ระบบควบคุมความหนาของฉนวนสำหรับเครื่องหุ้มฉนวนสายไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี

นายภาสพงษ์ ปริธรรมมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5285-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A THICKNESS CONTROLLING SYSTEM OF ELECTRICAL WIRE INSULATING MACHINE USING RADIATION TRANSMISSION TECHNIQUE

Mr. Passapong Paritamma

สถาบันวิทยบริการ
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 2003

ISBN 974-17-5285-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมความหนาของฉนวนสำหรับเครื่องหุ้มฉนวนสายไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี
โดย	นาย ภาสพงษ์ ปริธรรมมา
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

…… อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

…… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาสพงษ์ ปริธรรมมา : ระบบควบคุมความหนาของฉนวนสำหรับเครื่องหุ้มฉนวนสายไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี. (A THICKNESS CONTROLLING SYSTEM OF ELECTRICAL WIRE INSULATING MACHINE USING RADIATION TRANSMISSION TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ , อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม ; 81 หน้า. ISBN 974-17-5285-7.

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์เทคนิคการถ่ายภาพรังสีแบบไมโครโฟกัสเพื่อพัฒนาระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟร่วมกับกรรมวิธีตรวจสอบขอบภาพ (edge detection) แบบโซเบล (Sobel) ในการวัดความหนาฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าและประเมินการเบี่ยงศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำในเชิงเวกเตอร์ตามแนวแกน X และแกน Y พร้อมทั้งกำเนิดสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนกันสำหรับใช้ควบคุมอัตราการฉีดฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ระบบกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาดโฟกัส 300 ไมโครเมตร ปรับเปลี่ยนพลังงานได้จาก 10 – 80 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่กระแสสูงสุด 5 มิลลิแอมแปร์ และระบบสร้างภาพชนิดเห็นภาพได้ทันที ใช้กล้องวีดิทัศน์ชนิด CCD ความไว 0.003 ลักซ์ ถ่ายภาพจากฉากเรืองรังสีของ OKMOTO รุ่น LUS สัญญาณภาพคอมโพสิตจะส่งผ่านวงจรจับภาพถ่ายรังสีเข้าไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงภาพและประมวลความหนาของฉนวน ผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมความหนาฉนวนสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถประเมินความหนาของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนหุ้ม PVC ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 , 1.5 , 2.5 และ 4 ตารางมิลลิเมตร เปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบมาตรฐานให้ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 120 ไมโครเมตร และสามารถส่งสัญญาณควบคุมความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำระหว่าง 0 – 0.16 มิลลิเมตร สัมพันธ์กับขนาดสัญญาณ 0 – 9.33 โวลต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370443221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORDS : ELECTRICAL WIRE INSULATING /ON LINE INSPECTION / MICRO - FOCUS X-RAY / X-RAY RADIOGRAPHY

PASSAPONG PARITAMMA : A THICKNESS CONTROLLING SYSTEM OF ELECTRICAL WIRE INSULATING MACHINE USING RADIATION TRANSMISSION TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-ADVISOR : DECHO THONG-ARAM , 81 pp. ISBN 974-17-5285-7.

The microfocus X-ray radiography was applied for developing a thickness controlling system of an electrical wire insulating machine associated with the edge detection by Sobel method to determine an insulation sheath thickness and evaluate a conductor wire off-center in terms of X-Y vector shifting. The evaluated results was employed to generate an error signal which was proportional to the shifting magnitude and could be used to control an injection rate of the machine. The developed system consisted mainly of 300 μm focus spot X-ray generating system with 10-80 keV energy adjustable at a maximum anode current of 5 mA and a real time fluoroscopic system using a 0.003 lux sensitivity CCD camera , coupled with a LUS type of OKAMOTO screen. A composite video signal was sent to microcomputer via a frame grabber unit for image processing and displaying. In operational test , the PVC insulated electrical wire at cross sectional area of 1 , 1.5 , 2.5 and 4 mm^2 were inspected comparing with the standard method. It was found that the inspected values were less than 120 μm error and the error signal from conductor wire shifting resulted at 0 - 0.16 mm corresponding to 0 – 9.33 V could be generated.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology Student's signature……

Field of study Nuclear Technology Advisor's signature……

Academic year 2003 Co-advisor's signature……

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมอาจารย์เดโช ทองอร่าม ซึ่งท่านได้สละเวลาอันมีค่าจากภารกิจที่มีอยู่อย่างมากมายเพื่อให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย รวมถึงการให้กำลังใจและการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี พร้อมกันนี้ขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยที่ให้การอุดหนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณบุษบา แซ่ลิ้ม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ช่วยติดต่อและประสานงานในการศึกษาวิธีการทดสอบสายไฟฟ้าตัวอย่างตามมาตรฐาน มอก. ที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ นิคมอุตสาหกรรมบางปู

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณทุกกำลังใจและมิตรภาพอันดีที่ได้รับจากพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคน อนึ่งผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณกำลังใจที่ทุกคนในครอบครัวได้มอบให้ โดยเฉพาะยิ่งมารดาและบิดา ซึ่งได้ให้ความรัก ความห่วงใย กำลังใจ คำชี้แนะและการสนับสนุนในทุก ๆ ด้านเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย …….. …… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……... จ

กิตติกรรมประกาศ…….. ฉ

สารบัญ…… ช

สารบัญตาราง…….. ญ

สารบัญภาพ……. ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…….. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……..… 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย……. 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย…… 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ……. 2

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..……..… 3

2 ทฤษฎี…… 4

2.1 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า……..…..... 4

2.1.1 ชนิดของสายไฟฟ้า ……..... 4

2.1.2 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าในกระบวนการผลิต …….. 6

2.1.3 มาตรฐานการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ……..……. 8

2.2 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบ real time …… 9

2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ …….. 9

2.2.2 ระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์. ……..…. 14

2.2.3 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส……. 16

2.2.4 ระบบเก็บข้อมูลภาพถ่ายรังสีเอกซ์…… 17

บทที่ หน้า

2.3 กระบวนการทางสัญญาณภาพ..... 20

2.3.1 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของภาพ..... 20

2.3.1.1 การปรับแก้ความสม่ำเสมอของพื้นภาพ 20

2.3.1.2 การปรับระดับความเปรียบต่างสัญญาณ 21

2.3.1.3 การทำ edge detection 22

3 การพัฒนาระบบควบคุมความหนาของฉนวนสายไฟฟ้า 27

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า..... 27

3.2 การออกแบบระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบ real time 30

3.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส 30

3.2.2 ฉากเรืองรังสี (Phosphor screen) 31

3.2.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพ 31

3.3 การออกแบบระบบกำเนิดรังสีเอกซ์ 32

3.3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด 33

3.3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 33

3.4 การออกแบบระบบประมวลสัญญาณภาพ 35

3.4.1 ระบบเก็บข้อมูลภาพ 35

3.4.2 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก 36

3.5 การพัฒนาโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพและประมวลผล 37

3.5.1 การพัฒนาโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ 37

3.5.2 การพัฒนาโปรแกรมประมวลความหนาของสายไฟฟ้า 38

4 ผลทดสอบการทำงานของระบบ..... 43

4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ..... 43

4.2 การทดสอบสเปกตรัมพลังงานของระบบกำเนิดรังสีเอกซ์..... 44

4.3 การทดสอบขีดจำกัดของกำลังขยายภาพ 45

บทที่ หน้า

4.4 การทดลองถ่ายภาพชิ้นงาน..... 47

4.5 การทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนา..... 50

4.6 การตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า..... 52

4.7 ผลทดสอบการกำเนิดสัญญาณความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงศูนย์กลาง 53

5 สรุปผลและเสนอแนะ 55

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 55

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 56

รายการอ้างอิง 58

ภาคผนวก 59

ภาคผนวก ก. 60

ภาคผนวก ข. 64

ภาคผนวก ค. 65

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความหนาของฉนวนหุ้มสายบางชนิด 6
ตารางที่ 2.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ใช้กับสายไฟฟ้าบางชนิด 8
ตารางที่ 4.1 ขนาดของเงามัวขอบภาพที่กำลังขยายต่าง ๆ ด้วยการประเมินจากวิธีการ edge spread function 46
ตารางที่ 4.2 แสดงความสามารถในการแจกแจงความหนาเทียบกับเส้นลวดมาตรฐาน IQI .. 50
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบโปรแกรมตรวจสอบความหนาของฉนวนกับสายไฟตัวอย่าง 52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของสายหุ้มฉนวน 6
รูปที่ 2.2 เครื่องจักรในการหุ้มฉนวนสายไฟฟ้า 7
รูปที่ 2.3 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการผลิต 8
รูปที่ 2.4 แสดงการวัดความหนาของฉนวน 9
รูปที่ 2.5 แสดงการจัดระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ 10
รูปที่ 2.6 แผนภาพส่วนประกอบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ 11
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าเร่งกับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ 12
รูปที่ 2.8 แสดงจุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 13
รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงประเภทของระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์ 14
รูปที่ 2.10 แสดงการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ด้วยต้นกำเนิดรังสีที่มีขนาดจุดโฟกัสต่างกัน 16
รูปที่ 2.11 แผนภาพของอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพถ่ายรังสีเอกซ์ 17
รูปที่ 2.12 รายละเอียดการสแกนแบบสอดแทรก 18
รูปที่ 2.13 รายละเอียดของสัญญาณภาพคอมโพสิต 19
รูปที่ 2.14 กลไกการแปลงสัญญาณภาพถ่ายรังสีเอกซ์ทางอ้อม 19
รูปที่ 2.15 การปรับระดับความเปรียบต่างของสัญญาณภาพ 22
รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างจุดภาพของภาพดิจิตอล 23
รูปที่ 2.17 แสดงหน้ากากสำหรับหาค่าแกรเดียนท์ในทิศทางแกน X และ แกน Y 24
รูปที่ 2.18 แสดงหน้ากากขนาด 3x3 ที่ใช้ในการหาขอบภาพ 25
รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างการหาขอบภาพโดยวิธีของ Sobel 25
รูปที่ 2.20 แสดงวิธีการตรวจหาเส้นขอบภาพ 26
รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า 28
รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณและภาพของการประมวลความหนา 29
รูปที่ 3.3 ระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์สำหรับตรวจสอบความหนาสายไฟฟ้า 30
รูปที่ 3.4 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์รุ่น BX-1 0.3 31
รูปที่ 3.5 แผนภาพของระบบแปลงสัญญาณ 32
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรจ่ายไฟฟ้าแก่หลอดรังสีเอกซ์แบบกราวนด์แคโทด 32
รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด 33
รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 34

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำปรับค่าได้ 34
รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง 35
รูปที่ 3.11 แผนภาพระบบเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ 36
รูปที่ 3.12 วงจรเชื่อมโยงสัญญาณกับพอร์ตเครื่องพิมพ์ 37
รูปที่ 3.13 แสดงการทำงานของโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ 39
รูปที่ 3.14 แสดงการทำงานของโปรแกรมประมวลความหนาของสายไฟฟ้า 40
รูปที่ 3.15 แสดงภาพหน้าจอหลักการทำงานของโปรแกรม 41
รูปที่ 3.16 ระบบตรวจสอบและควบคุมความหนาของฉนวนที่พัฒนาขึ้น 42
รูปที่ 4.1 แผนภาพของระบบทดสอบสเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์..... 44
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แอโนด..... 44
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์เมื่อแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่แอโนด..... 45
รูปที่ 4.4 การประเมินขีดจำกัดกำลังขยายภาพ 46
รูปที่ 4.5 ชิ้นงานทดสอบภาพถ่ายรังสี 47
รูปที่ 4.6 แสดงผลของภาพถ่ายชิ้นงานด้วยระบบตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟ – ฟ้า..... 49
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายเส้นลวดมาตรฐาน IQI เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA 50
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการแจกแจงความหนาของเส้นลวดมาตรฐาน 51
รูปที่ 4.9 แสดงโปรแกรมตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า 53
รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำ.. 54

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้าต้องตรวจสอบ และควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ว่า ขนาดของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าจะต้องไม่บางกว่า 0.1 มิลลิเมตร บวกด้วยร้อยละ 10 ของค่าที่กำหนดไว้ในสายไฟฟ้าแต่ละขนาด[1] ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ปัจจุบันการตรวจสอบความสมบูรณ์ในการหุ้มฉนวนสายไฟฟ้าทำกันอยู่ 2 ลักษณะ คือออนไลน์ (on–line) และออฟไลน์ (off–line) โดยการตรวจสอบแบบ off–line เป็นการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าหลังกระบวนการผลิต ด้วยการสุ่มตัดสายไฟฟ้า และวัดขนาดความหนาของฉนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์ ส่วนการตรวจสอบแบบ on–line เป็นการตรวจสอบระหว่างการผลิตด้วยวิธีทดสอบแรงดันทะลุฉนวนไฟฟ้า (breakdown discharge)[2] บริเวณฉนวนที่มีความบางผิดปกติ แต่วิธีตรวจดังกล่าวเป็นการตรวจหลังจากเกิดความผิดพลาดแล้ว ซึ่งจะต้องคัดผลิตภัณฑ์ออก โดยไม่ทราบว่าความสม่ำเสมอของความหนาฉนวนตลอดความยาวว่าเป็นอย่างไร มีผลให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรต้นทุนในการผลิต จากเหตุผลดังกล่าวจึงเกิดแนวคิดในการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าด้วยการใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีร่วมกับกระบวนการเก็บข้อมูลโปรไฟล์การวัดความหนาในแนวแกนตั้งและแกนนอนผ่านศูนย์กลางสายไฟฟ้า และประมวลการเบี่ยงศูนย์กลางของสายลวดตัวนำไฟฟ้าจากการวัดความหนา สร้างเป็นสัญญาณความผิดพลาดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อส่งกลับไปควบคุมความเร็วในการป้อนสายหุ้มฉนวน เป็นการควบคุมแบบปิดวงจร (closed loop feedback control) ในกระบวนการทำงานของเครื่องหุ้มฉนวนสายไฟฟ้า แทนการใช้ความชำนาญของช่างเทคนิคในการปรับแก้ระบบด้วยมือ (manual control) ซึ่งเป็นการควบคุมไม่ต่อเนื่องและอาจเกิดความเผลอเลอตามธรรมชาติของมนุษย์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าระหว่างกระบวนการฉนวนสายด้วยโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์ภาพในแนวแกน X และแกน Y ของสายไฟฟ้า

2. พัฒนาโปรแกรมประมวลความหนาของฉนวนไฟฟ้าและสร้างสัญญาณควบคุมความเร็วในการป้อนสายหุ้มฉนวนไฟฟ้า

3. เปรียบเทียบผลการวัดความหนากับวิธีมาตรฐานและความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุมกับความหนาที่คลาดเคลื่อนไป

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2 ออกแบบอุปกรณ์บังคับลำรังสีของต้นกำเนิดรังสีเพื่อให้ได้จุดโฟกัสที่มีขนาดเล็ก

3 ออกแบบและสร้างระบบเก็บโปรไฟล์ข้อมูลภาพในแนวแกน X และแกน Y

4 พัฒนาโปรแกรมประมวลความหนาและสร้างสัญญาณควบคุม

5 เปรียบเทียบผลการวัดความหนากับวิธีมาตรฐาน และความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุมกับความหนาที่คลาดเคลื่อน

6 สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระบบควบคุมความหนาของฉนวนไฟฟ้าในระบบการผลิตสายไฟฟ้า และเป็นแนวทางในการควบคุมความหนาของเครื่องจักรกลที่ใช้เทคนิคการหุ้มวัสดุแบบ on–line ชนิดอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 1974 August Haller ได้ทำการศึกษาเรื่อง การตรวจสอบการแตกหักของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี โดยอาศัยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาและใช้ฟิล์มเป็นตัวแสดงผล เพื่อตรวจสอบความผุกร่อนของเส้นลวดตัวนำภายในสายไฟฟ้าที่ไม่สามารถดูได้จากภายนอก แต่วิธีการถ่ายภาพโดยอาศัยเทคนิคการส่งผ่านรังสีนี้ ไม่สามารถตรวจพบการแตกหักของเส้นลวดตัวนำเพียง 10 – 30 %

2. ปี 1995 เดโช ทองอร่าม ได้ทำการศึกษาเรื่อง ระบบควบคุมความหนาแบบนิวคลีโอนิคสำหรับเครื่องรีดโลหะแผ่นบาง โดยได้พัฒนาเครื่องวัดความหนาของแผ่นโลหะด้วยเทคนิคนิวเคลียร์โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี เพื่อนำไปควบคุมระบบสกรูดาวน์ของลูกรีดในเครื่องรีดโลหะแบบรีดเย็นที่ระบบกลขาดความแม่นยำจากการใช้เป็นเวลานาน ไม่สามารถปรับแก้ด้วยการใช้แรงงานคนได้ ให้สามารถปรับแก้ความหนาต่อเนื่องในระบบอัตโนมัติได้ โดยระบบประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ดังนี้ เกจวัดความหนาแบบส่งผ่านรังสี ระบบวัดรังสี ระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข ไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบเชื่อมโยงสัญญาณ

3. ปี 1998 James H. Elder , and Stven W. Zucker ได้การทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการตรวจสอบขอบภาพเพื่อคำนวณวัดความหนาของรูปร่างต่าง ๆ ที่สามารถนำไปใช้ประมาณหาจุดโฟกัสและขนาดของขอบภาพมัวอันเกิดจากขอบภาพที่ไม่คมชัดและมีแสงเงาได้ โดยควบคุมระยะของสเกลของขอบที่มีความมัวให้อยู่ภายในขอบเขตของบริเวณพื้นที่ที่กำหนด เพื่อทำการประมาณค่าในแต่ละจุดของขอบภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

2.1.1 ชนิดของสายไฟฟ้า

สายไฟฟ้าตามความหมายทั่วไปแล้วจะหมายถึง สื่อนำกำลังไฟฟ้าจากจุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดที่ต้องการใช้ไฟฟ้า สายไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้แบ่งออกเป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ใช้ และองค์ประกอบในการเลือกใช้สายไฟฟ้าได้แก่ ความสามารถในการยอมให้กระแสไหลผ่านสูงสุด ความต้านทานภายในเส้นลวด คุณสมบัติของฉนวน การทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า การระบายความร้อน และสภาพความแข็งแรงทางกล เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้ เพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมมีการตรวจสอบ โดยเฉพาะฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบในการผลิตที่สำคัญในด้านความปลอดภัย สามารถป้องกันอุบัติเหตุเกี่ยวกับไฟฟ้ารั่วได้ ซึ่งตามประกาศของกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยทางไฟฟ้าได้ให้ความหมายของฉนวนไฟฟ้าไว้ดังนี้ [1]

“ ฉนวนไฟฟ้า คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการกีดกัน หรือขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำไฟฟ้า เพื่อป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวนำ หรือระหว่างตัวนำกับพื้นดิน ”

ฉนวนที่ใช้หุ้มสายไฟฟ้ามีอยู่หลายชนิด เช่น พีวีซี (PVC) พีอี (PE) เทฟลอน (Teflon) ฟลูออโรเทน (fluorotane) ซึ่งแต่ละชนิดก็ขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน สำหรับฉนวนไฟฟ้านั้นแรงดันยิ่งสูงฉนวนที่หุ้มต้องหนาขึ้นด้วย ฉะนั้นจึงได้กำหนดค่าการเป็นฉนวนด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า เช่น 300 , 600 , 1000 , 3000 โวลต์ เป็นต้น

มาตรฐานของสายไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่มีหลายมาตรฐาน เช่น B.W.G. (Birmingham Iron Wire Gauge) , A.W.G. (American Wire Gauge) , S.W.G. (British Standard Wire Gauge) และ M.M.G. (Miltimeter Gauge) แต่ที่นิยมใช้กันมากจะบอกเป็นแบบ A.W.G. และ S.W.G. (ชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้กับลวดทองแดงอาบน้ำยาใช้สำหรับพันขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า และมอเตอร์) ปัจจุบันนิยมบอกขนาดสายไฟฟ้าเป็นพื้นที่ของวงกลมของตัวนำไฟฟ้าตามหน่วย SI การวัดพื้นที่หน้าตัดของสายจึง

วัดเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2) ซึ่งเรียกว่าหน่วยเมตริก ส่วนระบบอังกฤษจะนิยมวัดเป็นเซอร์คิวลามิล (Circularmil)

การแบ่งประเภทของสายไฟฟ้า เมื่อพิจารณาตามการใช้งานทั่ว ๆ ไปทางไฟฟ้าจะแบ่งได้ 3 ประเภทคือ สายคู่ สายเดี่ยวและสายเคเบิลใต้ดิน แต่ถ้าพิจารณาตามลักษณะของสายไฟฟ้า แบ่งออกตามลักษณะภายนอกได้ 3 ประเภท คือ

ก. ประเภทที่ไม่มีฉนวนห่อหุ้มภายนอก โดยทั่วไปเรียกว่า สายเปลือย (bare conductor) ใช้เป็นสายไฟแรงสูง หรือแรงต่ำ ซึ่งมักจะวางพาดไว้กับเสาสูงๆเพื่อความปลอดภัย สายเปลือยนี้สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าสายหุ้มฉนวนที่มีขนาดและพื้นที่เท่ากันได้เกือบเท่าตัว เพราะขึงไว้ในที่สูงลมพัดผ่านเสมอ เป็นการระบายความร้อนทำให้สายไม่ร้อน สำหรับสายเปลือยนี้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นสายไฟฟ้าภายในอาคาร

ข. สายที่มีฉนวนห่อหุ้ม (insulated conductor) สายชนิดนี้ใช้กันมากตามอาคารบ้านเรือนและในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะจะให้ความปลอดภัยได้มากกว่าและป้องกันความชื้นได้ สำหรับสายที่มีฉนวนหุ้มนี้บางชนิดสามารถกันความร้อนได้ แบ่งออกเป็น

1. สายหุ้มยาง (rubber insulated wire or valeanized rubber cover) เป็นสายที่หุ้มด้วยยางมีทั้งแบบธรรมดาและแบบทนความร้อน สายนี้ใช้ไม่นานสายจะเปื่อยและเสื่อมคุณภาพ ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้

2. สายที่ห่อหุ้มภายนอกด้วยด้ายปัก (cotton braid) ได้แก่สายที่ห่อหุ้มด้วยยาง แต่ภายนอกจะถักด้ายห่อหุ้มไว้อีกชั้นหนึ่ง

3. สายหุ้มพีวีซี (Polyvinyl Chloride:PVC) ชนิดนี้ทนทานต่อดินฟ้าอากาศ ไม่ติดไฟ ทนต่อความร้อน แข็ง เหนียว ไม่เปื่อยง่ายนิยมใช้กันมาก

4. สายหุ้มพลาสติกธรรมดา เป็นสายอ่อนเส้นเล็ก ภายในมีหลายเส้นเป็นสายที่ไม่ถาวร ติดไฟได้ง่าย

5. สายเคลือบน้ำยา หรือสายอีนาเมล (enamel cover) เป็นสายเปลือยเคลือบด้วยน้ำยาเคมี ใช้กันมากในงานซ่อมพันขดลวดไดนาโม มอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า

6. สายที่มีเปลือกโลหะหุ้ม นิยมใช้ฝังเข้าผนังตึก หรือเป็นสายมีชีลด์สายชนิดนี้ราคาแพง

สายไฟฟ้าที่ใช้ในงานต่าง ๆ มีทั้งแบบที่มีสายลวดตัวนำเพียงเส้นเดียว(single core) และแบบที่ประกอบด้วยลวดตัวนำเส้นเล็ก ๆ หลายเส้นรัดเข้าด้วยกัน (multicore) ดังในรูปที่ 2.1 ขึ้นกับ

อัตราทนกระแสไฟฟ้า สายไฟฟ้าที่มีอัตราทนกระแสไฟฟ้าสูงจะใช้สายลวดตัวนำเล็กตีเกลียวให้มีพื้นที่โตพอในการทนกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สายมีความอ่อนตัว และมีพื้นที่ระบายความร้อนเพิ่มขึ้น

ก. แบบ single core ข. แบบ multicore

รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของสายหุ้มฉนวน[2]

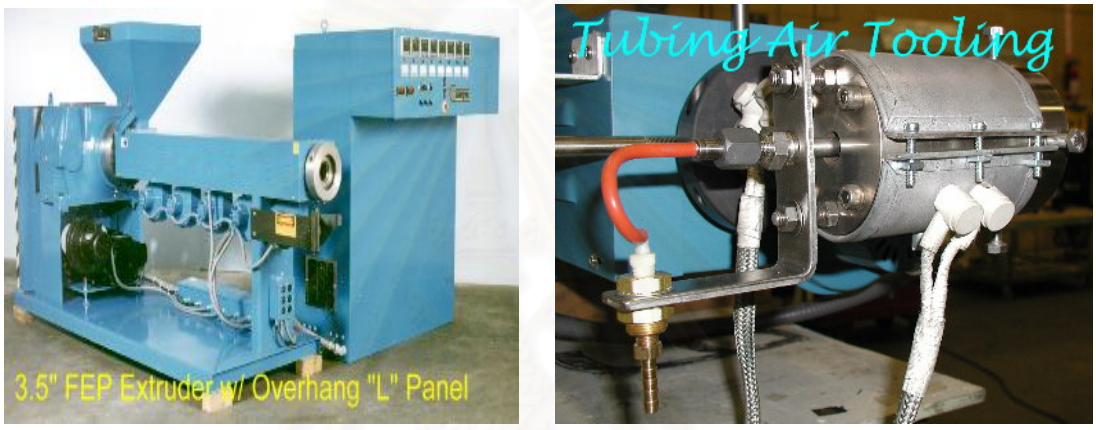
ตารางที่ 2.1 แสดงความหนาของฉนวนหุ้มสายบางชนิด[3]

ชนิดของสายไฟฟ้า	ขนาดสายไฟฟ้า $(mm)^2$	ชนิดของฉนวนไฟฟ้า	อัตราการทนแรงดันไฟฟ้า	ความหนาฉนวนไฟฟ้า (mm)
VAF,MEA	0.5		300 V	0.6
Type B	2.5	PVC	300 V	1.7
	2.5		300 V	1.2
VTF	0.5	PVC	300 V	0.8
	2.5		300 V	0.8
VV,MEA	1	PVC	750 V	0.8
Type B	2.5		750 V	0.8
NYY	1	PVC	750 V	1.5

2.1.2 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าในกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตสายไฟฟ้าชนิดสายหุ้มฉนวนนั้น สายลวดตัวนำ (conductor) ขนาดมาตรฐานจะถูกป้อนผ่านเครื่องหุ้มฉนวน (insulating extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ก. ฉนวนอาจจะเป็นโพลีไวนีลคลอไรด์ (PVC) โพลีเอทีลีน (PT) หรือพลาสติกอื่นๆ ขึ้นกับประเภทของสายไฟฟ้า ความ

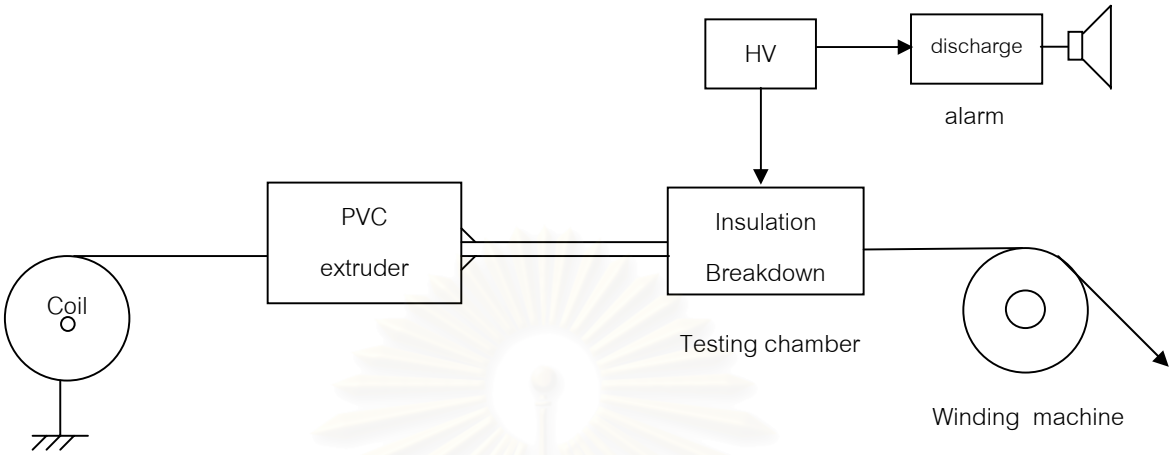
หนาของฉนวนจะถูกกำหนดโดยอัตราทนแรงดันไฟฟ้าและขนาดของลวดตัวนำดังตารางที่ 2.1 ระหว่างกระบวนการผลิตสายลวดตัวนำจะได้รับการควบคุมให้อยู่บริเวณศูนย์กลางของฉนวนที่หุ้มซึ่งขึ้นกับการปรับขนาดของหัวฉีดฉนวน (cross head) ดังในรูปที่ 2.2 ข. ให้มีความสมมาตร และการปรับความเร็วในการป้อนสายให้สัมพันธ์กับการเย็นตัวของฉนวนที่ฉีดออกมาขณะหุ้มสายลวดตัวนำ หากอัตราการป้อนเร็วและฉนวนยังไม่อยู่ตัวจะเกิดการเบี่ยงศูนย์กลางของลวดตัวนำ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและควบคุมความสัมพันธ์ดังกล่าว



ก. เครื่องหุ้มฉนวนไฟฟ้า ข. หัวฉีดฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

รูปที่ 2.2 เครื่องจักรในการหุ้มฉนวนสายไฟฟ้า

ดังนั้นจะเห็นว่าคุณภาพของสายไฟฟ้า ในด้านการทนอัตราแรงดันไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคจะขึ้นกับสมมาตรของฉนวนที่หุ้ม ถ้าเกิดการเบี่ยงศูนย์กลางของสายฉนวนด้านหนึ่งจะบางกว่ามาตรฐานทำให้อัตราทนแรงดันไฟฟ้าลดลง การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าระหว่างกระบวนการผลิต (on-line process) ที่นิยมใช้กันอยู่เป็นการตรวจสอบแรงดันทะลุฉนวนไฟฟ้า (breakdown discharge)[2] ซึ่งทำโดยการป้อนสายไฟฟ้าหลังหัวฉีดฉนวนผ่านแชมเบอร์ทดสอบแรงดันไฟฟ้าทะลุ (testing chamber) ที่มีการป้อนแรงดันทดสอบไว้ตามมาตรฐานดังในตารางที่ 2.2 เมื่อมีการตรวจพบความผิดปกติของฉนวน เช่น บางกว่าปกติหรือฉนวนไม่สมบูรณ์ เป็นต้น จะเกิดการดิสชาร์จ (discharge) และระบบจะส่งเสียงเตือน ให้หยุดเครื่องและปรับแก้ใหม่ด้วยผู้ชำนาญการ แผนภาพของระบบการตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าในกระบวนการผลิตแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การตรวจสอบฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ใช้กับสายไฟฟ้าบางชนิด[3]

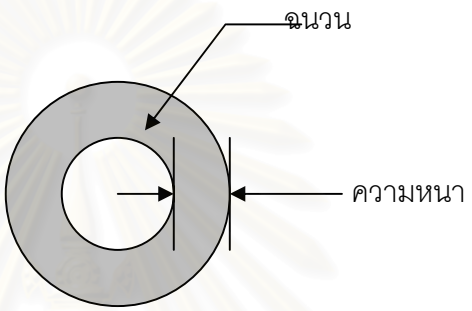
ชนิดของสาย	อัตราทนแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (circuit voltage)	แรงดันไฟฟ้าทดสอบ (testing voltage)
IV,VAF	300 V	2000 V
THW,VV	750 V	2500 V
0.6/1KV-CV	1000 V	2500 V
1.8/3.6KV-CV	3600 V	6500 V
3.6/6(7.2)KV-CV	7200 V	11,000 V

อย่างไรก็ตามการทดสอบฉนวนไฟฟ้าในระบบ on-line จะต้องทำควบคู่กับการสุ่มตรวจสอบแบบ off-line ตามมาตรฐานการควบคุมความหนาของฉนวนโดยการตรวจความหนาฉนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์

2.1.3 มาตรฐานการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมได้กำหนดวิธีตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าตามมอก.11-2531 พ.ศ.2531 ไว้ดังนี้คือ การตรวจสอบให้ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้าจากทุกแกน แกนละ 3

แห่ง แต่ละแห่งห่างกันอย่างน้อย 1 เมตร ปอกสิ่งห่อหุ้มภายนอกแกนออก แล้วถอดตัวนำออกจากแกนโดยไม่ให้ฉนวนเสียหาย ตัดฉนวนเป็นแผ่นบางตามระนาบซึ่งตั้งฉากกับแนวแกนของตัวนำ เพื่อทำเป็นชิ้นทดสอบ แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือเครื่องฉาย (projector) ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 10 เท่า วัดความหนาของชิ้นทดสอบ โดยวางระนาบรอยตัดตั้งฉากกับแนวการมองของสายตาดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการวัดความหนาของฉนวน [1]

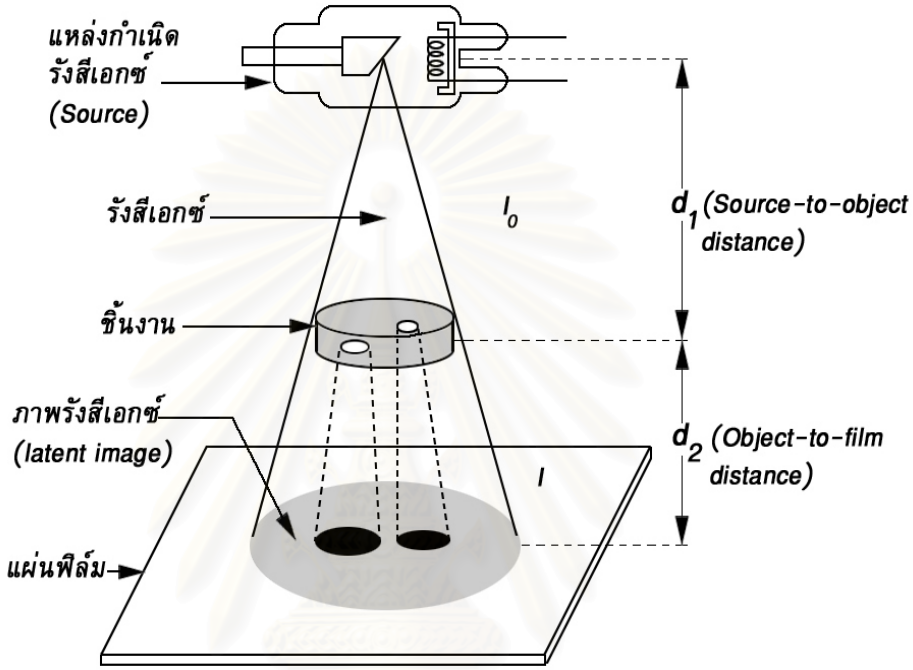
ให้ทำการวัดความหนา 6 ครั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวงเท่า ๆ กัน โดยการวัดครั้งแรกให้วัดตรงตำแแหน่งที่ฉนวนบางที่สุด การรายงานผลให้คำนวณค่าเฉลี่ยจาก 18 ค่า ซึ่งได้จากชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นใน 1 แกน โดยคิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วปัดเศษเหลือทศนิยม 1 ตำแหน่ง ค่าที่ได้คือค่าเฉลี่ยของความหนาฉนวน ในการคำนวณ ถ้าทศนิยมตำแหน่งที่สองเป็น 5 หรือมากกว่า ให้ปัดทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งให้มีค่าถัดขึ้นไป ถ้าทศนิยมตำแหน่งที่สองน้อยกว่า 5 ให้ปัดทิ้ง ค่าต่ำสุดที่ได้จาก 18 ค่า ให้ถือเป็นความหนาของฉนวน ณ จุดบางที่สุด โดยที่ความหนาเฉลี่ยของฉนวน ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด ฉนวนที่จุดใดจุดหนึ่งอาจบางกว่าที่กำหนดได้ แต่จะบางกว่าได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร บวกร้อยละ 10 ของค่าที่กำหนด

2.2 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบ real time

2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing ; NDT) วิธีหนึ่งที่ใช้ในปัจจุบันเพื่อศึกษาโครงสร้าง หรือตรวจสอบสิ่งบกพร่องภายในเนื้อชิ้นงาน

กระบวนการถ่ายภาพอาศัยคุณสมบัติในการทะลุทะลวงของรังสีเอกซ์ และอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ต่อชนิดของตัวกลางหรือความหนาของชิ้นงาน ผนวกกับการบันทึกปริมาณรังสีส่งผ่านบนแผ่นฟิล์ม สร้างเป็นภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.5[4]



รูปที่ 2.5 แสดงการจัดระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์[4]

โดยที่ความสัมพันธ์ของปริมาณรังสีที่ส่งผ่านเป็นไปตามสมการที่ 2.1[5]

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{.....} \quad (2.1)$$

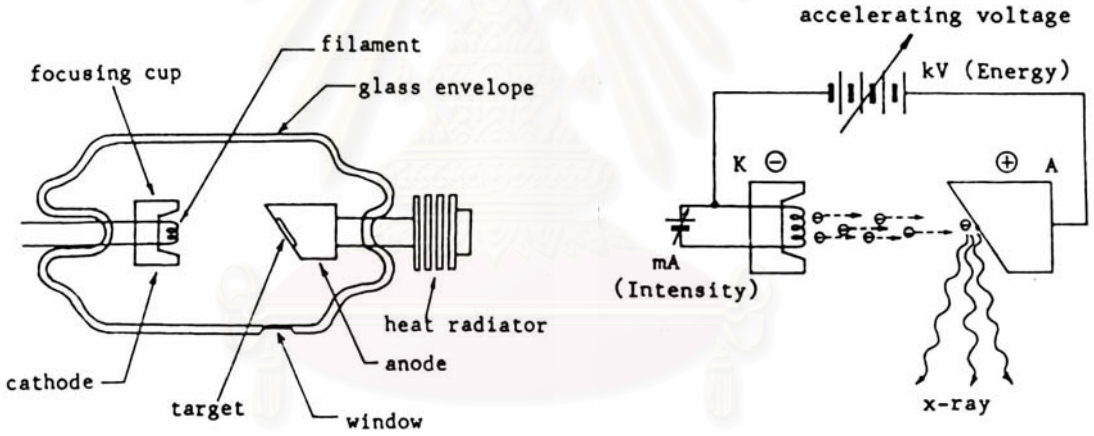
เมื่อ I_0 = ปริมาณของรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน

I_x = ปริมาณของรังสีหลังผ่านชิ้นงาน

μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (attenuation coefficient) , ซม$^{-1}$

x = ความหนาของชิ้นงาน , ซม.

ปริมาณรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน (I_0) กำเนิดจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งมีโครงสร้างและการทำงานดังแผนภาพรูปที่ 2.6 โดยอาศัยหลักการเร่งอิเล็กตรอนที่ผลิตจากฟิลาเมนต์ (filament) ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง (accelerating voltage) ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงเคลื่อนเข้าชนเป้า (target) ด้านขั้วไฟฟ้าบวก (anode) อิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าเกิดการสูญเสียพลังงานและปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่อง (continuous x-ray) ออกมา เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เบรมส์สตราลุง (Bremsstahlung) บางกรณีที่มีอันตรกิริยาร่วมจากผลของการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในโครงสร้างอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าหลุดจากวงโคจรจะเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นโคจร ทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (characteristic x-ray) ออกมาปะปนด้วย ดังแสดงในสเปกตรัมพลังงานรูปที่ 2.7 โดยสเปกตรัมเส้นทึบใช้แรงดันไฟฟ้าสูง 80kV ขณะที่สเปกตรัมเส้นประใช้แรงดันไฟฟ้าสูง 110 kV ซึ่งกำเนิดย่านพลังงานรังสีเอกซ์สูงพอที่จะทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์



ก. ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ ข. แผนภาพการทำงาน

รูปที่ 2.6 แผนภาพส่วนประกอบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์[4]

ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ผลิตจากไส้หลอดจะถูกเปลี่ยนเป็นปริมาณรังสีเอกซ์ประมาณร้อยละ 1 เท่านั้น ที่เหลือร้อยละ 99 จะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนบนผิวของเป้า จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนจากเป้าเพื่อป้องกันไม่ให้เป้าหลอมละลายกลายเป็นไอภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตรังสีเอกซ์

ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอดไปยังเป้า เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.2

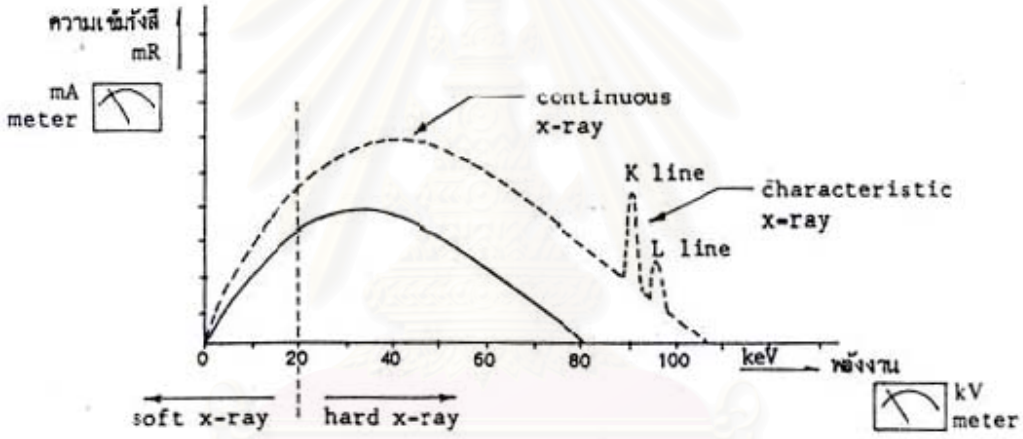
$$Icont \quad \alpha \quad (mA).(kV)^2.(Z) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.2)$$

โดยที่ Icont คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้

mA คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอดไปยังเป้า

kV คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับเป้าและไส้หลอด

Z คือ เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าเร่งกับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์[4]

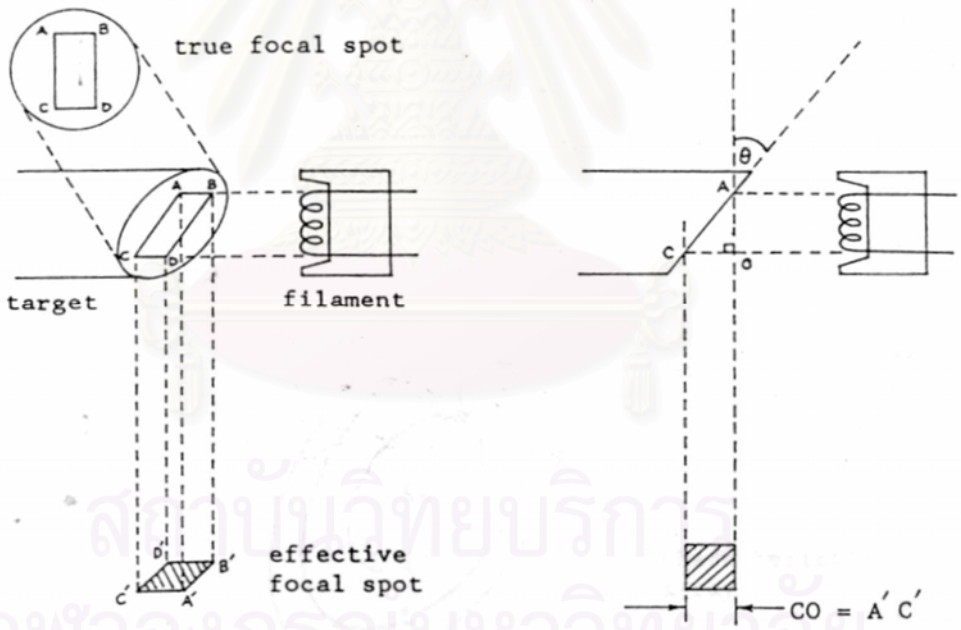
คุณสมบัติของรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ยังมีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ดังนี้

ก. พลังงานของรังสีเอกซ์จะมีผลโดยตรงต่อความเปรียบต่างของภาพ อันเป็นผลจากความสามารถในการทะลุทะลวงบริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน

ข. ความเข้มรังสี มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีเนื่องจากปริมาณรังสีในบริเวณต่างๆ ที่ส่งผ่านชิ้นงาน ถ้ามีน้อยจะต้องใช้เวลาในการบันทึกภาพนาน

ค. ขนาดจุดโฟกัส มีผลโดยตรงต่อความคมชัด (sharpness) ของภาพ เนื่องจากจุดโฟกัสที่มีขนาดใหญ่ จะเกิดเงาซ้อนของขอบภาพหนา ทำให้ภาพสูญเสียความคมชัดไป

จากที่กล่าวมาแสดงว่า ขนาดของจุดโฟกัสมีผลต่อความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ดังนั้น ผู้ผลิตหลอดรังสีเอกซ์จึงพยายามออกแบบให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีจุดโฟกัสเล็ก โดยเฉพาะงานถ่ายภาพรังสีที่ต้องการรายละเอียดภาพสูง จะต้องใช้หลอดแบบไมโครโฟกัส ซึ่งขนาดของโฟกัสจะมีตั้งแต่ 500 μm ลงไป[6] จากโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ ณ บริเวณเป้ากำเนิดรังสีจะเห็นว่าขนาดของจุดโฟกัสเกี่ยวข้องกับการตกกระทบของลำอิเล็กตรอนบนระนาบของเป้า เกิดเป็นบริเวณพื้นที่ของจุดโฟกัสจริง (true focal spot) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ABCD ดังในรูปที่ 2.8 ก. แต่ในรูปลักษณะการใช้งานผลของบริเวณปลดปล่อยรังสีในแนวตั้งฉากกับชิ้นงานจะทำให้เกิดจุดโฟกัสใช้งาน (effective focal spot) บนพื้นที่ A'B'C'D' ซึ่งสามารถคำนวณได้จากภาพฉายทางเรขาคณิตตามรูปที่ 2.8 ข. ดังนั้นขนาดของจุดโฟกัสใช้งานจึงขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดฟิลาเมนต์ (A'B') และมุมของเป้าผลิตรังสีเอกซ์ (θ) ซึ่งทำให้เกิดขนาด A'C'



ก. จุดโฟกัสจริงและจุดโฟกัสใช้งาน ข. เรขาคณิตของการคำนวณจุดโฟกัสใช้งาน

รูปที่ 2.8 แสดงจุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์[4]

รูปที่ 2.8 ข. จากภาพฉายเรขาคณิตของแนวตกกระทบของลำอิเล็กตรอน สามารถคำนวณหาขนาดของจุดโฟกัสใช้งาน ได้ตามสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$\tan\theta = \frac{CO}{AO} \quad \text{ดังนั้น } CO = AO\tan\theta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.3)$$

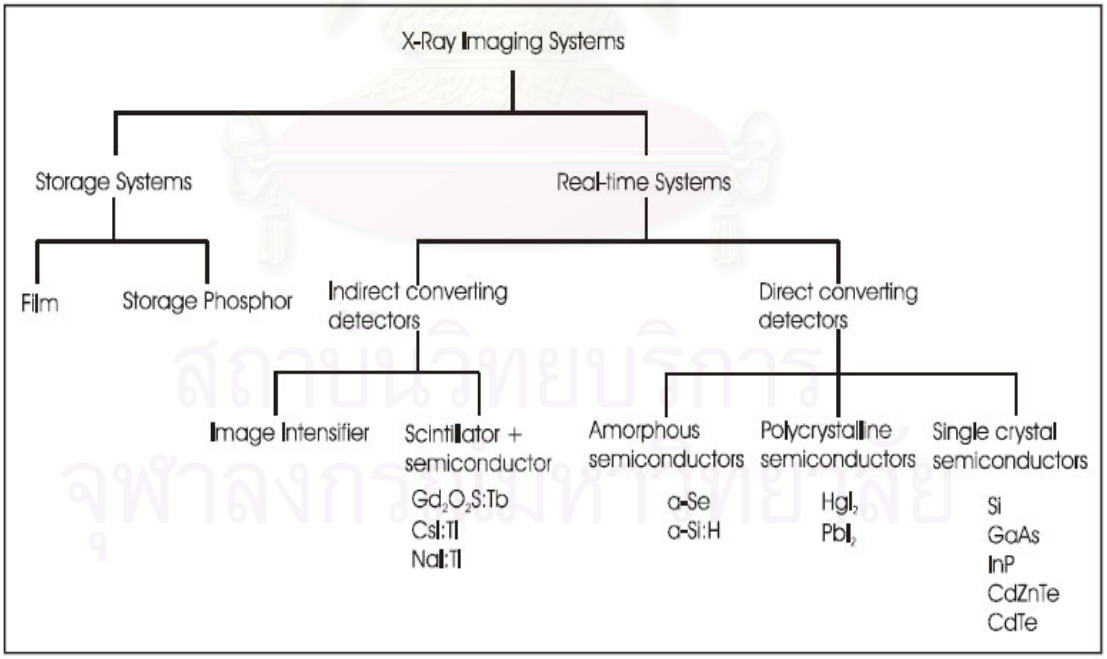
เมื่อ AO คือ ขนาดความยาวของขดลวดไส้หลอดในแนวขนานกับเป้า

CO คือ ขนาดความยาวของขดลวดไส้หลอดในแนวตั้งฉากกับเป้า

θ คือ มุมของเป้าผลิตรังสีเอกซ์

2.2.2 ระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์

กระบวนการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานและมีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง จึงมีวิวัฒนาการด้านระบบสร้างภาพหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งในเชิงเทคนิคได้ 2 ประเภท[7] ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงประเภทของระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์[7]

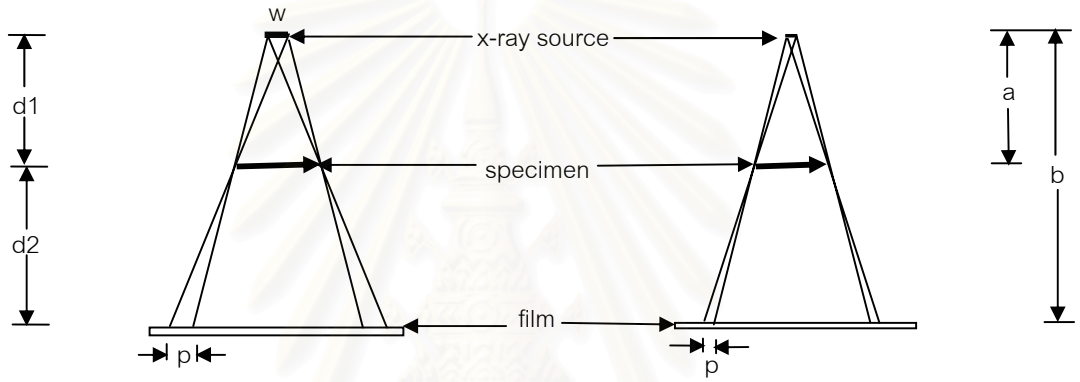
จากแผนผังในรูปที่ 2.9 ระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์แบ่งได้เป็น ระบบที่ใช้แผ่นบันทึกภาพ (storage system) และระบบที่แสดงภาพทันที (real-time system) ในระบบถ่ายภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพดั้งเดิมซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี คือ ระบบถ่ายภาพที่ใช้ฟิล์ม (photographic film) การที่จะมองเห็นภาพถ่ายได้จะต้องนำแผ่นฟิล์มไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแผ่นบันทึกภาพรุ่นใหม่ เรียกว่า Image Plate,IP การทำงานของแผ่นบันทึกภาพนี้อาศัยหลักการของ Photostimulable Luminescence;(PSL) โดยสารที่ใช้ได้แก่ $BaFBr:Eu^{2+}$ แผ่นบันทึกภาพใหม่นี้มีความไวรังสีสูงกว่าฟิล์ม จึงสามารถลดเวลาถ่ายภาพลง 50-90% เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้กับฟิล์มชนิดไวแสงสูง และยังมีการตอบสนองความเปรียบต่างภาพ (contrast) กว้างมากกว่าฟิล์มถึง 10^3 เท่า ทั้งยังนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังการลบข้อมูลด้วยแสงความเข้มสูง อย่างไรก็ตามเทคนิคของแผ่นบันทึกภาพชนิดIP ต้องอาศัยกระบวนการอ่านข้อมูลภาพด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser) เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพแฝงที่บันทึกในแผ่นบันทึกภาพ ในลักษณะข้อมูลเชิงตัวเลขซึ่งสามารถเห็นภาพทางจอภาพ แต่เป็นการได้ภาพถ่ายรังสีทางอ้อมซึ่งไม่สามารถเห็นภาพได้ทันที

งานตรวจสอบชิ้นงานในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม จำเป็นต้องใช้ระบบสร้างภาพที่ให้ผลทันทีระหว่างกระบวนการต่อเนื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ การใช้เทคนิคแปลงสัญญาณภาพทางอ้อม (indirect converting) และการใช้เทคนิคแปลงสัญญาณภาพโดยตรง (direct converting) อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงภาพถ่ายรังสีเอกซ์เป็นสัญญาณภาพถ่ายรังสีทางอ้อม ได้แก่ อุปกรณ์เพิ่มความเข้มแสงจากภาพรังสีเอกซ์ (image intensifier) ผลึกเรืองรังสีประกอบกับไดโอดไวแสง ผลึกเรืองรังสีประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทวีปริมาณอิเล็กตรอน (PMT) และฉากเรืองแสงกับชาร์จคัปเปิลดีไวซ์ (CCD) เป็นต้น ในส่วนของอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพโดยตรงได้แก่ กลุ่มของอุปกรณ์ประเภทแผ่นแปลงสัญญาณภาพเชิงเลข (Digital Plate;DP) ซึ่งออกแบบจุดวัดปริมาณรังสีขนาดเล็ก (pixel) ที่มีความละเอียดสูงด้วยเทคโนโลยีของหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ ทั้งแบบผลึกเดี่ยวของ Si, GaAs, InP, CdZnTe และผลึกแบบหลายระนาบ (polycrystal) ของ HgI_2 และ PbI_2 รวมทั้งสารกึ่งตัวนำแบบฟิล์มบางของ Se หรือ Si:H เป็นต้น

ในบรรดาอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพที่กล่าวถึงนั้น แผ่นแปลงสัญญาณภาพเชิงเลข (DP) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ความละเอียดสูงและมีการรบกวนระหว่างสัญญาณของจุดภาพข้างเคียงน้อย แต่มีราคาสูงมาก ดังนั้นในงานด้านอุตสาหกรรมจึงยังนิยมใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณในกลุ่มของอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางอ้อมมาพัฒนาเป็นระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์แบบแสดงภาพทันที โดยเฉพาะการใช้ฉากเรืองรังสีกับกล้องวีดิทัศน์ หรืออุปกรณ์เพิ่มความเข้มแสงกับกล้องวีดิทัศน์ เป็นต้น

2.2.3 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส มีหลักการคล้ายคลึงกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบสัมผัสฟิล์ม แต่ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสจึงมีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของจุดภาพสูง พร้อมทั้งการจัดระยะของวัตถุตัวอย่างให้ใกล้กับต้นกำเนิดรังสีและห่างจากฟิล์มจะทำให้ภาพถ่ายรังสีเอกซ์มีกำลังขยายเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามความคมชัดของขอบภาพจะขึ้นอยู่กับขนาดของจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสี ดังรูปที่ 2.10 แสดงภาพเปรียบเทียบการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีขนาดจุดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่างกัน



รูปที่ 2.10 แสดงการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ด้วยต้นกำเนิดรังสีที่มีขนาดจุดโฟกัสต่างกัน

จากรูปจะพบว่าถ้าขนาดของจุดโฟกัสมีขนาดไม่เล็กพอ จะเกิดเงาซ้อนของขอบภาพ (penumbra) ทำให้สูญเสียความคมชัดของภาพ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.4

$$P = w(d2 / d1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.4)$$

โดยที่ w = ขนาดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสี

d1 = ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน

d2 = ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับตัวตรวจวัดรังสี

p = ขนาดของขอบเงาซ้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากการใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสจะให้ความคมชัดของภาพสูงแล้วการถ่ายภาพในลักษณะนี้ยังสามารถใช้ในงานถ่ายภาพที่ต้องการกำลังขยายของภาพได้ เนื่องจากสามารถเลื่อนระยะระหว่างชิ้นงานกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพได้ โดยกำลังขยายของภาพจะคำนวณได้จากเรขาคณิตของภาพฉายในรูปที่ 2.10 ตามสมการ

$$M = b / a \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.5)$$

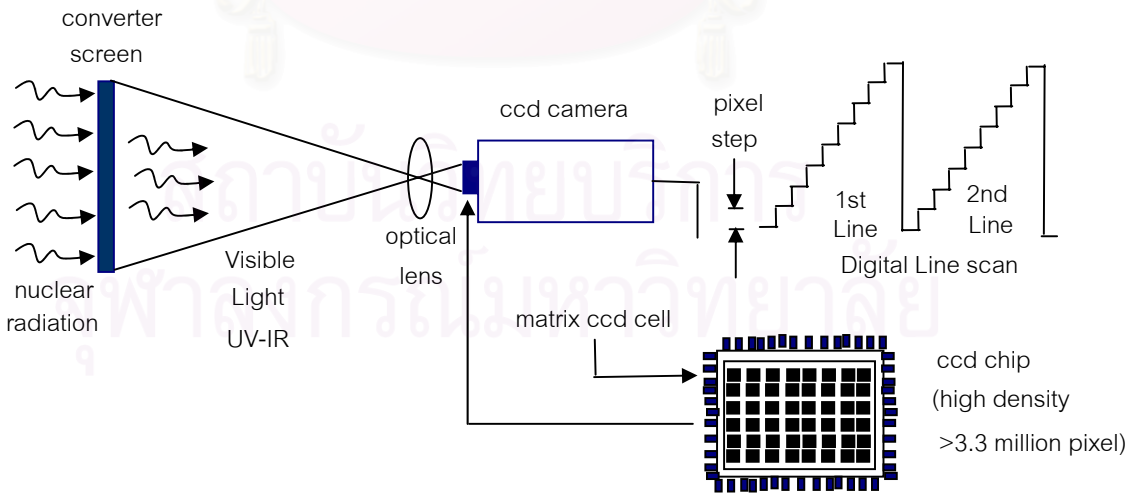
โดยที่ M = กำลังขยายของภาพ

a = ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับต้นกำเนิดรังสี (d1)

b = ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับตัวตรวจวัดรังสี (d1+d2)

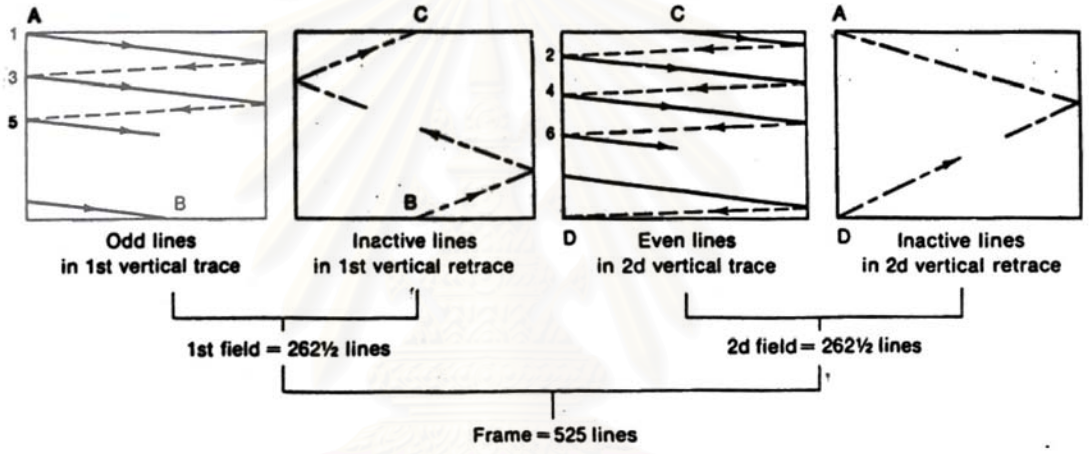
2.2.4 ระบบเก็บข้อมูลภาพถ่ายรังสีเอกซ์

ในการสร้างภาพด้วยระบบแปลงสัญญาณภาพทางอ้อม อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ได้แก่ ฉากเรืองรังสี ซึ่งเคลือบด้วยสารเรืองรังสี (phosphor) ประกอบกับกล้องวีดิทัศน์ชนิด CCD ความไวสูง กลไกการแปลงสัญญาณภาพจะเริ่มจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์ถูกแปลงเป็นภาพเรืองแสงบนฉากเรืองรังสีและอุปกรณ์ไวแสงของกล้องถ่ายภาพจะแปลงภาพจากฉากเรืองรังสีเป็นสัญญาณภาพคอมโพสิต (composite video signal) ดังแผนภาพในรูปที่ 2.11



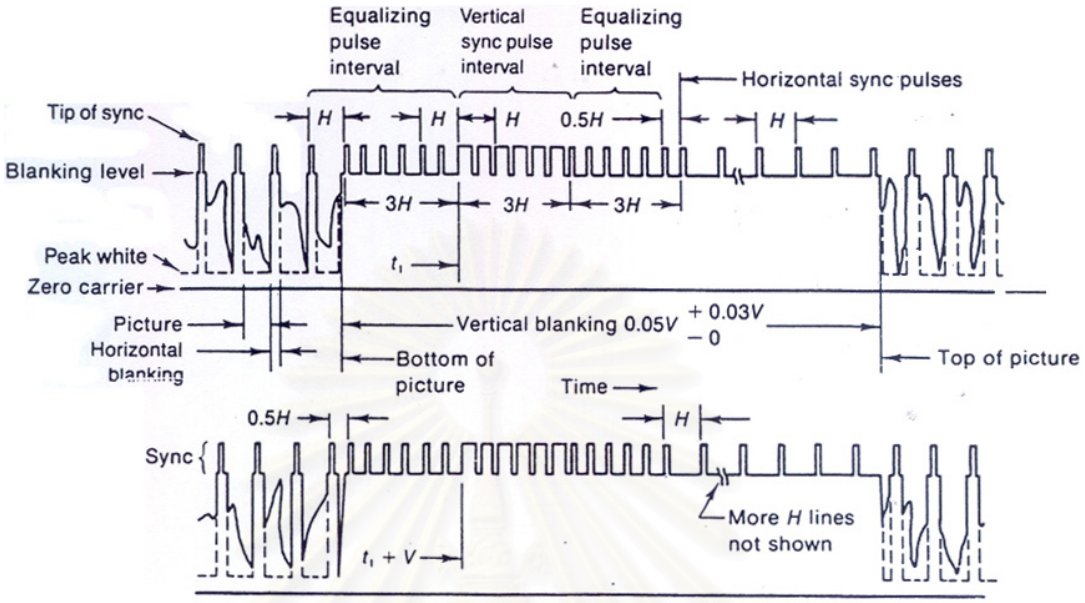
รูปที่ 2.11 แผนภาพของอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพถ่ายรังสีเอกซ์

ระบบการสแกนเส้นภาพของกล้องวีดิทัศน์จะจัดให้ทำงานในระบบสแกนแบบสอดแทรก (interlace scan) ซึ่งเหมาะกับการแสดงภาพเคลื่อนไหว โดยแบ่งการสแกนเส้นภาพเต็มกรอบ (frame) เป็น 2 ฟิลด์ (field) ได้แก่ ฟิลด์คี่ (odd field) และฟิลด์คู่ (even field) ดังตัวอย่างระบบสแกนเต็มเฟรม 525 เส้นในรูปที่ 2.12 ฟิลด์แรกจะเริ่มสแกนที่กรอบมุมซ้ายของภาพที่ตำแหน่ง A และจบที่กึ่งกลางกรอบด้านล่างที่ B จากนั้นจะย้อนกลับไปเริ่มต้น ฟิลด์ที่ 2 ที่ตำแหน่ง C กึ่งกลางกรอบภาพด้านบนแทรกกลางระหว่างแนวสแกนเส้นภาพของฟิลด์คี่ครั้งแรก มาจบที่กรอบภาพด้านล่างขวามือ และสะบัดกลับมาที่ตำแหน่ง D เพื่อย้อนไปเริ่มต้นฟิลด์คี่ที่ตำแหน่ง A ใหม่

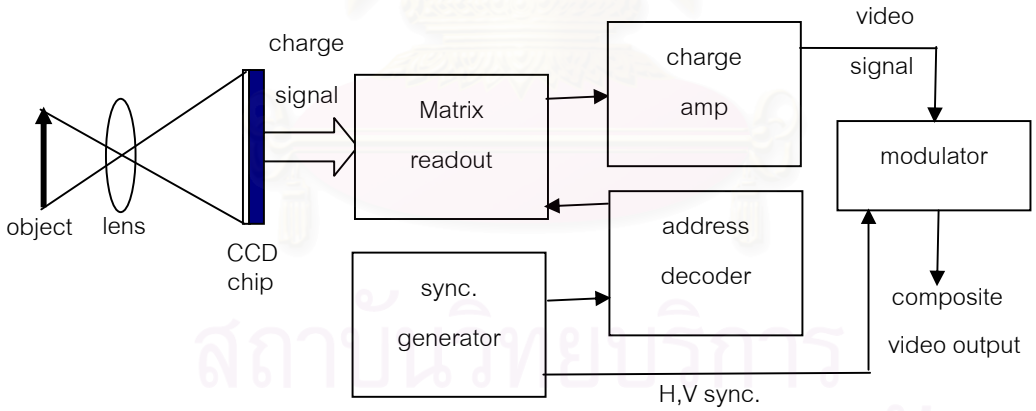


รูปที่ 2.12 รายละเอียดการสแกนแบบสอดแทรก[8]

สัญญาณที่ควบคุมการเริ่มต้นสแกนเส้นภาพนี้จะถูกนำไปผสมกับสัญญาณภาพ (video signal) ในแต่ละเส้นสแกนและใช้เป็นสัญญาณเข้าจังหวะ (synchronizing signal) ให้กับจอแสดงภาพ ดังแสดงแผนภาพการทำงานในรูปที่2.14 สัญญาณนี้ประกอบด้วยสัญญาณ vertical sync สัญญาณ horizontal sync และสัญญาณ vertical equalizer สำหรับการปรับจุดเริ่มต้นของเส้นสแกนภาพในฟิลด์คี่และฟิลด์คู่ เมื่อนำมาผสมกับส่วนของสัญญาณภาพจะเกิดเป็นสัญญาณภาพรวมเรียกว่า composite video signal ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สัญญาณภาพระดับสีดำสุดจะอยู่ที่ระดับบ่าสัญญาณเข้าจังหวะ ขณะที่ระดับสีขาวสุดจะอยู่ที่ระดับฐานของสัญญาณภาพ



รูปที่ 2.13 รายละเอียดของสัญญาณภาพคอมโพสิต[8]



รูปที่ 2.14 กลไกการแปลงสัญญาณภาพถ่ายรังสีเอกซ์ทางอ้อม

สัญญาณภาพจากกล้อง CCD จะถูกส่งไปยังแผ่นวงจรแปลงสัญญาณภาพเป็นสัญญาณเชิงเลข ก่อนส่งไปประมวลภาพบนไมโครคอมพิวเตอร์ โดยแผ่นวงจรแปลงสัญญาณภาพจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นวงจรจับเฟรมของภาพในแบบ noninterlace scanและแปลงระดับความเปรียบต่าง

ภาพจากสัญญาณข้อมูลอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงเลข (ADC) เรียกรวมว่า แผ่นวงจรเฟรมแกรบเบอร์ (frame grabber) ซึ่งในการแปลงสัญญาณภาพมีข้อมูลทางเทคนิคที่ต้องกำหนดคือ

ก. Resolution หรือความละเอียดในการจับภาพเพื่อให้เล่นกลับหรือแสดงผลต่อไป

ข. Frame Rate หรือจำนวนเฟรมต่อวินาที (FPS) เป็นการกำหนดจำนวนเฟรมที่จะให้แสดงผลใน 1 วินาที

ค. ความละเอียดของระดับสัญญาณสีเทา (gray level)

ง. ระบบสื่อสารข้อมูลทางพอร์ตของไมโครคอมพิวเตอร์

2.3 กระบวนการทางสัญญาณภาพ

ข้อมูลภาพที่ได้จากกระบวนการจัดเก็บสัญญาณภาพในระบบเชิงตัวเลขด้วยการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์ จะถูกบันทึกอยู่ในหน่วยความจำซึ่งสามารถใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และเทคนิคการเสริมคุณภาพของภาพ[8] (image processing) ปรับปรุงคุณภาพของภาพที่บันทึกไว้ให้ชัดเจนและคมชัดขึ้น ได้แก่ การเสริมความเปรียบต่างภาพ (contrast enhancement) การปรับแก้ความเปรียบต่างภาพ (gamma correction) การปรับระดับความสว่าง การเสริมความคมชัดของขอบภาพ การกำจัดสิ่งรบกวน เป็นต้น

2.3.1 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของภาพ

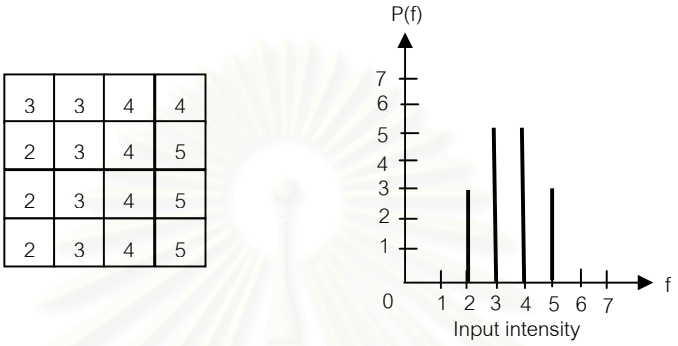
โดยทั่วไปกระบวนการปรับแต่งคุณภาพของภาพในกระบวนการวิเคราะห์ภาพเป็นการเสริมและปรับระดับสีเทาของภาพให้มีความเปรียบต่างภาพดีขึ้น รวมทั้งปรับแต่งรายละเอียดภาพให้มีความคมชัดขึ้น ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐานดังนี้

2.3.1.1 การปรับแก้ความสม่ำเสมอของพื้นภาพ (shading correction)

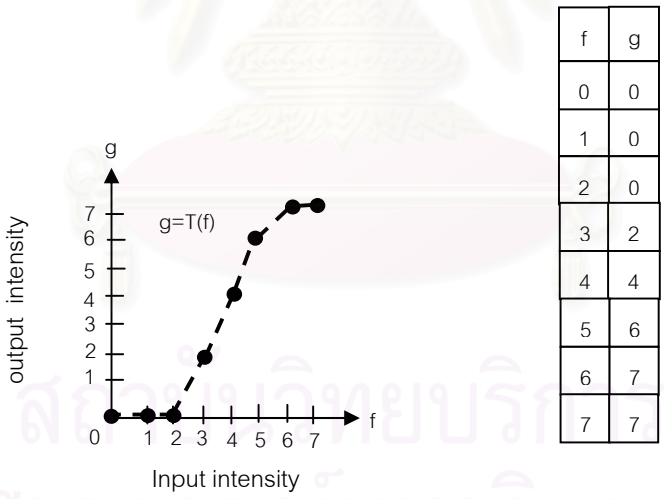
เป็นการปรับพื้นภาพทั่วบริเวณกรอบภาพ หรือรายละเอียดภาพที่มีเฟส (phase) เดียวกันให้มีระดับสีเทาเหมือนกัน ความคลาดเคลื่อนของระดับสีเทานี้เกิดจากสัญญาณความสว่างไม่คงที่อาจมีสาเหตุมาจากผลของมุมเอียงของเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์ ความไวสัญญาณของอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณแต่ละจุดภาพไม่สม่ำเสมอ หรือความสว่างของฉากเรืองแสง เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้ความสว่างของภาพแต่ละบริเวณที่ควรจะมีระดับเดียวกันแตกต่างกันไป และหนุนระดับสีเทาของสัญญาณให้เปลี่ยนแปลงด้วย การปรับแก้ทำได้โดยการตั้งระดับอ้างอิงสัญญาณและเลือกระดับความเปรียบต่างในช่วงระดับอ้างอิงให้มาอยู่ในระดับเดียวกัน เพื่อปรับฐานความสว่างให้มาอยู่ในระดับเดียวกัน

2.3.1.2 การปรับระดับความเปรียบต่างของสัญญาณ

การปรับแก้ความเปรียบต่างของสัญญาณภาพ ทำได้โดยการแปลงข้อมูลระดับสีเทาของภาพด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 2.15



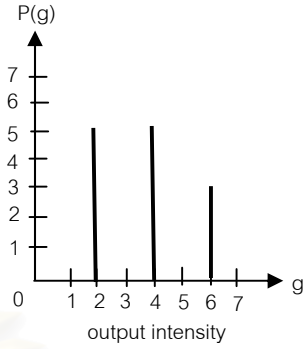
ก. ข้อมูลภาพบริเวณจุดภาพขนาด 4x4 และฮิสโตแกรมระดับสีเทา



ข. กราฟของฟังก์ชันที่เลือกใช้ในการแปลงข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2	2	4	4
0	2	4	6
0	2	4	6
0	2	4	6



ค.ข้อมูลภาพบริเวณเดิมหลังการใช้ฟังก์ชันแปลงข้อมูล

รูปที่ 2.15 การปรับระดับความเปรียบต่างของสัญญาณภาพ

ในรูปที่ 2.15 ก. แสดงข้อมูลระดับสีเทาของจุดภาพขนาด 4x4 จุด มีความละเอียดของระดับสีเทา 3 บิต สามารถแปลงเป็นข้อมูลฮิสโตแกรมของจำนวนจุดภาพที่ระดับสีเทาต่างๆ ได้จากฟังก์ชัน $P(f) = \sum_{k=0}^{f} P(k)$ เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับแก้ด้วยฟังก์ชัน $g = T(f)$ ในรูปที่ 2.15 ข. ข้อมูลระดับสีเทาในตารางเปรียบเทียบข้อมูลทางเข้า (f) จะถูกปรับแก้เป็นข้อมูลทางออก (g) ดังนั้นข้อมูลระดับสีเทาของภาพเดิมหลังการเสริมความเปรียบต่างของสัญญาณจึงถูกแปลงเป็นฮิสโตแกรมของฟังก์ชัน $P(g) = \sum_{k=0}^{g} P(k)$ ดังภาพในรูปที่ 2.15 ค. การปรับเปลี่ยนสเกลของระดับสีเทานี้อาจจะจัดให้ฟังก์ชันของสมการ T(f) เป็นแบบเชิงเส้นหรือลอกกาลิทึม (logalithmic) ขึ้นอยู่กับข้อมูลภาพเริ่มต้น การปรับระดับความเปรียบต่างของสัญญาณภาพนี้ช่วยให้เห็นความเปรียบต่างได้ชัดเจนขึ้น

2.3.1.3 การทำ edge detection

การทำ edge detection เป็นวิธีที่ใช้เพื่อลดจำนวนข้อมูลในรูปภาพลงก่อนที่จะนำไปเป็นอินพุตเพื่อการประมวลผลในกระบวนการต่อไป จึงเป็นส่วนแรกของการประมวลผลข้อมูลภาพ ดังนั้นความถูกต้องและประสิทธิภาพในการทำงานเป็นสิ่งสำคัญ โดยเน้นความรวดเร็วด้วย หลักพื้นฐานที่ใช้

ในการหาเส้นขอบภาพคือใช้ค่าแกรเดียนท์ หรือคือการหาค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 ค่าแกรเดียนท์สำหรับฟังก์ชัน f(x,y) ที่จุด (x,y) เขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\nabla F = [\, Gx \;\; Gy \,] = [\partial f / \partial x \;\;\; \partial f / \partial y \,] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.6)$$

โดยที่มุมของเวกเตอร์คือ

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left[\frac{Gy}{Gx}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.7)$$

ขนาดของเวกเตอร์คือ

$$\nabla F = \text{mag}(\nabla F) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2\right]^{1/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.8)$$

หรือค่าประมาณของขนาดเวกเตอร์นี้คือ

$$\nabla F \approx \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.9)$$

พิจารณาจุดภาพของ digital ดังรูปที่ 2.16

$Z_{x-1,y-1}$	$Z_{x-1,y}$	$Z_{x-1,y+1}$
$Z_{x,y-1}$	$Z_{x,y}$	$Z_{x,y+1}$
$Z_{x+1,y-1}$	$Z_{x+1,y}$	$Z_{x+1,y+1}$

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างจุดภาพของภาพดิจิตอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

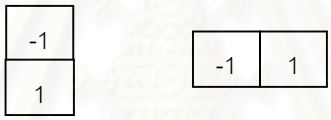
จากรูปที่ 2.16 $Z_{x,y}$ แทนจุดภาพที่มีค่าแทนระดับสีเทาของภาพดิจิตอล ดังนั้นสมการที่ 2.8 สามารถที่จะถูกแทนเพื่อหาค่าของแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งของจุดภาพ $Z_{x,y}$ ได้ดังนี้

$$\nabla F = [(Z_{x+1,y} - Z_{x,y})^2 + (Z_{x,y+1} - Z_{x,y})^2]^{1/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.10)$$

หรือ

$$\nabla F \approx | Z_{x+1,y} - Z_{x,y} | + | Z_{x,y+1} - Z_{x,y} | \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.11)$$

หรือคือการใช้หน้ากาก (mask) หรือ เทมเพลต (template) ขนาด 2x1 และหน้ากากขนาด 1x2 ดังรูปที่ 2.17 เพื่อหาค่าแกรเดียนท์ในทิศทางแกน X และแกน Y ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงหน้ากากสำหรับหาค่าแกรเดียนท์ในทิศทางแกน X และ แกน Y

ผลที่ได้คือผลรวมค่าสัมประสิทธิ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้หน้ากากทั้งสองแบบกับภาพต้นแบบ แต่ปกติเมื่อคำนวณหาค่าแกรเดียนท์ในทิศทางแกน X และแกน Y หรือ Gx และ Gy ค่าทั้งสองจะต้องเป็นค่า ณ ตำแหน่งของจุดภาพเดียวกัน แต่ตำแหน่งที่ตรงกันของหน้ากากทั้งสองจะต้องเป็นค่า Gx และ Gy ที่ตำแหน่ง Zx+1/2,y+1/2 ซึ่งไม่ใช่ตำแหน่งของจุดภาพ ดังนั้นจึงนิยมใช้หน้ากากขนาด 2x2 หรือ 3x3 แทน เพราะตำแหน่งของ Gx และ Gy จะอยู่ที่ตำแหน่งของจุดภาพตรงกลางพอดี หน้ากากชนิดนี้เรียกว่า “หน้ากากแบบ Sobel” ซึ่งหน้ากากและการหาขอบภาพโดยวิธีของ sobel แสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

ก. หน้ากากแบบ Sobel ในทิศทางแกน X

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

ข. หน้ากากแบบ Sobel ในทิศทางแกน Y

รูปที่ 2.18 แสดงหน้ากากแบบ Sobel ที่ใช้ในการหาขอบภาพ

ก. ภาพต้นแบบ ข. ภาพหลังจากการทำ edge detection

รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างการหาขอบภาพโดยวิธีของ Sobel

ค่าแกรเดียนท์ที่ได้จากหน้ากากดังกล่าวจะต้องถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ที่กำหนดขึ้นค่าหนึ่ง เพื่อพิจารณาว่าค่าที่ได้ควรจะเป็นค่าของจุดภาพที่อยู่บนเส้นขอบหรือไม่ การกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนควรกำหนดให้เหมาะสม เพราะว่าถ้าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าต่ำเกินไป ก็จะทำให้ได้ลายเส้นขอบภาพมากขึ้น รวมทั้งสัญญาณรบกวนก็อาจถูกมองว่าเป็นลายเส้น

ขอบไปด้วย แต่ถ้าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าสูงเกินไปก็อาจจะทำให้ได้ลายเส้นขอบภาพลดลง มีผลให้ลายเส้นขอบที่เห็นลาง ๆ ในภาพต้นแบบจะไม่ปรากฏอยู่ในภาพลายเส้นขอบที่ได้

จากวิธีที่กล่าวมาเป็นวิธีเบื้องต้นในการตรวจหาเส้นของภาพ ซึ่งในบางครั้งตัวตรวจจับเส้นขอบภาพอาจตอบสนองเส้นของภาพที่ตรวจพบมากกว่า 1 ครั้ง จึงมีวิธีการตรวจหาเส้นขอบภาพที่ให้ค่าสูงสุดเพียงจุดเดียวเพื่อตอบสนองตำแหน่งของเส้นขอบภาพที่เป็นจริงในแต่ละจุด (only one response to a single edge) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกว่า edge thinning[9] มีวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

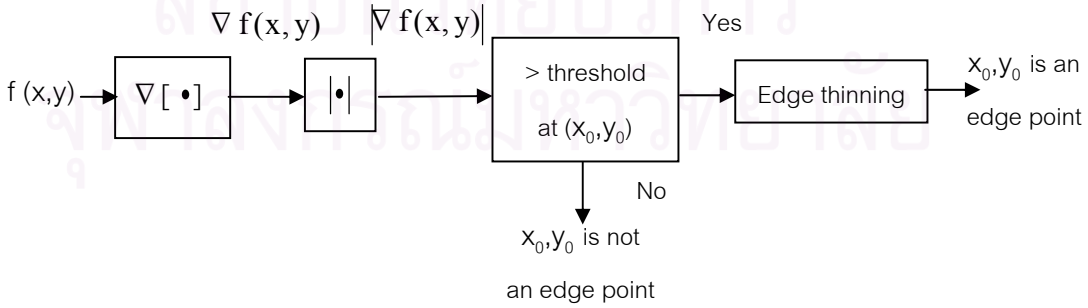
ก. ถ้า $|\nabla f(x,y)|$ มีค่าสูงสุดที่จุด x_0,y_0 ในทิศทางแกน X แต่ไม่ได้มีค่าสูงสุดในทิศทางแกน Y จุด x_0,y_0 จะเป็นจุดของขอบภาพก็ต่อเมื่อ

$$\left|\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right| x= x_0,y=y_0 \quad > \quad K\left|\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\right| x= x_0,y=y_0 \quad \text{เมื่อ K มีค่าเท่ากับ 2}$$

ข. ถ้า $|\nabla f(x,y)|$ มีค่าสูงสุดที่จุด x_0,y_0 ในทิศทางแกน Y แต่ไม่ได้มีค่าสูงสุดในทิศทางแกน X จุด x_0,y_0 จะเป็นจุดของขอบภาพก็ต่อเมื่อ

$$\left|\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\right| x= x_0,y=y_0 \quad > \quad K\left|\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right| x= x_0,y=y_0 \quad \text{เมื่อ K มีค่าเท่ากับ 2}$$

สรุปวิธีการหาเส้นขอบภาพแสดงได้ดังในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงวิธีการตรวจหาเส้นขอบภาพ

บทที่ 3

การพัฒนาระบบควบคุมความหนาของฉนวนสายไฟฟ้า

กระบวนการผลิตสายไฟฟ้าในอุตสาหกรรมขนาดกลางที่ใช้เครื่องหุ้มฉนวนไฟฟ้าสมรรถนะปานกลางนั้น การควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้ายังคงอาศัยการปรับอัตราการป้อนสายลวดตัวนำผ่านหัวฉีดเพื่อให้เกิดความสมมาตรด้วยระบบ manual ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของช่างเทคนิค ร่วมกับการตรวจสอบความหนาของฉนวนจากการสุ่มตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือเกิดการอาร์คเมื่อฉนวนบางกว่าที่จะทนแรงดันทดสอบได้ อย่างไรก็ตามบางบริเวณที่เกิดความไม่สม่ำเสมอ ถึงแม้จะไม่ถึงกับเกิดการทะลุของแรงดันไฟฟ้าทดสอบแต่จะเสียความแข็งแรงเชิงกลเมื่อมีการดัดงอสายจะฉีกขาดภายหลังโดยผู้บริโภคไม่อาจทราบได้ ดังนั้นการตรวจสอบความหนาของฉนวนแบบต่อเนื่องโดยปรับอัตราการป้อนสายและการฉีดฉนวนหุ้มด้วยอัตราที่เหมาะสมเพื่อรักษาสมมาตรของฉนวนจะช่วยให้การผลิตมีคุณภาพสูงขึ้น

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

จากการศึกษาคุณสมบัติของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าชนิด PVC และประยุกต์เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสชนิดเห็นภาพทันที (real time) ในการสร้างภาพขยายของความหนาฉนวนสายไฟฟ้าและประมวลความหนาด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้ทำงานบนไมโครคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดข้อมูลในการออกแบบระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าได้ดังนี้

1. ระบบถ่ายภาพรังสีจะต้องเป็นระบบถ่ายภาพ 2 แนวแกนทำมุมกัน 90^0 เพื่อให้สามารถประเมินการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า และประเมินความหนาที่เปลี่ยนแปลงจากผลการเบี่ยงศูนย์กลางได้

2. ระบบถ่ายภาพรังสีชนิดเห็นภาพทันทีเลือกใช้แบบ fluoroscopy จับสัญญาณภาพด้วยกล้องถ่ายวีดิทัศน์ชนิดความไวแสงสูง เนื่องจากเป็นระบบที่มีราคาไม่สูงมาก คุณภาพของภาพขึ้นกับฉากเรืองรังสีและกล้องวิดีทัศน์

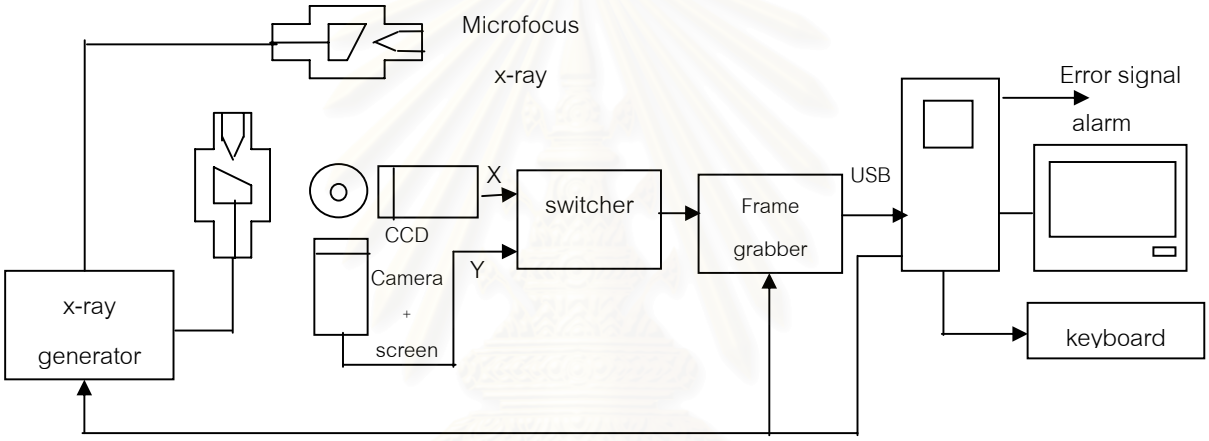
3. ระบบกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นแบบ constant potential ซึ่งสามารถกำเนิดพลังงานของรังสีเอกซ์ได้ในช่วง 0-80 keV ที่กระแสประมาณ 2 mA

4. ระบบแปลงสัญญาณภาพเป็นสัญญาณเชิงเลข ใช้เทคนิคการเก็บข้อมูลภาพบนแผ่นวงจรจับสัญญาณภาพ (frame grabber) ส่งสัญญาณผ่านทางพอร์ต USB

5. การตรวจสอบความหนาฉนวนของภาพถ่ายรังสีใช้เทคนิคการตรวจสอบลายขอบภาพด้วยโปรแกรม edge detection

6. ระบบเชื่อมโยงสัญญาณซึ่งสามารถกำเนิดสัญญาณแสดงความคลาดเคลื่อน เมื่อเกิดการเบี่ยงศูนย์ และการส่งสัญญาณเตือนเมื่อไม่สามารถปรับแก้ได้

จากข้อมูลพื้นฐานนี้สามารถพัฒนาโครงสร้างของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1



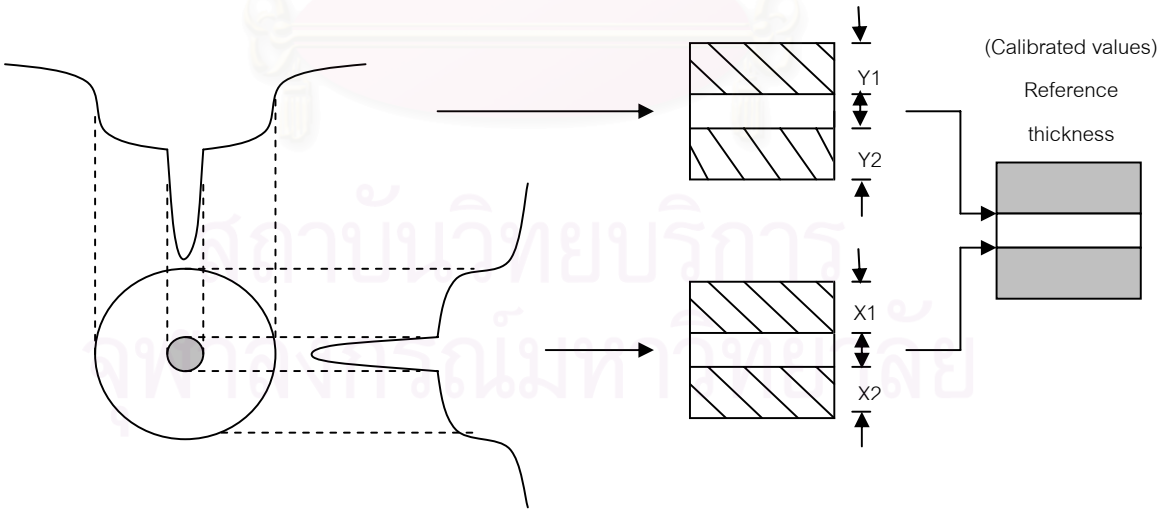
รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

การทำงานเริ่มจากการกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ constant potential ที่พลังงาน 0-80 keV กระแสแอโนด 1-2 mA ส่งผ่านชิ้นตัวอย่างสายไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน ทำให้เกิดภาพถ่ายรังสีเอกซ์ตกบนฉากเรืองรังสี โดยจัดรูปแบบการถ่ายภาพรังสีแบบส่งผ่านในระบบไมโครโฟกัสให้มีกำลังขยาย 1-2 เท่า พร้อมกับกำลังขยายของการจัดระยะเลนส์กล้องวีดิทัศน์ ภาพแสงเรืองรังสีบนฉากจะถูกแปลงเป็นสัญญาณภาพคอมโพสิต (composite video signal) ด้วยกล้องวีดิทัศน์ชนิด CCD แบบไวแสงสูงในแนวแกน X และ Y ส่งไปยังวงจรเลือกสัญญาณ (switcher) ซึ่งจะทำหน้าที่ 2 ประการ คือ สวิตซ์หลอดรังสีในแนวแกน X และ Y รวมทั้งเลือกรับสัญญาณในแนวแกน X และ Y สลับกันไป เพื่อส่งต่อไปยังแผ่นวงจรจับสัญญาณภาพและปรับระบบภาพแบบ interlace scan ให้เป็นแบบ noninterlace

scan พร้อมทั้งแปลงสัญญาณภาพอนาลอกเป็นสัญญาณภาพเชิงตัวเลขส่งออกผ่านทางพอร์ตมาตรฐาน USB 2.0 (Universal Serial Bus) ด้วยอัตราสัญญาณ 480 Mbps ไปยังไมโครคอมพิวเตอร์

ไมโครคอมพิวเตอร์จะทำงานด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใน 2 ส่วนได้แก่ โปรแกรมจับสัญญาณภาพ และโปรแกรมประมวลความหนาของสายไฟฟ้า ในส่วนของโปรแกรมจับสัญญาณภาพจะสแกนหาไดร์เวอร์ของแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณผ่านทางพอร์ต USB ก่อนนำไปแสดงผลในกรอบหน้าต่างที่ออกแบบไว้ ขณะที่สัญญาณภาพส่วนหนึ่งจะนำไปผ่านกระบวนการหาความหนาจากข้อมูลโปรไฟล์ความหนาของฉนวนสายไฟฟ้าที่ได้จากภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ขนาดความหนาที่ตรวจสอบได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาอ้างอิง พร้อมทั้งแสดงผลการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของสายลวดตัวนำและส่งสัญญาณคลาดเคลื่อนตำแหน่งเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนสายหุ้มฉนวน

การประมวลความหนาของฉนวนหุ้มสายจากภาพถ่ายรังสีแบบส่งผ่านด้วยโปรแกรม มีขั้นตอนจากการสุ่มข้อมูลโปรไฟล์ต่อเนื่องในแกน X และแกน Y เป็นจังหวะโดยโปรแกรมจะทำการอ่านขนาดของความหนาของสายไฟฟ้าจากสัญญาณภาพตำแหน่ง X1 , X2 และ Y1 , Y2 เทียบกับค่าอ้างอิงและประมวลความเบี่ยงเบนเชิงเวกเตอร์ จากนั้นจึงส่งสัญญาณควบคุมตามสัดส่วนขนาดที่เบี่ยงเบน พร้อมแสดงผลบนจอภาพ ถ้าระบบไม่สามารถปรับแก้ด้วยความเร็วได้ ความหนาจะคลาดเคลื่อนมาก ระบบจะส่งสัญญาณเตือนเพื่อให้ทราบ ในรูปที่ 3.2 แสดงวิธีการในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์และการวัดความหนาขอบภาพด้วยการทำ edge detection ในกระบวนการ image processing[9]

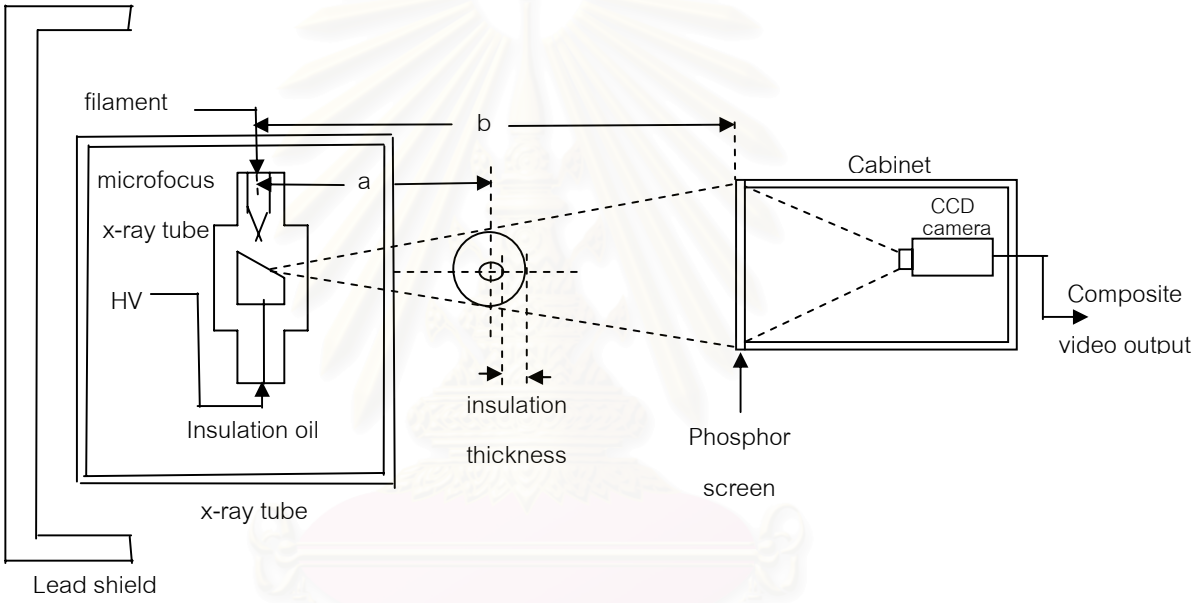


ก. โปรไฟล์ข้อมูล ข. ภาพถ่ายแต่ละช่วงในแกน X และ Y

รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณและภาพของการประมวลความหนา

3.2 การออกแบบระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบ real-time

ระบบถ่ายภาพรังสีแบบมองเห็นภาพทันทีในงานวิจัยนี้เลือกแบบ indirect converting detection ประกอบด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส ฉากเรืองรังสีและกล้องวีดิทัศน์ชนิด CCD ความไวสูง จัดระบบถ่ายภาพชนิดให้กำลังขยาย 2 เท่า ในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายรังสีจะใช้ระบบถ่ายภาพ 2 ชุด ทำงานสลับกันในแนวแกน X และแกน Y ดังแสดงโครงสร้างและการทำงานในแผนภาพรูปที่ 3.3

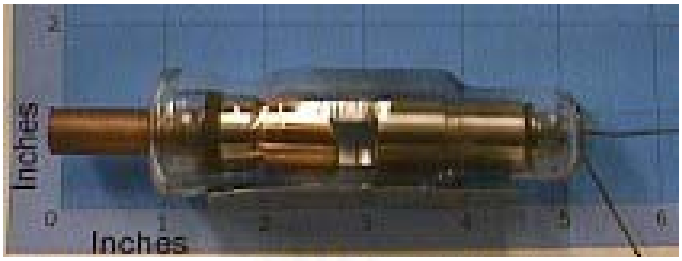


รูปที่ 3.3 ระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์สำหรับตรวจสอบความหนาสายไฟฟ้า

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์เพื่อตรวจวัดความหนาสายไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีลักษณะทางเทคนิคและวิธีการประกอบดังต่อไปนี้

3.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เลือกใช้เป็นของบริษัท Brand X-Ray Tube รุ่น BX-1 0.3 ซึ่งมีขนาดโฟกัสเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร (300μm) ใช้แรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดไส้หลอด 1.75 โวลต์ กระแส 2 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงของวงจรแอโนดสูงสุดเท่ากับ 80 กิโลโวลต์ ที่กระแสแอโนด 2 มิลลิแอมป์ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.4 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์รุ่น BX-1 0.3

จัดวงจรให้ทำงานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบ constant potential และกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นจังหวะสัมพันธ์กับความต้องการในการเก็บข้อมูลภาพในแนวแกน X และแกน Y โดยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะติดตั้งไว้ภายในถัง (tank) ที่บรรจุน้ำมันฉนวนไฟฟ้า และทำหน้าที่ระบายความร้อน พร้อมกำบังรังสีด้วยตะกั่วหนา 3mm เปิดทางให้ลำรังสีรูปกรวย (cone shape) ส่งผ่านชิ้นงานไปตกกระทบบนฉากเรืองรังสีด้วยการจัดระยะห่างของชิ้นงานกับฉาก(a) เท่ากับ 6 cm. ระยะห่างระหว่างฉากกับโฟกัสหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (b) เท่ากับ 12 cm. จะได้กำลังขยายจากการจัดวางระบบถ่ายภาพเท่ากับ 2 เท่า รวมกับกำลังขยายจากการจัดองค์ประกอบกล้อง 1.15 เท่า เป็นกำลังขยายรวมเท่ากับ 2.3 เท่า

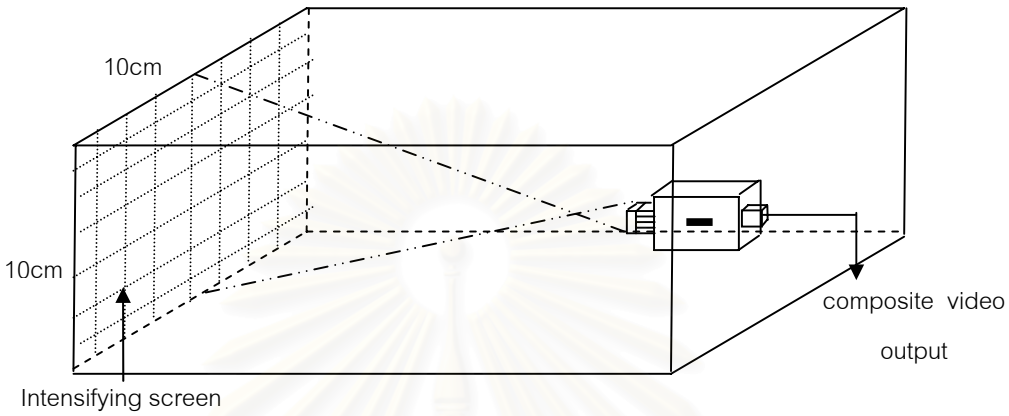
3.2.2 ฉากเรืองรังสี (Phosphor screen)

ฉากเรืองรังสีเลือกใช้ Intensifying screen ของบริษัท Okamoto รุ่น LUS โดยที่มีค่า Relative Speed และRelative Sharpness เท่ากับ 200 และ 68 ตามลำดับ ดังรายละเอียดข้อมูลเทคนิคในภาคผนวก ข. แผ่นเรืองรังสีนี้จะให้แสงสีเขียวซึ่งเหมาะกับย่านตอบสนองแสงของกล้องวีดิทัศน์และระบบเลนส์ทั่วไป ในงานนี้ใช้แผ่นเรืองรังสีขนาดพื้นที่รับรังสี 10x10 cm^2 ติดตั้งบนด้านหน้ากล่องทึบแสงที่ออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับระยะโฟกัสของระบบเลนส์ในกล้องวีดิทัศน์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณภาพ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.5

3.2.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้แปลงสัญญาณภาพเรืองรังสีเป็นสัญญาณภาพสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้กล้องวีดิทัศน์ของบริษัท Fugiko รุ่น FK-BF460 ซึ่งใช้แผ่นรับภาพชนิดซีซีดี (CCD) ของบริษัท Sony ที่มีความละเอียดภาพ 520TV line มีความไวแสง 0.003 ลักซ์ (lux) โดยกล้องวีดิทัศน์จะถูกจัดประกอบในกล่องทึบแสงและลดการสะท้อนแสงภายในด้วยการพ่นสีดำด้านภายในกล่อง พร้อมทั้งจัด

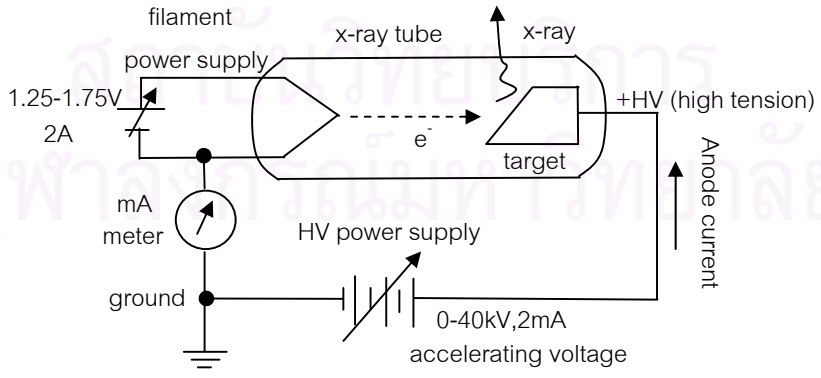
ระยะโฟกัสของระบบเลนส์ให้ได้ความคมชัด เพื่อทำหน้าที่แปลงภาพเรืองรังสีเป็นสัญญาณภาพคอมโพสิตส่งไปยังแผ่นวงจรสวิตช์สัญญาณในระบบเก็บข้อมูลภาพ



รูปที่ 3.5 แผนภาพของระบบแปลงสัญญาณ

3.3 การออกแบบระบบกำเนิดรังสีเอกซ์

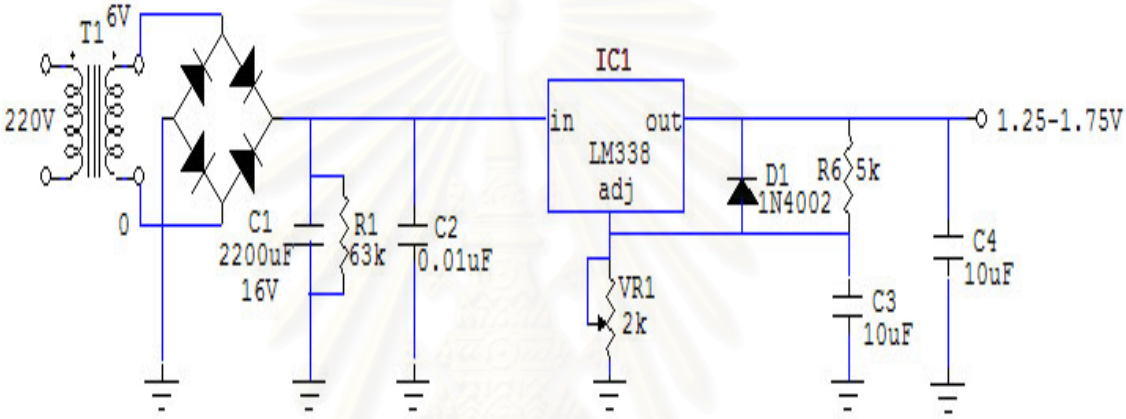
ระบบกำเนิดรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้ใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำปรับค่าได้สำหรับจุดไส้หลอด และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงปรับค่าได้จาก 0–40 กิโลโวลต์ เพื่อเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนชนเป้าและผลิตรังสีเอกซ์ โดยจัดวงจรจ่ายไฟฟ้าในแบบกราวนด์แคโทด (cathode ground) ดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรจ่ายไฟฟ้าแก่หลอดรังสีเอกซ์แบบกราวนด์แคโทด

3.3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด

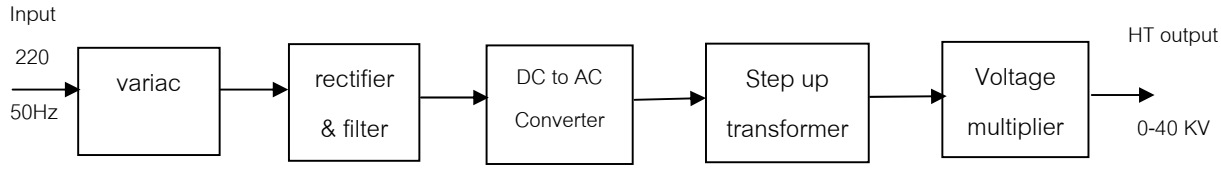
จากข้อมูลเทคนิคตามเส้นกราฟของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์รุ่น BX-1,0.3 ในภาคผนวก ก. พบว่าจะต้องจัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อแปรเปลี่ยนกระแสแอโนดในการควบคุมความเข้มของรังสีเอกซ์สำหรับวงจรฟิลาเมนต์ที่กระแส 1.75 แอมแปร์ และปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่1.25 –1.75 โวลต์ จึงได้เลือกไอซีเบอร์ LM338 ควบคุมแรงดันทางออกแบบ series regulator และจ่ายกระแสได้สูงสุด 3 A โดยจัดวงจรดังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด

3.3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

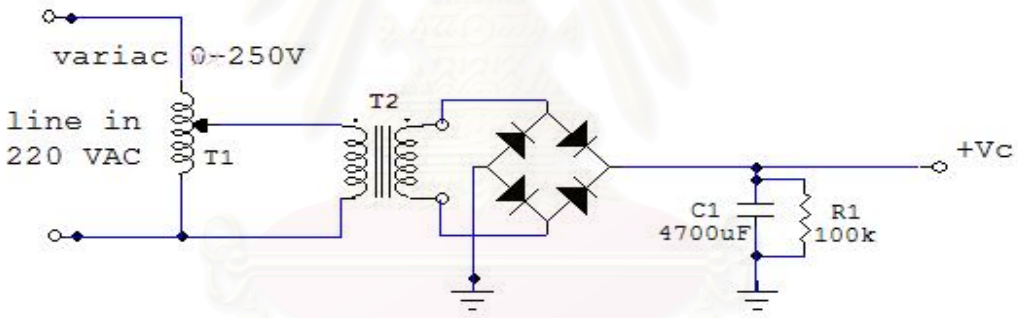
จากผลการทดสอบถ่ายภาพรังสีเอกซ์ของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวน PVC ขนาดเส้นลวดตัวนำ 1 – 4 mm^2 ด้วยแผ่นฟิล์มถ่ายภาพพบว่าจะต้องใช้พลังงานรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ประมาณ 30-40 keV และกระแสแอโนดประมาณ 1 mA จึงได้ออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงปรับค่าได้จาก 0-40 kV กระแสสูงสุด 2 mA สำหรับใช้เป็นศักดาไฟฟ้าเร่ง (accelrating voltage) ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนชนเป้าในการผลิตรังสีเอกซ์ โดยวงจรแบ่งออกเป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูง วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง และวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าดังแผนภาพของระบบในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

ก. วงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำ

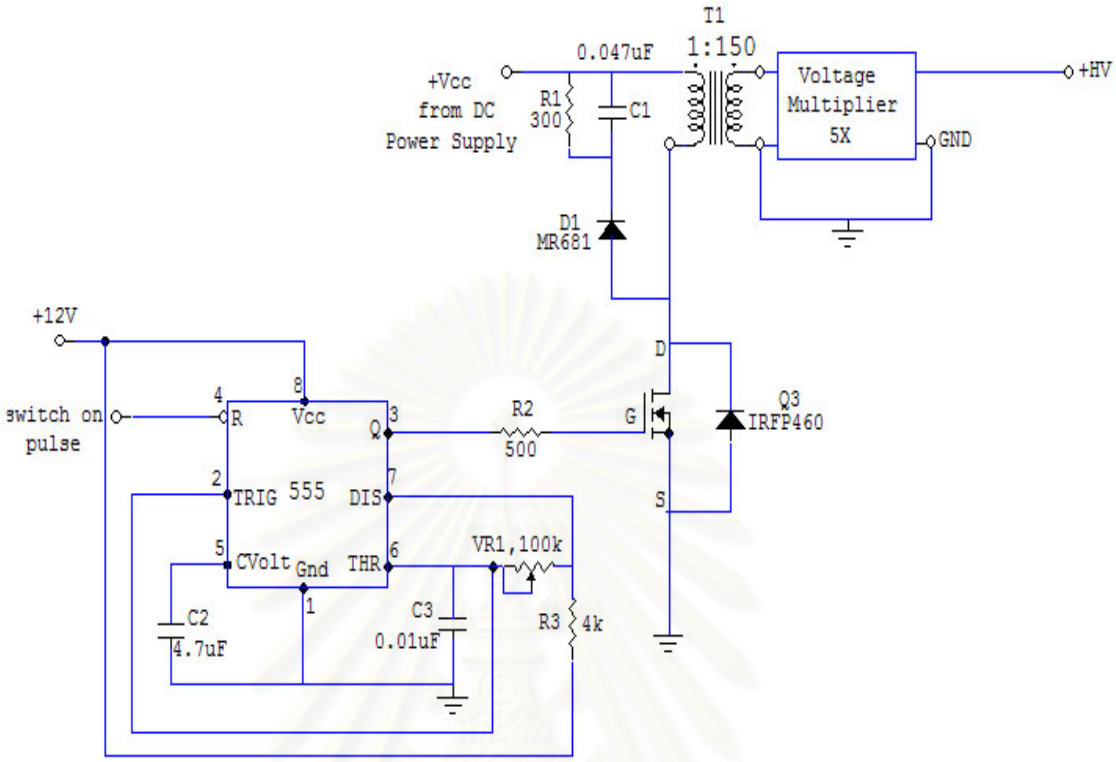
จากแผนภาพในรูปที่ 3.8 ได้ออกแบบวงจรจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำโดยใช้วาริแอ็ก (variac) T1 สามารถแปรเปลี่ยนไฟฟ้าได้จาก 0-250 โวลต์ เพื่อจ่ายให้หม้อแปลงไฟฟ้า T2 ซึ่งเป็นหม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้า ก่อนส่งไปยังวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูงต่อไป



รูปที่ 3.9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ข. วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงปรับค่าได้จาก 0-40 กิโลโวลต์ จ่ายกระแสได้ 2 มิลลิแอมแปร์ เลือกการทำงานแบบ flyback converter ทำงานที่ความถี่ 30 kHz ขับหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีอัตรารอบ Np:Ns เท่ากับ 1:150 ส่วนวงจรกำเนิดความถี่ 30 kHz เลือกใช้ไอซีเบอร์ NE555 สร้างสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมที่มี duty cycle = 49.7 % ขับทรานซิสเตอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ให้สวิตซ์หม้อแปลงไฟฟ้าทางเข้า ก่อนจ่ายให้วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 5 เท่า ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

3.4 การออกแบบระบบประมวลสัญญาณภาพ

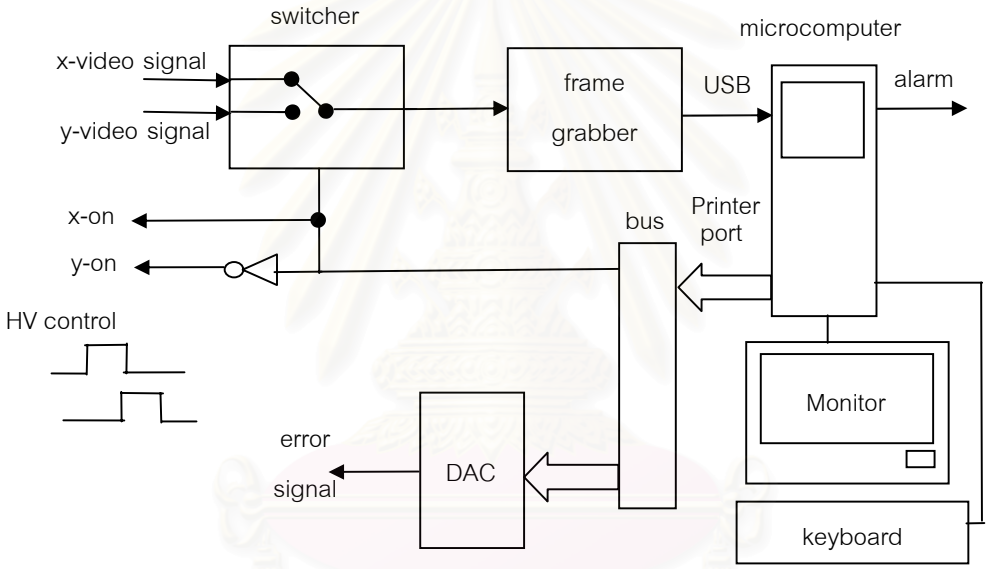
ระบบประมวลสัญญาณภาพประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ระบบเก็บข้อมูลสัญญาณภาพและระบบเชื่อมโยงสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.11

3.4.1 ระบบเก็บข้อมูลภาพ

ระบบเก็บข้อมูลภาพทำหน้าที่รับสัญญาณภาพคอมโพสิตจากกล้องวีดิทัศน์ในแนวแกน X และ Y ส่งให้แผ่นวงจรจับสัญญาณภาพสลับกัน ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างสัญญาณสวิตช์จากพอร์ตเครื่องพิมพ์เพื่อควบคุมวงจร switcher ในการรับสัญญาณ และสัญญาณสวิตช์อีกส่วนหนึ่งจะส่งออกไปควบคุมการทำงานของวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้เปิด-ปิดสัมพันธ์กับการเก็บข้อมูลภาพ

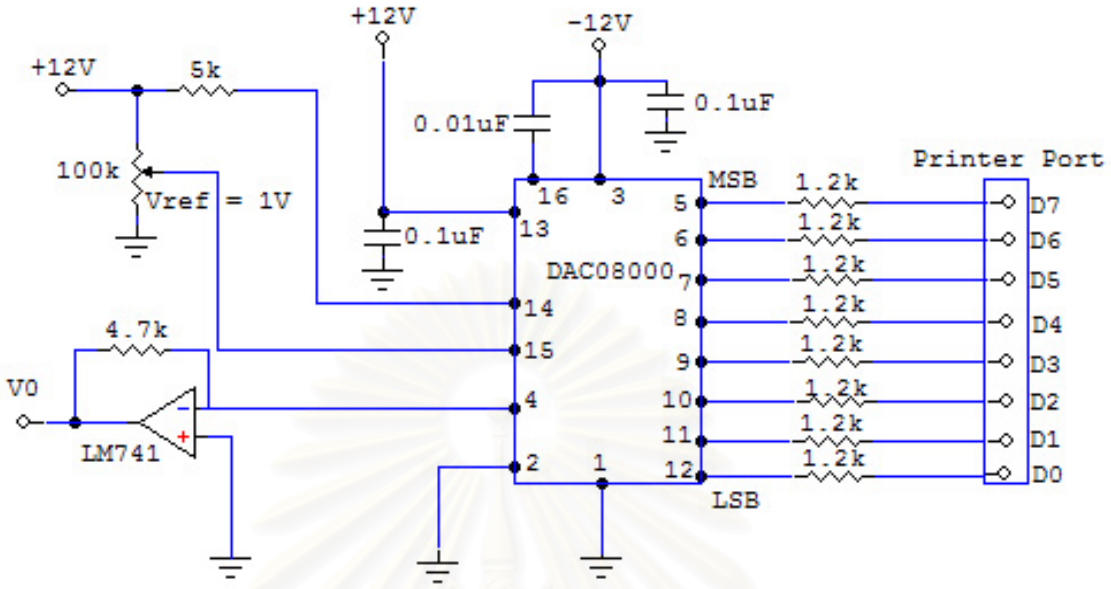
3.4.2 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก

ระบบนี้ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากผลการประมวลความหนาเพื่อใช้ประโยชน์ในกระบวนการควบคุมความหนา นอกเหนือจากการแสดงผลด้วยภาพและการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า สัญญาณที่กำเนิดจากระบบเชื่อมโยงสัญญาณจะส่งผ่านมาจากพอร์ตเครื่องพิมพ์ ได้แก่ สัญญาณเตือนเมื่อไม่สามารถควบคุมให้ความหนาคงที่ได้ และสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) จากการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำ ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.11 และวงจรที่ออกแบบขึ้นในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แผนภาพระบบเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 วงจรเชื่อมโยงสัญญาณกับพอร์ตเครื่องพิมพ์

3.5 การพัฒนาโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพและประมวลผล

โปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพและนำสัญญาณภาพที่ได้มาประมวลผลเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การพัฒนาโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ

การเริ่มต้นโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพมีลำดับการทำงานดังโฟล์วชาร์ต (flowchart) ในรูปที่ 3.13 เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงาน โปรแกรมหลักจะทำการสร้างหน้าต่างหลัก (Main window) พร้อมทั้งเครื่องมือที่ใช้บนหน้าต่างหลัก ได้แก่ ปุ่มกด เมนูบาร์ กล่องรับข้อมูล และหน้าต่างสำหรับแสดงภาพจากแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณภาพ เมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มเริ่มต้นให้โปรแกรมรับสัญญาณภาพ โปรแกรมจะกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล หลังจากที่กำหนดค่าเริ่มต้นจนครบแล้ว โปรแกรมจะทำการสแกนหาไดรเวอร์ของแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ ถ้าพบไดรเวอร์โปรแกรมก็จะแสดงภาพจากแผ่นวงจรแปลงสัญญาณบนหน้าต่างสำหรับแสดงภาพ

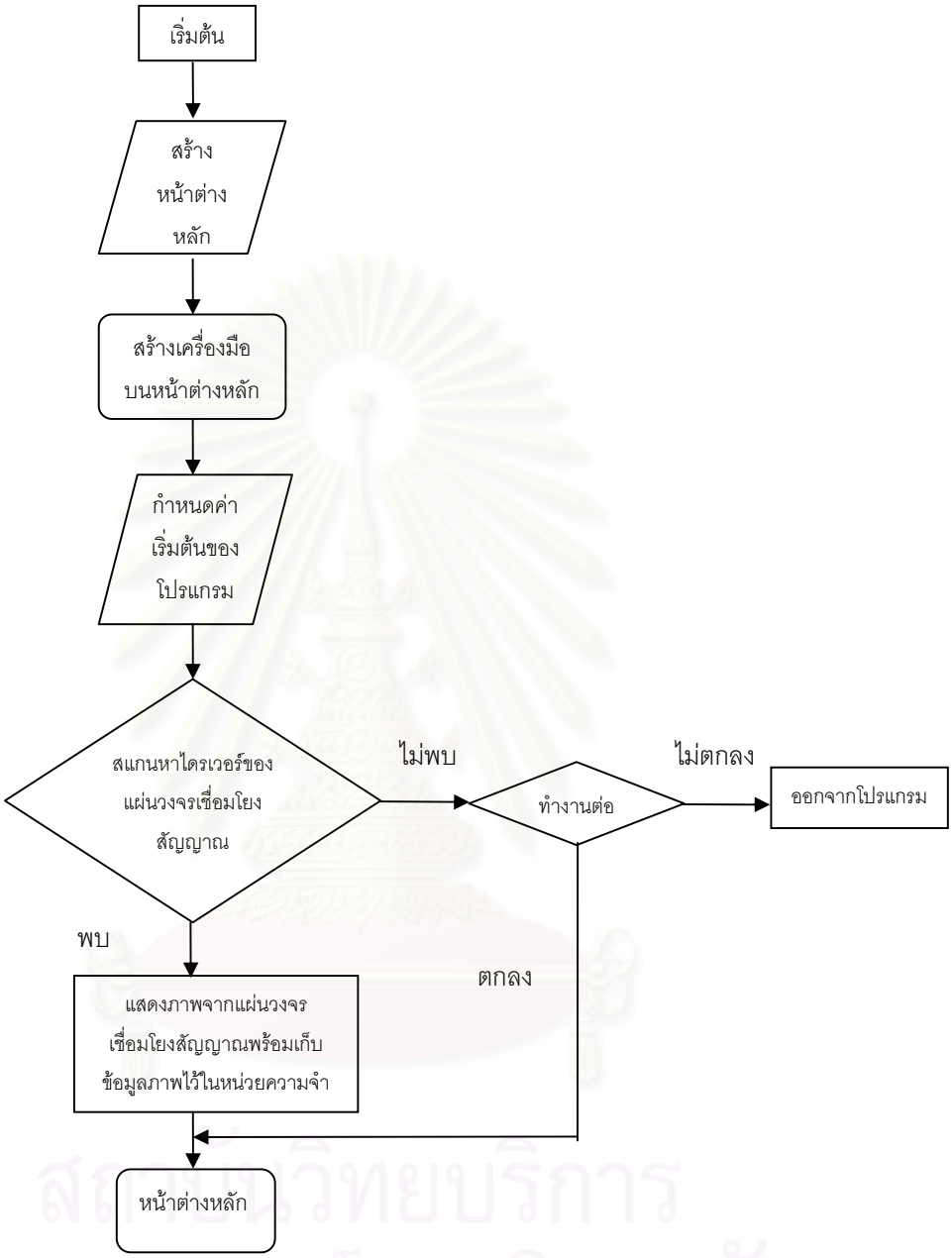
แล้วโปรแกรมจะรอการสั่งการต่อไปที่หน้าต่างหลัก แต่หากไม่พบไดรเวอร์โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความให้เลือกว่าจะทำงานต่อหรือไม่ ถ้าเลือกทำงานต่อโปรแกรมจะรอสั่งการที่หน้าต่างหลักโดยไม่สามารถแสดงภาพจากแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณได้ แต่ถ้าเลือกไม่โปรแกรมจะปิดหน้าต่างทั้งหมดพร้อมออกจากโปรแกรม

ในส่วนของการเก็บข้อมูลระบบภาพ อาศัยการเก็บข้อมูลโดยตรงจากกล้องวีดิทัศน์ผ่านทางแผ่นวงจร frame grabber โดยใช้ activeX control ของโปรแกรม visual basic ชื่อว่า active video ช่วยในการเก็บข้อมูลระบบภาพไว้ในหน่วยความจำชั่วคราว รายละเอียดโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ค.

3.5.2 การพัฒนาโปรแกรมประมวลความหนาของสายไฟฟ้า

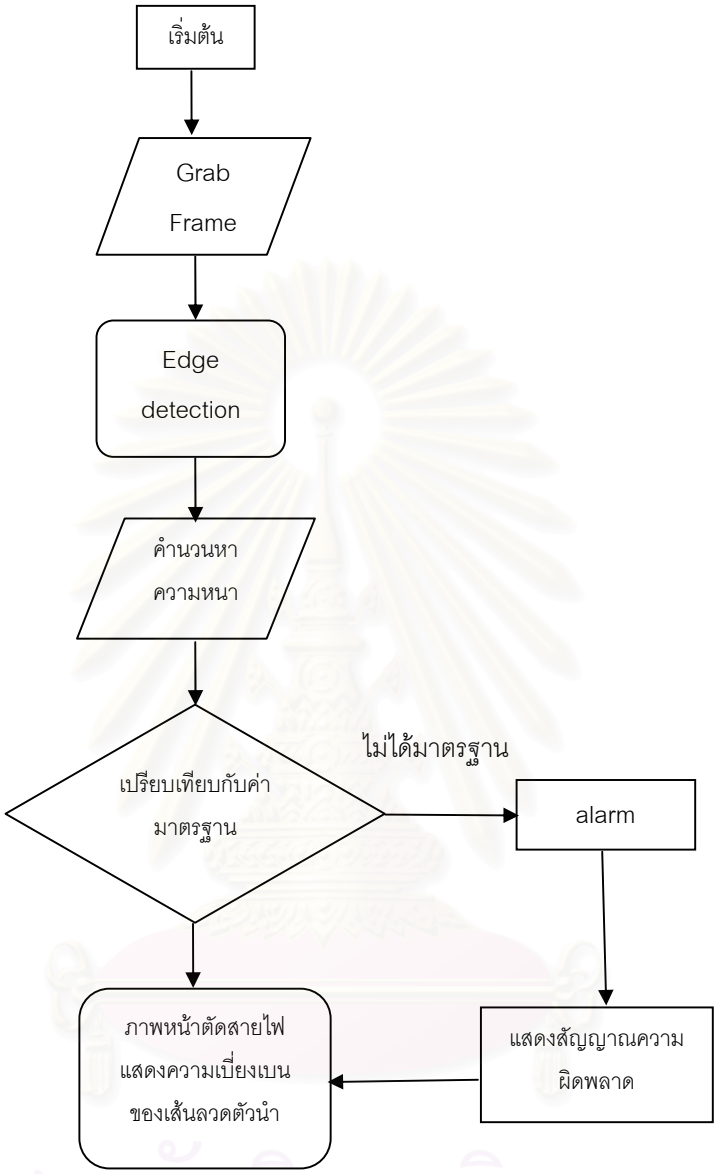
การพัฒนาโปรแกรมตรวจสอบความหนาบนไมโครคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนจากการสุ่มข้อมูลโปรไฟล์ต่อเนื่องในแกน X และแกน Y โปรแกรมจะทำการตรวจสอบหาขอบภาพโดยวิธี edge detection จากหน้าต่างที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาพ ซึ่งกำหนดหน่วยวัดของพิกัดเป็นหน่วย Twip ซึ่งเป็นหน่วยที่ไม่ขึ้นกับค่าความละเอียด (resolution) ของจอภาพที่ตั้งไว้ โดยที่ 1440 Twip มีค่าเท่ากับ 1 นิ้ว และคำนวณหาระยะห่างของขอบภาพที่ได้เทียบกับค่าอ้างอิงและประมวลหาความเบี่ยงเบนของเส้นลวดตัวนำ พร้อมทั้งแจ้งสัญญาณความผิดพลาดออกมา ดังโฟล์วชาร์ตในรูปที่ 3.14 และโปรแกรมใน ภาคผนวก ค.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 แสดงการทำงานของโปรแกรมเก็บข้อมูลสัญญาณภาพ

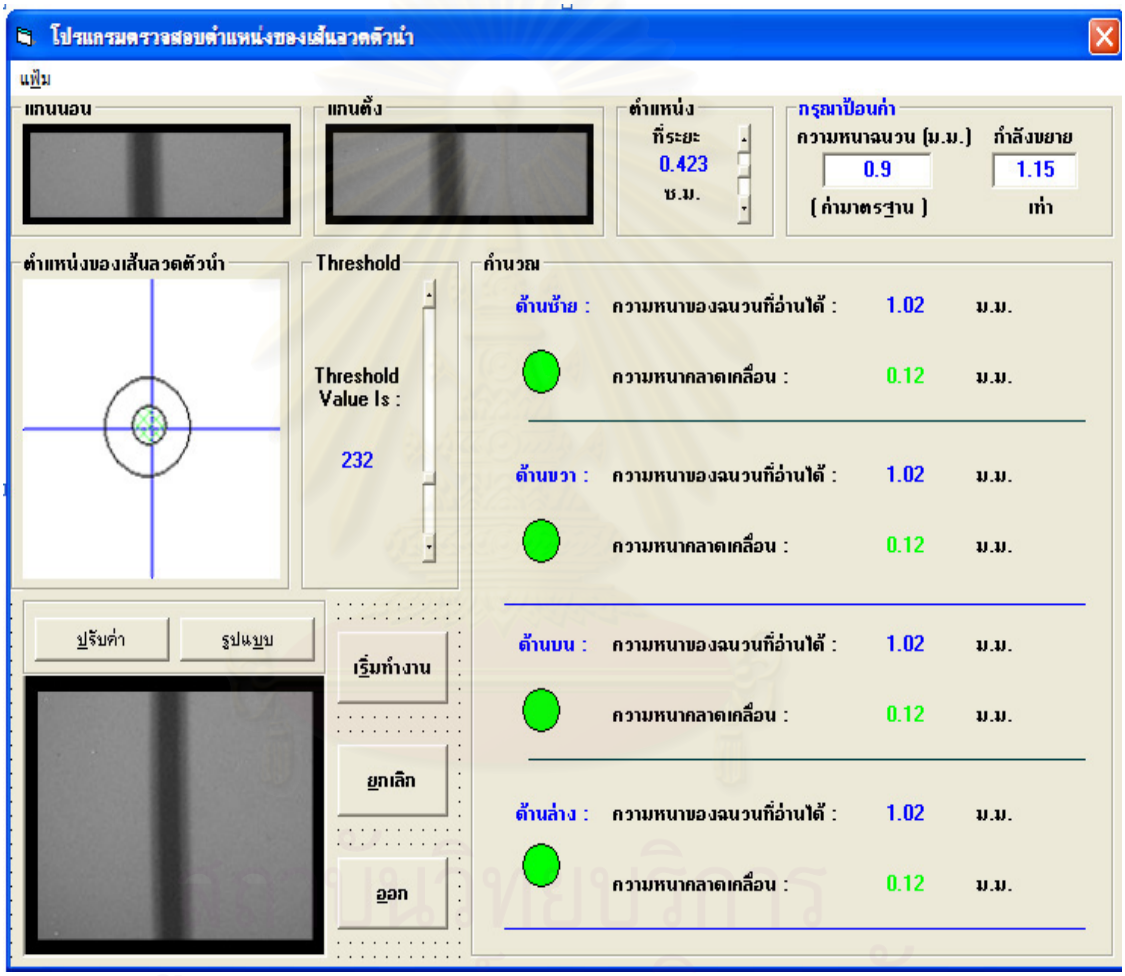
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 แสดงการทำงานของโปรแกรมประมวลความหนาของสายไฟฟ้า

ในรูปที่ 3.15 แสดงภาพหน้าจอการทำงานของโปรแกรมตรวจสอบตำแหน่งของเส้นลวดตัวนำและความหนาของฉนวนสายไฟฟ้า เมื่อโปรแกรมรับสัญญาณภาพจากกล้องวีดิทัศน์

ผ่านทางวงจรเชื่อมโยงสัญญาณแล้ว การทำงานผู้ใช้งานสามารถปรับค่าความคมชัดของภาพ ความเปรียบต่างของภาพ ได้ที่ปุ่มปรับค่า ก่อนทำการตรวจสอบต้องป้อนค่าปรับเทียบความหนามาตรฐานและกำลังขยายภาพที่ได้จากการจัดวางองค์ประกอบการถ่ายภาพ หลังจากนั้นให้กดปุ่มทำงาน โปรแกรมจะทำการตรวจจับขอบภาพ และประมวลหาค่าความหนาที่หน้าจอด้านขวาและแสดงตำแหน่งของเส้นลวดตัวนำที่หน้าจอทางด้านซ้าย



รูปที่ 3.15 แสดงภาพหน้าจอการทำงานของโปรแกรม

รูปที่ 3.16 ระบบตรวจสอบและควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า เป็นการทดสอบคุณภาพของภาพ real-time fluoroscopy และความสามารถในการถ่ายภาพรังสี เพื่อประเมินความสามารถในการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า แบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

ก. การทดสอบสเปกตรัมพลังงานของระบบกำเนิดรังสีเอกซ์

ข. การทดสอบขีดจำกัดของกำลังขยายภาพ

ค. การทดลองถ่ายภาพชิ้นงาน

ง. การทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนา

จ. การตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

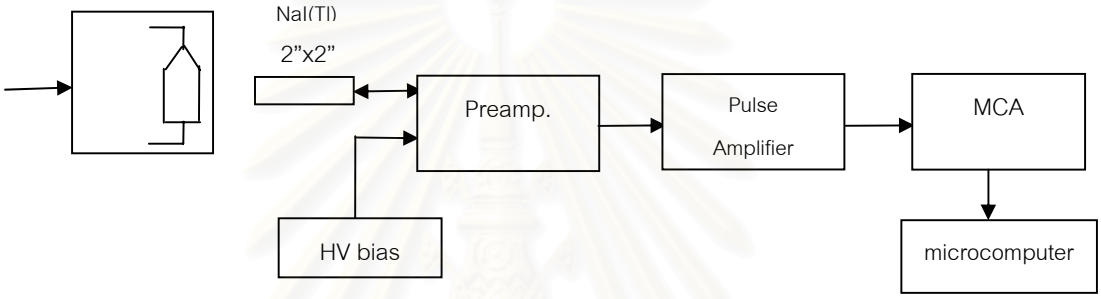
4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ (DVM) ของบริษัท Fluke model 8840A
2. ระบบวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (MCA) ของบริษัท Tracor Northern model TN-1706
3. หัววัดรังสี NaI(Tl) ขนาด 2"x2" พร้อม preamplifier และฐานหลอด PMT ของบริษัท Ortec, model 276
4. อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ ของบริษัท Canberra model 2022
5..ชุดเส้นลวดทดสอบมาตรฐาน (IQI) รหัส DIN62FE 10/16
6. ชิ้นงานทดสอบภาพถ่ายรังสี
8. ไมโครคอมพิวเตอร์
9. ระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

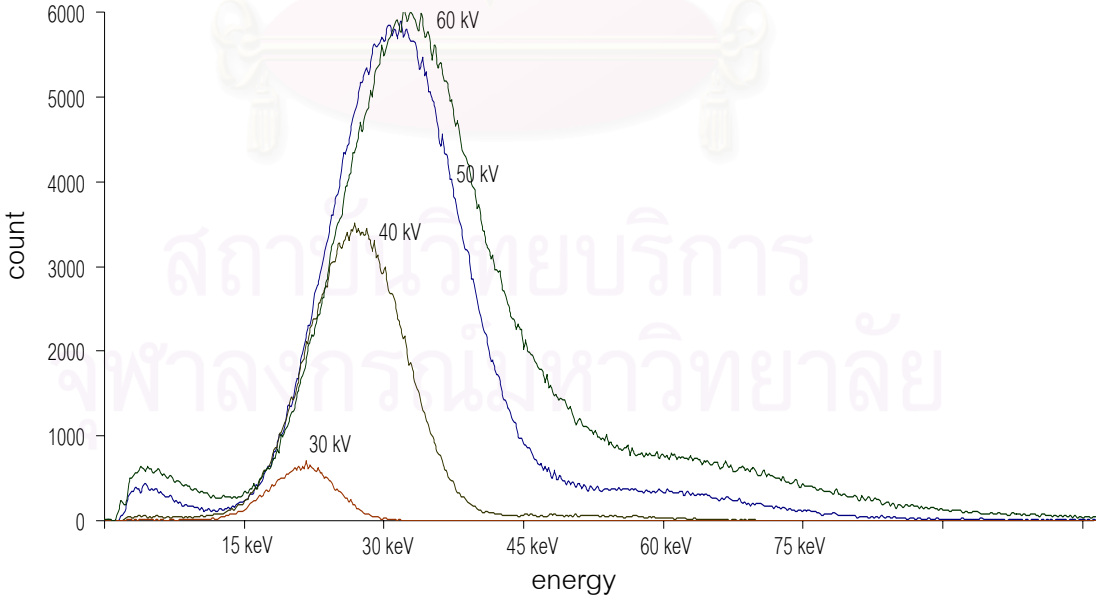
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การทดสอบสเปกตรัมพลังงานของระบบกำเนิดรังสีเอกซ์

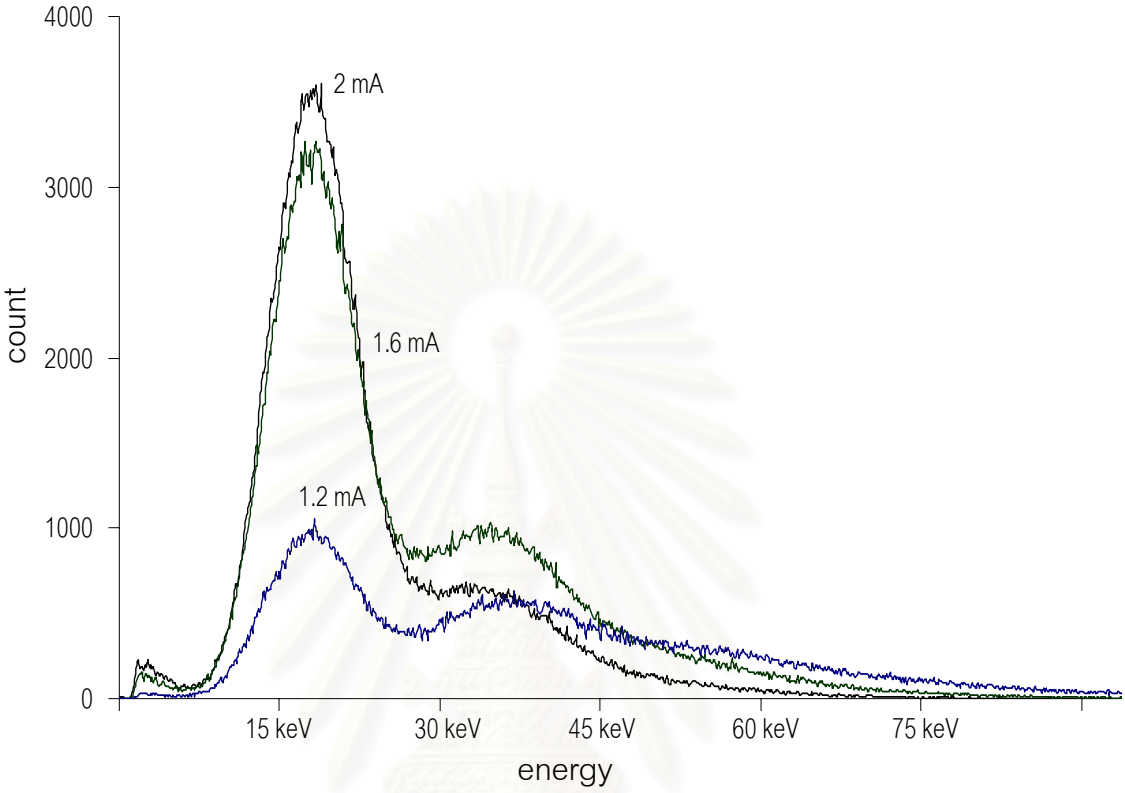
ได้ทดสอบการทำงานของระบบกำเนิดรังสีเอกซ์โดยจัดระบบวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ดังแผนภาพในรูปที่ 4.1 และแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้กับแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เป็น 30 ,40 ,50 และ 60 กิโลโวลต์และที่แรงดันไฟฟ้าสูง 40 กิโลโวลต์ ได้แปรเปลี่ยนกระแสแอโนดที่ 1.2 , 1.6 และ 2 มิลลิแอมแปร์ ผลการทดลองให้ผลดังสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แผนภาพของระบบทดสอบสเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์



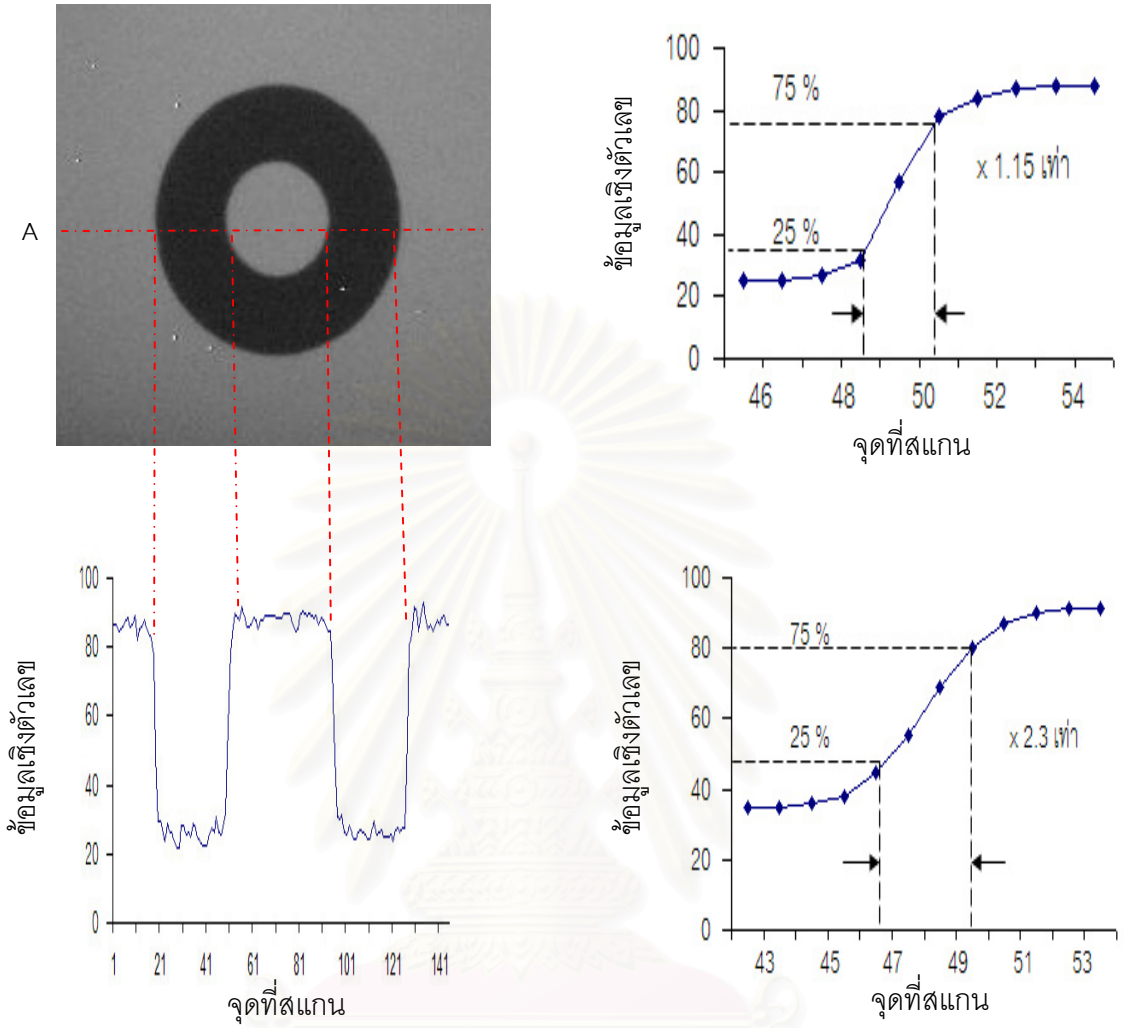
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แอโนด



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์เมื่อแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่แอโนด

4.3 การทดสอบขีดจำกัดของกำลังขยายภาพ

ในการทดสอบขีดจำกัดกำลังขยายภาพของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ซึ่งใช้หลอดรังสีเอกซ์ที่มีขนาดโฟกัส 300 μm ได้ประยุกต์การทดสอบหาค่ารีโซลูชันด้วย Edge Spread Function เพื่อตรวจหาค่าขอบเงามัวของภาพถ่าย โดยกำลังขยายจากการจัดองค์ประกอบกล้อง 1.15 เท่า กำลังขยายจากการจัดวางระบบถ่ายภาพ 1 และ 2 เท่า ซึ่งจะได้กำลังขยายรวมจากผลคูณของกำลังขยายทั้ง 2 เท่ากับ 1.15 และ 2.3 เท่า ตามลำดับ โดยถ่ายภาพวงแหวนโลหะบางด้วยพลังงาน 40 keV และกระแสแอโนด 1.2 mA จัดระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับฉากเรืองรังสี 12 เซนติเมตร และระยะระหว่างฉากเรืองรังสีกับกล้อง 2.5 cm



ก. โปรไฟล์ของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของวงแหวนตามแนวแกน A

ข. การหาค่าขอบเงามัวจากโปรไฟล์บริเวณขอบภาพ

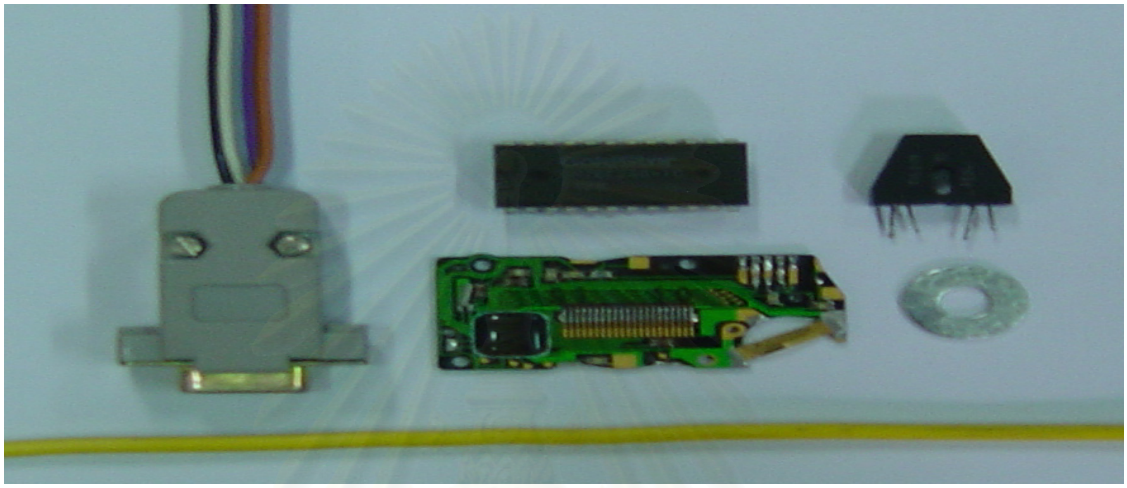
รูปที่ 4.4 การประเมินขีดจำกัดกำลังขยายภาพ

ตารางที่ 4.1 ขนาดของเงามัวขอบภาพที่กำลังขยายต่าง ๆ ด้วยการประเมินจากวิธีการ edge spread function

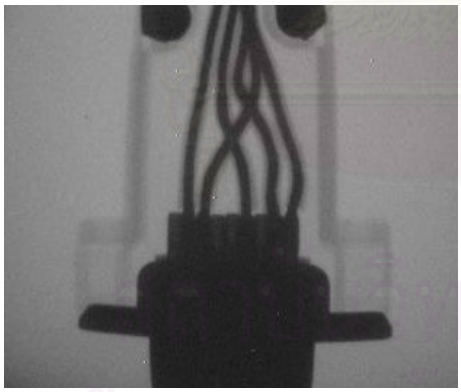
กำลังขยายรวม	ขนาดของเงามัว mm
1.15	0.1
2.3	0.15

4.4 การทดลองถ่ายภาพชิ้นงาน

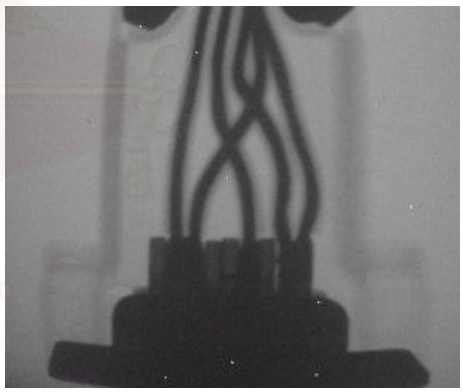
ได้ทดลองถ่ายภาพตัวอย่างชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่กำลังขยายรวม 1.15 และ 2.3 เท่า โดยปรับเงื่อนไขของพลังงานและความเข้มรังสีที่เหมาะสม สามารถจับภาพบนฉากเรืองรังสีได้ชัดเจน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานทดสอบภาพถ่ายรังสี

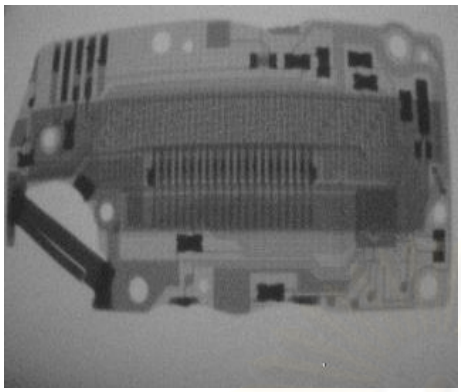


กำลังขยายรวม 1.15 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)

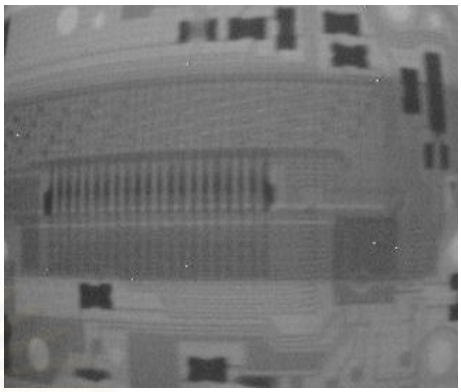


กำลังขยายรวม 2.3 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

ก. ภาพถ่ายคอนเนกเตอร์เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA

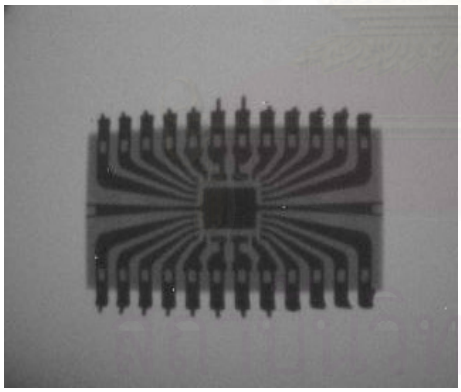


กำลังขยาย 1.15 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)

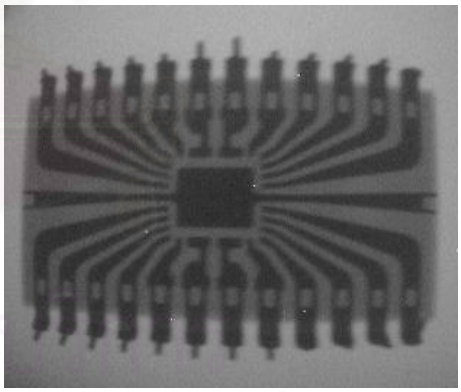


กำลังขยาย 2.3 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

ข. ภาพถ่ายแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA



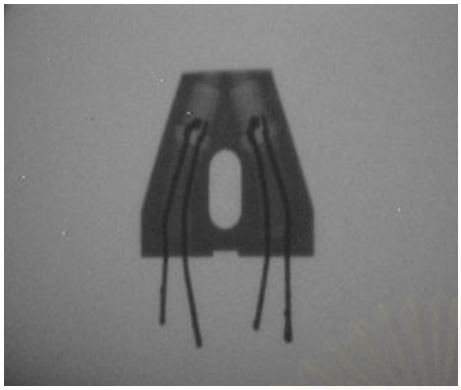
กำลังขยาย 1.15 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)



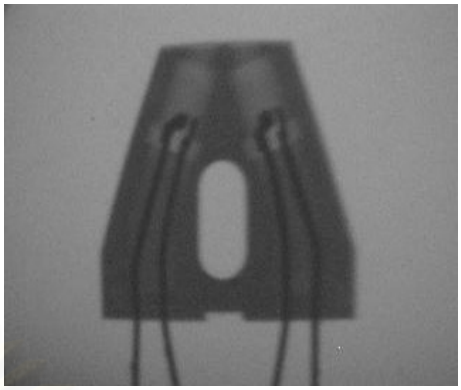
กำลังขยาย 2.3 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

ค. ภาพถ่ายไอซี เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 60 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

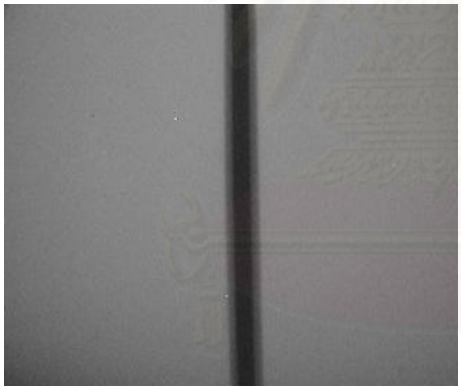


กำลังขยาย 1.15 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)

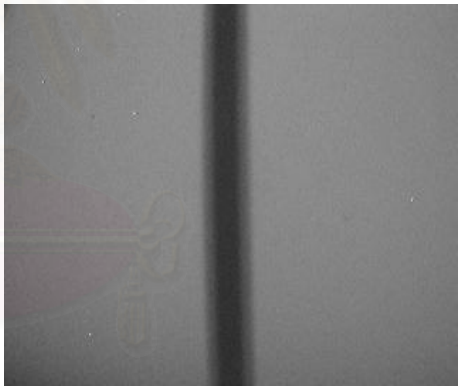


กำลังขยาย 2.3 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

ง. ภาพถ่าย opto - sensor เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA



กำลังขยาย 1.15 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)



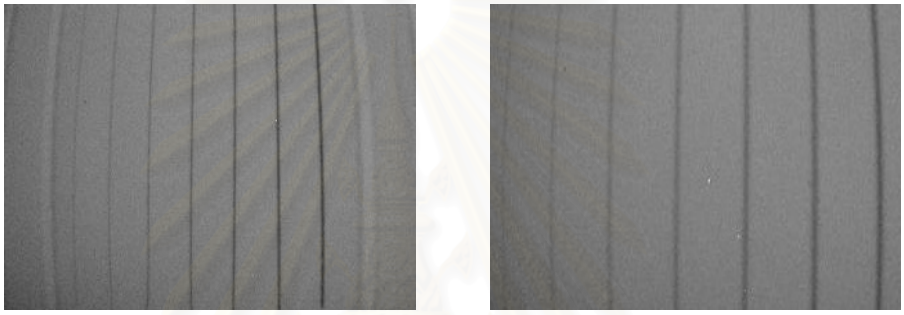
กำลังขยาย 2.3 เท่า
(กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า
กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

จ. ภาพถ่ายสายไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 2.5 มม.^{2} เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 2 mA

รูปที่ 4.6 แสดงผลของภาพถ่ายชิ้นงานด้วยระบบตรวจสอบความหนาฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

4.5 การทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนา

การทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนา ได้ทำการทดสอบโดยใช้เส้นลวดมาตรฐาน IQI รหัส DIN62FE 10/16 ซึ่งมีขนาดดังนี้ 0.40 mm , 0.32 mm , 0.25 mm , 0.20 mm , 0.16 mm , 0.125 mm และ 0.10 mm ตามลำดับ ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่แรงดันไฟฟ้าสูง40 กิโลโวลต์ กระแส 1.2 มิลลิแอมแปร์ กำลังขยายรวม 1.15 เท่าและ 2.3 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากนั้นประเมินความหนา (ขนาดของเส้นลวด) หลังการปรับเทียบขนาดมาตรฐานของเส้นลวดบนโปรแกรมแล้ว ผลการตรวจสอบความหนาให้ผลดังตารางที่ 4.2



กำลังขยาย 1.15 เท่า (กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 1 เท่า)

กำลังขยาย 2.3 เท่า (กำลังขยายของกล้อง 1.15 เท่า กำลังขยายของระบบถ่ายภาพ 2 เท่า)

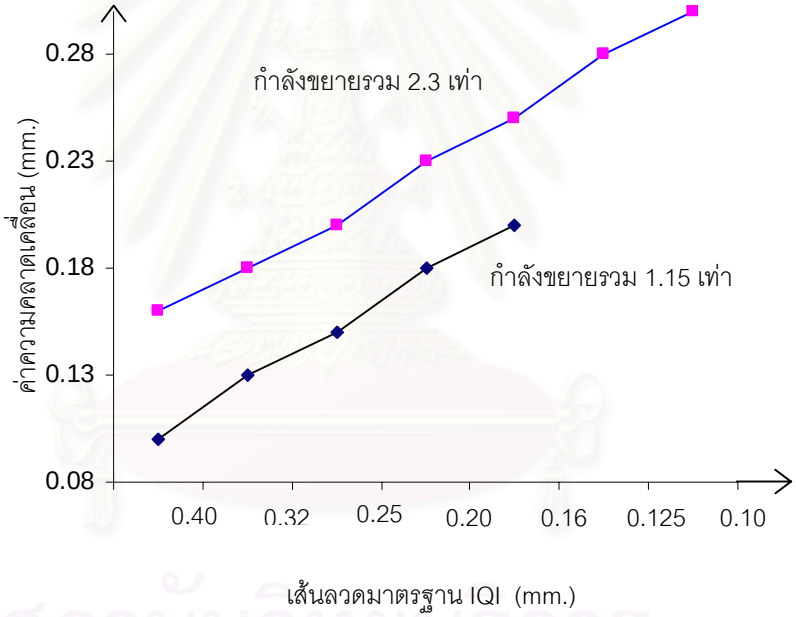
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายเส้นลวดมาตรฐาน IQI เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV และกระแสแอโนด 1.2 mA

ตารางที่ 4.2 แสดงความสามารถในการแจกแจงความหนาเทียบกับเส้นลวดมาตรฐาน

ขนาดเส้นลวดมาตรฐาน (mm.)	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมตรวจสอบ	
	1.15 เท่า	2.3 เท่า
0.40	0.5	0.56
0.32	0.45	0.50
0.25	0.40	0.45
0.20	0.38	0.43

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ขนาดเส้นลวดมาตรฐาน (mm.)	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมตรวจสอบ	
	1.15 เท่า	2.3 เท่า
0.16	0.36	0.41
0.125	0	0.405
0.10	0	0.4



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการแจกแจงความหนาของเส้นลวดมาตรฐาน

จากการทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนาของโปรแกรม โดยนำภาพขนาดเส้นลวดมาหาค่าความคลาดเคลื่อนให้ผลดังรูปที่ 4.8 จะพบว่าที่กำลังขยายรวม 1.15 เท่า ไม่สามารถตรวจพบขนาดเส้นลวดมาตรฐาน 0.125 mm และ 0.10 mm ได้ ความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยคิดจาก

ขนาดเส้นลวด 0.40 mm , 0.32 mm , 0.25 mm , 0.20 mm และ 0.16 mm มีค่า ±0.152 mm ขณะที่กำลังขยาย 2.3 เท่า ความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยมีค่า ± 0.228 mm.

4.6 การตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

การทดสอบโปรแกรมตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ได้ทำการทดสอบสายไฟฟ้าตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง ดังนี้

1. สายอ่อนหุ้มด้วยฉนวนแกนเดียว พื้นที่หน้าตัด 1 ตารางมิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 750 โวลต์ จำนวนเส้นลวดในตัวนำ 1 เส้น ความหนาของฉนวน 0.8 มิลลิเมตร

2. สายอ่อนหุ้มด้วยฉนวนแกนเดียว พื้นที่หน้าตัด 1.5 ตารางมิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 750 โวลต์ จำนวนเส้นลวดในตัวนำ 1 เส้น ความหนาของฉนวน 0.8 มิลลิเมตร

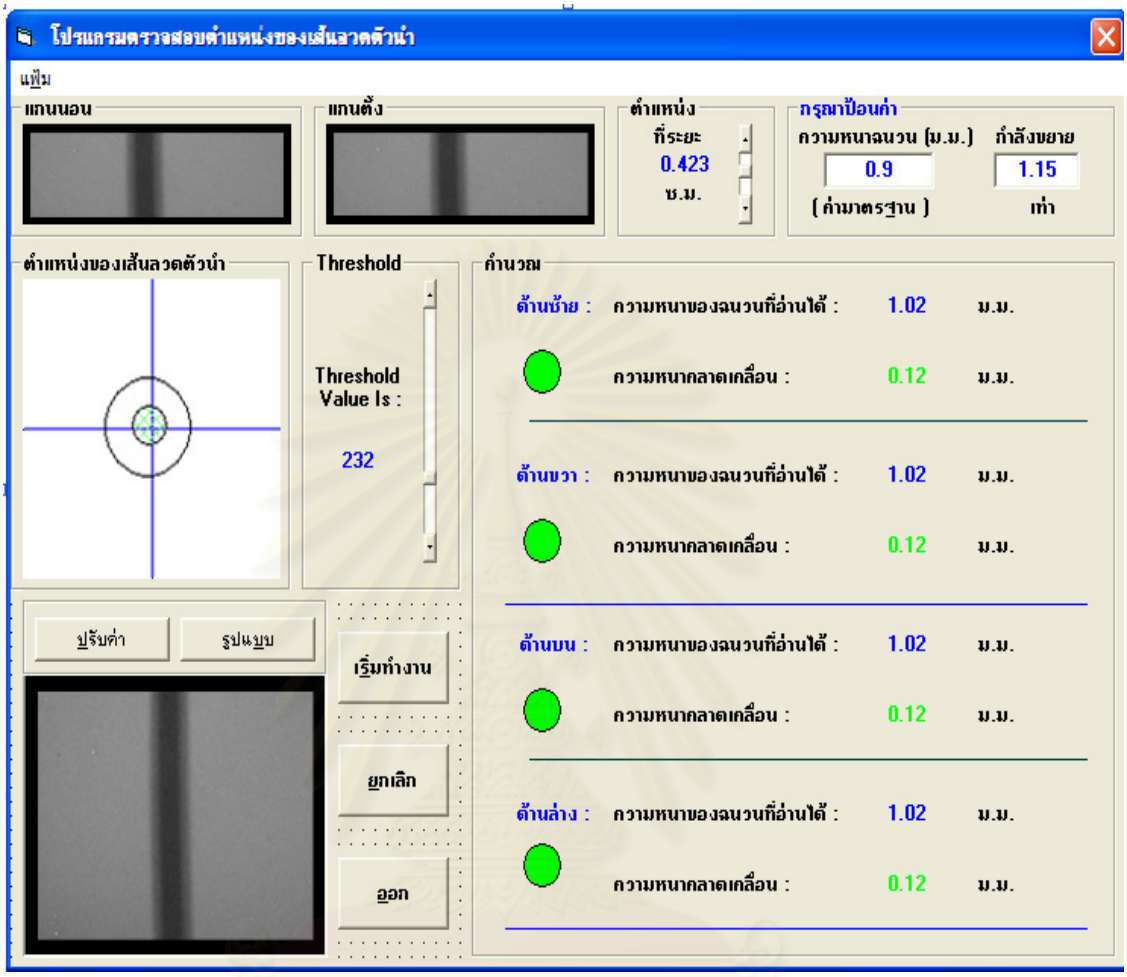
3. สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวนแกนเดียว พื้นที่หน้าตัด 2.5 ตารางมิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 750 โวลต์ จำนวนเส้นลวดในตัวนำ 1 เส้น ความหนาของฉนวน 0.8 มิลลิเมตร

4. สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวนแกนเดียว พื้นที่หน้าตัด 4 ตารางมิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 750 โวลต์ จำนวนเส้นลวดในตัวนำ 1 เส้น ความหนาของฉนวน 0.9 มิลลิเมตร

ทดสอบถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่แรงดันไฟฟ้าสูง 40 กิโลโวลต์ กระแส 2 มิลลิแอมแปร์ กำลังขยายรวม 1.15 เท่า ผลการตรวจสอบความหนาฉนวนของสายไฟตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.3 และแสดงผลทางจอภาพดังรูปที่ 4.9 ผลการตรวจสอบความหนาฉนวนสายไฟฟ้าที่มีความหนาระหว่าง 0.8 – 0.9 มิลลิเมตร มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.12 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบโปรแกรมตรวจสอบความหนาของฉนวนกับสายไฟตัวอย่าง

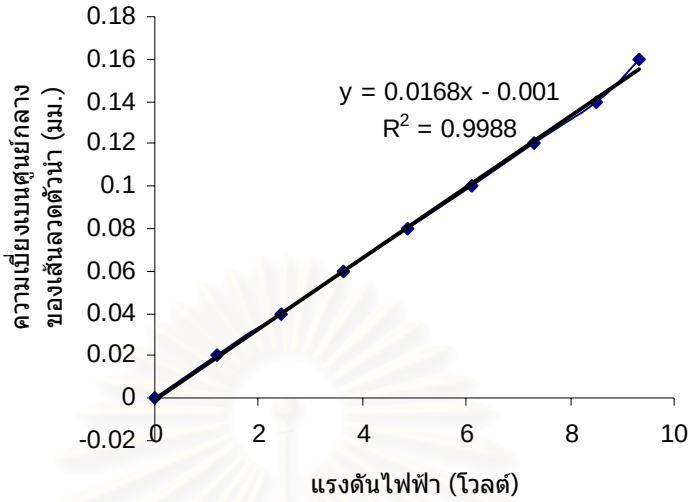
สายไฟฟ้าตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยที่อ่านได้จากโปรแกรม (mm)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm)
ตัวอย่างที่ 1	0.9	0.1
ตัวอย่างที่ 2	0.9	0.1
ตัวอย่างที่ 3	0.92	0.12
ตัวอย่างที่ 4	1.02	0.12



รูปที่ 4.9 แสดงโปรแกรมตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า

4.7 ผลทดสอบการกำเนิดสัญญาณความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงศูนย์กลาง

ผลการทดสอบโปรแกรมตรวจสอบความหนาฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนมาตรวจสอบหาค่าความเบี่ยงศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำเทียบและกำเนิดระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำ

จากการทดสอบพบว่าสัญญาณความความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำ 0 – 0.16 มิลลิเมตร สัมพันธ์กับขนาดแรงดันไฟฟ้า 0 – 9.33 โวลต์ จากเส้นกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นสูง โดยให้ค่าสหสัมพันธ์ความเป็นเชิงเส้น $R^2 = 0.9988$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ระบบควบคุมความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ระบบกำเนิดรังสีเอกซ์ ระบบสร้างภาพถ่ายรังสีเอกซ์ชนิดเห็นภาพทันที ระบบเชื่อมโยงสัญญาณสำหรับเก็บข้อมูลภาพรวมทั้งส่งสัญญาณควบคุมประมวลผลภายนอก และโปรแกรมประมวลความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้มุ่งเน้นในการควบคุมสมมาตรของเส้นลวดตัวนำขณะหุ้มฉนวนด้วยการควบคุมอัตราการฉีดฉนวนหุ้มสาย โดยการตรวจประเมินความหนาของฉนวนในแนวแกน x และ y เพื่อนำมาประมวลการเบี่ยงเบนจากศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำและส่งสัญญาณคลาดเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนกับการเบี่ยงเบนเพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการฉีดฉนวนหุ้มสาย

5.1.2 ระบบกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ออกแบบขึ้นเป็นแบบ constant potential ควบคุมการกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นจังหวะตามความต้องการในการจับภาพถ่ายรังสี (pulse type) จากโปรแกรมควบคุมสามารถกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พลังงานสูงสุด 80 keV กระแสสูงสุด 5 mA ระบายความร้อนด้วยฉนวนน้ำมันในถังผลิตไฟฟ้าแรงดันสูง (HV tank) มีขนาดจุดโฟกัส 0.3 มิลลิเมตร (300μm) ในการพัฒนาระบบกำเนิดรังสีเอกซ์นี้อุปกรณ์ส่วนใหญ่สามารถหาได้ง่าย ยกเว้นหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และอุปกรณ์ทวีแรงดันไฟฟ้าต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ

5.1.3 ระบบสร้างภาพเป็นแบบ fluoroscopy ฉากเรืองแสงเลือกใช้ฉากเสริมความเข้มรังสี (image intensifying screen) ของบริษัท OKAMOTO รุ่น LUS ที่ใช้ในงานถ่ายภาพรังสีทางการแพทย์ และแปลงภาพถ่ายรังสีเป็นสัญญาณภาพคอมโพสิทด้วยกล้องวีดิทัศน์ความไว 0.003 ลักซ์ โดยจัดระบบถ่ายภาพรังสีในย่านไมโครโฟกัสซึ่งให้กำลังขยายจากการจัดระบบถ่ายภาพ 1 - 2 เท่า กำลังขยายจากการจัดองค์ประกอบกล้อง 1.15 เท่า รวมเป็นกำลังขยายรวม 1.15 – 2.3 เท่า จากผลการทดสอบขนาดของเงามัวขอบภาพด้วยการประเมินจากวิธีการ edge spread function พบว่าขนาดของเงามัวมีค่า 0.1 – 0.15 มิลลิเมตรตามลำดับ

5.1.4 ผลการทดสอบความสามารถในการแจกแจงความหนา โดยการถ่ายภาพชุดเส้นลวดทดสอบมาตรฐาน (IQI) รหัส DIN62FE 10/16 พร้อมทั้งปรับเทียบขนาดเส้นลวดบนโปรแกรมก่อนประเมินขนาดเส้นลวด พบว่าที่กำลังขยายภาพรวม 1.15 เท่าและ 2.3เท่า ให้ผลการตรวจค่าความหนาคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.152 และ 0.288 mm ตามลำดับ โดยที่กำลังขยายภาพรวม 1.15 เท่า โปรแกรมไม่สามารถตรวจพบขอบภาพของชุดเส้นลวดขนาด 0.125 mm และ 0.10 mm ได้

5.1.5 ผลทดสอบการตรวจสอบความหนาของฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน โดยใช้สายไฟฟ้าขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 , 1.5 , 2.5 และ 4 mm^2 พบว่าผลการตรวจสอบความหนาให้ผลคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 120 μm

5.1.6 ผลการทดสอบสัญญาณความความคลาดเคลื่อนจากการเบี่ยงเบนศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำพบว่าที่ความคลาดเคลื่อน 0 – 0.16 มิลลิเมตร ระบบสามารถกำเนิดสัญญาณสัมพันธ์กับขนาดแรงดันไฟฟ้า 0 – 9.33 โวลต์ มีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยให้ค่า $R^2 = 0.9988$

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความหนาที่พัฒนาขึ้นได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและตรวจสอบสัญญาณควบคุมจากการแปรเปลี่ยนค่าความหนาของฉนวนในด้านแกน x และ y ยังไม่มีการนำสัญญาณไปควบคุมกับระบบฉีดฉนวนหุ้มโดยตรง ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบสร้างภาพให้กะทัดรัด (compact) ขึ้น และมีการทดสอบกับเครื่องฉีดฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าจริง จะทำให้ได้ข้อมูลในการปรับสมรรถนะระบบควบคุมความหนาให้เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น

5.2.2 แนวทางในการพัฒนาระบบให้กะทัดรัดขึ้น ทำได้โดยแยกส่วนของหลอดรังสีเอกซ์ออกจากถังกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง และออกแบบการฉนวนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้ทนแรงดันไฟฟ้า 50 kV นำหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ประกอบกับระบบสร้างภาพ ให้ลักษณะเป็นรูปตัวซี (c-arm) เพียงชุดเดียว และออกแบบระบบกลให้หมุนแขน detector นี้ในแนวแกน x และ y สลับกัน ซึ่งจะช่วยลดระบบสร้างภาพให้เหลือเพียงชุดเดียว

5.2.3 การประเมินความหนาของฉนวนจะถูกต้องมากขึ้นจำเป็นต้องมีการขยายภาพขนาดของสายให้มากกว่านี้ โดยยังคงความคมชัดของภาพ ซึ่งจะต้องใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีโฟกัสเล็กลงกว่านี้มาก แต่ราคาของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะสูงขึ้น

5.2.4 จากงานวิจัยนี้พบว่าการประยุกต์วิธีตรวจสอบขอบภาพ (edge detection) ด้วยวิธีของโซเบล (Sobel) ร่วมกับการทำ edge thinning เป็นวิธีที่มีขั้นตอนน้อยใช้เวลาประมวลภาพรวดเร็วเหมาะ

กับการตรวจสอบในระบบ on-line แต่จะไม่เหมาะกับการตรวจสอบขอบภาพที่ต้องการความถูกต้องสูง ดังนั้นในกรณีที่ต้องการตรวจสอบขอบภาพวัสดุในระบบ off – line ควรทดลองใช้วิธีการของแคนนี (canny) จะเป็นวิธีตรวจจับขอบภาพที่ตรงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงมากกว่า เนื่องจากมีขั้นตอนการประมวลภาพที่มีขั้นตอนซับซ้อนกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยโพลิไวนิลคลอไรด์ . มอก 11 – 2531 , 2531 .
2. สำรวย สังข์สะอาด .วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง .กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ. 2528
3. Thai Yazaki .Technical Information and Specification for Electric Wire and Cable. 1st ed. , October 1991 .
4. วิรุฬห์ มังคละวิรัช, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, กล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ , วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่2 , ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2535
5. John R. Lamarsh . Introduction to nuclear engineering . 2nd ed. London : Addison – Wesley Publishing Company , 1983 .
6. Training course series no.3, Industrial Radiography, IAEA, Vienna, 1992
7. M. Kroning, O. Hirsch, B. Shulgin, D. Raikov, M.Kidibaev, T. Koroleva, R. Hanke, T. Baumbach, X-Ray Imaging Systems for NDT and General Applications, NDE2002 predict. assure. improve. National Seminar of ISNT, Chennai, 5 – 7 december 2002
8. Bernard Grob. Basic Television and Video Systems. 5th ed. McGraw-Hill Book Company , 1986.
9. Adrian Low. Introductory Computer Vision and Image Processing . McGraw-Hill Book Company , 1991.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

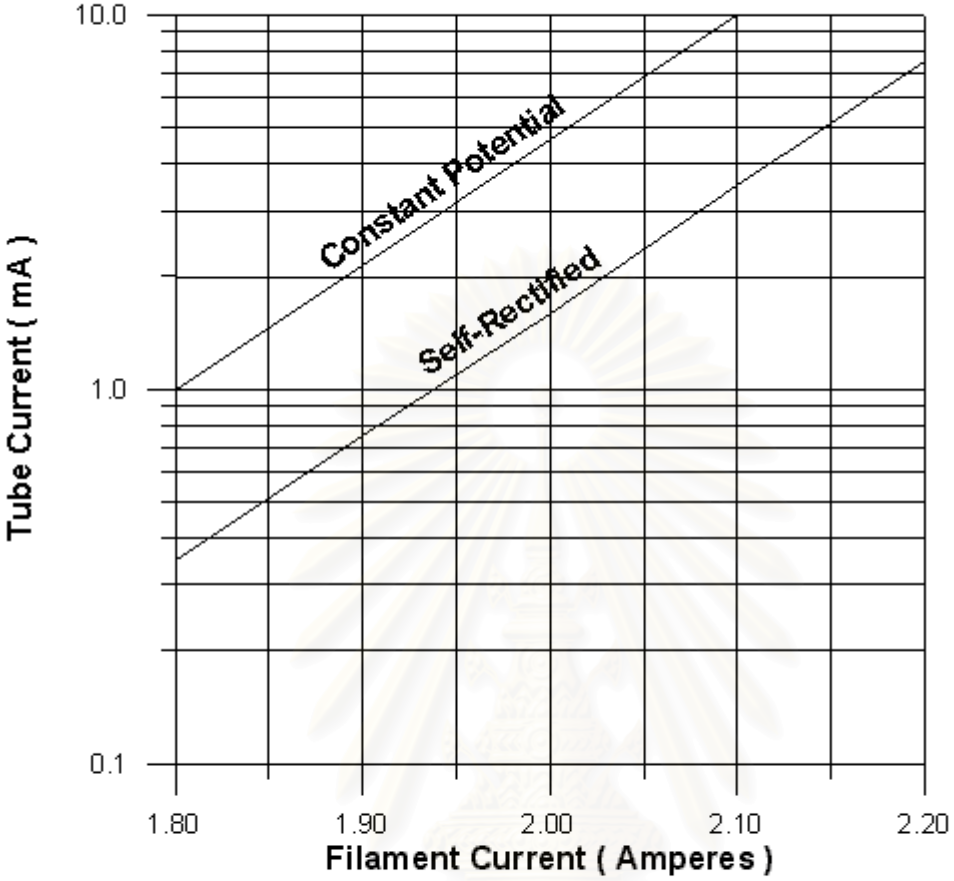
คู่มือหลอดเอกซเรย์

BX-1 0.3 mm 8 degree x-ray tube

Application: The BX-1 0.3 mm 8 degree is a non-directional beam x-ray tube for use in both medical and industrial applications. It is suitable for applications requiring excellent stability at techniques to 95 kVp self-rectified and 80 kV constant potential in compact head designs.

Structure:	
Anode:	Tungsten target cast in solid copper anode.
Cathode:	Line focus, tungsten filament.
Envelope:	Hard glass, gettered.
Mass:	210 grams, approx.
Focal Spot Size:	0.3 mm, per NEMA Std. XR 5-1984
Target Angle:	8 degrees effective. (20 degrees absolute, double-tilt geometry, rotated 67 degrees approx.
Shielding:	External molded cylindrical shield available with a lead equivalence of 1mm typical (170 grams typical).
Electrical Ratings:	
Voltage:	Maximum 95 kVp self-rectified. Maximum 100 kVp inverse. Maximum 100 kVp starting surge.
Current:	See Radiographic Chart. See Emission Characteristic Chart.
Filament:	2.20 Amperes Maximum. See Filament Characteristic Chart.
Thermal Ratings:	
Energy Storage:	14 kJ (20 kHU)
Energy dissipation:	Maximum 233 J/sec (333 HU/sec) continuous. See Heating and Cooling Chart.
Cooling rate:	Maximum 7.5 kJ/min (10.6 kHU/min) averaged over a one minute interval. See Heating and Cooling Chart.

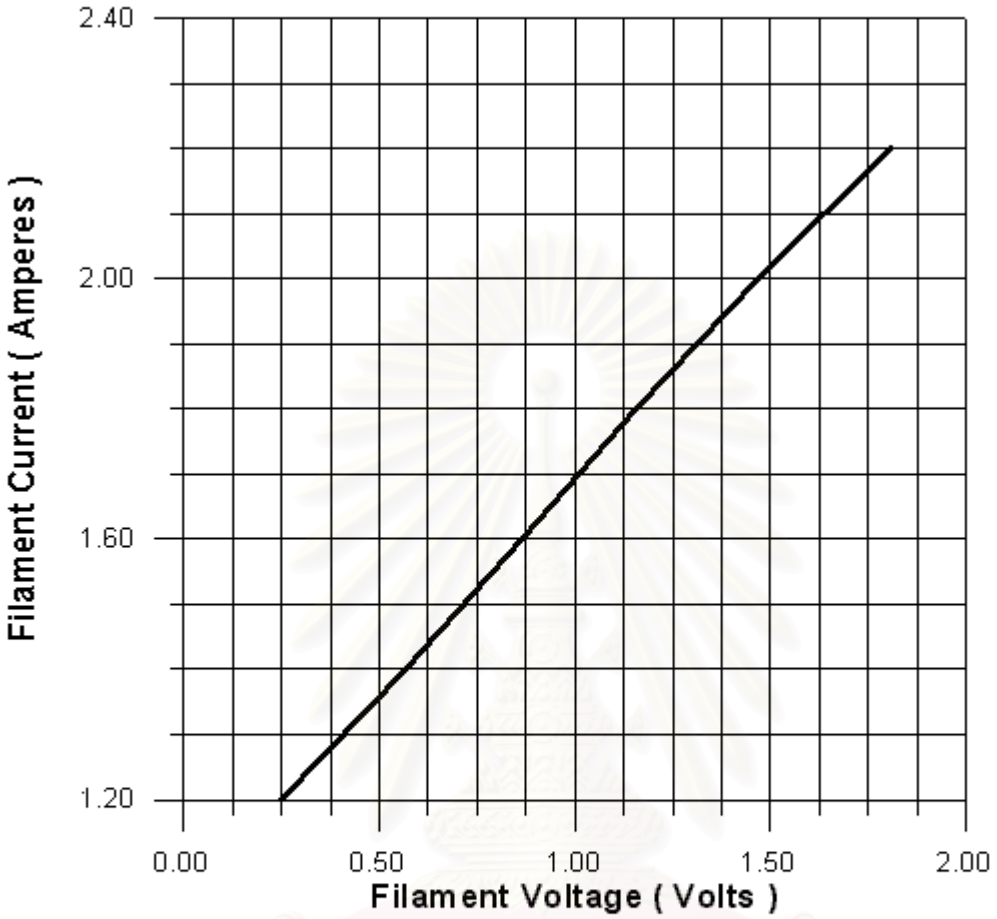
BX-1 0.3mm 8 degree Emission Characteristic



Tube:	Drawing B0105, BX-1 0.3mm 8 degrees.
HV Circuit:	Constant Potential and Self-Rectified, 60 Hz.
Comments:	Emission Characteristic is typical at 70 kVcp or 70 kVp.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

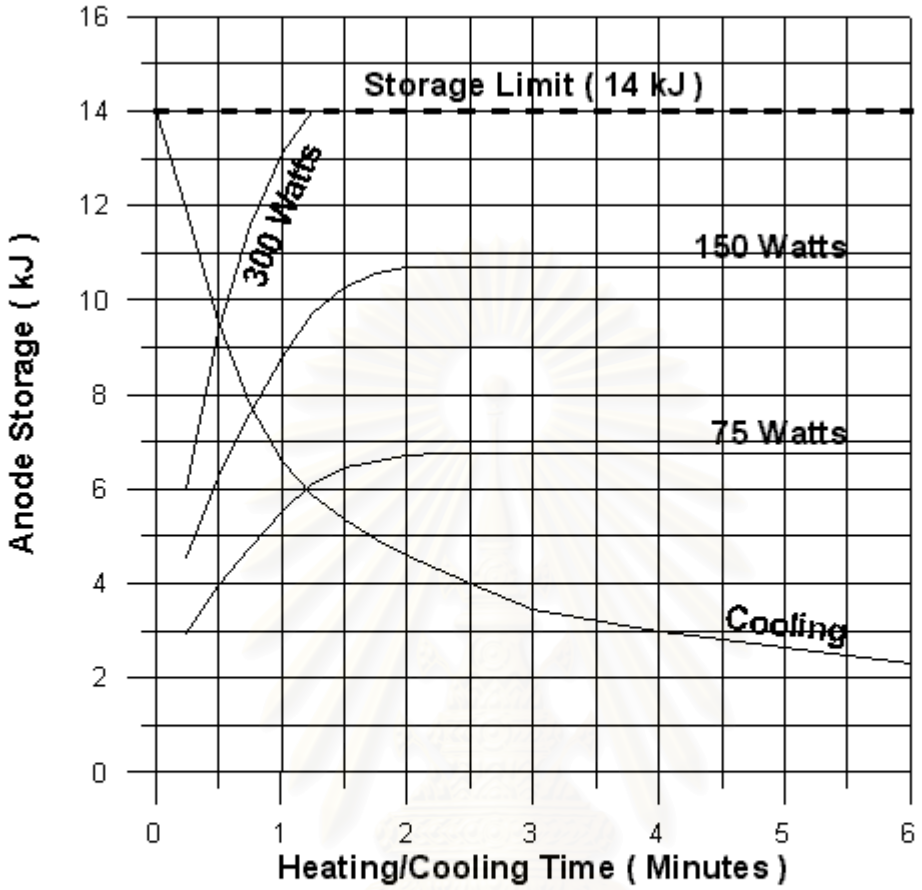
BX-1 0.3mm 8 degree Filament Characteristic



Tube:	Drawing B0105, BX-1 0.3mm 8 degree
Comments:	Filament Characteristic is typical, and is given for a point on the supplied wires one inch from the cathode seal.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BX-1 0.3mm 8deg Heating/Cooling Characteristic



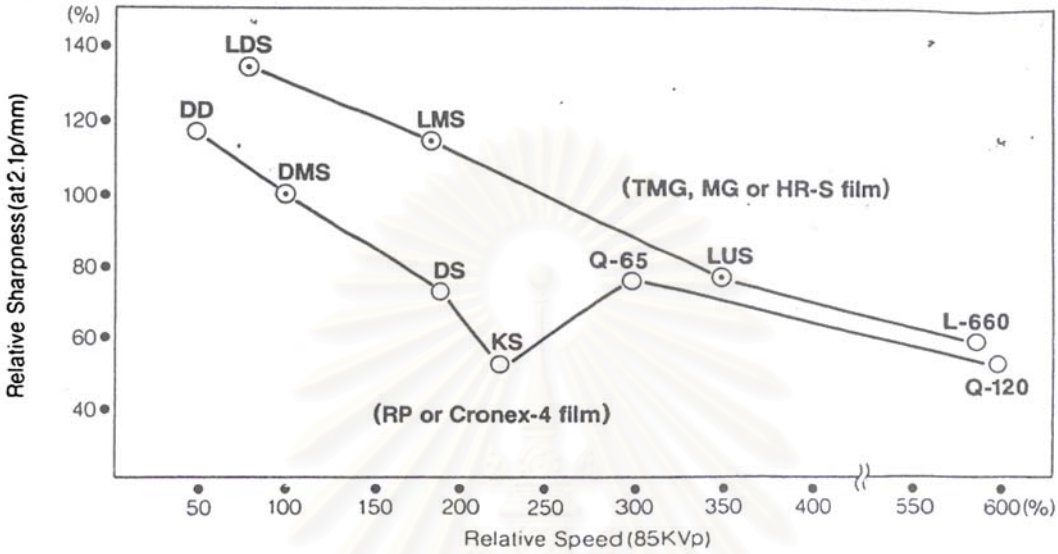
Tube: Drawing B0105, BX-1 0.3mm 8 degree
Comments: Curves assume operation in well-circulated transformer oil.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

คู่มือ Intensifying Screen

OKAMOTO Intensifying Screens Characteristics Chart



Most suitable objects radiographed for OKAMOTO Intensifying Screen

Objects / Type of Screen	Upper & lower limbs	Chest	Head Tomogran	Stomach	Urinary organs	Pregnancy Children's Hip-Joint	Head & leg	Lumber vertebra
DD	⊙	○						
DMS		⊙	○	⊙				
DS				○	⊙	○		⊙
KS					⊙	⊙		○
Q-65					○	⊙		○
Q-120								
EC	Complete Vertebrae Column							
LDS	⊙	⊙	⊙	○			⊙	
LMS	○	○	⊙	⊙			○	
LUS				○	⊙	⊙		⊙
L-660								
LC	Complete Vertebrae Column							
S-100	Mammography							

Standard Type Orth Type ⊙ = Most suitable object ○ = Suitable objects

OKAMOTO Rare Earth Intensifying Screens Characteristics Table

Screen	Relative Speed*	Relative Sharpness*
LDS	45	115
LMS	100	100
LUS	200	68
L-660	260	53

(*LMS values assigned 100)

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมการทำงานของระบบ

```
Private Declare Function GetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal X As Long, ByVal Y As Long) As Long
Private Declare Function SetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal X As Long, ByVal Y As Long, ByVal crColor
As Long) As Long
Dim Cancel As Boolean
Private Declare Sub Out Lib "inpout32.dll" _
Alias "Out32" (ByVal PortAddress As Integer, ByVal Value As Integer)
Public pwrite As Integer
Private Sub Standard()
If Not IsNumeric(Text2.Text) Then
 MsgBox "¡ÃØ³Ò»éÍ¹¤èÒà»ç¹µÑÇàÅ¢·Õè¶Ù¡µéÍ§", vbOKOnly, "»éÍ¹¤èÒ"
 Exit Sub
 End If
End Sub

Private Sub CancelDraw_Click()
Cancel = True
Timer2.Enabled = False
Timer3.Enabled = False
End Sub
Private Sub Edge1()
Dim G As Long
Dim S1 As Integer
List1.Clear
List3.Clear
For X = 0 To Source.Width \ Screen.TwipsPerPixelX
Gx = Abs(GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption)) +
GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc,
X - 1, Yo.Caption)) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1))
Gy = Abs(GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X, Yo.Caption + 1)) +
GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc,
X, Yo.Caption - 1)) - GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1))
G = Gx + Gy
If G > (Threshold.Value) ^ 3 Then List1.AddItem X
If X = Source.Width \ Screen.TwipsPerPixelX Then
If List1.ListCount >= 7 Then
```

```
 For i = 1 To (List1.ListCount - 2)
 S1 = Abs(List1.List(i + 1) - List1.List(i))
 If S1 >= 2 Then
 List3.AddItem i
 If List3.ListCount >= 3 Then
 Label8.Caption = CCur(((List1.List(List3.List(1)) - List1.List(List3.List(0) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) /
1440)
 Label17.Caption = CCur(((List1.List(List3.List(2)) - List1.List(List3.List(1) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) /
1440)
 Else
 Label8.Caption = 0
 Label17.Caption = 0
 End If
 End If
 Next i
Else
Label8.Caption = 0
Label17.Caption = 0
End If
End If
DoEvents
If Cancel = True Then GoTo Finish:
Next X
If Not IsNumeric(Text2.Text) Then Text2.Text = 0
S = 0.1 + (0.1 * Text2.Text)
If Label8.Caption = 0 Then
Label9.Caption = 0: Label9.ForeColor = &HFF00&: Shape1.FillColor = &HFF00&
Else
Label9.Caption = CCur(Label8.Caption - Text2.Text)
If Val(Label8.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label9.ForeColor = &HFF&: Shape1.FillColor = &HFF& Else
Label9.ForeColor = &HFF00&: Shape1.FillColor = &HFF00&
End If
If Label17.Caption = 0 Then
Label18.Caption = 0: Label18.ForeColor = &HFF00&: Shape2.FillColor = &HFF00&
Else
Label18.Caption = CCur(Label17.Caption - Text2.Text)
If Val(Label17.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label18.ForeColor = &HFF&: Shape2.FillColor = &HFF& Else
Label18.ForeColor = &HFF00&: Shape2.FillColor = &HFF00&
End If
If Label9.ForeColor = &HFF& Or Label18.ForeColor = &HFF& Or Label31.ForeColor = &HFF& Or Label33.ForeColor =
&HFF& Then Timer1.Interval = 100 Else Timer1.Interval = 0
```

```
Finish:
End Sub
Private Sub Edge2()
Dim G1 As Long
Dim S1 As Integer
List2.Clear
List4.Clear
For X = 0 To SourceY.Width \ Screen.TwipsPerPixelX
Gxx = Abs(GetPixel(SourceY.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1) + (2 * GetPixel(SourceY.hdc, X + 1, Yo.Caption)) +
GetPixel(SourceY.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(SourceY.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 *
GetPixel(SourceY.hdc, X - 1, Yo.Caption)) - GetPixel(SourceY.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1))
Gyy = Abs(GetPixel(SourceY.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1) + (2 * GetPixel(SourceY.hdc, X, Yo.Caption + 1)) +
GetPixel(SourceY.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(SourceY.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 *
GetPixel(SourceY.hdc, X, Yo.Caption - 1)) - GetPixel(SourceY.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1))
G1 = Gxx + Gyy
If G1 > (Threshold.Value) ^ 3 Then List2.AddItem X
If X = SourceY.Width \ Screen.TwipsPerPixelX Then
If List2.ListCount >= 7 Then
For i = 1 To (List2.ListCount - 2)
S1 = Abs(List2.List(i + 1) - List2.List(i))
If S1 >= 2 Then
List4.AddItem i
If List4.ListCount >= 3 Then
  Label30.Caption = CCur(((List2.List(List4.List(1)) - List2.List(List4.List(0) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051)
/ 1440)
  Label32.Caption = CCur(((List2.List(List4.List(2)) - List2.List(List4.List(1) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051)
/ 1440)
Else
Label30.Caption = 0
Label32.Caption = 0
End If
End If
Next i
Else
Label30.Caption = 0
Label32.Caption = 0
End If
End If
DoEvents
If Cancel = True Then GoTo Finish:
Next X
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
If Not IsNumeric(Text2.Text) Then Text2.Text = 0
S = 0.1 + (0.1 * Text2.Text)
If Label30.Caption = 0 Then
Label31.Caption = 0: Label31.ForeColor = &HFF00&: Shape10.FillColor = &HFF00&
Else
Label31.Caption = CCur(Label30.Caption - Text2.Text)
If Val(Label30.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label31.ForeColor = &HFF&: Shape10.FillColor = &HFF& Else
Label31.ForeColor = &HFF00&: Shape10.FillColor = &HFF00&
End If
If Label32.Caption = 0 Then
Label33.Caption = 0: Label33.ForeColor = &HFF00&: Shape11.FillColor = &HFF00&
Else
Label33.Caption = CCur(Label32.Caption - Text2.Text)
If Val(Label32.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label33.ForeColor = &HFF&: Shape11.FillColor = &HFF& Else
Label33.ForeColor = &HFF00&: Shape11.FillColor = &HFF00&
End If
If Label9.ForeColor = &HFF& Or Label18.ForeColor = &HFF& Or Label31.ForeColor = &HFF& Or Label33.ForeColor =
&HFF& Then Timer1.Interval = 100 Else Timer1.Interval = 0
Finish:
End Sub
Private Sub Close_Click()
End
End Sub
Private Sub Capture1()
Source.Visible = False
Source.Picture = LoadPicture("")
Source.Picture = actiVideoX1.GrabFrame
If Source.Picture <> LoadPicture("") Then
If Source.Width > SourceBack.ScaleWidth Or Source.Height > SourceBack.ScaleHeight Then
Source.Width = SourceBack.ScaleWidth
Source.Height = SourceBack.ScaleHeight
Source.Left = 0
Source.Top = 0
Else
Source.Left = (SourceBack.ScaleWidth - Source.Width) / 2
Source.Top = (SourceBack.ScaleHeight - Source.Height) / 2
End If
Source.Visible = True
End If
End Sub
Private Sub Capture2()
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
SourceY.Visible = False
SourceY.Picture = LoadPicture("")
SourceY.Picture = actiVideoX1.GrabFrame
If SourceY.Picture <> LoadPicture("") Then
If SourceY.Width > SourceYBack.ScaleWidth Or SourceY.Height > SourceYBack.ScaleHeight Then
SourceY.Width = SourceYBack.ScaleWidth
SourceY.Height = SourceYBack.ScaleHeight
SourceY.Left = 0
SourceY.Top = 0
Else
SourceY.Left = (SourceYBack.ScaleWidth - SourceY.Width) / 2
SourceY.Top = (SourceYBack.ScaleHeight - SourceY.Height) / 2
End If
SourceY.Visible = True
End If
End Sub
Private Sub Test()
If List1.ListCount >= 7 And List2.ListCount >= 7 And List3.ListCount >= 3 And List4.ListCount >= 3 Then
W4 = (List1.List(List3.List(2)) - List1.List(List3.List(0) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX
H4 = (List2.List(List4.List(2)) - List2.List(List4.List(0) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX
L4 = (DestY.ScaleWidth / 2) - (W4 / 2)
T4 = (DestY.ScaleHeight / 2) - (H4 / 2)
Shape4.Move L4, T4, W4, H4
L3 = ((DestY.ScaleWidth / 2) - (W4 / 2)) + ((List1.List(List3.List(1)) - List1.List(List3.List(0) + 1)) *
Screen.TwipsPerPixelX)
T3 = ((DestY.ScaleHeight / 2) - (H4 / 2)) + ((List2.List(List4.List(1)) - List2.List(List4.List(0) + 1)) *
Screen.TwipsPerPixelX)
W3 = (List1.List(List3.List(1) + 1) - List1.List(List3.List(1))) * Screen.TwipsPerPixelX
H3 = (List2.List(List4.List(1) + 1) - List2.List(List4.List(1))) * Screen.TwipsPerPixelX
Shape3.Move L3, T3, W3, H3
End If
End Sub
Private Sub YYchange()
Cancel = False
Line4.Y1 = YY.Value
Line4.Y2 = YY.Value
Line5.Y1 = YY.Value
Line5.Y2 = YY.Value
Yo.Caption = YY.Value \ Screen.TwipsPerPixelY
Yoo.Caption = CCur((YY.Value * 2.5400051) / 1440)
Call Edge1
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Call Edge2
Call Test
End Sub
Private Sub Capture_Click()
Cancel = False
Call Capture1
Call Edge1
Timer2.Enabled = True
Timer3.Enabled = True
Timer2.Interval = 2000
End Sub

Private Sub Command1_Click()
actiVideoX1.ShowSourceDialog
End Sub

Private Sub Command2_Click()
actiVideoX1.ShowFormatDialog
End Sub

Private Sub Command3_Click()
Text4.Text = ((Text1.Text * Text1.Text) + (Text3.Text * Text3.Text)) ^ (0.5)
Shape3.Left = 1000 + (400 * Text1.Text)
Shape3.Top = 1000 - (400 * Text3.Text)
If Text4.Text > 0.3 Then A = (0.3 * 850) Else A = (((Text1.Text * Text1.Text) + (Text3.Text * Text3.Text)) ^ (0.5)) * 850
Text5.Text = A
Z = Hex$(A)
Text6.Text = Z
W = "&H" + Z
Out pwrite, W
End Sub

Private Sub Command4_Click()
Out pwrite, 0
End Sub

Private Sub Form_Load()
pwrite = &H378
End Sub

Private Sub Label35_Change()
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Beep
End Sub
Private Sub Label36_Change()
Timer2.Interval = 0
Timer3.Interval = 2000
Call Capture2
Call Edge2
Call Test
End Sub
Private Sub Label37_Change()
Timer2.Interval = 2000
Timer3.Interval = 0
Call Capture1
Call Edge1
Call Test
End Sub
Private Sub MnuEdgeDetection_Click()
MainFrm2.Show
actiVideoX1.DisconnectVideo
Unload MainFrm
End Sub
Private Sub MnuExit_Click()
End
End Sub
Private Sub MnuOpen_Click()
 actiVideoX1.DisconnectVideo
 Label8.Caption = 0
 Label9.Caption = 0
 Label9.ForeColor = &HFF0000
 Label17.Caption = 0
 Label18.Caption = 0
 Label18.ForeColor = &HFF0000
 List1.Clear
 List2.Clear
 List3.Clear
 List4.Clear
 Shape1.FillColor = &HFF00&
 Shape2.FillColor = &HFF00&
 Label30.Caption = 0
 Label31.Caption = 0
 Label31.ForeColor = &HFF0000
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
 Label32.Caption = 0
 Label33.Caption = 0
 Label33.ForeColor = &HFF0000
 Shape10.FillColor = &HFF00&
 Shape11.FillColor = &HFF00&
 Cancel = False
 Call Standard
MainFrm3.Show
End Sub
Private Sub Text2_Change()
If Not IsNumeric(Text2.Text) Then
MsgBox "¡ÃØ³Ò»éÍ¹¤èÒà»ç¹ µÑÇàÅ¢·Õè¶Ù¡µéÍ§", vbOKOnly, "»éÍ¹¤èÒ"
Exit Sub
Else
S = 0.1 + (0.1 * Text2.Text)
If Label8.Caption = 0 Then
Label9.Caption = 0: Label9.ForeColor = &HFF00&: Shape1.FillColor = &HFF00&
Else
Label9.Caption = CCur(Label8.Caption - Text2.Text)
If Val(Label8.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label9.ForeColor = &HFF&: Shape1.FillColor = &HFF& Else
Label9.ForeColor = &HFF00&: Shape1.FillColor = &HFF00&
End If
If Label17.Caption = 0 Then
Label18.Caption = 0: Label18.ForeColor = &HFF00&: Shape2.FillColor = &HFF00&
Else
Label18.Caption = CCur(Label17.Caption - Text2.Text)
If Val(Label17.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label18.ForeColor = &HFF&: Shape2.FillColor = &HFF& Else
Label18.ForeColor = &HFF00&: Shape2.FillColor = &HFF00&
End If
If Label30.Caption = 0 Then
Label31.Caption = 0: Label31.ForeColor = &HFF00&: Shape10.FillColor = &HFF00&
Else
Label31.Caption = CCur(Label30.Caption - Text2.Text)
If Val(Label30.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label31.ForeColor = &HFF&: Shape10.FillColor = &HFF& Else
Label31.ForeColor = &HFF00&: Shape10.FillColor = &HFF00&
End If
If Label32.Caption = 0 Then
Label33.Caption = 0: Label33.ForeColor = &HFF00&: Shape11.FillColor = &HFF00&
Else
Label33.Caption = CCur(Label32.Caption - Text2.Text)
```

```
If Val(Label32.Caption) < Val(Text2.Text - S) Then Label33.ForeColor = &HFF&: Shape11.FillColor = &HFF& Else
Label33.ForeColor = &HFF00&: Shape11.FillColor = &HFF00&
End If
End If
If Label9.ForeColor = &HFF& Or Label18.ForeColor = &HFF& Or Label31.ForeColor = &HFF& Or Label33.ForeColor =
&HFF& Then Timer1.Interval = 100 Else Timer1.Interval = 0
End Sub
Private Sub Threshold_Change()
Thresh.Caption = Threshold.Value
End Sub
Private Sub Threshold_Scroll()
Thresh.Caption = Threshold.Value
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
Label35.Caption = Timer()
End Sub
Private Sub Timer2_Timer()
Label36.Caption = Timer()
End Sub
Private Sub Timer3_Timer()
Label37.Caption = Timer()
End Sub
Private Sub YY_Change()
Call YYchange
End Sub
Private Sub YY_Scroll()
Call YYchange
End Sub
Private Sub Command1_Click()
Dim RequestedHeight%, RequestedWidth%
   On Local Error Resume Next

   MainFrm.actiVideoX1.RequestedHeight = RequestedHeight%
   MainFrm.actiVideoX1.RequestedWidth = RequestedWidth%
   If MainFrm.actiVideoX1.ConnectVideo(Combo1.ListIndex) Then
   Else
   MsgBox "An error occured attempting to connect to the specified device driver!", vbCritical, "Error:"
   End If
   Unload Me
MainFrm.Capture.Enabled = True
MainFrm.Command1.Enabled = True
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
MainFrm.Command2.Enabled = True
End Sub
Private Sub Command2_Click()
   Unload Me
End Sub
Private Sub Form_Load()
Dim drvCounter As Integer
On Local Error Resume Next
If MainFrm.actiVideoX1.DriverCount > 0 Then
For drvCounter = 0 To MainFrm.actiVideoX1.DriverCount - 1
Combo1.AddItem "[" & MainFrm.actiVideoX1.DriverName(drvCounter) & "] Ver. " &
MainFrm.actiVideoX1.DriverVersion(drvCounter)
Next
Combo1.Enabled = True
Combo1.ListIndex = 0
Command1.Enabled = True
Else
Combo1.AddItem "There are no drivers installed!"
Combo1.Enabled = False
Command1.Enabled = False
End If
End Sub
Private Declare Function GetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal X As Long, ByVal Y As Long) As Long
Private Declare Function SetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal X As Long, ByVal Y As Long, ByVal crColor
As Long) As Long
Dim Cancel As Boolean
Private Sub CancelDraw_Click()
Cancel = True
End Sub
Private Sub YYchange()
Cancel = False
Yo.Caption = YY.Value \ Screen.TwipsPerPixelY
Yoo.Caption = CCur((YY.Value * 2.5400051) / 1440)
Line2.Y1 = YY.Value
Line2.Y2 = YY.Value
Line1.Y1 = YY.Value
Line1.Y2 = YY.Value
Dim G As Long
Dim G1 As Long
Dim S As Integer
List1.Clear
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
List3.Clear
For X = 0 To Source.Width \ Screen.TwipsPerPixelX
  Gx = Abs(GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption)) +
GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc,
X - 1, Yo.Caption)) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1))
  Gy = Abs(GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption + 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X, Yo.Caption + 1)) +
GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption + 1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Yo.Caption - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc,
X, Yo.Caption - 1)) - GetPixel(Source.hdc, X + 1, Yo.Caption - 1))
  G = Gx + Gy
  If G > (Threshold.Value) ^ 3 Then List1.AddItem X
  If X = Source.Width \ Screen.TwipsPerPixelX Then
     If List1.ListCount >= 7 Then
     For i = 1 To (List1.ListCount - 2)
     S = Abs(List1.List(i + 1) - List1.List(i))
     If S >= 2 Then
     List3.AddItem i
     If List3.ListCount >= 3 Then

     Label8.Caption = CCur(((List1.List(List3.List(1)) - List1.List(List3.List(0) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX *
25.400051) / 1440)
     Label17.Caption = CCur(((List1.List(List3.List(2)) - List1.List(List3.List(1) + 1)) * Screen.TwipsPerPixelX *
25.400051) / 1440)

     Else
     Label8.Caption = 0
     Label17.Caption = 0
     End If
     End If
     Next i
     End If
  End If
DoEvents
Next X
End Sub
Private Sub Close_Click()
actiVideoX1.DisconnectVideo
Unload MainFrm2
MainFrm.Show
End Sub
Private Sub Edge1()
 List1.Clear
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
List3.Clear
List5.Clear
List6.Clear
List7.Clear
Dest.Cls
Dim G As Long

Dim S As Integer
Dim i As Integer
Dim N As Integer
Dim M As Integer
Dim Z As Integer

Z = 1

For Y = 0 To Source.Height \ Screen.TwipsPerPixelY
For X = 0 To Source.Width \ Screen.TwipsPerPixelX
 Gx = Abs(GetPixel(Source.hdc, X + 1, Y - 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X + 1, Y)) + GetPixel(Source.hdc, X + 1, Y +
1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Y - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc, X - 1, Y)) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Y + 1))
 Gy = Abs(GetPixel(Source.hdc, X - 1, Y + 1) + (2 * GetPixel(Source.hdc, X, Y + 1)) + GetPixel(Source.hdc, X + 1, Y +
1) - GetPixel(Source.hdc, X - 1, Y - 1) - (2 * GetPixel(Source.hdc, X, Y - 1)) - GetPixel(Source.hdc, X + 1, Y - 1))
 G = Gx + Gy

 If Y = Yo.Caption Then List5.AddItem G

 If G > (Threshold.Value) ^ 3 Then G = 0 Else G = vbWhite
 If G = 0 Then SetPixel Dest.hdc, X, Y, G
 If Y = Yo.Caption And G = 0 Then List1.AddItem X
 If Y = Yo.Caption + 1 And X = 0 Then
    If List1.ListCount >= 17 Then
    For i = 0 To (List1.ListCount - 2)
    S = Abs(List1.List(i + 1) - List1.List(i))
    If S >= 2 Then
    List3.AddItem i
    End If
    Next i
    If List3.ListCount >= 8 Then
    N = (List1.List(List3.List(1))) - (List1.List(List3.List(0) + 1))
    If N > 1 Then
      If (List5.List(List1.List(List3.List(0) + 1))) >= (List5.List(List1.List(List3.List(0) + 2))) Then List6.AddItem 1 Else
List6.AddItem 2
```

```
      If (List5.List(List1.List(List3.List(1)))) >= (List5.List(List1.List(List3.List(1) - 1))) Then List6.AddItem (N + 1) Else
List6.AddItem N
      Label8.Caption = Z * CCur(((List6.List(1) - List6.List(0)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) / 1440)
     ElseIf N = 1 Then
      Label8.Caption = Z * CCur((Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) / 1440)
     Else
      Label8.Caption = 0
     End If

     M = (List1.List(List3.List(2))) - (List1.List(List3.List(1) + 1))
     If M > 1 Then
      If (List5.List(List1.List(List3.List(1) + 1))) >= (List5.List(List1.List(List3.List(1) + 2))) Then List7.AddItem 1 Else
List7.AddItem 2
      If (List5.List(List1.List(List3.List(2)))) >= (List5.List(List1.List(List3.List(2) - 1))) Then List7.AddItem (M + 1) Else
List7.AddItem M
      Label17.Caption = Z * CCur(((List7.List(1) - List7.List(0)) * Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) / 1440)
     ElseIf M = 1 Then
      Label17.Caption = Z * CCur((Screen.TwipsPerPixelX * 25.400051) / 1440)
     Else
      Label17.Caption = 0
     End If
     Else
     Label17.Caption = 0
     End If



    Else
     Label8.Caption = 0
     Label17.Caption = 0
     End If
  End If

  Next X
  Dest.Refresh
  DoEvents
  If Cancel = True Then GoTo Finish:
  Next Y
Finish:
End Sub
Private Sub Capture1()
Source.Visible = False
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Source.Picture = LoadPicture("")
Source.Picture = actiVideoX1.GrabFrame
If Source.Picture <> LoadPicture("") Then
If Source.Width > SourceBack.ScaleWidth Or Source.Height > SourceBack.ScaleHeight Then
Source.Width = SourceBack.ScaleWidth
Source.Height = SourceBack.ScaleHeight
Source.Left = 0
Source.Top = 0
Else
Source.Left = (SourceBack.ScaleWidth - Source.Width) / 2
Source.Top = (SourceBack.ScaleHeight - Source.Height) / 2
End If
Source.Visible = True
End If
End Sub
Private Sub Command1_Click()
Cancel = False
Call Capture1
Call Edge1
End Sub
Private Sub Command2_Click()
actiVideoX1.ShowSourceDialog
End Sub
Private Sub Command3_Click()
actiVideoX1.ShowFormatDialog
End Sub
Private Sub Command4_Click()
Text2.Text = List5.List(Text1.Text)
Text3.Text = List5.List(Text4.Text)
End Sub
Private Sub Form_Load()
Dest.Height = Source.Height
Dest.Width = Source.Width
End Sub
Private Sub MnuExit_Click()
End
End Sub
Private Sub MnuOpen_Click()
 actiVideoX1.DisconnectVideo
 List1.Clear
 List2.Clear
```

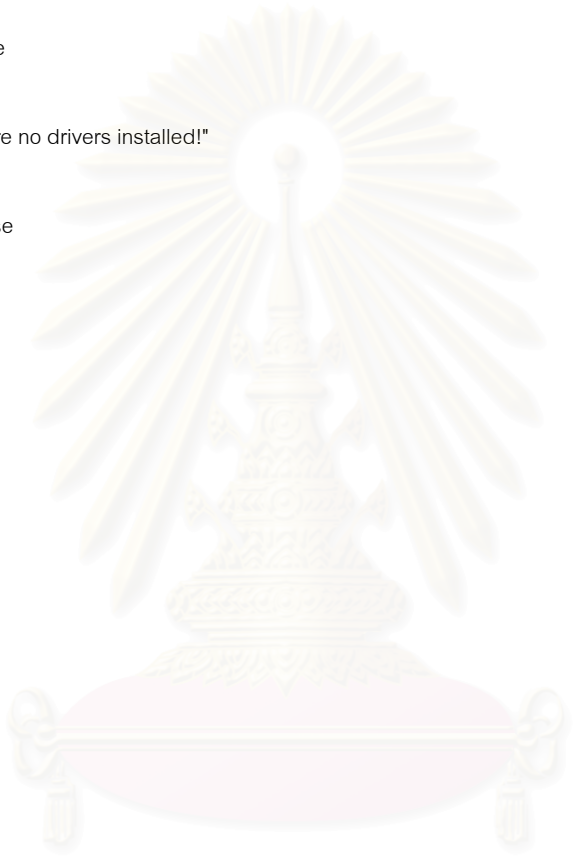
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
 List3.Clear
 List4.Clear
 Label8.Caption = 0
 Label17.Caption = 0
 Label30.Caption = 0
 Label32(0).Caption = 0
 Cancel = False
 MainFrm4.Show
End Sub
Private Sub Threshold_Change()
Thresh.Caption = Threshold.Value
End Sub
Private Sub Threshold_Scroll()
Thresh.Caption = Threshold.Value
End Sub
Private Sub YY_Change()
Call YYchange
End Sub
Private Sub YY_Scroll()
Call YYchange
End Sub
Private Sub Command1_Click()
Dim RequestedHeight%, RequestedWidth%
   On Local Error Resume Next

   MainFrm2.actiVideoX1.RequestedHeight = RequestedHeight%
   MainFrm2.actiVideoX1.RequestedWidth = RequestedWidth%
   If MainFrm2.actiVideoX1.ConnectVideo(Combo1.ListIndex) Then
   Else
  MsgBox "An error occured attempting to connect to the specified device driver!", vbCritical, "Error:"
  End If
  Unload Me
MainFrm2.Command1.Enabled = True
MainFrm2.Command2.Enabled = True
MainFrm2.Command3.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command2_Click()
   Unload Me
End Sub
Private Sub Form_Load()
```

```
Dim drvCounter As Integer
On Local Error Resume Next
If MainFrm2.actiVideoX1.DriverCount > 0 Then
For drvCounter = 0 To MainFrm2.actiVideoX1.DriverCount - 1
Combo1.AddItem "[" & MainFrm2.actiVideoX1.DriverName(drvCounter) & "] Ver. " &
MainFrm2.actiVideoX1.DriverVersion(drvCounter)
Next
Combo1.Enabled = True
Combo1.ListIndex = 0
Command1.Enabled = True
Else
Combo1.AddItem "There are no drivers installed!"
Combo1.Enabled = False
Command1.Enabled = False
End If
End Sub
```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาสพงษ์ ปริธรรมมา เกิดวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย