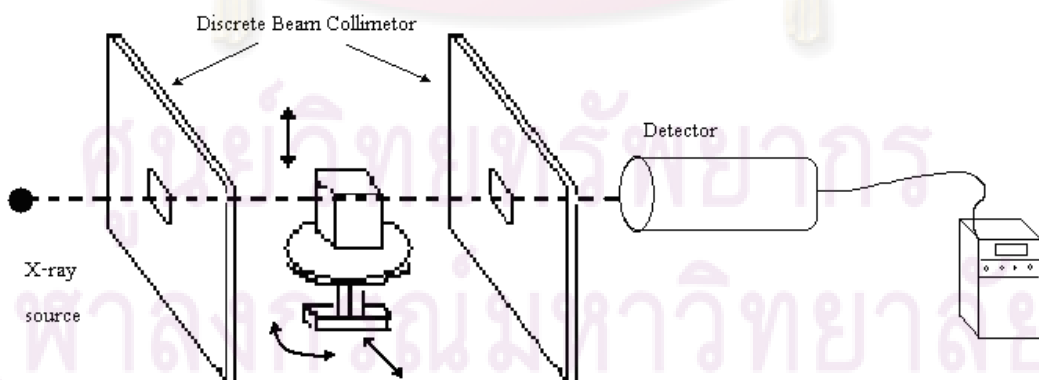
ทฤษฎี

2.1 หลักการเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี^[1]

โดยทั่วไปการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้น ใช้หลักการทะลุผ่านของรังสีต่อวัตถุ ตัวอย่าง ซึ่งเมื่อเก็บข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ แล้วนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง และแสดงผลเป็นภาพในลักษณะของภาพตัดขวาง เทคนิคการเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีแบบส่งผ่าน (Transmission tomography) มีอยู่ 3 วิธี ได้แก่

2.1.1 วิธีสแกนแบบรังสีลำแคบ (narrow beam)

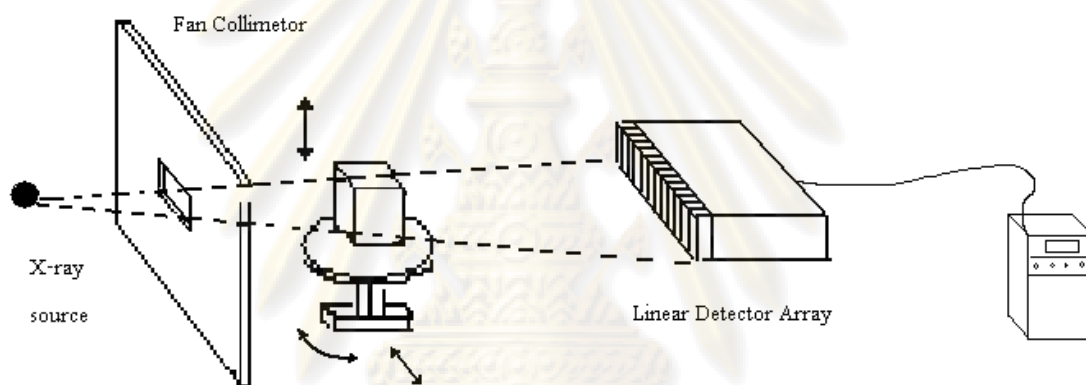
ลักษณะการทำงานของวิธีสแกนแบบรังสีลำแคบนี้ คือการใช้ลำรังสีที่พุ่งออกจากแหล่งกำเนิดรังสีซึ่งจำกัดขนาดให้เป็นลำแคบ ทะลุผ่านวัตถุแล้วตกกระทบหัววัดรังสีซึ่งอยู่ด้านตรงกันข้ามและจำกัดขนาดลำรังสีเช่นกัน การสแกนด้วยวิธีนี้กำหนดให้วัตถุเคลื่อนผ่านลำรังสีไปจนสุดขอบของวัตถุ จากนั้นหมุนวัตถุไปด้วยมุมน้อยๆ จึงสแกนย้อนมาที่จุดเดิม ระยะห่างของแต่ละจุดที่สแกนเป็นเส้นตรงขณะทำการวัดรังสี กำหนดให้ห่างกันเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรังสีลำแคบนั้นๆ เรียกปริมาณรังสีแต่ละจุดว่า “เรย์ซัม (ray-sum)” การสแกนผ่านวัตถุต่อการหมุนของวัตถุด้วยมุมน้อยๆนั้น ประกอบไปด้วยหลายๆเรย์ซัม เรียกว่า “โปรไฟล์ (profile)” หรือ “โปรเจกชัน (projection)” การสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์นั้นจะต้องกำหนดให้วัตถุหมุนจากมุม 0-180 องศาเป็นอย่างน้อย ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วิธีสแกนแบบรังสีลำแคบ^[1]

2.1.2 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (fan beam)

เนื่องจากวิธีสแกนแบบรังสีลำแคบใช้เวลาในการเก็บข้อมูลค่อนข้างนานมาก จึงได้มีการพัฒนาวิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปพัดขึ้นมา เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ให้น้อยลง โดยใช้ลำรังสีเป็นรูปพัด และหัววัดรังสีเป็นแบบแถว (Linear detector array) หลักการทำงานจะคล้ายๆกับวิธีแรก แตกต่างกันตรงที่เมื่อหมุนวัตถุไปแต่ละครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโปรไฟล์ได้เลย จึงเป็นผลให้วิธีนี้ใช้เวลาน้อยลง ส่วนในการออกแบบสร้างเป็นระบบข้อมูลด้วยวิธีนี้สามารถออกแบบให้วัตถุหมุนรอบตัวเพียงอย่างเดียว โดยต้นกำเนิดรังสีและหัววัดยึดอยู่กับที่ และในทางกลับกันก็สามารถออกแบบให้วัตถุตัวอย่างยึดติดอยู่กับที่ แต่ต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีหมุนรอบวัตถุ ดังรูปที่ 2.2

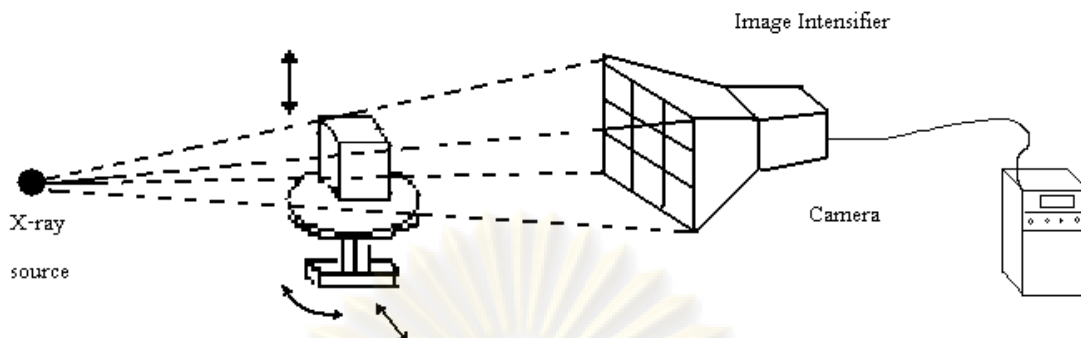


รูปที่ 2.2 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปพัด^[1]

2.1.3 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (cone beam)

การเก็บข้อมูลด้วยวิธีนี้ เป็นการถ่ายภาพวัตถุซึ่งสามารถทราบรายละเอียดทั้งในแนวแกนนอนกับแกนตั้ง ซึ่งลำรังสีที่ใช้นั้นมีลักษณะเรียงกันเป็นแถว หลายๆ แถว หรืออาจใช้แผ่นเรืองแสงรับภาพโดยมีกล้องโทรทัศน์จับภาพ และแสดงภาพบนจอมอนิเตอร์ การเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยวิธีนี้ ใช้เวลาน้อยที่สุดซึ่งอาจเรียกว่า “ระบบโทรทัศน์ (television system)” ดังรูปที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 วิธีการสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย^[1]

2.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี^[2]

เนื่องจากแนวความคิดที่ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนของปริมาณความเข้มของลำรังสีเอกซ์ ในวัตถุต่างชนิดกัน ในระนาบใดระนาบหนึ่งสามารถหาได้โดยการนำเอาปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุในทิศทางต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีแบคโปรเจกชัน (Back-Projection) วิธีอิตเทอเรชัน (Iteration) และวิธีคอนโวลูชันฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน (Convolution Filter Back-Projection) เป็นต้น

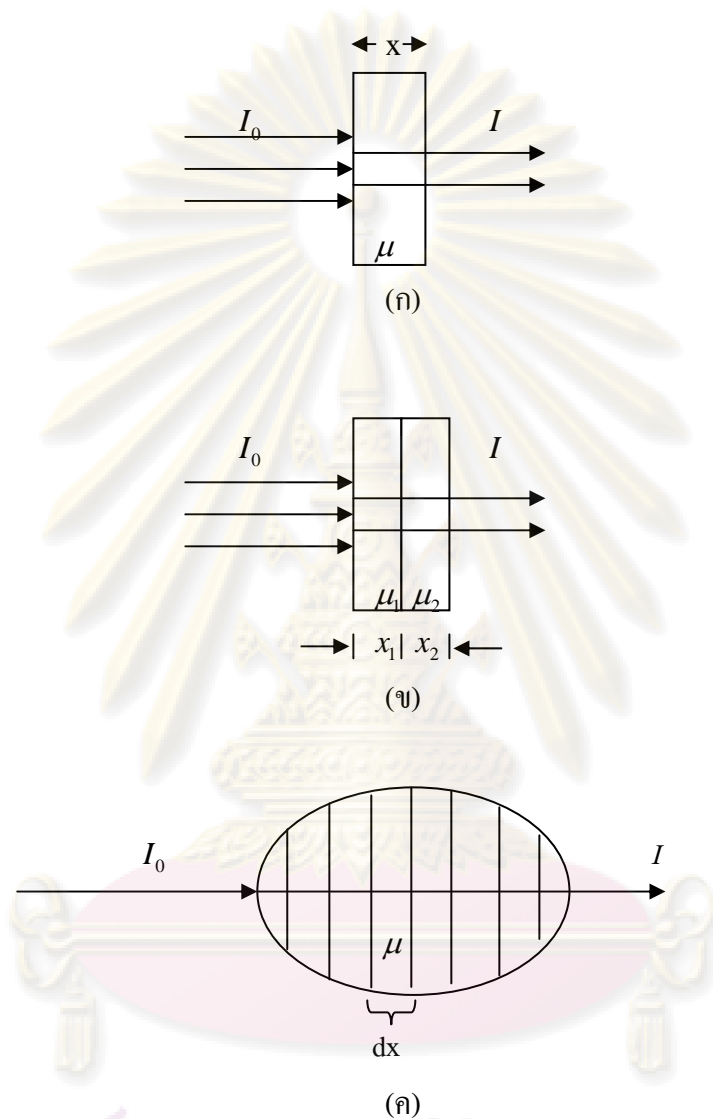
2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงสามารถทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงได้ และเป็นรังสีที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวขณะที่มันเคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางนั้น ในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับวัตถุได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) คอมป์ตัน (Compton Effect) และแพร์โปรดักชัน (pair production) ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง โดยมีความสัมพันธ์กับสมการที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

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

เมื่อ I_0 และ I คือความเข้มของรังสีก่อน และหลังทะลุผ่านตัวกลางตามลำดับ
 μ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ที่พลังงานใดๆ ต่อวัตถุตัวกลาง
 x คือความหนาของตัวกลาง

จากความสัมพันธ์จะเห็นว่า ความเข้มของปริมาณรังสีเอกซ์ที่เดินทางผ่านตัวกลาง ออกมาจะขึ้นกับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี, ความหนา และชนิดของตัวกลางนั้น ๆ ซึ่งแสดงการ ลดทอนในเทอม $e^{-\mu x}$ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงรูปของทางเดินรังสีเอกซ์ที่ผ่านตัวกลาง 3 ชนิด ^[3]

(ก) ตัวกลางที่มีชนิดเดียว (ข) ตัวกลางที่มี 2 ชนิด (ค) ตัวกลางที่มีหลายชนิด

ถ้ากรณีที่ตัวกลางประกอบไปด้วยสาร 2 ชนิดหนา x_1 และ x_2 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์ของตัวกลางทั้งสองเป็น μ_1 และ μ_2 ตามลำดับดังรูปที่ 2.4 (ข) จะได้

$$I = I_0 e^{-[\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2]} \dots\dots\dots 2.2$$

แต่ถ้าตัวกลางประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดในการคำนวณการดูดกลืนรังสี จำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นส่วนๆ ขนาดความหนา dx เท่าๆ กันดังรูปที่ 2.4 (ค) ความหนาของส่วนที่แบ่งออกนั้นเล็กจนสามารถสมมติได้ว่าส่วนเล็กๆ ที่แบ่งออกนั้น ประกอบด้วยสารเนื้อเดียวตลอด กรณีนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง I , I_0 , μ และความหนา (x) ของตัวกลางจะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \dots\dots\dots 2.3$$

2.2.2 เรย์ซัม (Ray-sum)

สมการที่ 2.3 เป็นสมการที่มีความสำคัญต่อการคำนวณการสร้างภาพ เพื่อความสะดวกจึงเขียนสมการที่ 2.3 ใหม่ โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm)

$$p(r, \phi) = -\ln \frac{I}{I_0} = \int_{r, \phi} \mu dx \dots\dots\dots 2.4$$

เมื่อ P คือ เรย์ซัมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเรย์โปรเจกชัน (ray-projection) หมายถึงอินทิกรัลเชิงเส้นตามเส้นทางของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านเข้าไปในตัวกลาง เรย์ซัมสะท้อนให้เห็นถึงการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวกลางตามเส้นทางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านไป ถ้าเรย์ซัมมีค่ามากแสดงว่ามีการดูดกลืนรังสีเอกซ์มาก และในทางกลับกันถ้าเรย์ซัมมีค่าน้อยแสดงว่ามีการดูดกลืนรังสีเอกซ์น้อย

2.2.3 โปรไฟล์ (Profile)

เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ จะพิจารณาการเก็บข้อมูลของซีทีรุ่นที่หนึ่งซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนและแบบหมุนผสมกันเมื่อหลอดเอกซเรย์ปล่อยรังสีลำแคบออกมาแล้วเคลื่อนที่แบบตัดผ่านระนาบที่ต้องการสร้างภาพ เมื่อหัววัดเอกซเรย์อ่านค่าความเข้มของรังสีเอกซ์แล้ว จะถูกเปลี่ยนให้เป็นเรย์ซัม เมื่อนำค่าเรย์ซัมที่ได้มาพิจารณาเทียบกับระยะทางที่หลอดเอกซเรย์และหัววัดเอกซเรย์เคลื่อนที่แบบเลื่อนแล้ว จะได้ความสัมพันธ์เป็นเซตของเรย์ซัมที่นำมาเรียงกันนี้เรียกว่า โปรไฟล์หรือโปรเจกชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 แบคโพรเจกชัน (Back-Projection)

การคำนวณการสร้างภาพมีหลายวิธี ขั้นตอนวิธีการคำนวณการสร้างภาพที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ แบคโพรเจกชัน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ความยุ่งยากในทางคณิตศาสตร์มีน้อย คูห์ล (Kuhl) และเอดเวิร์ดส์ (Edwards) เป็นสองคนแรกที่นำวิธีนี้ไปสร้างภาพของระนาบในตัวผู้ป่วยได้สำเร็จ

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

การคำนวณการสร้างภาพตามวิธีการนี้ไม่ได้คำนวณการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงในระนาบที่สนใจ แต่เป็นการคำนวณการจำแนกของ μ แทน โดยที่

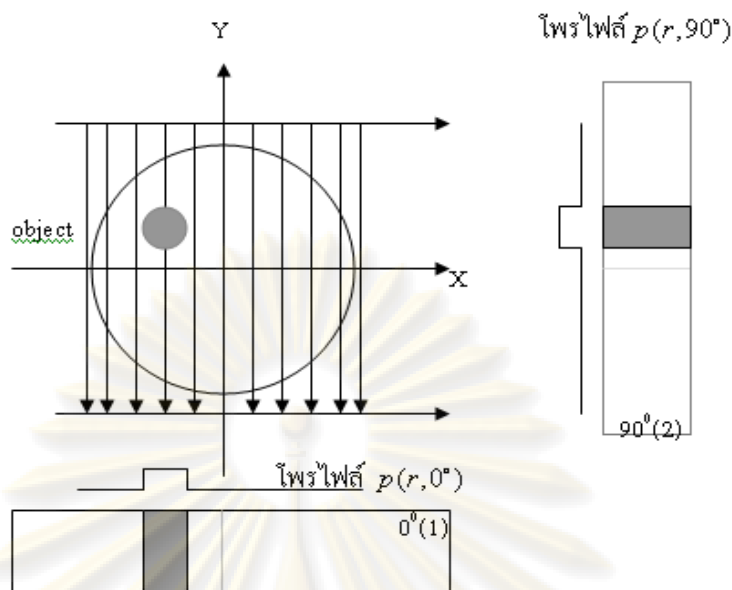
$$\mu(x, y) = \sum_{j=1}^m p(r_j, \phi_j) \square \phi \dots\dots\dots 2.5$$

เมื่อ

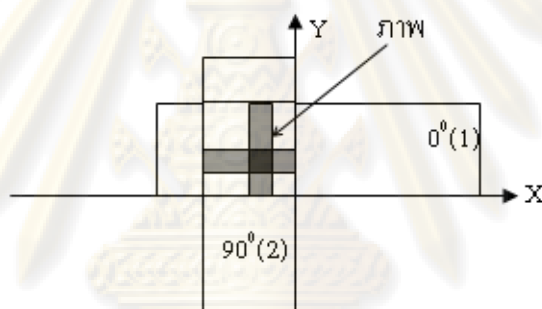
$$r_j = x \cos \phi_j + y \sin \phi_j \dots\dots\dots 2.6$$

ในสมการที่ 2.5 m คือ จำนวนโปรไฟล์ทั้งหมด ϕ_j คือ มุมของโปรไฟล์ที่ j , $\square \phi$ เรียกว่า ระยะห่างเชิงมุม (angular distance) ระหว่างโปรไฟล์ มีค่าเท่ากับ π / m ส่วน $\mu(x, y)$ ไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของตัวกลางจริงๆ แต่การพิจารณาการจำแนกของมันบนระนาบ x, y ที่กำหนดขึ้นจะสามารถจำลองภาพขึ้นได้เหมือนจริงมาก

เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้นจะพิจารณาตามรูป 2.5 (ก) สมมติว่าการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งแรกมุม $\phi = 0^\circ$ จะได้โปรไฟล์หนึ่งชุด หรือได้ $p(r, 0^\circ)$ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งที่สองที่มุม $\phi = 90^\circ$ จะได้โปรไฟล์อีกหนึ่งชุด หรือได้ $p(r, 90^\circ)$ เมื่อนำโปรไฟล์ทั้งสองมาซ้อนทับกันอย่างเหมาะสมดังรูปที่ 2.5 (ข) จะเห็นว่าตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุ $p(r, 0^\circ)$ และ $p(r, 90^\circ)$ ที่มีค่าสูงมากจะรวมกันหรือเสริมกันทำให้เห็นเด่นเป็นภาพของวัตถุขึ้น แนวความคิดแบบนี้จึงเกิดเป็นสมการ 2.5 ซึ่งนำเอา $p = (r, \phi)$ ที่มี r และ ϕ ที่เหมาะสมมารวมกันตรงตำแหน่ง (x, y) ใดๆ ในระนาบ XY ที่จะสร้างภาพ



(ก)



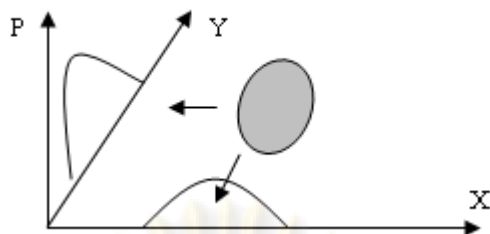
(ข)

รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดภาพตามวิธีการแบคโพรเจกชัน^[2]

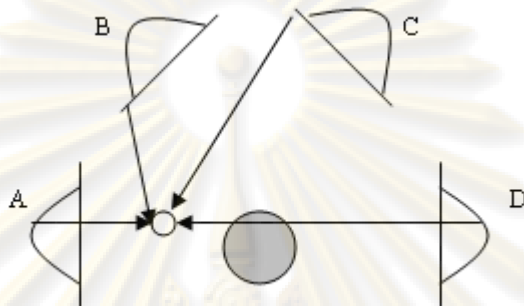
ก.) โพรไฟล์ของวัตถุที่บันทึกได้ในสองทิศทางคือ $0^\circ(1)$ และ $90^\circ(2)$ วัดเทียบแกน Y

ข.) โพรไฟล์ในรูป ก. นำมาซ้อนกันอย่างเหมาะสมเพื่อสร้างภาพ

แบคโพรเจกชันไม่ใช่วิธีการที่ดีในการนำข้อมูลที่หัววัดรังสีเอกซ์บันทึกไว้มาสร้างภาพ เพราะแต่ละเรย์ซัม ไม่ได้นำไปรวมกันเฉพาะตรงจุดที่มีความหนาแน่นสูงเท่านั้น แต่จะนำไปรวมกันบนทุกๆ จุดตามเส้นทางของลำรังสีเอกซ์ เหตุนี้เองทำให้ภาพที่สร้างขึ้นไม่คมชัดเท่าที่ควร โดยตรงขอบภาพจะเห็นเป็นแฉกรูปดาว เรียกว่า อาทิแฟ็คต์รูปดาว (star artifact) ตามรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่า จุดที่อยู่นอกภาพของวัตถุจะมีความหนาแน่นสูงซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากโพรไฟล์ A และ D อย่างไรก็ตามแม้วิธีนี้จะมีข้อบกพร่องอยู่บ้างแต่ก็เป็นพื้นฐานของวิธีการสร้างภาพแบบที่ต้องการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงเข้าช่วย



(ก)



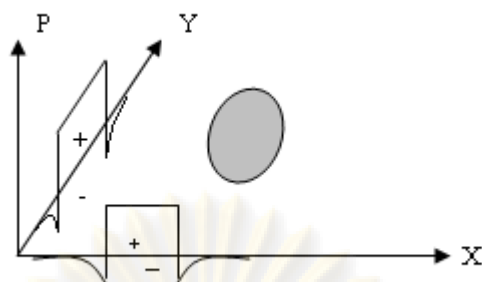
(ข)

รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอาทิแฟลคต์^[2]

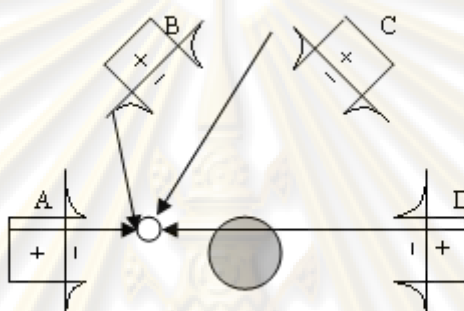
- ก) โปรไฟล์ของวัตถุวงกลมในสองทิศทาง
 ข) โปรไฟล์ A และ Dมีส่วนทำให้ความหนาแน่นของจุดที่อยู่นอกภาพของวัตถุมีค่าสูงขึ้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่คมชัด

2.2.5 ฟิวเตอร์แบคโพรเจกชัน (Filtered Back-Projection)

การสร้างภาพแบบฟิวเตอร์แบคโพรเจกชัน คล้ายกับการสร้างภาพแบบแบคโพรเจกชัน จะทำการกรองข้อมูลโปรไฟล์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อนดำเนินการทำแบคโพรเจกชัน ผลลัพธ์ทำให้สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับความไม่คมชัดของภาพที่เกิดขึ้นในการสร้างภาพแบบโพรเจกชัน หากปรับปรุงโปรไฟล์ในรูป 2.6 ให้มีซีกลบเพิ่มขึ้นด้วยขบวนการทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 2.7 (ก) แล้วผลที่เกิดขึ้นคือ อิทธิพลของเรย์ซัมที่มีค่าเป็นบวกจะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเซลล์ที่อยู่นอกภาพของวัตถุวงกลมเพิ่มสูงมากอีกต่อไป เพราะมีเรย์ซัมที่มีค่าลบคอยรักษาภาพหนาแน่นที่เป็นจริงเอาไว้ ดังรูปที่ 2.7 (ข) ทำให้ภาพที่สร้างขึ้นมีความคมชัดมาก การปรับปรุงโปรไฟล์นี้จำเป็นต้องทำอย่างเหมาะสมซึ่งการกรองเชิงคณิตศาสตร์มีหลายวิธี เช่น การกรองแบบฟูเรียร์ (Fourier filtering) การกรองแบบราดอน (Radon filtering) การกรองแบบคอนโวลูชัน (convolution filtering) เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 แสดงการปรับปรุงโปรไฟล์^[2]

- ก) โปรไฟล์ของวัตถุรูปวงกลมที่ปรับปรุงแล้ว
- ข) โปรไฟล์ A, B และ D มีส่วนทำให้เซลล์ที่อยู่นอกวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้น แต่โปรไฟล์ C จะทำให้ความหนาแน่นลดกลับมาสู่สภาพเป็นจริงทำให้ขอบภาพคมชัดขึ้น

2.2.6 วิธีการกรองด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Shepp-Logan^[1]

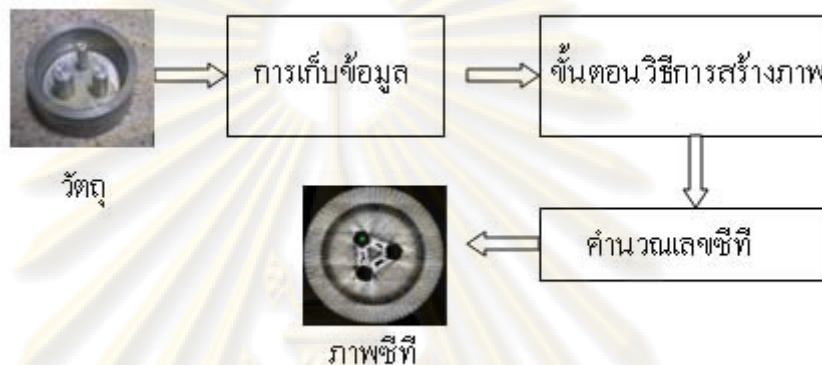
สำหรับการกรองข้อมูลโปรไฟล์ด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันนั้นเป็นการนำข้อมูลโปรไฟล์แต่ละโปรไฟล์มาปรับด้วยการคำนวณจากสมการของ Shepp-Logan ดังนี้

$$H(x) = \frac{2}{\pi^2 d(1-4x^2)} \dots\dots\dots 2.7$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างเรย์ซัม และ x คือ เลขจำนวนเต็ม ดังนั้นเมื่อปรับข้อมูลโปรไฟล์ $P(\theta, x)$ โดยการคูณด้วยสมการที่ 2.7 แล้วจึงนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีแบคโปรเจกชันต่อไป

2.3 ภาพโทโมกราฟีหรือภาพซีที^[2]

เมื่อคำนวณหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นแล้ว ในขบวนการสร้างภาพ เริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ ตามด้วยขั้นตอนวิธีการคำนวณสร้างภาพ ซึ่งจะประกอบด้วย ขั้นตอนของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นให้เป็นเลขซีที (CT number) ด้วย ดังนั้นจะ ขอกกล่าวรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับภาพซีที เลขซีที และการแสดงผลภาพซีทีเท่านั้น



รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนสำคัญของกระบวนการสร้างภาพซีที

2.3.1 เลขซีที (CT number)

ภาพโทโมกราฟีหรือภาพ CT เป็นภาพที่มีลักษณะเฉพาะต่างไปจากภาพรังสีเอกซ์ทั่วไป เพราะเป็นภาพที่แสดงการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์ในระนาบหนึ่งในแนว ภาคตัดขวาง ในทางปฏิบัติตัวเลขที่ปรากฏตามตำแหน่งต่างๆ หรือความดำที่ปรากฏบนภาพโทโม กราฟีไม่ใช่สัมประสิทธิ์การลดลงที่แท้จริง แต่เป็นค่าที่เรียกว่า เลขซีที ยกตัวอย่างเช่น การใช้เลขซีที ในทางการแพทย์นิยามว่า

$$H_s = K \left(\frac{\mu_s(E) - \mu_w(E)}{\mu_w(E)} \right) \dots\dots\dots 2.8$$

เมื่อ H_s คือเลขซีที

$\mu_w(E)$ และ $\mu_s(E)$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของน้ำและตัวกลางใดๆ ตามลำดับ

K คือ แฟคเตอร์สเกล (scale factor) เป็นค่าคงที่ที่ใช้ใน CT แต่ละเครื่อง บาง เครื่องใช้ค่า K เป็น 1000 ได้แก่ Hounsfield Scale

ในสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าถ้า $\mu_w(E) = \mu_s(E)$ จะได้ $H_s = 0$ แปลว่าเลขซีทีของน้ำเท่ากับศูนย์ ดังนั้นถ้า $\mu_w(E) < \mu_s(E)$ หรือตัวกลางใดหนาแน่นกว่าน้ำ จะได้ $H_s > 0$ แปลว่าเลขซีทีของตัวกลางนั้นเป็นบวก ทำนองกลับกัน ถ้า $\mu_w(E) > \mu_s(E)$ หรือตัวกลางใดหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จะได้ $H_s < 0$ แปลว่า เลขซีทีของตัวกลางนั้นเป็นลบ

สาเหตุที่ต้องนำเลขซีทีมาใช้ในการแสดงภาพแทนการดูดกลืนด้วยสัมประสิทธิ์การลดลง ก็เพื่อต้องการให้ความหนาแน่นที่ต่างกันน้อยๆ ให้สามารถ แสดงความแตกต่างออกมาให้เห็นได้เด่นชัด

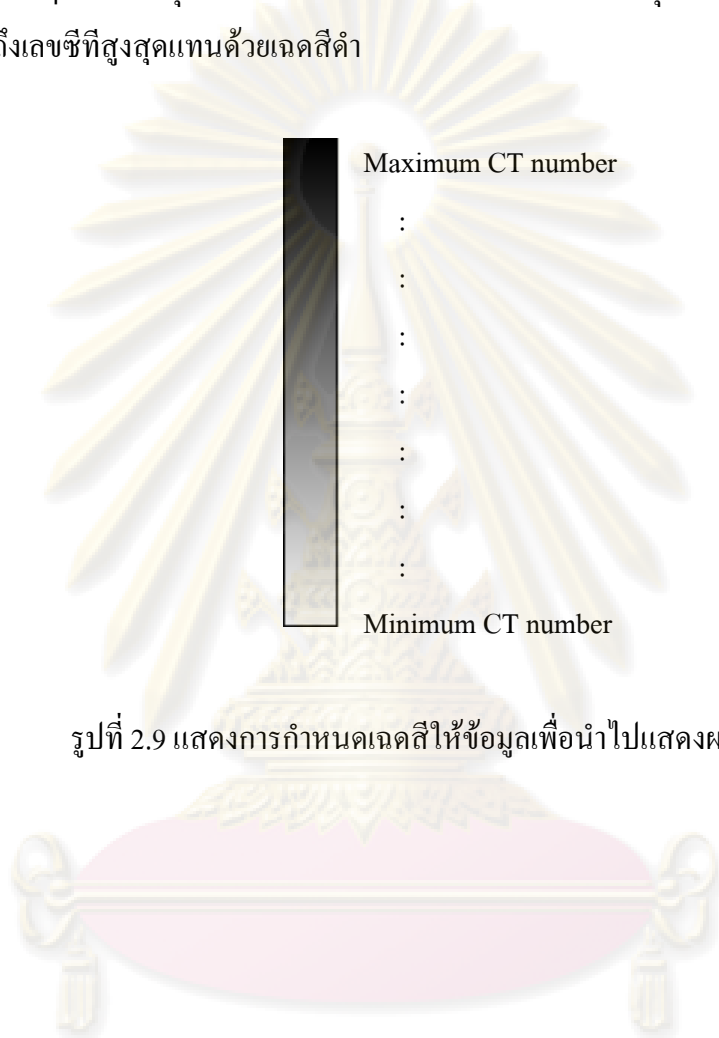
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเลขซีทีของเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ ในทางการแพทย์

เนื้อเยื่อ	เลขซีที	μ (cm ⁻¹)		
		60 keV	84 keV	122 keV
กระดูก	1000	0.528	0.464	0.41
ไวต์แมตเตอร์	46	0.213	0.187	0.166
เกรย์แมตเตอร์	43	0.212	0.184	0.163
เลือด	40	0.208	0.182	0.163
ซีเอสเอฟ (CSF)	15	0.207	0.181	0.16
น้ำ	0	0.206	0.18	0.16
ไขมัน	-100	0.185	0.162	0.144
อากาศ	-1000	0.0004	0.0003	0.0002

จากตารางที่ 2.1 กระดูกมีค่าเลขซีทีสูงที่สุดเท่ากับ +1000 ในขณะที่อากาศมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -1000 และน้ำมีเลขซีทีอยู่ตรงกลางเท่ากับ 0 ถ้าพิจารณาสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของเกรย์แมตเตอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของเลือดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยิ่งพลังงานของรังสีเอกซ์มีค่ามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของทั้งสองยิ่งใกล้เคียงกันมากขึ้น แต่เมื่อเป็นเลขซีทีแล้วจะมีค่าต่างกันคือ 43 และ 40 ตามลำดับ ซึ่งเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน

2.3.2 การแสดงผลของภาพซีที

ภาพซีทีที่มีความแตกต่างจากภาพรังสีเอกซ์ธรรมดา เมื่อได้ข้อมูลความค่าที่อ่านมาจากฟิล์มของภาพโทโมกราฟีแล้ว นำมาแบ่งเป็นส่วนเล็กๆ เท่ากัน เพื่อหาค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ซึ่งส่วนที่แบ่งเป็นส่วนเล็กๆ นี้จะบรรจุค่าเลขซีทีไว้ จากนั้นกำหนดให้เลขซีทีต่ำสุดแทนด้วยเฉดสีขาวไล่ขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงเลขซีทีสูงสุดแทนด้วยเฉดสีดำ



รูปที่ 2.9 แสดงการกำหนดเฉดสีให้ข้อมูลเพื่อนำไปแสดงผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และการพัฒนาโปรแกรมคำนวณเลขชี้ที่จากภาพโทโมกราฟี

3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์^[1]

รังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยได้จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตพลังงานได้สูงสุด 200 กิโลโวลต์ (kV) และกระแสสูงสุดเท่ากับ 8 มิลลิแอมแปร์ (mA) สามารถตั้งเวลาฉายรังสีได้นาน 12 นาที (min) ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ของวัตถุนั้นจะต้องพิจารณาความหนาของวัตถุ และความหนาแน่นของวัตถุด้วย หากวัตถุหนามากและความหนาแน่นมาก ก็ต้องปรับพลังงานของรังสีเอกซ์ให้สูงพอเหมาะเพื่อที่จะให้รังสีบางส่วนทะลุผ่านวัตถุไปตกกระทบกับแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ และจะมีรังสีบางส่วนไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุมาได้ โดยภายในวัตถุจะมีความหนาไม่เท่ากัน ส่วนที่หนามากรังสีก็ทะลุผ่านได้น้อย ส่วนที่หนาน้อยรังสีก็ทะลุผ่านได้มาก รังสีที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มทำให้เกิดความดำบนฟิล์มแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นภาพขึ้นมา นอกจากนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ก็มีผลอย่างมากต่อความดำบนฟิล์ม ซึ่งก็คือปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มในระยะเวลาที่กำหนดมีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์วินาที(mA-second)

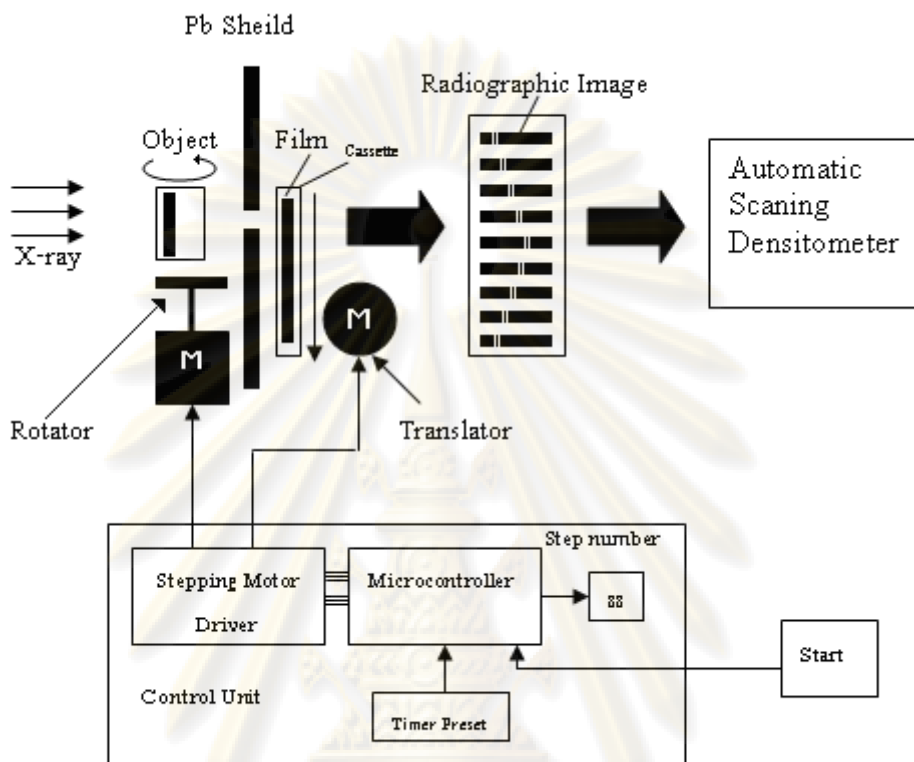


รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

3.1.2 ชุดกำบังรังสีสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์^[1]

ชุดเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย มีรายละเอียดการทำงานดังรูปที่ 3.2

ดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพหลักการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยเทคนิคฟิล์ม^[1]

ชุดกำบังรังสีสำหรับถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ออกแบบให้วัตถุตัวอย่างวางอยู่บนแป้นหมุนที่ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ และติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของแผ่นตะกั่วกำบังรังสีโดยเจาะช่องไว้ขนาด 8 ซม. x 8 ซม. เพื่อให้รังสีเอกซ์ลอดผ่านไปยังฟิล์ม ด้านหลังมีตลับอะลูมิเนียมซึ่งบรรจุฟิล์มเอกซเรย์ขนาด 8.5 ซม. x 30.5 ซม. สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งด้วยการขับเคลื่อนของสเต็ปมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์กำลังรังสีเพื่อการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การเคลื่อนที่ของตลับบรรจุฟิล์ม และการหมุนของวัตถุตัวอย่างจะถูกควบคุมโดยชุดควบคุม (Control unit) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมให้การเคลื่อนที่ของตลับบรรจุฟิล์มสัมพันธ์กับการหมุนของวัตถุตัวอย่างในขณะที่ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

3.1.3 เครื่องสแกนฟิล์ม Vdar VXR-16 DosimetryPro film scanner, (vidar system Corp, Herndon, VA, USA)

เมื่อนำฟิล์มที่ถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม ภาพบนฟิล์มที่ปรากฏจะมีความดำมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัตถุตัวอย่าง ความดำที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุนั้น ความดำที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นฟิล์มนี้ สามารถอ่านได้โดยใช้เครื่องสแกนฟิล์ม Vdar ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะนำมาอ่านค่าอีกทีโดยใช้โปรแกรม Math Lab เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 3.4 เครื่องสแกนฟิล์ม V-dar VXR-16 Dosimetry Pro film scanner

- 3.1.4 ฟิล์มเอกซเรย์ Kodak industrex MX125 ขนาด 9 ซม.x43 ซม.
- 3.1.5 น้ำยาล้างฟิล์ม Fixer และ Developer
- 3.1.6 ถาดพลาสติกใส่น้ำ และบีกเกอร์สำหรับตวงขนาด 1000 ml
- 3.1.7 โลหะชนิดต่างๆ
 - เหล็กทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 7, 5, 3 มิลลิเมตร
 - ทองเหลืองทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 7, 5, 3 มิลลิเมตร
 - ทองแดงทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 7, 5, 3 มิลลิเมตร
 - อะลูมิเนียมทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 7, 5, 3 มิลลิเมตร
- 3.1.8 เครื่องซังสาร
- 3.1.9 เวอร์เนียวคาลิปเปอร์
- 3.1.10 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 3.1.11 ตลับใส่ฟิล์มอะลูมิเนียมสำหรับบรรจุฟิล์มเอกซเรย์ขนาด 8.5 ซม. x 30.5 ซม.
- 3.1.12 อะลูมิเนียมแผ่น
- 3.1.13 เลื่อยฉลุ
- 3.1.14 ฉากเพิ่มความเข้มรังสี (intensifying screen)
- 3.1.15 นาฬิกาจับเวลา

3.2 การพัฒนาโปรแกรมเปรียบเทียบค่าเลขซีที (CT NUMBER PROGRAM)

จากข้อมูลโปรไฟล์ที่สแกนอ่านได้นั้นเมื่อนำมาแสดงเป็นกราฟจะพบว่าบริเวณที่ฟิล์มดำมากที่สุด ซึ่งแสดงว่ารังสีเอกซ์ทะลุได้มากที่สุด และจะค่อยๆจางลงเมื่อผ่านวัสดุที่มีความหนามากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงแสดงผลของค่าเลขซีทีที่มีความสัมพันธ์กับค่าข้อมูลโปรไฟล์ โดยวัสดุมีความหนาหรือมีความหนาแน่นมากรังสีก็ทะลุผ่านได้น้อยค่าเลขซีทีก็จะอ่านค่าได้น้อย และในทางกลับกันถ้าวัสดุบางหรือมีความหนาแน่นน้อยก็จะอ่านค่าเลขซีทีได้มากขึ้น

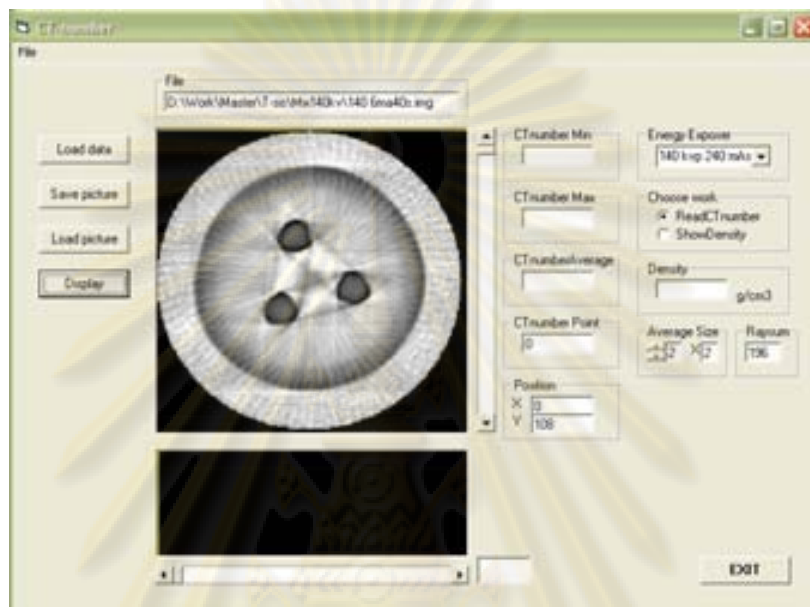
โปรแกรมเปรียบเทียบค่าเลขซีทีจึงพัฒนาต่อเนื่องมาจากโปรแกรมคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่มีอยู่แล้ว โดยอาศัยการคำนวณสร้างภาพซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบคอนโวลูชันฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน (convolution filter back projection) ข้อมูลจะถูกปรับให้เหมาะสมด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Shepp-Logan จากนั้นนำข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้มาคำนวณข้อมูลภาพด้วยวิธีแบคโปรเจกชัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของวัตถุนั้นๆ จากนั้นนำข้อมูลภาพโทโมกราฟีที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาข้อมูลเลขซีทีในจุดที่สนใจดังรูปที่ 3.5 เป็นแผนภาพการทำงานของขั้นตอนการคำนวณสร้างภาพและวิเคราะห์ค่าเลขซีที



รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีและวิเคราะห์เลขซีที

3.2.1 รายละเอียดโปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีที

โปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีทีที่พัฒนาขึ้นนี้เขียนโดยใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เมื่อเริ่มรัน (Run) โปรแกรมก็จะปรากฏหน้าจอแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เมนูหลักของ โปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีที

จากเมนูหลักของ โปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีทีจะกล่าวถึงการทำงานและรายละเอียดของช่องข้อมูลต่างๆ ได้ดังนี้

- File เป็นช่องที่แสดงชื่อของไฟล์ที่นำมาวิเคราะห์ใน โปรแกรมอ่านค่าเลขซีที
- Load data เมื่อเลือกใช้งานคำสั่งนี้จะเป็นการเรียกข้อมูลภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการคำนวณสร้างภาพแล้วมาคำนวณหาข้อมูลเลขซีที
- Save picture เมื่อเลือกใช้งานคำสั่งนี้จะเป็นการบันทึกรูปภาพ โทโมกราฟีในนามสกุลของ bitmap เพื่อที่จะเรียกกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งเพื่อคำนวณข้อมูลเลขซีที
- Load picture เมื่อเลือกใช้งานคำสั่งนี้จะเป็นการเรียกภาพโทโมกราฟีที่บันทึกไว้มาแสดงผลเพื่อที่จะคำนวณข้อมูลเลขซีที
- Display เมื่อเลือกใช้งานคำสั่งนี้จะเป็นการแสดงผลภาพโทโมกราฟีให้แสดงผลออกทางช่องแสดงผลซึ่งต้องกดใช้หลังจาก Load data เข้ามาเนื่องจากคำสั่ง Load data จะเรียกเฉพาะข้อมูลโทโมกราฟีเท่านั้นแต่ไม่แสดงผลของภาพโทโมกราฟี

- CT number Min เป็นช่องที่แสดงข้อมูลเลขซีทีที่น้อยที่สุดภายในพื้นที่ที่เลือกคำนวณข้อมูลเลขซีที
- CT number Max เป็นช่องที่แสดงข้อมูลเลขซีทีที่มากที่สุดภายในพื้นที่ที่เลือกคำนวณข้อมูลเลขซีที
- CT number Average เป็นช่องที่แสดงข้อมูลเลขซีทีเฉลี่ยภายในพื้นที่ที่เลือกคำนวณข้อมูลเลขซีที
- CT number Point เป็นช่องที่แสดงข้อมูลเลขซีทีตรงตำแหน่งที่เมาส์อยู่
- Position เป็นที่แสดงตำแหน่งพิกัด x และ y
- Energy Exposure เป็นช่องที่ให้เลือกค่าพลังงานที่ต้องการจะคำนวณข้อมูลเลขซีทีของภาพโทโมกราฟีนั้นๆ
- Choose work เป็นช่องที่จะเลือกให้โปรแกรมแสดงผลข้อมูลตามต้องการ
 - Read CT number เลือกให้แสดงข้อมูลเลขซีทีอย่างเดียว
 - Show density เลือกให้แสดงผลของความหนาแน่นของข้อมูลเลขซีทีด้วย
- Average size เป็นช่องให้เลือกขนาดของกรอบสี่เหลี่ยม เพื่อคำนวณข้อมูลในพื้นที่ที่ต้องการ
- Raysum เป็นช่องที่แสดงจำนวนของข้อมูลที่นำมาคำนวณสร้างภาพในแต่ละโปรเจกชัน
- Exit เมื่อเลือกใช้งานคำสั่งนี้จะเป็นการออกจากการทำงานของโปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

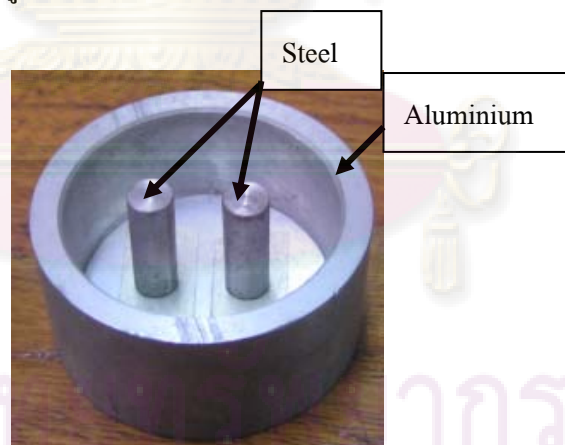
วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัย

4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1.1 ออกแบบวัตถุตัวอย่างเพื่อทำการทดลอง

เนื่องจากระบบถ่ายภาพเก็บข้อมูลโปรไฟล์ ซึ่งมีตลับอะลูมิเนียมสำหรับใส่ฟิล์มทำงานโดยการเลื่อนลงทีละ 1 เซนติเมตร จะได้จำนวนโปรไฟล์ทั้งหมด 26 โปรไฟล์ ดังนั้นหากกำหนดให้วัตถุหมุนไปด้วยมุม 3.6 องศา จะต้องใช้แผ่นฟิล์มเอกซเรย์จำนวน 2 แผ่น และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่หมุนครบ 180 องศาขึ้นไปสำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวัตถุตัวอย่างเพื่อการทดสอบเป็น 5 ตัวอย่างได้แก่

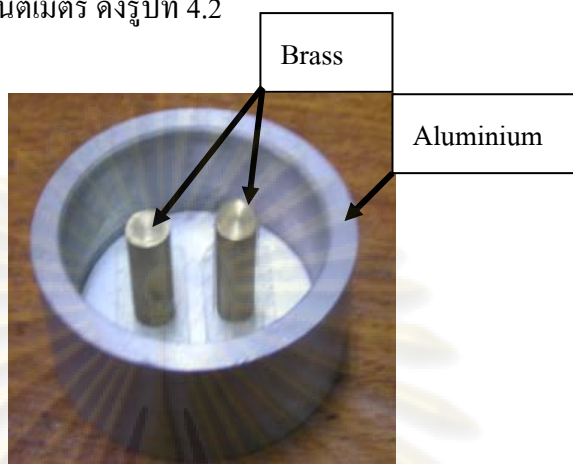
ตัวอย่าง A เป็นท่ออะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีขอบหนา 5 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุแท่งเหล็กรูปทรงกระบอกตัน 2 แท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่าง A

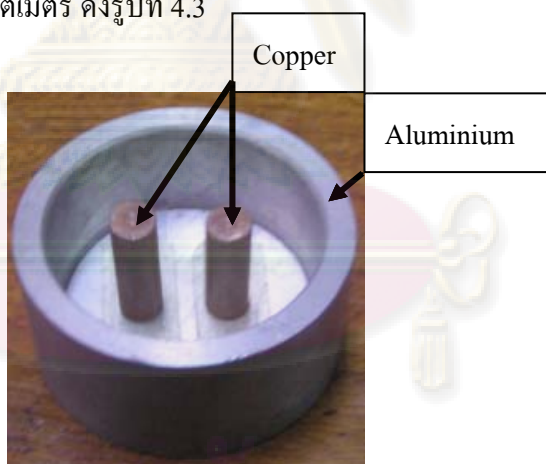
ศูนย์วิจัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่าง B เป็นท่ออะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีขอบหนา 5 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุแท่งทองเหลืองรูปทรงกระบอกตัน 2 แท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวอย่าง B

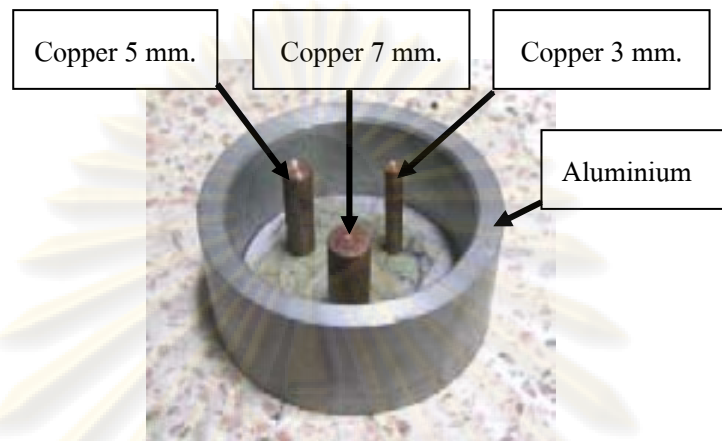
ตัวอย่าง C เป็นท่ออะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีขอบหนา 5 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุแท่งทองแดงรูปทรงกระบอกตัน 2 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตัวอย่าง C

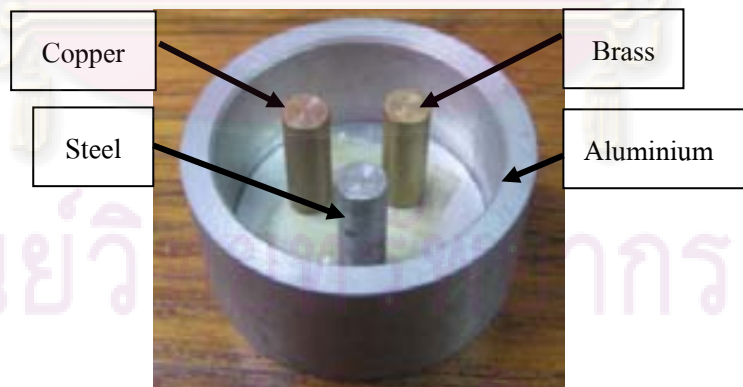
ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่าง D เป็นท่ออะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีขอบหนา 5 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุแท่งทองแดงรูปทรงกระบอกตัน 3 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่าง D

ตัวอย่าง E เป็นท่ออะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีขอบหนา 5 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุแท่งเหล็กรูปทรงกระบอกตัน 1 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร, แท่งทองเหลืองรูปทรงกระบอกตัน 1 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร, แท่งทองแดงรูปทรงกระบอกตัน 1 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่าง E

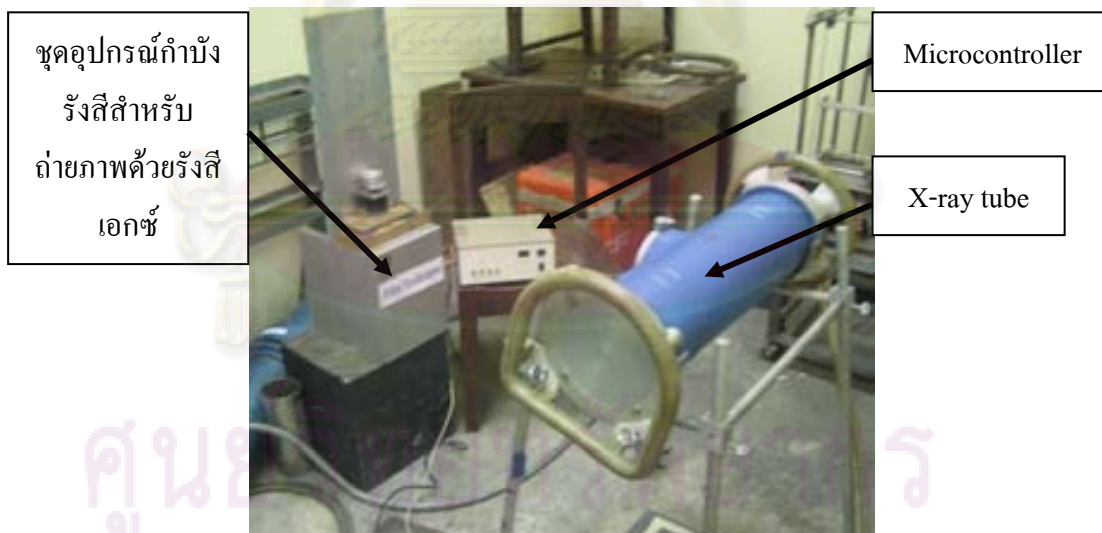
ในการทะลุผ่านของรังสีต่อชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ และชนิดของวัสดุ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ต่อวัตถุได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุ

Material	μ (cm ⁻¹)		
	140 kVp	150 kVp	160 kVp
Steel	1.680	1.429	1.358
Brass	2.057	1.73	1.617
Copper	2.179	1.794	1.691

4.1.2 การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การจัดระบบเพื่อการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าเลขซีทีกับชนิด และขนาดของวัตถุดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

4.1.2.1 การทดลองสำหรับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเท่ากัน

จัดวางระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร กำหนดให้วัตถุหมุนไปด้วยมุมทีละ 3.6 องศา เพื่อทดสอบกับตัวอย่าง A, ตัวอย่าง B และตัวอย่าง C โดยเปลี่ยนตัวแปรของความต่างศักย์ดังนี้

- 4.1.2.1.1 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 140 kVp เลือกระแสเท่ากับ 5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 30 วินาที (Exposure = 150 mAs)
- 4.1.2.1.2 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 150 kVp เลือกระแสเท่ากับ 5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 30 วินาที (Exposure = 150 mAs)
- 4.1.2.1.3 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 30 วินาที (Exposure = 150 mAs)

4.1.2.2 การทดลองสำหรับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดไม่เท่ากัน

จัดวางระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร กำหนดให้วัตถุหมุนไปด้วยมุมทีละ 3.6 องศา เพื่อทดสอบกับตัวอย่าง E โดยเปลี่ยนตัวแปรของ Exposure ดังนี้

- 4.1.2.2.1 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 270 mAs)
- 4.1.2.2.2 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 7 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 315 mAs)

4.1.2.3 การทดลองสำหรับวัสดุต่างชนิดกันที่มีขนาดเท่ากัน

จัดวางระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร กำหนดให้วัตถุหมุนไปด้วยมุมทีละ 3.6 องศา เพื่อทดสอบกับตัวอย่าง D โดยเปลี่ยนตัวแปรของความต่างศักย์และ Exposure ดังนี้

- 4.1.2.3.1 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 140 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 240 mAs)
- 4.1.2.3.2 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 140 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 260 mAs)

- 4.1.2.3.3 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 140 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 270 mAs)
- 4.1.2.3.4 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 140 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 292 mAs)
- 4.1.2.3.5 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 150 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 240 mAs)
- 4.1.2.3.6 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 150 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 260 mAs)
- 4.1.2.3.7 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 150 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 270 mAs)
- 4.1.2.3.8 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 150 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 292 mAs)
- 4.1.2.3.9 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 240 mAs)
- 4.1.2.3.10 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 260 mAs)
- 4.1.2.3.11 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 40 วินาที (Exposure = 270 mAs)
- 4.1.2.3.12 ฉายรังสีเอกซ์ที่ 160 kVp เลือกระแสเท่ากับ 6.5 mA ตั้งเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 45 วินาที (Exposure = 292 mAs)

4.1.3 กระบวนการล้างฟิล์ม^[4]

เมื่อได้ฟิล์มที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แล้ว นำฟิล์มมาผ่านกระบวนการล้างฟิล์มในห้องมืด เพื่อให้ได้ภาพของวัตถุแต่ละโปรไฟล์ ขั้นตอนการล้างฟิล์มมีดังต่อไปนี้

4.1.3.1 ดีเวลอปิง (Developing) เป็นกระบวนการรีดิวซ์เงินไอออน (Ag^+) ที่เกิดจากเงินโบรไมด์ที่ถูกรังสีให้เป็นโลหะเงิน (Ag) ซึ่งมีสีดำ โดยใช้สารละลายที่เป็นด่าง กระบวนการนี้ใช้เวลา 5 นาที

4.1.3.2 สต๊อปบัท (Stop Bath) เป็นกระบวนการทำให้สารละลายดีเวลอปเปอร์ (developer) ที่ตกค้างอยู่ให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายที่เป็นกรด หรือใช้น้ำธรรมดาให้ไหลผ่านฟิล์มก็ได้ ในที่นี้ใช้น้ำเป็นตัวสตั๊ปปบัท กระบวนการนี้ใช้เวลา 1 นาที

4.1.3.3 ฟิกซิง (Fixing) เป็นกระบวนการชะล้างผลึกเงินโบรไมด์ที่ไม่ได้ถูกรังสีออกจากแผ่นฟิล์มโดยใช้สารละลายเคมีที่เป็นกรด นอกจากนี้ใช้น้ำยาฟิกเซอร์ (fixer) ยังช่วยทำให้เจลาตินในฟิล์มอยู่ตัว และช่วยให้สารละลายดีเวลอปเปอร์ที่ตกค้างอยู่มีสภาพเป็นกลาง กระบวนการนี้ใช้เวลา 5 นาที

4.1.3.4 ล้างน้ำ (Washing) เป็นการล้างสารละลายที่ตกค้างอยู่ออกด้วยน้ำ กระบวนการนี้ใช้เวลา 15 นาที

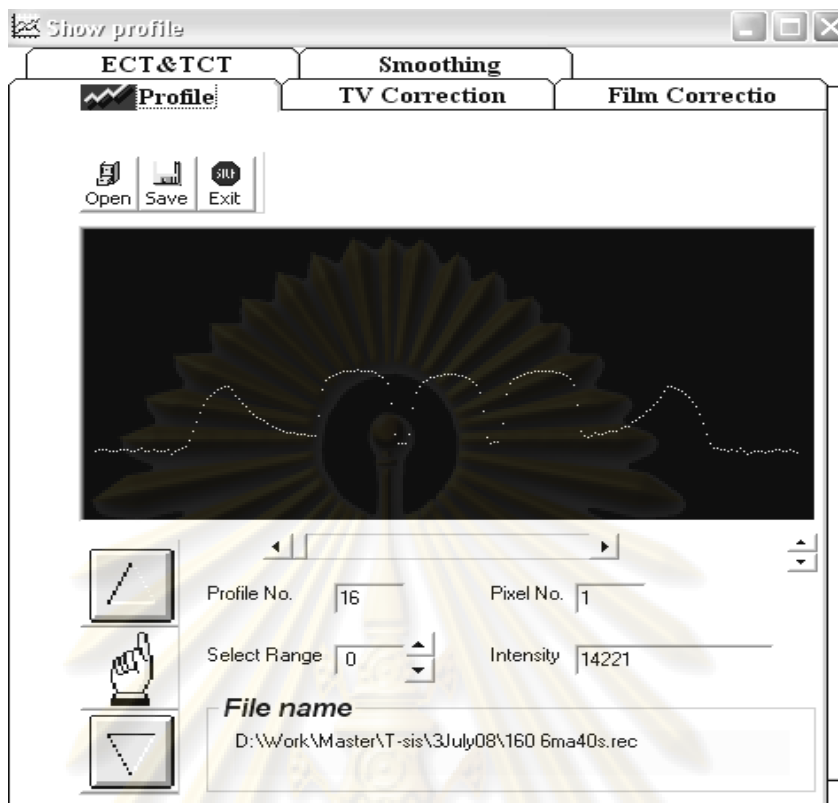
4.1.3.5 การทำให้แห้ง (Drying) เป็นการผึ่งฟิล์มให้แห้งในอากาศ หรือให้อากาศอุ่นที่ปราศจากฝุ่น ซึ่งตามปกติทำเป็นตู้อบฟิล์มมีพัดลมดูดอากาศ และที่กรองอากาศ กระบวนการนี้ใช้เวลานานพอสมควรจนกว่าฟิล์มจะแห้ง

ฟิล์มเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านกระบวนการล้างฟิล์มแล้วดังรูป



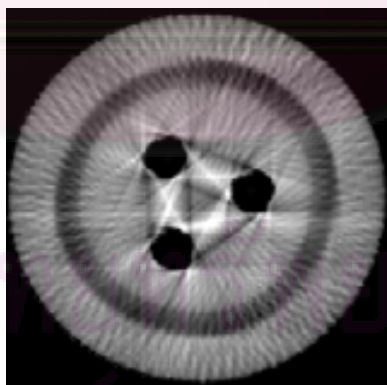
รูปที่ 4.7 ฟิล์มเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม

เมื่อนำฟิล์มไปสแกนด้วยเครื่องสแกนฟิล์ม V-dar แล้วนำมาอ่านข้อมูลความดำด้วยโปรแกรม Math Lab แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับแก้โปรไฟล์ให้ได้จำนวนเรย์ซันที่เท่ากัน ด้วยโปรแกรม ProSIM จากนั้นนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการ normalization ซึ่งจะทำการหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเพื่อปรับแก้ข้อมูลแล้วจึงนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการ correction film ซึ่งจะทำการปรับแก้ข้อมูลจากความแรงรังสีพื้นฐานจึงจะได้ข้อมูลโปรไฟล์ก่อนที่จะนำไปคำนวณสร้างภาพตัดขวาง (reconstruction) ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างข้อมูลโปรไฟล์ ณ มุมหนึ่ง

นำข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ไปคำนวณสร้างภาพตัดขวาง (reconstruction) ด้วยวิธีคอนโวลูชัน ฟิลเตอร์แบคโปรเจกชันจะได้ภาพโทโมกราฟีดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ภาพโทโมกราฟี

4.2 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่คือ

- ส่วนของผลการวิจัยที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซเรย์ที่ความต่างศักย์และค่า Exposure เป็น 140 kVp 150 mAs, 150 kVp 150 mAs และ 160 kVp 150 mAs โดยจัดระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร และใช้ฉากเพิ่มความเข้มของรังสีเพื่อวิเคราะห์หาค่าเลขซีทีของวัสดุในตัวอย่าง A, ตัวอย่าง B และตัวอย่าง C

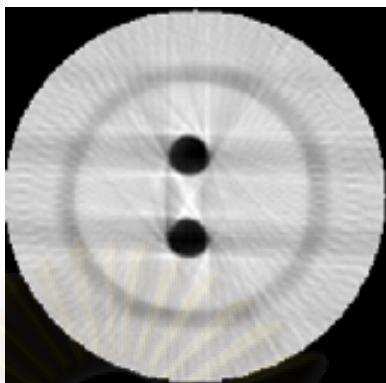
- ส่วนของผลการวิจัยที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซเรย์ที่ความต่างศักย์และค่า Exposure เป็น 160 kVp 270 mAs และ 160 kVp 315 mAs โดยจัดระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร และใช้ฉากเพิ่มความเข้มของรังสี เพื่อวิเคราะห์หาค่าเลขซีทีของวัสดุในตัวอย่าง D

- ส่วนของผลการวิจัยที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซเรย์ที่ความต่างศักย์และค่า Exposure เป็น 140 kVp, 150 kVp, 160 kVp และเปลี่ยนค่า Exposure เป็น 240 mAs, 260 mAs, 270 mAs, 292 mAs โดยจัดระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงแผ่นฟิล์มเท่ากับ 70 เซนติเมตร และใช้ฉากเพิ่มความเข้มของรังสี เพื่อวิเคราะห์หาค่าเลขซีทีของวัสดุในตัวอย่าง E
ซึ่งมีผลวิจัยดังนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างที่มีวัสดุชนิดเดียวกัน และขนาดเท่ากัน

ส่วนที่หนึ่งทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ดูว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกัน ขนาดเท่ากันจะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างไร โดยการเปลี่ยนค่าของความต่างศักย์รังสีเอกซ์ทั้งหมด 3 ค่าคือ 140 kVp 150 mAs, 150 kVp 150 mAs, 160 kVp 150 mAs ทดสอบกับตัวอย่าง A, ตัวอย่าง B และตัวอย่าง C ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12

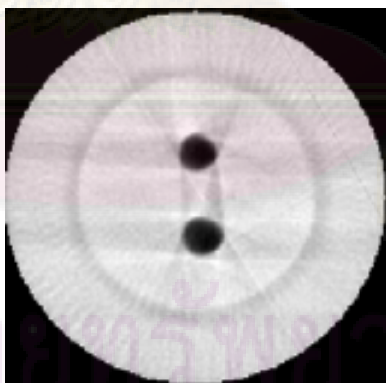
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) 140 kVp 150 mAs

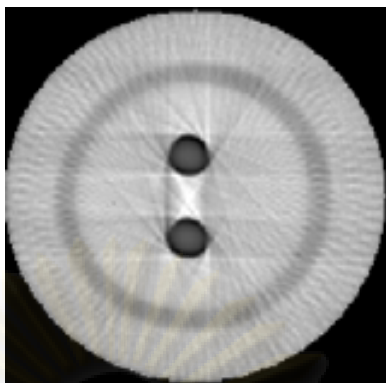


(ข) 150 kVp 150 mAs

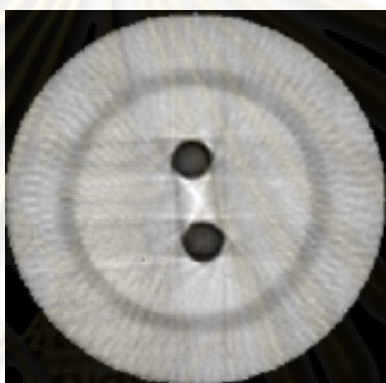


(ค) 160 kVp 150 mAs

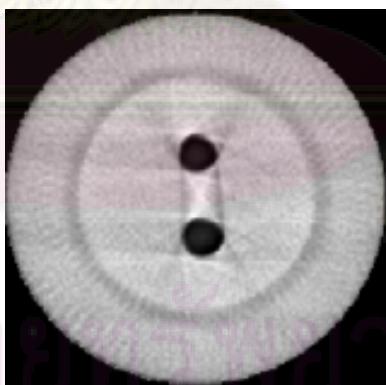
รูปที่ 4.10 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง A ที่ประกอบด้วยแท่งเหล็ก (Steel) 2 แท่ง ขนาดเท่ากัน เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น (ก) 140 kVp 150 mAs (ข) 150 kVp 150 mAs (ค) 160 kVp 150 mAs



(ก) 140 kVp 150 mAs

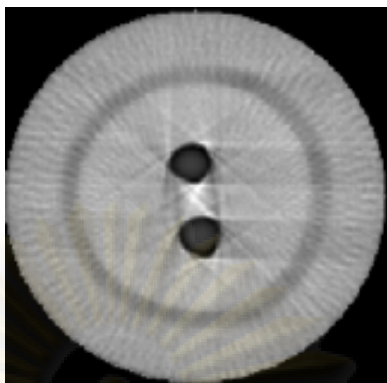


(ข) 150 kVp 150 mAs

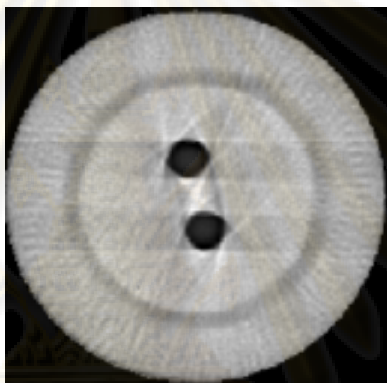


(ค) 160 kVp 150 mAs

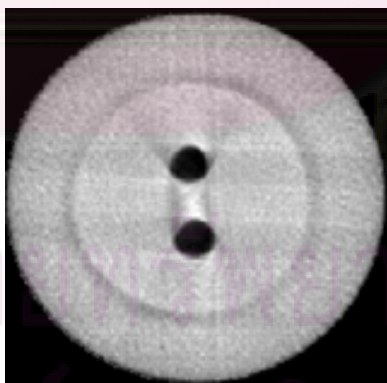
รูปที่ 4.11 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง B ที่ประกอบด้วยแท่งทองเหลือง (Brass) 2 แท่ง ขนาดเท่ากัน เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น (ก) 140 kVp 150 mAs (ข) 150 kVp 150 mAs (ค) 160 kVp 150 mAs



(ก) 140 kVp150 mAs



(ข) 150 kVp150 mAs



(ค) 160 kVp150 mAs

รูปที่ 4.12 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง C ที่ประกอบด้วยแท่งทองแดง (Copper) 2 แท่ง ขนาดเท่ากัน เมื่อเลือกความต่างศักย์เป็น (ก) 140 kVp150 mAs (ข) 150 kVp150 mAs (ค) 160 kVp150 mAs

จากภาพโทโมกราฟีที่ได้แต่ละรูป นำไปวิเคราะห์อ่านค่าเลขซีทีโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าเลขซีทีที่ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเลขซีที ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง A

Voltage/Exposure	Rod No.	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
140 kVp 150 mAs	1	9395	9735	9565	97.801
	2	9357	9745	9565	97.801
150 kVp 150 mAs	1	8048	8712	8425	91.788
	2	8308	8512	8423	91.777
160 kVp 150 mAs	1	6385	6645	6489	80.554
	2	6123	6773	6440	80.250

หมายเหตุ (Steel) density = 7.83 g/cm³

จากตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9565 ± 97.801 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9565 ± 97.801

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 8425 ± 91.788 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 8423 ± 91.777

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 6489 ± 80.554 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 6440 ± 80.250

จากผลของค่าเลขซีทีของภาพซีทีตัวอย่างทั้ง 3 ค่าความต่างศักย์ และค่า Exposure ต่างๆ พบว่า ค่าเลขซีทีของวัตถุชนิดเดียวกัน และมีขนาดเท่ากันค่าเลขซีทีจะใกล้เคียงกัน เมื่อค่าความต่างศักย์ และค่า Exposure เท่ากัน แต่เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้รังสีเอกซ์มีพลังงานสูงขึ้น ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงขึ้น ฟิล์มเอกซเรย์ก็ดำขึ้นจึงทำให้ค่าเลขซีทีลดลง (ค่าเลขซีทีที่เกิดจากการนำข้อมูลไปรื้อไฟล์จากฟิล์มเอกซเรย์มาคำนวณสร้างภาพด้วยวิธีฟิลเตอร์เบคโปรเจกชัน)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเลขซีที ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง B

Voltage/Exposure	Rod No.	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
140 kVp 150 mAs	1	12727	13716	13293	115.295
	2	12632	13756	13237	115.052
150 kVp 150 mAs	1	9124	9494	9299	96.431
	2	9063	9437	9212	95.979
160 kVp 150 mAs	1	8878	9248	9042	95.089
	2	8439	9502	9006	94.900

หมายเหตุ (Brass) density = 8.07 g/cm³

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 13293 ± 115.295 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 13237 ± 115.052

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9299 ± 96.431 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9212 ± 95.979

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9042 ± 95.089 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 9006 ± 94.900

จากผลของค่าเลขซีทีเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุมาเป็นตัวอย่าง B พบว่าค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดเดียวกัน และมีขนาดเท่ากันค่าเลขซีทีจะใกล้เคียงกัน รวมไปถึงแนวโน้มการลดลงของค่าเลขซีทีเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเลขซีที ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง C

Voltage/Exposure	Rod No.	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
140 kVp 150 mAs	1	12191	12537	12387	111.297
	2	11997	12797	12423	111.459
150 kVp 150 mAs	1	8581	8930	8779	93.696
	2	8625	8979	8771	93.654
160 kVp 150 mAs	1	6821	7593	7261	85.212
	2	6981	7407	7294	85.405

หมายเหตุ (Copper) density = 8.71 g/cm^3

จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 12387 ± 111.297 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 12423 ± 111.459

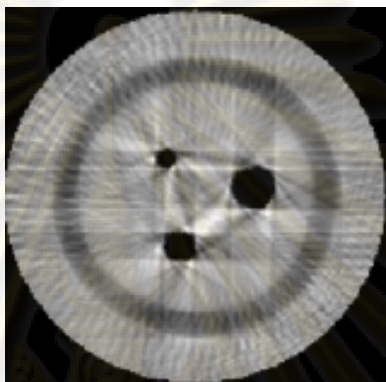
ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 8779 ± 93.696 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 8771 ± 93.654

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 150 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 1 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 7261 ± 85.212 , ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C แห่งที่ 2 มีค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย 7294 ± 85.405

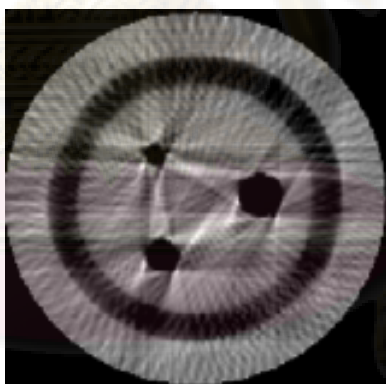
เมื่อเปลี่ยนเป็นตัวอย่าง C ก็ยังพบว่าค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดเดียวกันขนาดเท่ากันมีค่าใกล้เคียงกัน ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะในกลุ่มของวัสดุชนิดเดียวกัน แต่ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุต่างชนิดกันเช่น Steel, Brass และCopper ซึ่งมีความหนาแน่น 7.83 , 8.07 และ 8.71 g/cm^3 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของค่าเลขซีทีจะลดลง แต่ไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะเป็นการถ่ายภาพเอกซเรย์ที่มีการจัด Geometry และเงื่อนไขการล้างฟิล์มไม่คงที่ จึงทำให้ค่าเลขซีทีไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวอย่างแต่ละชนิด

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัตถุชนิดเดียวกัน และขนาดต่างกัน

ส่วนที่สามทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ดูว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานชนิดเดียวกัน และขนาดต่างกันจะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างไร โดยออกแบบวัสดุที่ทดสอบเป็นทองแดงทรงกระบอกตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ฉายรังสีเอกซเรย์ที่พลังงาน 160 kVp 270 mAs และ 160 kVp 315 mAs ได้ผลวิจัยดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง E (Copper) ที่ 160 kVp 270 mAs



รูปที่ 4.14 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง E (Copper) ที่ 160 kVp 315 mAs

จากภาพโทโมกราฟีที่ได้ นำไปวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าเลขซีทีได้ผลดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขซีทีของแท่งทองแดงที่มีขนาดต่างกัน ที่ 160 kVp 270 mAs

Voltage/Exposure	Diameter (mm)	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
160 kVp 270 mAs	3	11679	12387	11929	109.220
	5	10412	10578	10508	102.509
	7	8288	8777	8575	92.601

หมายเหตุ (Copper) density = 8.71 g/cm^3

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขซีทีของแท่งทองแดงที่มีขนาดต่างกัน ที่ 160 kVp 315 mAs

Voltage/Exposure	Diameter (mm)	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
160 kVp 315 mAs	3	9889	11588	11138	105.537
	5	9227	9355	9284	96.354
	7	7394	7634	7520	86.718

หมายเหตุ (Copper) density = 8.71 g/cm^3



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ ขนาดของวัตถุ

จากตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง E ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 270 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของ

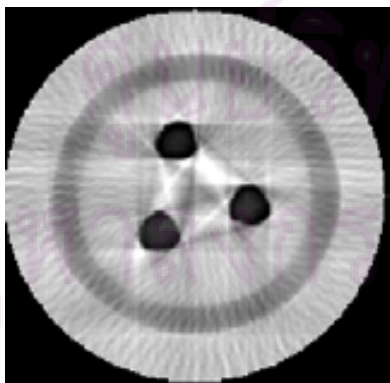
ทองแดงขนาด 3 มิลลิเมตรคือ 11929 ± 109.220 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตรคือ 10508 ± 102.509 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงขนาด 7 มิลลิเมตรคือ 8575 ± 92.601

จากตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง E ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 315 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงขนาด 3 มิลลิเมตรคือ 11138 ± 105.537 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตรคือ 9284 ± 96.354 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงขนาด 7 มิลลิเมตรคือ 7520 ± 86.718

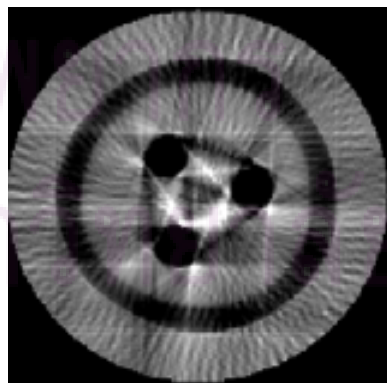
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าใดๆ นั้น ค่าเลขซีทีจะมีความเปลี่ยนแปลงตามขนาดของวัตถุ โดยวัตถุที่มีขนาดโตจะมีค่าเลขซีทีน้อยกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อต้องวิเคราะห์ชนิดของวัตถุ จึงต้องทำการเปรียบเทียบกับภาพโทโมกราฟีจากการถ่ายภาพของวัตถุตัวอย่างที่มีขนาด และรูปร่างเหมือนกันเท่านั้น

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานต่างชนิดกัน และขนาดเท่ากัน

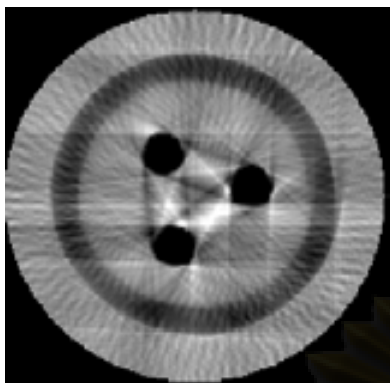
ส่วนที่สองทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ดูว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานต่างชนิดกัน และขนาดเท่ากันจะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างไร โดยออกแบบให้วัตถุตัวอย่างเป็นทองแดงรูปทรงกระบอกตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร, ทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร และเหล็กรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ทดลองโดยการเปลี่ยนค่าของความต่างศักย์ทั้งหมด 3 ค่าคือ 140 kVp, 150 kVp, 160 kVp และเปลี่ยนค่าExposure ทั้งหมด 4 ค่าคือ 240 mAs, 260 mAs, 270mAs, 292 mAs ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 4.16, รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18



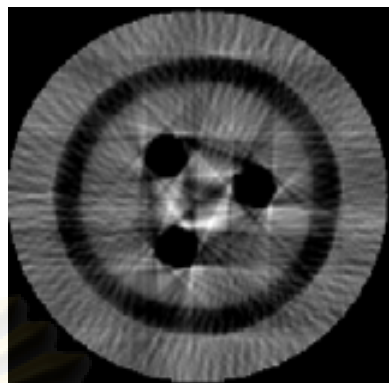
(ก) 140 kVp 240 mAs



(ข) 140 kVp 260 mAs

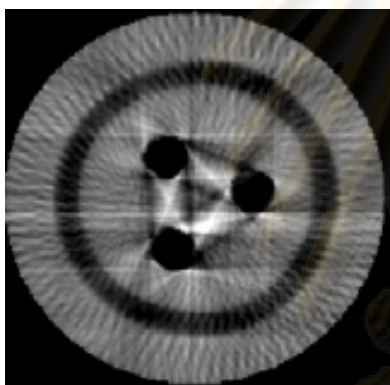


(ก) 140 kVp 270 mAs

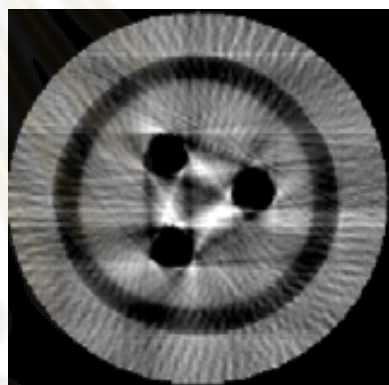


(ง) 140 kVp 292 mAs

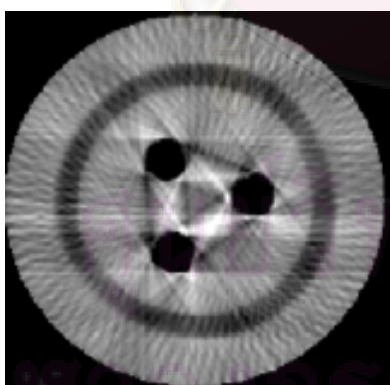
รูปที่ 4.16 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D เมื่อเลือกความต่างศักย์และค่าExposure เป็น (ก) 140 kVp 240 mAs (ข) 140 kVp 260 mAs (ค) 140 kVp 270 mAs (ง) 140 kVp 292 mAs



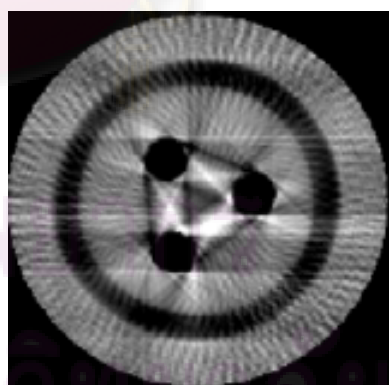
(ก) 150 kVp 240 mAs



(ข) 150 kVp 260 mAs

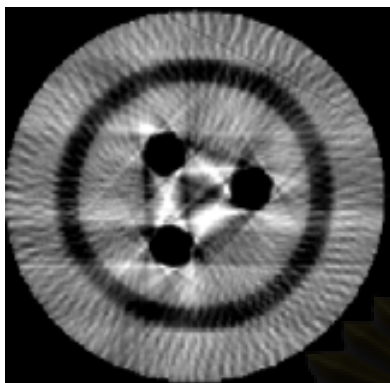


(ค) 150 kVp 270 mAs

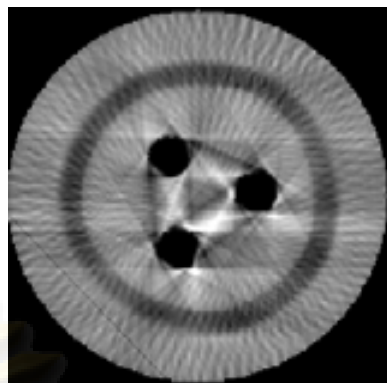


(ง) 150 kVp 292 mAs

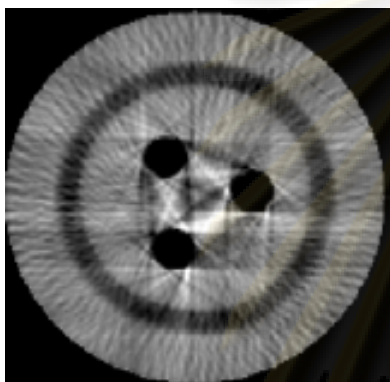
รูปที่ 4.17 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D เมื่อเลือกความต่างศักย์และค่าExposure เป็น (ก) 150 kVp 240 mAs (ข) 150 kVp 260 mAs (ค) 150 kVp 270 mAs (ง) 150 kVp 292 mAs



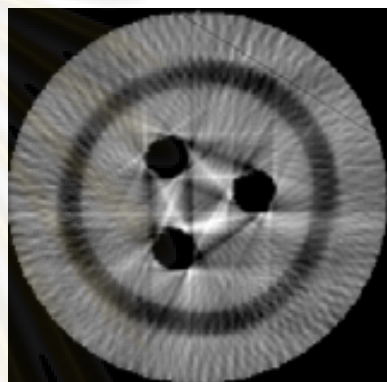
(ก) 160 kVp 240 mAs



(ข) 160 kVp 260 mAs



(ค) 160 kVp 270 mAs



(ง) 160 kVp 292 mAs

รูปที่ 4.18 แสดงภาพโทโมกราฟีของตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper) เมื่อเลือกความต่าง
 ศักย์และค่าExposure เป็น (ก) 160 kVp 240 mAs (ข) 160 kVp 260 mAs (ค) 160 kVp 270 mAs
 (ง) 160 kVp 292 mAs

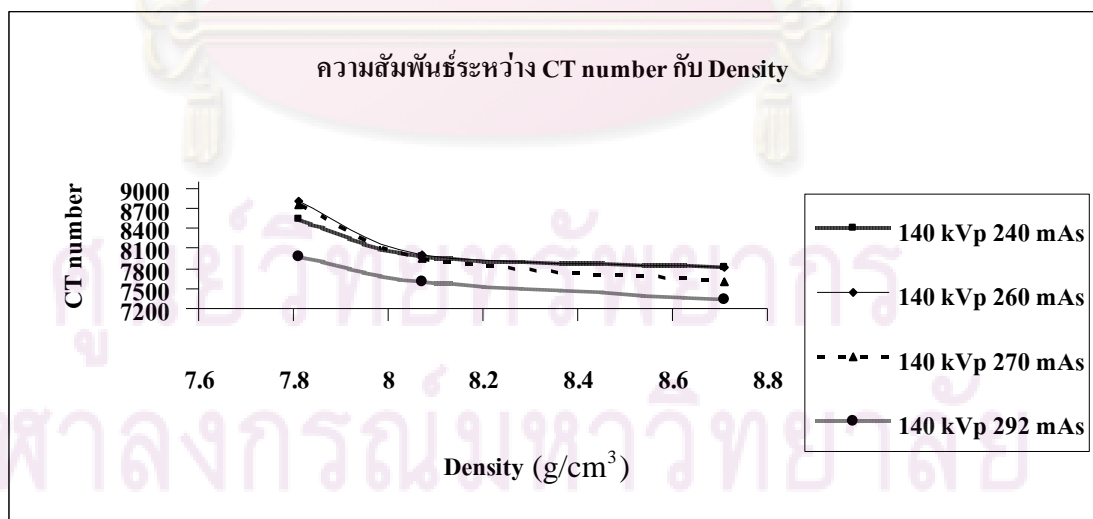
จากภาพโทโมกราฟีที่ได้แต่ละรูป นำไปวิเคราะห์อ่านค่าเลขซีทีโดยใช้โปรแกรมที่
 พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าเลขซีทีที่ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเลขซีทีของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ 140 kVp และค่า Exposure ต่างๆของ ตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper)

Voltage/Exposure	Material	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
140 kVp 240 mAs	Steel	8296	8769	8543	92.428
	Brass	7832	8258	7979	89.325
	Copper	7608	7976	7810	88.374
140 kVp 260 mAs	Steel	8605	9005	8809	93.856
	Brass	7822	8168	8004	89.465
	Copper	7281	8275	7821	88.436
140 kVp 270 mAs	Steel	8499	9048	8753	93.557
	Brass	7813	8094	7947	89.146
	Copper	7392	7869	7594	87.144
140 kVp 292 mAs	Steel	7762	8160	7965	89.247
	Brass	7425	7894	7596	87.155
	Copper	7136	7526	7328	85.604

หมายเหตุ(Steel) density = 7.83 g/cm^3 (Brass) density = 8.07 g/cm^3 (Copper) density = 8.71 g/cm^3



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 140 kVp

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 240 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 8543 ± 92.428 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 7979 ± 89.325 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 7810 ± 88.374

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 260 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 8809 ± 93.856 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 8804 ± 89.465 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 7821 ± 88.436

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 270 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 8753 ± 93.557 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 7947 ± 89.146 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 7594 ± 87.144

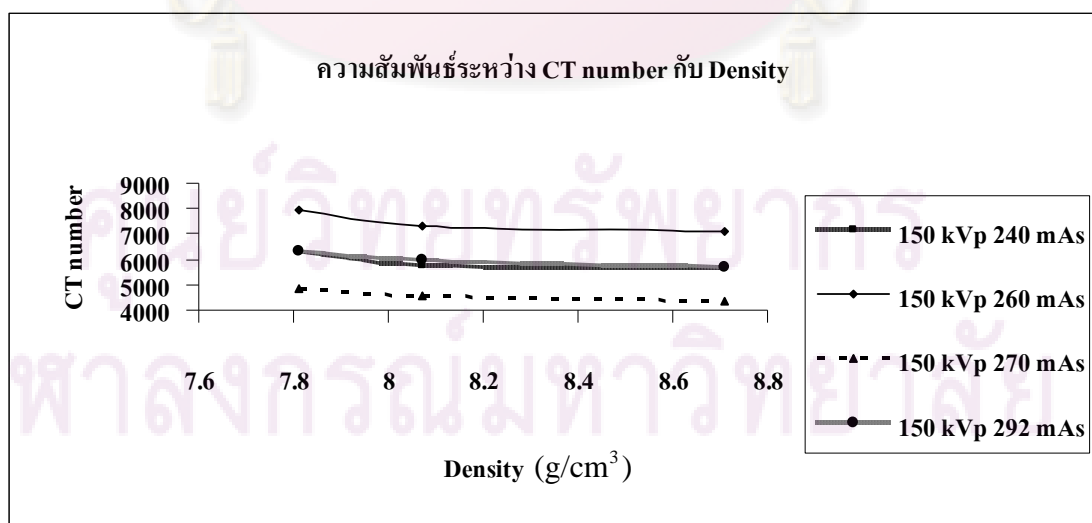
ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 140 kVp 292 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 7965 ± 89.247 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 7596 ± 87.155 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 7328 ± 85.604

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเลขซีทีของวัตถุชนิดต่างๆ ที่ 150 kVp และค่า Exposure ต่างๆของ ตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper)

Voltage/Exposure	Material	CT number Min	CT number Max	CT number Average	σ (Avg)
150 kVp 240 mAs	Steel	6219	6426	6298	79.360
	Brass	5719	5897	5787	76.072
	Copper	5558	5749	5667	75.279
150 kVp 260 mAs	Steel	7820	8154	7951	89.168
	Brass	7064	7654	7300	85.440
	Copper	6847	7332	7095	84.232
150 kVp 270 mAs	Steel	4702	4974	4832	69.513
	Brass	4436	4806	4594	67.779
	Copper	4283	4515	4375	66.144
150 kVp 292 mAs	Steel	6207	6464	6350	79.687
	Brass	5770	6235	6004	77.485
	Copper	5549	5762	5662	75.246

หมายเหตุ(Steel) density = 7.83 g/cm^3 (Brass) density = 8.07 g/cm^3 (Copper) density = 8.71 g/cm^3



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 150 kVp

จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 240 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 6298 ± 79.360 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 5787 ± 76.072 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 5667 ± 75.279

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 260 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 7951 ± 89.168 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 7300 ± 85.440 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 7095 ± 84.232

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 270 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 4832 ± 69.513 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 4594 ± 67.779 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 4375 ± 66.144

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 150 kVp 292 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 6350 ± 79.687 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 6004 ± 77.485 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 5662 ± 75.246

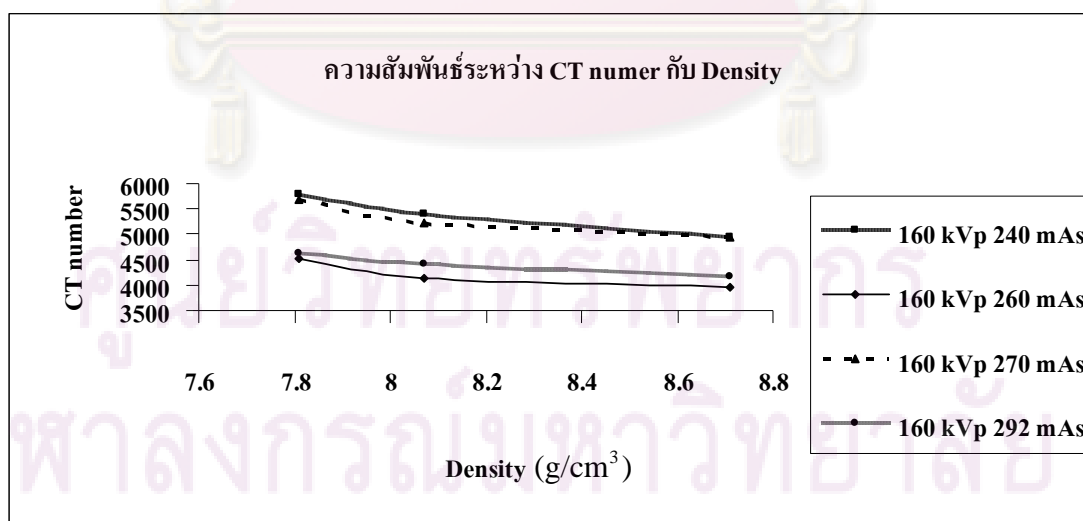


คุนยวิทยทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเลขซีทีของวัตถุนิตต่างๆ ที่ 160 kVp และค่า Exposure ต่างๆของ ตัวอย่าง D (Steel, Brass, Copper)

Voltage/Exposure	Material	CT number		CT number Average	σ (Avg)
		Min	Max		
160 kVp 240 mAs	Steel	5608	5971	5794	76.118
	Brass	5278	5574	5416	73.593
	Copper	4868	5045	4957	70.406
160 kVp 260 mAs	Steel	4366	4710	4538	67.365
	Brass	4037	4305	4146	64.389
	Copper	3901	4058	3963	62.952
160 kVp 270 mAs	Steel	5499	5869	5680	75.366
	Brass	5030	5365	5209	72.173
	Copper	4894	5031	4961	70.434
160 kVp 292 mAs	Steel	4550	4723	4626	68.015
	Brass	4316	4579	4404	66.363
	Copper	4091	4238	4155	64.459

หมายเหตุ(Steel) density = 7.83 g/cm^3 (Brass) density = 8.07 g/cm^3 (Copper) density = 8.71 g/cm^3



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CT number กับ Density ของตัวอย่าง D ที่ 160 kVp

จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 240 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 5794 ± 76.118 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 5416 ± 73.593 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 4957 ± 70.406

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 260 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 4538 ± 67.365 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 4146 ± 64.389 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 3963 ± 62.952

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 270 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 5680 ± 75.366 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 5209 ± 72.173 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 4961 ± 70.434

ผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่ความต่างศักย์และExposure เป็น 160 kVp 292 mAs จากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มพบว่า ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กคือ 4626 ± 68.015 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองเหลืองคือ 4404 ± 66.363 ค่าเลขซีทีที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของทองแดงคือ 4155 ± 64.459

ผลของค่าเลขซีทีจากการพิจารณาที่ค่า kVp ใดๆ และ ณ ค่า Exposure หนึ่ง พบว่าค่าเลขซีทีมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่นของวัตถุ (วัตถุชนิดต่างๆ) โดยวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าเลขซีทีที่น้อยที่สุดซึ่งได้แก่ ทองแดง (Copper) และค่าเลขซีทีของวัตถุเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของวัตถุลดลงได้แก่ ทองเหลือง (Brass) และเหล็ก (Steel) ตามลำดับ เนื่องจากวัตถุที่มีค่าความหนาแน่นมากๆ รังสีเอกซ์ทะลุผ่านได้น้อย ส่วนวัตถุที่มีค่าความหนาแน่นน้อย รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มค่า kVp และ Exposure จะทำให้แนวโน้มของค่าเลขซีทีลดลง ดังรูปที่ 4.19 - รูปที่ 4.21 ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมปรับเทียบค่าเลขซีทีจากผลการทดลอง

เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์ชนิดของวัตถุจากภาพโทโมกราฟี จำเป็นที่ต้องทราบค่าความสัมพันธ์ต่างๆ จากผลการทดลองดังกล่าว ดังนั้นการปรับเทียบค่าเลขซีทีจึงสามารถใช้ข้อมูลเลขซีทีบอกชนิดของวัตถุ ซึ่งเมื่ออ่านค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีแล้วค่าเลขซีทีที่อ่านได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเลขซีทีจากการปรับเทียบไว้ แล้วแสดงผลให้ทราบว่าวัตถุชนิดนั้นคืออะไร ซึ่งจากโปรแกรมดังกล่าวต้องกำหนดค่า kVp และค่า Exposure แล้วเมื่อเลือกภาพ

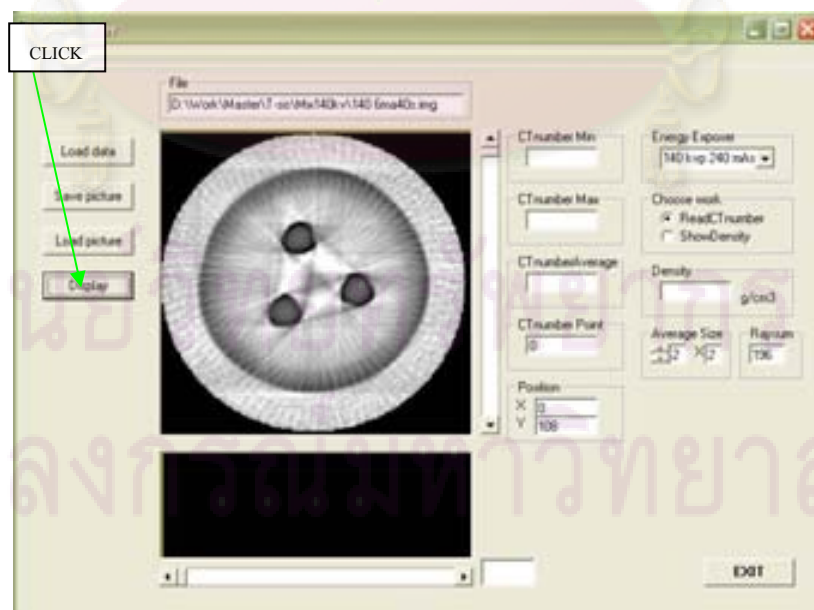
โทโมกราฟีมาแสดงและเลื่อนกรอบสี่เหลี่ยมไปยังบริเวณภาพวัตถุก็จะทำให้ทราบว่าคุณค่าเลขซีที่เป็นเท่าไร และเป็นวัตถุอะไร โดยค่าปรับเทียบดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 – ตารางที่ 4.9

ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ชนิดของวัตถุโดยโปรแกรมที่พัฒนา เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาแล้ว กด Load data เพื่อโหลดข้อมูลภาพโทโมกราฟี และเลือกไฟล์งานที่ต้องการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.22



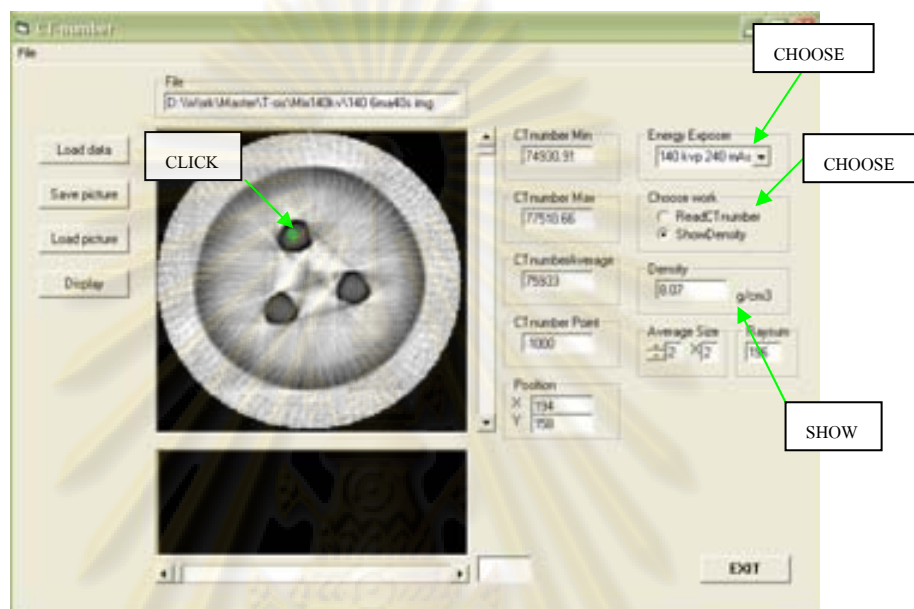
รูปที่ 4.22 เมนู Load data ของโปรแกรมการปรับเทียบค่าเลขซีที

จากนั้นกด Display เพื่อแสดงภาพโทโมกราฟีของไฟล์งานที่เลือกมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 เมนู Display ของโปรแกรมการปรับเทียบค่าเลขซีที

เลือกค่า kVp และ Exposure ที่กำหนดให้กับภาพโทโมกราฟี และเลือกให้แสดงผลของความหนาแน่น เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างว่าเป็นชนิดใด จากนั้นใช้เมาส์ลากไปยังจุดที่ต้องการวิเคราะห์หาคคลิกซ้ายที่เมาส์เพื่ออ่านค่าเลขซีที ซึ่งค่าเลขซีทีจะปรากฏในช่องข้อมูลต่างๆ ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงผลการคำนวณเมื่อคลิกซ้ายที่เมาส์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการพัฒนาโปรแกรมเปรียบเทียบค่าเลขซีที

โปรแกรมเปรียบเทียบค่าเลขซีทีที่สามารถแสดงผลค่าเลขซีทีที่สอดคล้องกับข้อมูลของวัตถุแต่ละชนิด โดยการกำหนดความกว้างของข้อมูลซีทีเฉลี่ยจากค่าที่ได้จากการทดลองรวมกับค่า $\pm\sigma$ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ซึ่งเมื่อเลื่อนตัวชี้ไปตำแหน่งภายในวัตถุก็จะสามารถแสดงผลเลขซีทีและทราบได้ว่าเป็นวัตถุชนิดใด

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเท่ากัน

5.1.2.1 ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง A ที่มีวัสดุเป็นเหล็กทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร 2 แท่ง

จากผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีที่ได้พบว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานเหล็กที่มีขนาดเท่ากันมีค่าเลขซีทีที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพลังงานรังสีเอกซ์ที่ใช้มีค่ามากขึ้นการทะลุชิ้นงานของรังสีเอกซ์ยิ่งมากขึ้นทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

5.1.2.2 ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง B ที่มีวัสดุเป็นเหล็กทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร 2 แท่ง

จากผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีที่ได้พบว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานทองเหลืองที่มีขนาดเท่ากันมีค่าเลขซีทีที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพลังงานรังสีเอกซ์ที่ใช้มีค่ามากขึ้นการทะลุชิ้นงานของรังสีเอกซ์ยิ่งมากขึ้นทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

5.1.2.3 ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง C ที่มีวัสดุเป็นเหล็กทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร 2 แท่ง

จากผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีที่ได้พบว่าค่าเลขซีทีของชิ้นงานทองแดงที่มีขนาดเท่ากันมีค่าเลขซีทีที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพลังงานรังสีเอกซ์ที่ใช้มีค่ามากขึ้นการทะลุชิ้นงานของรังสีเอกซ์ยิ่งมากขึ้นทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

5.1.2.4 ค่าเลขซีทีกับความต่างศักย์ที่ใช้

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มดำมากขึ้น ค่าเลขซีทีที่อ่านได้จึงน้อยลงเนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดค่าเลขซีทีน้อยเมื่อฟิล์มดำมาก และค่าเลขซีทีจะมากเมื่อฟิล์มดำน้อย

5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกัน

5.1.3.1 ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง E ที่มีวัสดุเป็นทองแดงทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร

จากผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีในตัวอย่าง E ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กรังสีเอกซ์จะทะลุผ่านได้มากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่า ถึงแม้ว่าความหนาแน่นจะใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าขนาดของวัสดุมีผลต่อค่าเลขซีทีด้วย

5.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุต่างชนิดกันที่มีขนาดเท่ากัน

5.1.4.1 ค่าเลขซีทีของตัวอย่าง D ที่มีวัสดุเป็นเหล็กทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร, ทองเหลืองทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร และทองแดงทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร

จากผลการวิเคราะห์ค่าเลขซีทีในแต่ละพลังงานต่างๆพบว่าชิ้นงานเหล็กที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด รังสีเอกซ์จะทะลุผ่านได้มากที่สุดทำให้ได้ค่าเลขซีทีมากที่สุด ส่วนชิ้นงานทองเหลืองที่มีความหนาแน่นรองลงมา รังสีเอกซ์จะทะลุผ่านได้ปานกลางทำให้ได้ค่าเลขซีทีน้อยกว่าเหล็ก และชิ้นงานทองแดงมีความหนาแน่นมากที่สุด รังสีเอกซ์จะทะลุผ่านได้น้อยที่สุดทำให้ได้ค่าเลขซีทีน้อยที่สุด ดังนั้นในการใช้เทคนิคนี้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านอุตสาหกรรมจึงมีข้อจำกัดอยู่ที่ว่าจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างและส่วนประกอบที่เหมือนกัน และเปรียบเทียบจากเงื่อนไขค่า kVp และ mAs เดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการเปรียบเทียบค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม ซึ่งควบคุมเงื่อนไขได้ค่อนข้างยาก เช่น การจัดระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เพื่อเก็บข้อมูลโปรไฟล์ การล้างฟิล์ม และการสแกนอ่านค่าข้อมูลโปรไฟล์ การเปรียบเทียบค่าเลขซีทีจากการถ่ายภาพด้วยรังสีแต่ละครั้ง (แต่ละชุดข้อมูลโปรไฟล์) ข้อมูลดังกล่าวจะไม่มีความสัมพันธ์กันแต่จะมี

แนวโน้มนั้นเหมือนกัน ดังนั้นการใช้เลขซีทีในการพิจารณาค่าความหนาแน่นของวัตถุจึงสามารถทำได้จากชุดข้อมูลเดียวกันหรือจากฟิล์มของภาพข้อมูลโปรไฟล์ชุดเดียวกัน แนวทางในการใช้เลขซีทีเพื่อพิจารณาความบกพร่องของวัตถุจากภาพโทโมกราฟีจึงควรมีการพัฒนากระบวนการถ่ายภาพด้วยรังสีให้ได้ภาพที่มีความคมชัด และค่าความดำคงที่ เช่น เมื่อถ่ายภาพวัตถุชนิดเดียวกันโดยปรับค่า kVp และ mAs คงที่ จะต้องได้ค่าข้อมูลโปรไฟล์ที่มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำได้ค่าเลขซีทีจากภาพโทโมกราฟีคงที่

5.2.2 เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะค่าเลขซีทีจากวัสดุเพียง 3 ชนิด และยังกำหนดเงื่อนไขในการตรวจสอบไม่มากเท่าที่ควรเพื่อให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้น ควรทำการศึกษาวัสดุชนิดอื่นๆ ในการทดลองด้วย เช่น อะลูมิเนียม หรือวัสดุอื่นๆ ที่นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

5.2.3 สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอายุการใช้งานที่นานมากแล้วจึงทำให้ค่า kVp และ mAs ไม่คงที่ สังกัดได้จากผลของภาพถ่ายแต่ละครั้ง จึงควรเลือกเครื่องถ่ายภาพรังสีเอกซ์อื่นที่มีประสิทธิภาพดีกว่านี้

5.2.4 ควรศึกษารายละเอียดของ CT และ MRI เพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์และปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] สมยศ ศรีสถิตย์ และอรรณพร ภัทรสุมันต์. การคำนวณการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [2] มานัส มงคลสุข. พื้นฐานทางฟิสิกส์ของ CT และ MRI. กรุงเทพมหานคร: ไพศาลศิลป์การพิมพ์, 2532.
- [3] มงคล วรรณประภา. การพัฒนาระบบสแกนรังสีแกมมาเพื่อคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- [4] นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [5] John R. Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. New York: Addison-Wiley publishing company, 1975.
- [6] Bushong SC. Computed tomography. Essentials of medical imaging series. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [7] นิเวศ ศรีคุณ. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [8] สุเมธ ทิพย์ไกรสร. การพัฒนาระบบสแกนอ่านค่าความดำรายละเอียดสูงสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [9] วัชรพงษ์ ปถมพานิชย์. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [10] นารายณ์ รัตนไพโรจน์จี. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

1 Interpolation

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัตถุ (Mass Attenuation coefficient) โดยวิธี Interpolation ของตัวอย่างเหล็กที่พลังงาน 140 kVp

จากตารางสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัตถุของเหล็กที่พลังงาน 150 kVp μ (cm²/g)
= 0.183

- $E_A = 150, \mu_A = 0.183$ (cm²/g)

จากตารางสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัตถุของเหล็กที่พลังงาน 100 kVp μ (cm²/g)
= 0.344

- $E_B = 100, \mu_B = 0.344$ (cm²/g)

- $E_C = 140, \mu_C = ?$ (cm²/g)

จากสมการวิธี Interpolation

$$\mu_C = \mu_B + \left(\frac{\mu_B - \mu_A}{E_B - E_A} \right) * (E_C - E_B)$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\mu_C = 0.344 + \left(\frac{0.344 - 0.183}{100 - 150} \right) * (140 - 100)$$

$$\mu_C = 0.344 + (-0.128)$$

$$\mu_C = 0.2152$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัตถุ (Mass Attenuation coefficient) ของตัวอย่างเหล็กที่พลังงาน 140 kVp เท่ากับ 0.2152 (cm²/g)

2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation coefficient)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในวัตถุ (Linear Attenuation coefficient) ของตัวอย่างเหล็กที่พลังงาน 140 kVp

- จากตารางสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัตถุ (Mass Attenuation coefficient) ที่พลังงาน 140 kVp μ (cm²/g) = 0.2152
- ความหนาแน่น (Density) ของเหล็ก $\rho = 7.81$ (g/cm³)

จากสมการ μ (cm⁻¹) = μ (cm²/g) x ρ (g/cm³)
แทนค่าในสมการจะได้

$$\mu$$
 (cm⁻¹) = 0.2152 (cm²/g) x 7.81 (g/cm³)

$$\mu$$
 (cm⁻¹) = 1.680712

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของเหล็กเท่ากับ 1.680712

3 ค่าเปลี่ยนแปลงมาตรฐาน (Standard deviation) σ

การคำนวณค่าเปลี่ยนแปลงมาตรฐาน (Standard deviation) ของข้อมูลตัวอย่างเหล็กที่พลังงาน 140 kVp

- CT number Average (N) = 8543

จากสมการคำนวณค่าเปลี่ยนแปลงมาตรฐาน

$$\sigma = \sqrt{N}$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\sigma = \sqrt{8543}$$

$$\sigma = 92.428$$

ดังนั้นค่าเปลี่ยนแปลงมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 92.428

4. ค่าความหนาแน่นของวัตถุ (Density)

การคำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่างเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร สูง 2 เซนติเมตร หาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$m = 5.79627 \text{ g}, v = 0.73972 \text{ cm}^3$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\rho = \frac{5.79627(\text{g})}{0.73972(\text{cm}^3)}$$

$$\rho = 7.83 \text{ g/cm}^3$$

ดังนั้นความหนาแน่นของเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร เท่ากับ 7.83 g/cm^3

5. การปรับแก้ข้อมูลโปรไฟล์

เมื่อสแกนอ่านข้อมูลโปรไฟล์จากฟิล์มเอกซเรย์ ซึ่งใช้ฟิล์มจำนวน 2 แผ่นต่อการถ่ายภาพ ชิ้นงานตัวอย่าง 1 ชิ้น ฟิล์มทั้ง 2 แผ่น และค่าExposure ที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้ความดำบนฟิล์มแต่ละโปรไฟล์ไม่สม่ำเสมอด้วย ดังนั้นการปรับแก้ข้อมูลโปรไฟล์ให้มีค่าความดำที่สม่ำเสมอกันในทุกๆ โปรไฟล์สามารถทำได้โดย

5.1 Normalization

หาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลโปรไฟล์ โดยนำค่าต่ำสุดมาลบออกจากค่าความดำทุกๆ จุดบนข้อมูลโปรไฟล์ และนำค่าสูงสุดตั้งลบออกด้วยค่าความดำทุกๆ จุดบนข้อมูลโปรไฟล์ ก็จะทำให้ได้ข้อมูลโปรไฟล์เปลี่ยนจากค่ามากเป็นค่าน้อย ซึ่งจะทำให้ข้อมูลโปรไฟล์กลับด้านจากข้อมูลเดิม

5.2 Correction film

นำข้อมูลดังกล่าวมาปรับแก้ด้วยวิธี Shading correction ดังสมการ

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{\mu x}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = \mu x$$

ดังนั้น
$$\mu x = \ln \left(\frac{I - B}{I_0 - B} \right)$$

- เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของฟิล์มเมื่อยังไม่มีวัตถุ
 I คือ ความเข้มของฟิล์มเมื่อผ่านวัตถุ
 μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี
 x คือ ขนาดของวัตถุ
 B คือ ค่าความเข้มของรังสีพื้นฐาน (Background)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรชัย ชูติรัตนานันท เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2526 จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย