


ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำโดยใช้หัววัดพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่ง



นายอร โฉม บัญพัฒนาภรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

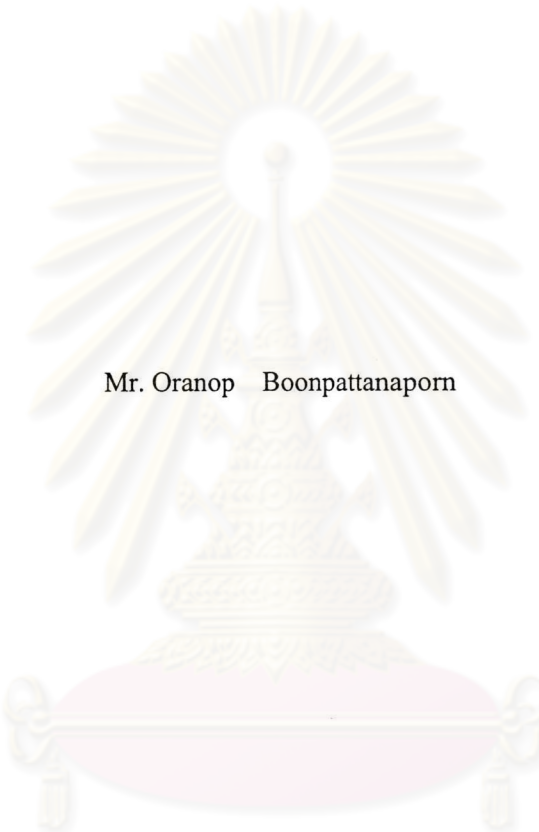
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0100-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SOFT X-RAY IMAGING SYSTEM USING A POSITION-SENSITIVE GAS FLOW  
PROPORTIONAL COUNTER



Mr. Oranop Boonpattanaporn

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0100 -4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำโดยใช้หัววัดพรอพอร์ชันแนล  
แบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่ง

โดย

นายอร โณพ บุญพัฒนาภรณ์

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

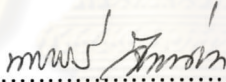
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์เคโซ ทองอร่าม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์เคโซ ทองอร่าม)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

อรโณพ บุญพัฒนาภรณ์: ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำโดยใช้หัววัดพรอพพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่ง (A SOFT X-RAY IMAGING SYSTEM USING A POSITION-SENSITIVE GAS FLOW PROPORTIONAL COUNTER )  
 อ. ที่ปรึกษา : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.เดโช ทองอร่าม, 103 หน้า.  
 ISBN 974 -17-0100-4.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) พร้อมทั้งทดสอบการถ่ายภาพรังสีของวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และตัวอย่างทางชีววิทยาด้วยเทคนิคการสแกน โดยใช้หัววัดรังสีพรอพพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่งซึ่งมีระยะความไวต่อตำแหน่ง 20 ซม. ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีประหยัด ทำงานร่วมกับระบบสแกนวัสดุตัวอย่างที่มีพื้นที่ 20 ซม. × 30 ซม. ระบบวัดสัญญาณตำแหน่งรังสีแบบไรส์ไทม์ (rise time) ใช้โมดูลมาตรฐาน NIM โดยการแปลงสัญญาณเวลาเป็นสัญญาณตำแหน่งเชิงตัวเลข ใช้อุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นขนาดสัญญาณ (TAC) ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง (MCA) ส่วนกระบวนการสร้างภาพควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ตสื่อสารข้อมูล 2 ชนิด คือ ระบบควบคุมการสแกนวัสดุ ตัวอย่างใช้พอร์ตเครื่องพิมพ์ ส่วนระบบแปลงสัญญาณตำแหน่งเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขซึ่งทำงานด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง ขนาด 1024 ช่องวัด ส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS-232 เพื่อสร้างข้อมูลภาพ

จากการทดลองถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอกซ์พลังงาน 5.9 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากต้นกำเนิดรังสีเหล็ก-55 ความแรง 5.83 มิลลิวินาที จักระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับวัสดุตัวอย่างห่างกัน 15 เซนติเมตร และจักระยะวัสดุตัวอย่างให้ใกล้กับช่องทางเข้ารังสีเท่าที่จะทำได้ ใช้อัตราการสแกนวัสดุตัวอย่าง 1.6 มม./สตีป แต่ละสตีปใช้เวลา 100 วินาที เลือกย่านเวลาในการแปลงผันสัญญาณตำแหน่ง  $20 \times 10^3$  นาโนวินาที พบว่าผลการถ่ายภาพตัวอย่างด้วยระบบถ่ายภาพที่พัฒนาขึ้นที่ความละเอียดภาพ  $256 \times 256$  จุด ให้ผลความเปรียบต่างดี และมีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพ 1.0 มม

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
 สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
 ปีการศึกษา 2544

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



## 4170628921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: A SOFT X-RAY IMAGING / RADIOGRAPHY / POSITION-SENSITIVE DETECTOR / PROPORTIONAL COUNTER

ORANOP BOONPATTANAPORN : A SOFT X-RAY IMAGING SYSTEM USING A POSITION-SENSITIVE GAS FLOW PROPORTIONAL COUNTER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA , THESIS CO-ADVISOR : DECHO THONG-ARAM , 103 pp. ISBN 974-17-0100-4

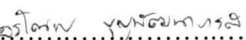
A soft x-ray imaging system using a position-sensitive gas flow proportional counter (PSGFPC) was developed and tested for nondestructive inspection of low density and biological specimens. The PSGFPC having a sensitive length of 20 cm was installed on the developed single translation scanning system capable of radiographing the specimen with a maximum dimension of 20 cm × 30 cm. The position-dependent rise time of the output pulses was measured by a rise time measuring system on NIM standard set and converted to digital position data by a developed time to amplitude converter (TAC) in conjunction with a multichannel analyzer (MCA). An image processing was controlled by a microcomputer via 2 communication ports which were the printer port for specimen scanning and the RS-232 serial port for image profile transferring from 1024 channel MCA.

An Fe-55 soft x-ray source at 5.9 keV energy and 5.83 mCi activity was arranged for radiography , the distance from a source to specimen was 15 cm while keeping the distance from specimen to the detector window as close as possible. The specimen scanning rate was set at 1.6 mm/step with 100 s counting time for each step and a  $20 \times 10^3$  ns converting time range of the TAC was selected. The 256×256 pixels radiographic image showed satisfactory contrast with an image resolution of 1 mm.


Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2001

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ อาจารย์เดโช ทองอร่าม ที่ให้โอกาสในการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำด้วยดีตลอดมา รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ โคนศิริ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสร้างอุปกรณ์ประกอบหัวเครื่องสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นกำลังใจ และให้การอบรมสั่งสอน

ขอขอบคุณ คุณวสันต์ อัมพูชนี คุณหัตถฤกษ์ เนียมอินทร์ คุณภัทราวดี มากมี คุณสุเมธ ทิพย์ไกรสร คุณกิตติพงษ์ เกษมสุข เพื่อนๆ และน้องๆทุกคนที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ ลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัย วิทยานิพนธ์บางส่วน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. กระบวนการแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์ทางจอภาพ.....	4
2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	4
2.1.1 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร.....	4
2.1.2 การลดทอนของปริมาณรังสีเอกซ์ในวัสดุ.....	9
2.1.3 องค์ประกอบของการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	11
2.1.4 การแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์บนจอภาพ.....	15
2.2 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดไวต่อตำแหน่ง.....	19
2.2.1 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล.....	19
2.2.2 โครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง.....	21
2.2.3 การวัดตำแหน่งแบบไรส์ไทม์.....	22
2.3 การควบคุมระบบสแกนสร้างภาพด้วยไมโครคอมพิวเตอร์.....	24
2.3.1 หลักการควบคุมระบบสแกนสร้างสัญญาณภาพ.....	24
2.3.2 โครงสร้างของพอร์ตเครื่องพิมพ์.....	26
2.3.3 พอร์ตข้อมูล.....	27
2.3.4 พอร์ตควบคุม.....	28

2.3.5	พอร์ตสถานะ.....	29
2.3.6	การใช้พอร์ตเครื่องพิมพ์ในการเชื่อมโยงกับอุปกรณ์ภายนอก.....	30
3.	การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....	31
3.1	โครงสร้างของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....	31
3.2	การปรับปรุงหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง.....	33
3.3	การออกแบบระบบสร้างสัญญาณภาพเชิงตัวเลข.....	34
3.3.1	วงจรหน่วงเวลาสัญญาณพัลส์.....	35
3.3.2	อุปกรณ์แปลงคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณชนิดอนาล็อก.....	36
3.4	การออกแบบระบบบันทึกข้อมูลและแสดงผลทางจอภาพ.....	40
3.5	การออกแบบระบบสแกนวัสดุทดสอบ.....	41
3.6	การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ.....	43
4.	ผลทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....	44
4.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.1.1	อุปกรณ์วัดนิวเคลียร์มาตรฐาน NIM.....	45
4.1.2	อุปกรณ์ประกอบการทดลอง.....	46
4.2	การทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ.....	46
4.2.1	ทดสอบความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา.....	46
4.2.2	ทดสอบการทำงานและความเป็นเชิงเส้น.....	49
4.3	การทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง ของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	51
4.4	การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....	54
4.4.1	การทดสอบการทำงานของระบบสแกนและระบบสร้างภาพ.....	54
4.4.2	ทดสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างวัสดุและ หน้าต่างหัววัดรังสี.....	57
4.4.3	ทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด ตามแนวเส้น.....	59
4.4.4	ทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดคุณภาพ.....	59
4.5	เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบด้วยวงจรแปลงผันเวลา ที่พัฒนาขึ้น.....	60



4.6 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำด้วยตัวอย่างทางชีวภาพ.....	61
4.6.1 การทดลองถ่ายภาพตัวอย่างของบรรจุวัสดุปึกฉนวน.....	61
4.6.2 การทดลองถ่ายภาพตัวอย่างทางชีวภาพ.....	63
5.สรุปผลและเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	64
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก	
ก. แบบระบบกลสำหรับสแกนสร้างภาพ.....	69
ข. โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ.....	70
ค. รายละเอียดหัวต่อสาย remote control J112.....	95
ง. รายละเอียดช่วงสัญญาณของพอร์ตเครื่องพิมพ์.....	96
จ. ข้อมูลไอซี.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

## สารบัญตาราง

ญ

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญญาณที่ใช้กับพอร์ตเครื่องพิมพ์.....	27
ตารางที่ 2.2 แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน.....	30
ตารางที่ ก.1 การจัดขารับส่งสัญญาณที่พอร์ต J112 ของเครื่องวิเคราะห์ แบบหลายช่อง.....	76



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....5	
รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก.....6	
รูปที่ 2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน.....7	
รูปที่ 2.4 การเกิดเพอร์โฟดักชัน.....8	
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับพลังงานของโฟตอนใน อลูมิเนียม.....10	
รูปที่ 2.6 แผนภาพการวัดปริมาณรังสีเอกซ์หลังผ่านเนื้อวัสดุที่บริเวณต่าง ๆ.....11	
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....12	
รูปที่ 2.8 แสดงความเปรียบต่างในเชิงสัญญาณภาพ.....13	
รูปที่ 2.9 แผนภาพเชิงเรขาคณิตของการจัดอุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....13	
รูปที่ 2.10 แสดงการบิดเบือนของภาพถ่ายรังสีเนื่องจากแนวกึ่งกลางลำรังสี ไม่ตั้งฉากกับชิ้นงานและฟิล์ม.....15	
รูปที่ 2.11 แผนภาพระบบแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์โดยใช้ฉากเรืองรังสี.....16	
รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์.....17	
รูปที่ 2.13 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งตามแนว.....18	
รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสี.....19	
รูปที่ 2.15 ช่วงการทำงานของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล.....21	
รูปที่ 2.16 การเกิดอะวาลานซ์.....21	
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง.....22	
รูปที่ 2.18 แผนภาพสมมูลทางวงจรไฟฟ้าของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง สำหรับการวัดแบบโรสส์ไทม์.....22	
รูปที่ 2.19 แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสส์ไทม์ชนิดสัญญาณ 2 ทาง.....23	
รูปที่ 2.20 แผนภาพของระบบสแกนสร้างภาพด้วยไมโครคอมพิวเตอร์พื้นฐาน.....25	
รูปที่ 2.21 ระบบบัสภายในของพอร์ตเครื่องพิมพ์.....26	
รูปที่ 2.22 วงจรภายในของพอร์ตข้อมูล.....28	
รูปที่ 2.23 วงจรภายในของพอร์ตควบคุม.....29	
รูปที่ 2.24 แสดงวงจรภายในของพอร์ตสถานะ.....30	
รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....32	
รูปที่ 3.2.ก. โครงสร้างของหัววัดรังสีเติมรูปทรงกระบอกกลมกลวง.....33	

รูปที่ 3.2.ข. โครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น.....	34
รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบวัดตำแหน่งด้วยการวัดโรสไฟท์.....	35
รูปที่ 3.4 การทำงานของวงจรหน่วงเวลาสัญญาณ.....	36
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงช่วงเวลาของสัญญาณในวงจร TAC.....	38
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรแปลงผันคาบเวลาเป็นสัญญาณอนาลอก.....	38
รูปที่ 3.7 วงจรแปลงผันเวลาเป็นขนาดสัญญาณ.....	39
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายวงจรแปลงผันคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณที่พัฒนาขึ้น.....	39
รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงช่วงเวลาของระบบบันทึกข้อมูลสัญญาณภาพ.....	40
รูปที่ 3.10 การเชื่อมโยงสัญญาณของระบบบันทึกสัญญาณภาพ.....	41
รูปที่ 3.11 วงจรขับสแต็ปมอเตอร์.....	42
รูปที่ 3.12 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบสร้างภาพ.....	43
รูปที่ 3.13 โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ.....	44
รูปที่ 3.14 โปรแกรมแสดงโปรไฟล์และภาพ.....	44
รูปที่ 4.1 แผนภาพการจักระบบทดสอบความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา.....	47
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของความสามารถในการแจกแจงคาบเวลาระหว่าง วงจรถ่าย TAC ที่พัฒนาขึ้น กับ โมดูลของ CANBERRA.....	47
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของความสามารถในการแปลงผันคาบเวลาของวงจรถ่าย TAC ที่พัฒนา ขึ้นกับ โมดูลของ CANBERRA.....	48
รูปที่ 4.4 แผนภาพการจับอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของ TAC.....	49
รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณพล็อตจากการทำงานของ TAC ที่พัฒนาขึ้น.....	50
รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งพีคของช่วงเวลาที่แปรเปลี่ยนจาก 20 ns ถึง 200 ns.....	50
รูปที่ 4.7 เส้นกราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถ่าย TAC ที่พัฒนาขึ้น.....	51
รูปที่ 4.8 แผนภาพการจับอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง.....	52
รูปที่ 4.9 เส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของหัววัดรังสี (HV plateau) ที่พัฒนาขึ้น.....	52
รูปที่ 4.10 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งกับ HV bias.....	53
รูปที่ 4.11 แพทเทอร์นแสดงการวัดตำแหน่งของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	53
รูปที่ 4.12 แสดงการรบกวนของรังสีเอกซ์เรืองภายในหัววัดรังสี.....	54
รูปที่ 4.13 การจักระบบภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ.....	55



รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายบนจอภาพเปรียบเทียบระหว่างหัววัดรังสีที่แคโทดเป็นรูปทรง กระบอกกลมและรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม.....	57
รูปที่ 4.15 ผลทดสอบสัญญาณโปรไฟล์จากผลกระทบของระยะห่างระหว่าง วัสดุทดสอบกับหน้าต่างของหัววัดรังสี.....	58
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายรังสีจากแผ่นทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดแนวเส้น.....	59
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายรังสีจากแผ่นทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดจุดภาพ.....	59
รูปที่ 4.18 ผลทดสอบสัญญาณข้อมูลโปรไฟล์แผ่น template ในการแจกแจงรายละเอียดภาพ.....	60
รูปที่ 4.19 ผลเปรียบเทียบสัญญาณโปรไฟล์ของระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสใหม่.....	60
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของวัสดุที่บรรจุภายในซองจดหมาย.....	62
รูปที่ 4.21 ทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของตัวอย่างใบไม้.....	63