ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมโดยใช้ตัวตรวจจับภาพแบบซีซีดี

INDIRECT X-RAY DETECTOR USING LINEAR CCD IMAGE SENSOR

ภูศักดิ์ รัมทโก

CHOOSAK JANTACO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-040-181

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบทางอ้อมโดยใช้ตัวตรวจจับภาพแบบซีซีดี

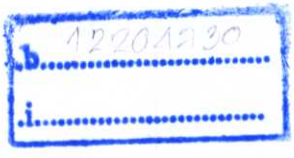
INDIRECT X-RAY DETECTOR USING LINEAR CCD IMAGE SENSOR

ชูศักดิ์ จันทโค

CHOUSAK JANTACO

T107442

เลขหมู่.....107442
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....29 มี.ค. 2553


b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-040-181

INDIRECT X-RAY DETECTOR USING LINEAR CCD IMAGE SENSOR

CHOUSAK JANTACO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTUTITE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL 2009-EN-M-040-181

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบทางอ้อมโดยใช้ตัวตรวจจับภาพแบบซีซีดี

Thesis Title Indirect X-ray Detector using Linear CCD Image Sensor

นักศึกษา นายชูศักดิ์ จันทโค

รหัสประจำตัว 50060417

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-040-181

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กิติพล	ชิตสกุล	
รศ.ดร.สมศักดิ์	ชุมช่วย	
ดร.ยุทธพงศ์	จิรรักษ์โสภากุล	
รศ.ดร.มนัส	สังวรศิลป์	
รศ.ดร.ชูชาติ	ปิณฑวิรุจน์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 7 เดือน ม.ค. พ.ศ. 2553
ลงชื่อ

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบทางอ้อมโดยใช้ตัวตรวจจับภาพแบบซีซีดี
นักศึกษา	นายชูศักดิ์ จันทโค
รหัสนักศึกษา	50060417
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ชนิดแถวยาว โดยเป็นการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับแสงประเภทซีซีดี โดยใช้งานร่วมกับแผ่นเรืองแสงชนิด $Gd_2O_2S:Tb$ ซึ่งทำหน้าที่แปลงเอกซเรย์ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าให้เป็นแสงสีเขียวที่สามารถตรวจจับได้ และใช้อุปกรณ์เอฟพีจีเอเข้ามาควบคุมการทำงานในระบบสแกนของหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ และส่งข้อมูลที่ได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลและแสดงผล ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้น พบว่า ค่าความสม่ำเสมอของสัญญาณใน 1 แนวสแกน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 8.7, ความเป็นเชิงเส้นของระบบเมื่อทดสอบกับเอกซเรย์ช่วง 90-100 kV (R^2= 0.95) เป็นที่ยอมรับได้, และความละเอียดของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์อยู่ที่ 10 lp/inch นอกจากนั้น ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นยังสามารถตรวจจับเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ ได้หลากหลาย และสามารถสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติของวัตถุต้นแบบได้อีกด้วย

อย่างไรก็ดี ผู้วิจัยยังคงพบข้อจำกัดหลายประการของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยมุ่งหวังให้สามารถพัฒนาระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ให้รายละเอียดของภาพสูงขึ้น และสามารถนำมาผลิตเพื่อใช้งานได้จริงในอนาคตอันใกล้

Thesis Title	Indirect X-ray Detector using Linear CCD Image Sensor
Student	Mr. Chousak Jantaco
Student ID.	50060417
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chuchart Pintavirooj

ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of a line array X-ray detector by using charge-couple device (CCD) coupled with an image intensifying screen (Gd_2O_2S:Tb) which was used to convert X-ray into visible light (peak wavelength of 540 nm). Field Programmable Gate Array (FPGA) was employed to control the CCD detector, and to transfer data to a computer for further processing. Multiple object scan tests were performed to test X-ray detector system performance, uniformity, linearity and resolution. The results showed that the CCD's uniformity from 1-line scan tests of the system has standard deviation of the averaged intensity at 8.7%., and the linearity of the averaged intensity area proven with linear regressive with $R^2 = 0.96$. Also, resolution of the X-ray detector system equals 10 line pair per inch. Moreover, the multiple object scan tests show the good performance of the X-ray detector. The first 2-dimension X-ray image obtained from the volume scanning was demonstrated in this study.

However, limitations of the X-ray detector were considered and analyzed. Discussions and suggestions were described in this thesis. The image resolution should be improved for the further X-ray detector development.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพ่อสุนทร จันทโค แม่เปรมฤทัย แซ่เจียง ที่เลี้ยงดู อบรม สั่งสอน ให้ความรัก ข้าพเจ้าและ ทุกๆกำลังใจจากครอบครัว

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้คำปรึกษาในการวิจัยและดูแลมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ ที่ให้คำปรึกษาและสั่งสอนในเรื่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ชินภัทร นันทจิวากรชัย ที่ให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิค

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้อบรมสั่งสอน

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ทำให้ได้เป็นคนที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณนางสาวไขแสง เหมทิวากรณ์ ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล ให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ร่วมทุกร่วมสุขไม่ว่าจะเกิดสิ่งใดๆขึ้น ขอบคุณกำลังใจที่มีให้

ขอขอบคุณพี่พี่ในแลปที่ให้คำปรึกษาต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ทำให้ข้าพเจ้าเข้มแข็ง และเป็นผู้ใหญ่ขึ้น

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้อบรม สอนสั่งและมอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และมอบให้แก่สังคมแห่งการเรียนรู้ทั้งหลาย

ชูศักดิ์ จันทโค

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย 4

1.3 คำถามงานวิจัย 6

1.4 สมมติฐานของการศึกษา 6

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 7

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย 7

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 หลักการทั่วไปของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 8

2.2 หลักการและคุณสมบัติของสารเรืองแสงและแผ่นเรืองแสง 17

2.3 หลักกการและคุณสมบัติของอุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี 21

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย 32

3.1 การออกแบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ 32

3.1.1 อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดีชนิดแถวยาว 32

3.1.2 ภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก 34

3.1.3 Field Programmable Gate Array (FPGA) 35

3.1.4 ส่วนแสดงผล 40

3.2 การทดลองทางแสง 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 ทดสอบความสามารถของการแยกระดับสัญญาณของแสงสีต่างๆ ของซีซีดี 42
3.2.2 ทดสอบการแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล 43
3.2.3 ทดสอบการปรับระดับสัญญาณและค่าออฟเซท 45
3.3 การทดลองกับเอกซเรย์ 45
3.3.1 ทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ 46
3.3.2 ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 47
3.3.3 ทดสอบความละเอียดของภาพ 47
3.3.4 ทดลองตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ 48
3.3.5 เก็บภาพเอกซเรย์สองมิติ 51

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 53
4.1 ความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 53
4.2 ความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 54
4.3 ความละเอียดของภาพที่ได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ 56
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการตรวจจับเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุแบบต่างๆ 58
4.5 ผลการเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติจากวัตถุต้นแบบ 64

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 67

เอกสารอ้างอิง 69

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณใน 1 Line Scan 46

3.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 47

4.1 ผลของค่าความเข้มของสัญญาณ (Intensity Level) ที่วัดได้โดยตัวตรวจจับเอกซเรย์ใน 1 Line Scan (ช่องสัญญาณที่ 1-5 , 340) ที่ความต่างศักย์ 100 kV 50mA 2mS.....53

4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ แสดงระดับความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณต่างๆ ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ความต่างศักย์ 90-100 kV.....55

4.3 แสดงผลการคำนวณค่า μ ซึ่งคำนวณจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ 63

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 แสดงสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ จะเห็นว่าเอกซเรย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก อยู่ระหว่างอุลตราไวโอเลตและแกมมา.....1

1.2 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในการถ่ายภาพอวัยวะของคนไข้ จากรูปแสดงการถ่ายภาพเอกซเรย์ปอด (Chest X-ray) สองมิติ.....2

1.3 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง (Cross Sectional Image) อวัยวะของคนไข้ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography).....2

1.4 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในงานด้านรักษาความปลอดภัย โดยใช้เป็นเครื่องสแกนหาวัตถุระเบิดหรืออาวุธที่ใช้ภายในสนามบิน.....3

1.5 ตัวตรวจจับเอกซเรย์ดิจิตอลที่นำมาใช้ในทางการแพทย์ โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณเอกซเรย์เป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่งไปทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ และแสดงภาพออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์.....4

2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่ t_c แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ.....10

2.2 แสดงการแผ่รังสีที่มีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน.....10

2.3 แสดงการต่อวงจรของเครื่องวัดกระแส.....11

2.4 ค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา ($\sigma_i(t)$).....12

2.5 บล็อกการทำงานของโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน.....13

2.6 แสดงการวัดสัญญาณแบบโหมดพัลส์.....14

2.7 แสดงลักษณะของสัญญาณจากวงจรที่มีค่าคงที่ของเวลาต่างกัน.....15

2.8 แสดงการกระจายตัวของพลังงานที่แตกต่างกัน.....16

2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยเอกซเรย์.....17

2.10 แสดงค่า Emision Spectra ของ $CaWO_4$ (เส้น) และ Gd_2O_2S:Tb (บาร์แท่ง).....19

2.11 จากภาพแสดงให้เห็นว่า $CaWO_4$ ปล่อยแสงออกมาในช่วงที่เหมาะกับ Blue film แต่ Gd_2O_2S:Tb มีค่าสูงสุดของสเปคตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาเหมาะสมกับฟิล์มชนิด Green film.....19

2.12 (รูปซ้าย) แสดงลักษณะของแผ่นสกรีนที่นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งโดยทั่วไปจะติดอยู่กับ Cassette และ (รูปขวา) แสดงโครงสร้างภายในของแผ่นเรืองแสงทั้ง 4 ชั้น.....21

2.13 ปฏิกิริยาของโฟตอนกับซิลิกอน (Photon Interaction with Silicon).....22

2.14 แสดงส่วนประกอบของซีซีดีชนิด Potential Wells and Barriers.....23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.15 Color sequential capture....24

2.16 Integral Color Filter Array Patterns....25

2.17 Normal and Thinned CCD....25

2.18 แสดงส่วนประกอบของ Interline CCD....26

2.19 แสดงส่วนประกอบของ Interline CCD กับ Microlentcular Array....26

2.20 Linear CCD รุ่น SONY ILX548 (รูปบน) ภายในประกอบไปด้วยตัวรับภาพ 3 แถว ได้แก่ ตัวรับภาพสีแดง เขียว และน้ำเงิน (รูปล่าง)....27

2.21 (รูปบน) แสดงสเปคตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาจากแผ่นเรืองแสงชนิด Gd_2O_2S:Tb ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าช่วง Peak สูงสุดของสเปคตรัมอยู่ที่ประมาณ 540 nm,(รูปล่าง) กราฟแสดงช่วงการตอบสนองของแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ โดยซีซีดีสามารถตอบสนองต่อแสงได้ 3 สีดังรูป คือ น้ำเงิน เขียว และแดง ซึ่งเราจะเลือกใช้ช่วงตอบสนองต่อแสงสีเขียว เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 nm ซึ่งตรงกันกับความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงนั่นเอง....28

2.22 ตัวตรวจจับเอกซเรย์ต้นแบบที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ของเอกภพ งามละเมียด....29

2.23 แสดงตัวอย่างตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ของ ธเนศ อังศุวัฒนากุล....30

3.1 ขั้นตอนการประกอบหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ รูป (A) ซีซีดีที่ใช้ในงานวิจัย, รูป (B) นำแผ่นเรืองแสงมาปิดแนบกับหน้าสัมผัสซีซีดี, รูป (C) แผ่นตะกั่วที่ปิดทับบนแผ่นเรืองแสงและซีซีดี รูป (D) แผ่นอะคริลิคสีดำปิดทับแผ่นตะกั่วเป็นชั้นสุดท้าย, และ รูป (E) หน้าตาของหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ที่ประกอบเสร็จแล้ว....33

3.2 บล็อกไดอะแกรมของโครงสร้างภายใน AD9822....34

3.3 แสดงการต่อใช้งานวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก....34

3.4 แสดงวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอกที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัย....35

3.5 แสดงวงจร FPGA ที่นำมาใช้ในงานวิจัย....35

3.6 สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุมซีซีดีที่ FPGA สร้างขึ้น....36

3.7 แสดงสัญญาณในส่วนของวงจรควบคุมซีซีดีที่วัดได้จากเครื่อง Digital Analyzer....36

3.8 สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุม Analog Frontend ที่ FPGA สร้างขึ้น....37

3.9 แสดงสัญญาณในส่วนของวงจรควบคุม Analog Frontend ที่วัดได้ด้วย Digital Analyzer....37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงสัญญาณควบคุมระบบต่างๆ ที่ FPGA สร้างขึ้น.....38

3.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆ ที่สร้างขึ้นด้วย FPGA.....39

3.12 ภาพอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ของระบบและสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆที่สร้างด้วยFPGA...39

3.13 ไดอะแกรมแสดงการรับสัญญาณดิจิตอลและส่งออกผ่าน USB Port.....40

3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....40

3.15 บล็อกไดอะแกรมแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วนต่างๆ ของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ออกแบบไว้ในงานวิจัย.....41

3.16 แสดงการทดลองการแยกแสงสีของซีซีดี โดยนำแผ่นกระดาษ 3 สี ได้แก่ น้ำเงิน เขียว และแดง (จากซ้ายไปขวา) วางบนหลอดไฟ แล้วสะท้อนลงไปที่ตัวซีซีดี.....42

3.17 แสดงผลการทดลองความสามารถในการแยกระดับสัญญาณของแสงสีต่างๆ ของซีซีดี (แกนนอน คือ Detector Number และ แกนตั้ง คือ ระดับความเข้มของสัญญาณที่วัดได้).....43

3.18 สัญญาณเอาท์พุตของลิเนียร์ซีซีดีซึ่งเป็นสัญญาณแอนะลอกเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (ADCCLK1) (รูปซ้าย) แสดงสัญญาณเอาท์พุตในขณะที่ไม่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล (รูปขวา) แสดงสัญญาณเอาท์พุตในขณะที่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล.....44

3.19 แสดงให้เห็นความสามารถของระบบในการแปลงสัญญาณจากแอนะลอกเป็นดิจิตอล.....44

3.20 ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์เมื่อนำมาใช้เก็บผลการทดลองกับเครื่องเอกซเรย์.....45

3.21 แสดงแฟนทอมวัดความละเอียดของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถตรวจจับได้ โดยทำมาจากอะคริลิคหนา 2 เซนติเมตร โดยระยะ A ยาว 2.5 cm มีความละเอียด 5 lp/inch และระยะ B ยาว 1.25 cm มีความละเอียด 10 lp/inch.....48

3.22 แผ่นเหล็กเจาะรู เส้นผ่านศูนย์กลางวงใหญ่ขนาด 5 mm, กลาง 3 mm, และเล็ก 2 mm.....48

3.23 แผ่นเหล็กเจาะรูเป็นวงรีกว้าง 1.5 mm วางตัวห่างกันช่องละ 1 mm (เส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี).....49

3.24 Aluminum Step Wedge หนาขั้นละ 4.5 mm (เส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี)...50

3.25 แผ่นอะลูมิเนียมวางซ้อนกัน หนาแผ่นละ 2.5 mm โดยขั้นบนสุดมีความหนารวม 15 mm ชั้นกลางมีความหนารวม 7.5 mm และชั้นล่างสุดมีความหนา 2.5 mm.....51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.26 แสดงวัตถุที่จะทำการเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติ ภายในวัตถุประกอบไปด้วยวัตถุเล็กๆ 4 ชนิด ที่มีความหนาแน่นและมีค่า Attenuation ที่แตกต่างกันดังรูป จากภาพเส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี ณ จุดเริ่มต้นการสแกน และลูกศรชี้แสดงทิศทางการสแกนตลอด Volume ของวัตถุ โดยทำการสแกนทั้งหมด 20 Line Scan ห่างกัน Line ละ 1 mm.....52

4.1 แสดง Intensity Profile ที่ได้จากการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับเอกซเรย์ จำนวน 5 ครั้ง โดยแกน x คือ Detector Number และแกน y คือ ระดับความเข้มของสัญญาณ (Intensity Level).....54

4.2 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ใน 1 Line Scan โดยทำการทดลองที่ความต่างศักย์ 90-100 kV 50mA 2mS ได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น R^2= 0.95 อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ.....55

4.3 แสดง Intensity Profile ที่ได้จากการทดสอบความละเอียดของตัวตรวจจับเอกซเรย์ จากภาพจะพบว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกรายละเอียดสัญญาณได้สูงสุดที่ 10 lp/inch ดังแสดงในรูป (B).....57

4.4 แสดงผลการทดลองของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์จำนวน 128 ตัว พบว่าสามารถแยกสัญญาณได้สูงสุดเพียง 5 lp/inch.....57

4.5 แสดงผล Intensity Profile ที่ 100kV 50mA 2mS ได้จากแผ่นเหล็กเจาะรูวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน.....58

4.6 แสดง Intensity Profile ที่ 90kV 50mA 2mS ได้จากแผ่นเหล็กเจาะรูเป็นวงรีกว้าง 1.5 mm 59

4.7 แสดง Intensity profile ที่ 90kV 50mA 2mS ได้จากแผ่นอลูมิเนียมขั้นบันได (Aluminum Step Wedge) แต่ละขั้นบันไดจะมีค่า Attenuation ที่แตกต่างกัน ทำให้ Intensity Level แสดงให้เห็นเป็นลักษณะขั้นบันได 3 ขั้น แต่เห็นไม่เป็นขั้นบันไดชัดเจนนัก เนื่องจากช่วงการสแกนที่สั้น และแต่ละขั้นมีความหนาแตกต่างกันไม่มากนัก.....60

4.8 แสดง Intensity Profile ที่ 100kV 50mA 2mS ได้จากการเอกซเรย์ผ่านแผ่นอลูมิเนียมที่วางซ้อนกัน โดยที่ความหนาแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน (บอกเป็นจำนวนแผ่นอลูมิเนียม) จึงมีค่า Attenuation แตกต่างกันไปด้วย ทำให้ความเข้มของสัญญาณที่วัดเห็นเป็นลักษณะขั้นบันได ที่มีความสูงไม่เท่ากัน.....61

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอลูมิเนียมแต่ละขั้นกับค่าความเข้มของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์วัดได้.....63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

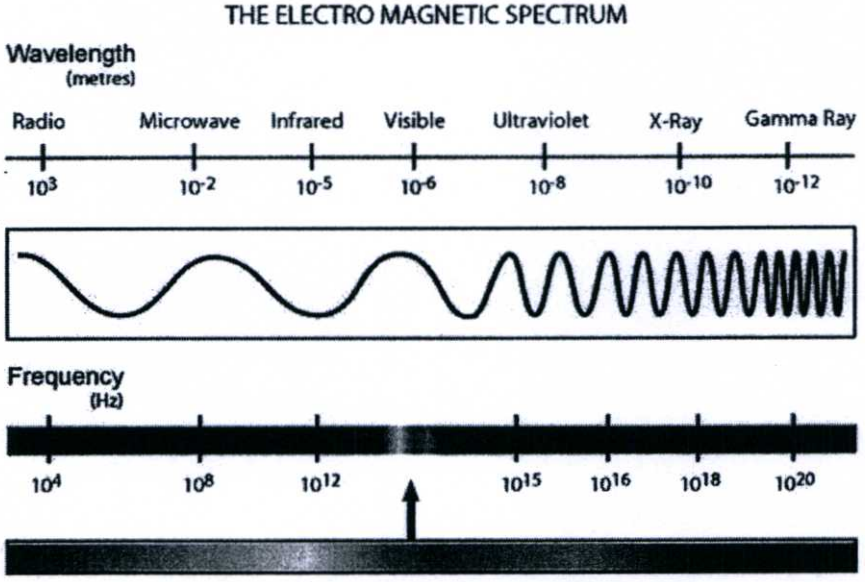
4.10 (รูปซ้าย) แสดง Intensity Profile จากการสแกนวัตถุจนครบ Volume ทั้งหมด 20 Line Scans เว้นระยะห่าง Line ละ 1 mm และ (รูปขวา) แสดงภาพเอกซเรย์สองมิติที่ได้จากการสแกนทั้งที่ยังไม่ได้ปรับปรุง (B) และปรับปรุงสัญญาณแล้ว (C).....65

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1) เอกซเรย์ (X-ray) คืออะไร

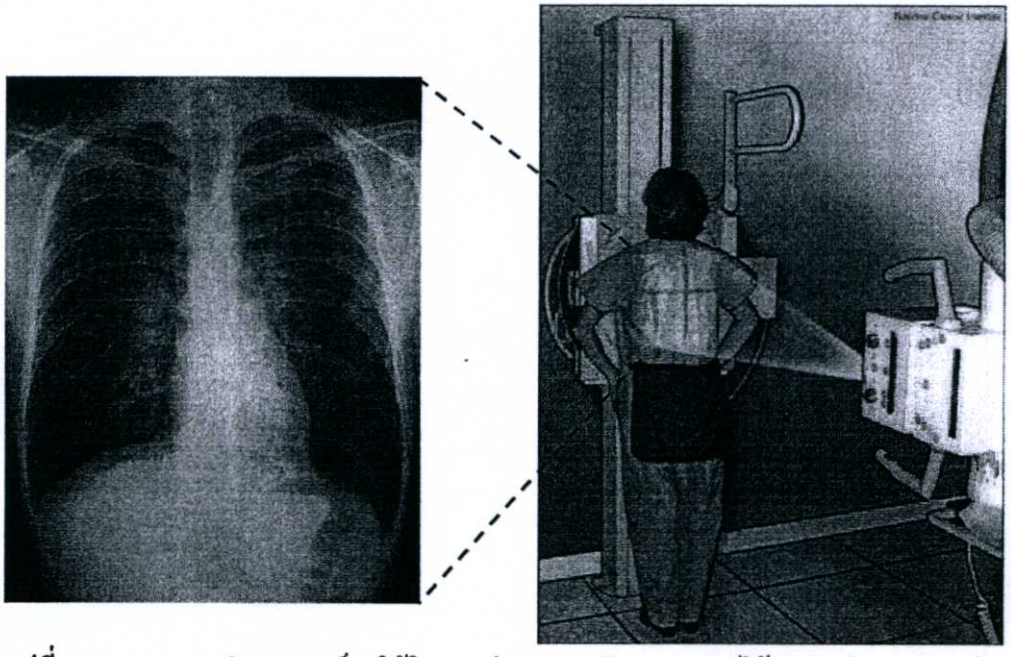
รังสีเอ็กซ์ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า เอกซเรย์ (X-Ray) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic Wave) ที่มีย่านความถี่สูงในช่วง 10^{17} – 10^{19} Hz และมีความยาวคลื่นในช่วง 0.01-10 nm หรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีอุลตราไวโอเลตและรังสีแกมมานั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 มีคุณสมบัติเหมือนกับแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง สะท้อนกลับ หักเห เลี้ยวเบน เป็น แต่เอกซเรย์ยังมีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่เหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่นๆ คือ มีอำนาจทะลุทะลวง (Penetration) สูง สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุได้มากบ้าง น้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุและน้ำหนักอะตอม (Atomic Number) ของวัตถุนั้นๆ และทำให้เกิดการเรืองแสงในสารพิเศษบางชนิดได้ โดย วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน (Wilhelm Conrad Roentgen) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน เป็นคนแรกที่ค้นพบเอกซเรย์ใน ค.ศ. 1895 จึงนำมาสู่การประดิษฐ์ต้นกำเนิดเอกซเรย์ (X-ray Source) ที่เรียกกันทั่วไปว่า หลอดเอกซเรย์ (X-ray Tube) เพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณและทิศทางของเอกซเรย์ให้เปล่งออกมาตามที่เราต้องการ นำมาสู่การประยุกต์ใช้เอกซเรย์เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย



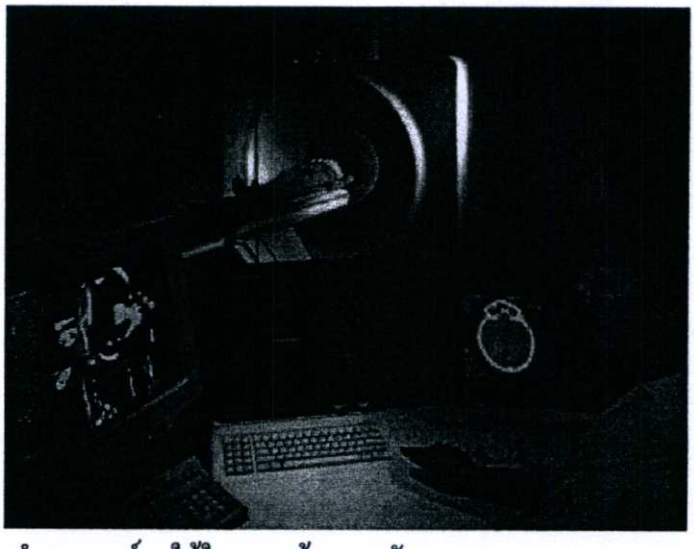
รูปที่ 1.1 แสดงสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ จะเห็นว่าเอกซเรย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก อยู่ระหว่างอุลตราไวโอเลตและแกมมานั่นเอง

(www.colourtherapyhealing.com/colour/electroma...)

เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของเอกซเรย์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ปัจจุบันมีการนำเอกซเรย์มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำเอกซเรย์มาใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ (Medical Imaging) เพื่อช่วยแพทย์ในการวินิจฉัยและวางแผนการรักษาโรค เช่น สร้างภาพเอกซเรย์สองมิติที่อวัยวะต่างๆ ของคนไข้ (Conventional X-ray) (รูปที่ 1.2) หรือ สร้างภาพตัดขวางของคนไข้ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography) (รูปที่ 1.3) เป็นต้น

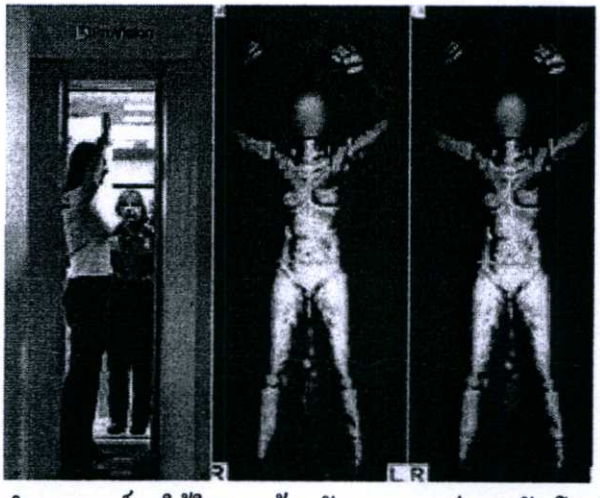


รูปที่ 1.2 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในการถ่ายภาพอวัยวะของคนไข้ จากรูปแสดงการถ่ายภาพเอกซเรย์ปอด (Chest X-ray) สองมิตินั่นเอง (www.daviddarling.info/.../C/chest_X-ray.html)



รูปที่ 1.3 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง (Cross Sectional Image) อวัยวะของคนไข้ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography)
(www.daviddarling.info/.../C/computed_tomography_scanning.html)

ปัจจุบันการสร้างภาพทางการแพทย์ด้วยเอกซเรย์เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการแพทย์ในการเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้แพทย์สามารถมองเห็นอวัยวะภายในร่างกายของคนไข้ได้โดยไม่ต้องทำการผ่าตัด ทำให้แพทย์สามารถวินิจฉัยโรคได้ง่ายและมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นกว่าในอดีต นอกจากนั้น เอกซเรย์ยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านความปลอดภัย โดยนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการสแกนหาวัตถุระเบิด สิ่งแปลกปลอมที่เป็นอันตราย (ดังรูป 1.4) เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำเอกซเรย์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น นำมาใช้ในการหารอยแยกรอยแตกของผลิตภัณฑ์ หรือค้นหารอยแตกของท่อแก๊ส เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีการสร้างภาพเอกซเรย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ในปัจจุบัน เข้ามามีส่วนในการดำรงชีวิตของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เพราะเอกซเรย์สามารถทำให้เรามองเห็นในสิ่งที่ตาเปล่ามองไม่เห็นออกมาเป็นรูปภาพหรือแสดงบนจอคอมพิวเตอร์ได้ ดังนั้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสร้างภาพเอกซเรย์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ จึงเป็นงานที่ท้าทายและมีคุณค่าเป็นอย่างยิ่ง



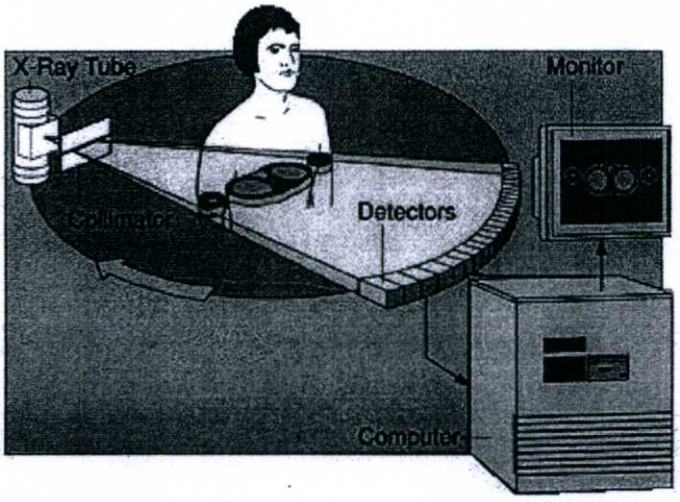
รูปที่ 1.4 แสดงการนำเอกซเรย์มาใช้ในงานด้านรักษาความปลอดภัย โดยใช้เป็นเครื่องสแกนหาวัตถุระเบิดหรืออาวุธที่ใช้ภายในสนามบิน

1.1.2) ตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-Ray Detector) คืออะไร

ในการจะนำเอกซเรย์มาใช้ประโยชน์ให้ได้ดังกล่าวข้างต้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างแรก คือ ทำอย่างไรจึงจะรู้ว่าบริเวณใดมีเอกซเรย์ มีปริมาณเท่าไร และแปลงเอกซเรย์ให้เป็นรูปภาพได้อย่างไร จึงมีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องมือเพื่อให้สามารถตรวจจับเอกซเรย์ที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดและนำมาสร้างภาพในที่สุด เรียกเครื่องมือนั้นว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-Ray Detector) โดยตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพเอกซเรย์ คือ ฟิล์มเอกซเรย์ (X-ray Film) ซึ่งสามารถตรวจจับเอกซเรย์และผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อสร้างภาพและแสดงให้เห็นบนฟิล์มเอกซเรย์ ซึ่งในทางการแพทย์มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และยังคงมีใช้อยู่ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าฟิล์มเอกซเรย์จะให้ภาพที่คมชัดและมีรายละเอียดสูงมาก แต่ทว่ายังพบปัญหา

ของการใช้ฟิล์มเอกซเรย์หลายประการ เช่น ต้องการพื้นที่ในการเก็บข้อมูลจำนวนมาก เช่น ห้องเก็บฟิล์ม, ไม่สามารถเก็บรักษาฟิล์มเอาไว้ได้เป็นเวลานาน โดยมีอายุการเก็บฟิล์มเอกซเรย์เฉลี่ยได้ไม่เกิน 5 ปี, ต้องใช้เวลาในการล้างฟิล์ม ซึ่งก่อให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน อีกทั้งยังต้องมีค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่ตามมา เช่น น้ำยาล้างฟิล์ม ฟิล์มเอกซเรย์ เครื่องล้างฟิล์ม และพนักงานล้างฟิล์ม เป็นต้น และข้อจำกัดที่สำคัญคือ ไม่สามารถแสดงภาพเอกซเรย์บนจอคอมพิวเตอร์ และไม่สามารถแสดงภาพเอกซเรย์เป็น Real Time ได้ ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีเทคโนโลยีตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบดิจิตอลเข้ามาช่วยเติมเต็มข้อจำกัดต่างๆ ของฟิล์ม ให้สามารถนำเอกซเรย์มาใช้งานได้กว้างขวางและหลากหลายมากยิ่งขึ้น

ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบดิจิตอลนั้น เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแท้จริง ในการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษมาใช้ในการตรวจจับเอกซเรย์ โดยสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สามารถแปลงเอกซเรย์ที่มาตกกระทบที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปแบบพลังงานที่สามารถนำมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์และแสดงผลภาพเอกซเรย์บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ตัวตรวจจับเอกซเรย์ดิจิตอลที่นำมาใช้ในทางการแพทย์ โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณเอกซเรย์เป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่งไปทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ และแสดงภาพออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

1.2 แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบดิจิตอลที่นำไปใช้ในการสร้างภาพเอกซเรย์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการสร้างภาพ [1] ได้แก่

1) ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพทางตรง (Direct Imaging)

ตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดนี้จะใช้สารกึ่งตัว (Semi-Conductor) ในการเปลี่ยนเอกซเรย์ให้เป็นประจุไฟฟ้าโดยตรง และนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์และสร้างภาพเอกซเรย์ในที่สุด ซึ่งนอกจากจะสามารถสร้างภาพเอกซเรย์ได้รวดเร็วแล้ว ยังได้ภาพที่มีรายละเอียดสูงอีกด้วย แต่ทว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดนี้มีราคาแพงมากและใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมขั้นสูงในการผลิต จึงนำมาสู่การพัฒนาตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดที่สองเข้ามาแทน

2) ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพทางอ้อม (Indirect Imaging)

ตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดนี้จะไม่ใช้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเอกซเรย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง แต่จะใช้อุปกรณ์หรือวัสดุอื่นที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเอกซเรย์เป็นพลังงานรูปอื่นที่ตรวจจับได้ง่าย เช่น พลังงานแสง วัสดุนั้นคือ แผ่นเรืองแสงหรือฟอสเฟอร์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเอกซเรย์เป็นพลังงานแสง หลังจากนั้น จะอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector Device) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และส่งไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์และแสดงภาพเอกซเรย์บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ในที่สุด ตัวอย่าง Photodetector ที่นำมาใช้ในตัวตรวจจับเอกซเรย์ประเภทนี้ ได้แก่ โฟโต้ไดโอด (Photodiode) โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) หรืออุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge-Coupled Device; CCD) เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพทางอ้อมนี้สามารถผลิตได้ง่ายและใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพงมากเท่ากับชนิดแรก แต่ข้อเสียของตัวตรวจจับชนิดนี้คือ คุณภาพของภาพที่ได้จะดีไม่เท่าตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพทางตรง แต่ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับและนำมาใช้งานได้ ซึ่งเป็นแนวคิดที่น่าสนใจและควรนำไปศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาต่อยอดในอนาคต

ในปัจจุบัน การพัฒนาทางด้านตัวตรวจจับเอกซเรย์ได้เจริญก้าวหน้าอย่างมากในต่างประเทศทั้งในด้านการประยุกต์ในงานการแพทย์ รักษาความปลอดภัย และงานอุตสาหกรรม แต่ทว่าในประเทศไทยกลับไม่มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้อย่างจริงจัง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประเทศไทยต้องสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก ในการนำเข้าเทคโนโลยีราคาแพงเหล่านี้มาใช้ภายในประเทศ ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าควรมีการพัฒนาเทคโนโลยีตัวตรวจจับเอกซเรย์อย่างจริงจัง เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเทคโนโลยีตัวตรวจจับเอกซเรย์สำหรับใช้งานภายในประเทศ และผลิตออกมาใช้งานโดยให้มีราคาถูกกว่าในท้องตลาด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพเอกซเรย์ทางอ้อม โดยเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาถูกและหาได้ภายในประเทศ และประยุกต์เทคนิคทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และรังสีเทคนิคเข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่มีราคาไม่แพง และสามารถสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติที่มีรายละเอียดที่ยอมรับและใช้งานได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ เอกภพ งามละเมียด ในปี พ.ศ. 2548 [2] และ ธเนศ อังศุวัฒนากุล ในปี พ.ศ. 2550 [3] ซึ่งได้สร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีการสร้างภาพทางอ้อมโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงคือ โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) ชนิดตัวเดียว และแถวยาว (Array) ตามลำดับ จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่า ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์ชี้ให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้ตรวจจับเอกซเรย์และสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติได้ แต่ทว่า ยังคงพบปัญหาที่สำคัญคือ ความละเอียดของภาพที่ได้ยังไม่เพียงพอที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ได้ เนื่องจากตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นจากโฟโตทรานซิสเตอร์นั้น มีช่วงการตอบสนองต่อแสงอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง และข้อจำกัดเฉพาะตัวของโฟโต้ทรานซิสเตอร์ ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งพัฒนาตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้การสร้างภาพทางอ้อม โดยมุ่งเน้นไปที่การคัดเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองต่อแสงในช่วงที่เหมาะสมกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง และมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมาะสม โดยมุ่งหวังให้สามารถสร้างภาพเอกซเรย์ที่มีความละเอียดของภาพดีกว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบเดิมอีกด้วย

1.3 คำถามงานวิจัย

จากที่มาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าวในข้างต้น นำมาสู่คำถามงานวิจัยที่สำคัญ 2 ประการ ได้แก่

1. อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector) ชนิดใด ที่มีช่วงการตอบสนองต่อแสงที่เหมาะสมกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง และสามารถหาซื้อได้ง่ายภายในประเทศ

2. จะมีเทคนิคในการสร้างและออกแบบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์อย่างไร ให้สามารถตรวจจับเอกซเรย์และนำมาสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติที่มีความละเอียดของภาพดีขึ้น

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

1. อุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge-Coupled Device; CCD) มีช่วงการตอบสนองต่อแสง 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน โดยช่วงแสงสีเขียวมีค่าการตอบสนองต่อแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 nm ซึ่งตรงกับความยาวคลื่นสูงสุดที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงที่เลือกใช้ในงานวิจัย จึงเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมจะนำมาพัฒนาเป็นตัวตรวจจับเอกซเรย์

2. ขนาดของอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge-Coupled Device; CCD) ต่อหนึ่งพิกเซลมีขนาดเล็กมาก ซึ่งเล็กกว่าขนาดของโฟโตทรานซิสเตอร์ จึงทำให้ความละเอียดของภาพที่ขนาดเท่ากันนั้นมีมากกว่า จึงน่าจะสร้างภาพเอกซเรย์ที่มีความละเอียดของภาพสูงกว่าโฟโต้ทรานซิสเตอร์ได้

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ดังนั้น จากคำถามงานวิจัย และสมมุติฐานที่ตั้งขึ้น จึงสรุปเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อตอบคำถามงานวิจัยและสมมุติฐานที่ตั้งขึ้น ดังต่อไปนี้

1. สร้างระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้วิธีสร้างภาพแบบทางอ้อม (Indirect Imaging) โดยใช้อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี (Charge-Coupled Device; CCD) ร่วมกับแผ่นเรืองแสง (Phosphor) โดยสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้เป็นแบบแถวเดียว (Linear Detector Array)

2. นำระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการตรวจจับเอกซเรย์และสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติที่มีความละเอียดของภาพสูงขึ้นได้

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดแถวยาว (X-Ray Detector Array) ที่สร้างภาพแบบทางอ้อม (Indirect Imaging) โดยใช้อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี (Charge-Coupled Device; CCD) เป็นตัวตรวจรับแสง (Photo-detector) ที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง (Phosphor)

2. ทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการตรวจจับเอกซเรย์และสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้น

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย คำถามของงานวิจัย สมมุติฐานของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การทดลองทางแสงและเอกซเรย์ ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การออกแบบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ การทดลองทางแสง และส่วนสุดท้ายคือ การทดลองเก็บภาพจากเอกซเรย์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์และนำมาสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติ

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะขอนำเสนอเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และทุกส่วนในระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ การทำความเข้าใจทฤษฎีต่างๆ เหล่านี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

นอกจากนั้น ในบทนี้จะขอกล่าวถึงงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเชื่อมโยงกับงานวิจัยนี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการอภิปรายและสรุปผลการวิจัยรวมไปถึงข้อเสนอแนะ ข้อดี และข้อด้อยของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้อีกด้วย

เนื่องจากระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-ray Detector) ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี (Charge-Coupled Device; CCD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง (Phosphor) เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ประกอบไปด้วย

2.1) หลักการทั่วไปของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-ray Detector)

2.2) หลักการและคุณสมบัติของสารเรืองแสง (Phosphor) และแผ่นเรืองแสง (Intensifying Screen)

2.3) หลักการและคุณสมบัติของอุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี (Charge-Coupled Device)

2.4) ทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

2.1 หลักการทั่วไปของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-Ray Detector)

ตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-Ray Detector) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับพลังงานเอกซเรย์แล้วเปลี่ยนรูปพลังงานเอกซเรย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปสร้างภาพหรือประมวลผลต่อไป โดยเอกซเรย์นั้น มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศจะมีความเร็วเท่ากับแสง คือ $3x10^8$ m/s นอกจากนั้น เอกซเรย์ยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา แต่ในการวัดพลังงานจะไม่เหมือนกับแสงทั่วๆ ไปที่จะวัดอนุภาคของแสงหรือโฟตอน การวัดพลังงานของเอกซเรย์ ตัวตรวจจับจะต้องได้รับพลังงานทั้งหมดของเอกซเรย์ โดยเอกซเรย์จะทำให้ตัวตรวจจับเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการวัดถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ทราบถึงพลังงานของเอกซเรย์ที่ตกกระทบกับตัวตรวจจับได้ ในกระบวนการการทำงานตัวตรวจจับแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของตัวตรวจจับ อย่างไรก็ตาม ตัวตรวจจับเหล่านี้จะมีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมือนกัน เช่น ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) การกระจายตัวของพลังงาน (Energy Resolution)

2.1.1) วิธีการบันทึกข้อมูลของตัวตรวจจับเอกซเรย์

โหมดการทำงานและวิธีการบันทึกข้อมูลซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่นำตัวตรวจจับไปใช้ โดยจะขออธิบายรายละเอียดดังกล่าว ดังต่อไปนี้

2.1.1.1) รูปแบบจำลองของตัวตรวจจับแบบพื้นฐาน (Modeling of a Basic X-ray Detector)

ถ้าสมมุติให้ตัวตรวจจับสามารถตรวจจับการแผ่รังสีได้บางชนิดเท่านั้น สิ่งแรกที่ต้องให้ความสนใจก็คือ การทำปฏิกิริยากับอนุภาคเดี่ยวหรือควอนตัม (Quantum) ภายในตัวตรวจจับเมื่อได้รับการแผ่รังสี ตัวอย่างเช่น อนุภาคเดี่ยวของรังสีแอลฟา (Alpha) หรืออาจจะเป็นโปรตอนของรังสีแกมมา (Gamma – Ray Photon) ในการที่ตัวตรวจจับจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อการแผ่รังสีทั้งหมดได้ การแผ่รังสีจะต้องทำปฏิกิริยากับโครงสร้างภายในตัวตรวจจับ และการทำปฏิกิริยานั้นจะต้องหยุดลงอย่างรวดเร็ว (โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10^{-9} s ในก๊าซ และ 10^{-12} s ในของแข็ง [4]) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยานี้มีค่าสั้นมาก ดังนั้น ***จึงมีการพิจารณาว่าการตอบสนองของตัวตรวจจับต่อพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีนั้นเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด***

ผลที่ได้จากตัวตรวจจับเมื่อทำปฏิกิริยากับการแผ่รังสีก็คือ ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจจับในส่วนที่ได้รับการกระตุ้น ถ้าสมมุติให้แบบจำลองของตัวตรวจจับมีค่าประจุ Q เกิดขึ้นที่เวลา t = 0 เมื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคเดี่ยว หรือควอนตัมของการแผ่รังสี ซึ่งประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการสะสมอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไป การสะสมประจุนี้จะเกิดขึ้นภายใต้แรงจากสนามไฟฟ้าภายในตัวตรวจจับ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประจุบวกและลบที่เกิดขึ้นมีการเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม ช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจจับ ตัวอย่างเช่น Ion Chambers ใช้เวลาอยู่ในช่วง 10^{-3} s แต่ถ้าเป็นตัวตรวจจับที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำประเภทไดโอด จะใช้เวลาประมาณ 10^{-9} s ค่าเหล่านี้สะท้อนถึงความเร็วของประจุพาหะภายใต้ตัวตรวจจับที่ได้รับการกระตุ้นและระยะทางเฉลี่ยที่ต้องเดินทางของประจุก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

ถ้าพิจารณาจากแบบจำลองของตัวตรวจจับการตอบสนองต่ออนุภาคเดี่ยวหรือควอนตัมที่เกิดจากการแผ่รังสีจะเป็นกระแสที่ไหลในช่วงเวลาที่มีค่าเท่ากับเวลาในการเก็บประจุทั้งหมด รูปที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่ t_c แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ

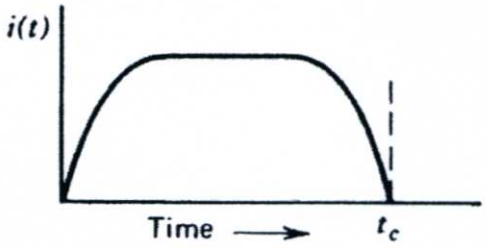
$$\int_0^{t_c} i(t)\,dt = Q \qquad (2.1)$$

เมื่อ i(t) คือ กระแส ณ ช่วงเวลาต่างๆ

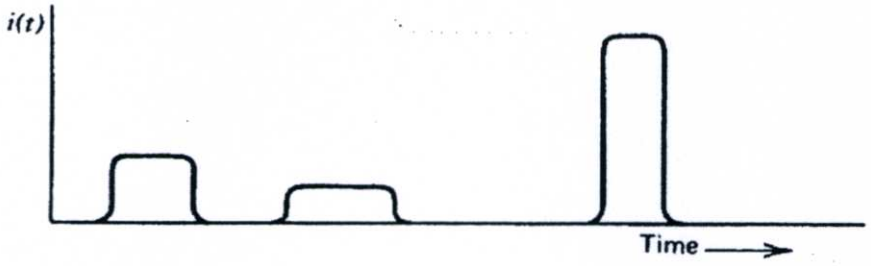
Q คือ ผลรวมของประจุที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง t

จากสมการ (2.1) แสดงค่าผลรวมของประจุ (Q) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง t_c ในสถานการณ์จริงการแผ่รังสีมักเกิดเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ถ้าการแผ่รังสีเกิดขึ้นหลายครั้งอย่างรวดเร็ว จะ

ทำให้กระแสที่เกิดขึ้นในตัวตรวจจับเป็นค่ากระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีหลายครั้ง แต่ในที่นี้จะสมมุติให้อัตราการแผ่รังสีในแต่ละครั้ง เกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำอย่างเพียงพอที่จะพิจารณาว่ากระแสที่เกิดในตัวตรวจจับแต่ละครั้งเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีเพียงครั้งเดียว ขนาดและเวลาที่เกิดค่ากระแสในแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับการเกิดปฏิกิริยาของการแผ่รังสีในแต่ละครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่ t_c แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ



รูปที่ 2.2 แสดงการแผ่รังสีที่มีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน

2.1.1.2) รูปแบบการทำงานของตัวตรวจจับ (Modes of Detector Operation)

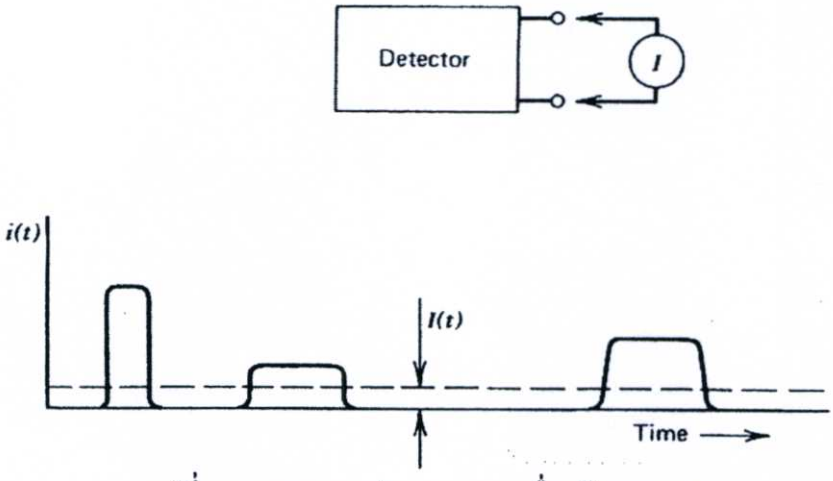
รูปแบบการทำงานพื้นฐานของตัวตรวจจับแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ โหมดพัลส์ (Pulse Mode), โหมดกระแส (Current Mode) และโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (Mean Square Voltage Mode) หรือบางครั้งจะเรียกว่า แคมเบลลิ่โหมด (Campbelling Mode) จากโหมดการทำงานทั้ง 3 ชนิด โหมดพัลส์จะมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายที่สุด แต่โหมดกระแสจะมีการนำไปใช้งานมากที่สุด ส่วนโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันจะมีการนำไปใช้ในบางงานเท่านั้น

ก) โหมดกระแส (Current Mode)

ในการวัดค่ากระแสอุปกรณ์ที่ใช้อย่างเช่น แอมมิเตอร์จะต่ออยู่ที่ขั้วไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทของตัวตรวจจับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าสมมติให้อุปกรณ์ที่ใช้การวัดค่ากระแสมีการตอบสนองอยู่ในช่วง T ดังนั้น ค่ากระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$I(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} i(t')\,dt'$$

เมื่อ I(t) คือ กระแสที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t



รูปที่ 2.3 แสดงการต่อวงจรของเครื่องวัดกระแส

เนื่องจากการตอบสนองในช่วงเวลา T มีค่ายาวนานกว่าค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเกิดพัลส์กระแสที่เกิดจากตัวตรวจจับในแต่ละลูก ผลที่ได้คือ การเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นจากหลายๆ พัลส์ภายในช่วงเวลาดังกล่าว

ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นได้จากผลรวมค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดประจุกับจำนวนประจุที่เกิดในแต่ละครั้ง ดังนี้

$$I_0 = rQ = r\frac{E}{W}q \qquad (2.3)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดประจุ

Q คือ Eq/W = จำนวนประจุที่เกิดในแต่ละครั้ง

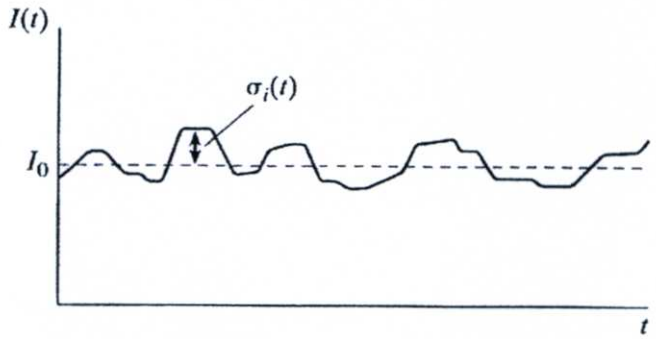
E คือ พลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง

W คือ พลังงานเฉลี่ยที่ต้องการในแต่ละครั้ง ที่ทำให้เกิดคู่ประจุ (electron-ion pair)

q คือ 1.6×10^{-19} C

สำหรับตัวตรวจจับที่ได้รับการแผ่รังสีที่มีค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของค่ากระแสคงที่ (I_0) รวมกับค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา

($\sigma_i(t)$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่ $\sigma_i(t)$ คือ ตัวแปรสุ่มที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการแผ่รังสีเมื่อทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.4 ค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา ($\sigma_i(t)$)

การวัดค่าทางสถิติที่เกิดจากองค์ประกอบที่เกิดอย่างสุ่มเหล่านี้ ได้จากค่าเฉลี่ยการผันแปร (Variance) หรือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Value) ที่กำหนดโดยค่าเวลาเฉลี่ยของกำลังสองของความแตกต่างของกระแสที่เกิดการผันแปรตามเวลา (I(t)) กับค่าเฉลี่ยของกระแส (I_0) ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองนี้เป็นไปตาม (2.4)

$$\overline{\sigma^2_I(t)} = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t}[I(t') - I_0]^2\,dt' = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t}\sigma^2_i(t')\,dt' \qquad (2.4)$$

โดยค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นไปตาม

$$\overline{\sigma_I(t)} = \sqrt{\overline{\sigma^2_I(t)}} \qquad (2.5)$$

ถ้าพิจารณาจากสถิติ Poisson (Poisson Statistics) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่ได้รับการบันทึก n เป็นไปตาม

$$\sigma_n = \sqrt{n} \qquad (2.6)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเหตุการณ์

ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการเกิด r ในช่วงเวลาที่ทำการวัด T คือ

$$\sigma_n = \sqrt{rT} \qquad (2.7)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดเหตุการณ์

ถ้าการกระจายตัวของประจุในแต่ละพัลส์มีค่าเหมือนกัน สัดส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากการวัดกับสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มภายในช่วงเวลา T กำหนดโดย

$$\frac{\overline{\sigma_I(t)}}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{rT}} \tag{2.8}$$

เมื่อ $\overline{\sigma_i(t)}$ คือ เวลาเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดกระแส เมื่อ T คือค่าเวลาการตอบสนองของเครื่องวัดกระแสและ I_0 คือค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้จากเครื่องวัดโดยผลที่ได้จะนำมาใช้ในการประมวลความไม่แน่นอนที่เกี่ยวเนื่องกับเครื่องมือวัดแบบ Current Mode

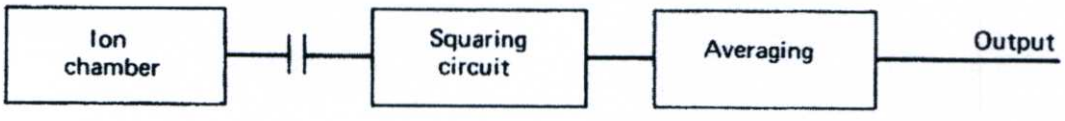
จากสมการ (2.8) ประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง (Q) สมมติให้มีค่าคงที่ ดังนั้น ผลที่ได้นี้จะนำไปใช้กับช่วงเวลาที่สัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเท่านั้น ไม่รวมถึงขนาดของสัญญาณ

ข) โหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (Mean Square Voltage (MSV) Mode)

การทำงานของ MSV เป็นการส่งสัญญาณกระแสที่ได้จากตัวตรวจจับผ่านเข้าสู่วงจรเฉลี่ยค่ากระแส (I_0) โดยค่ากระแสที่ส่งผ่านไปได้นั้น จะเป็นค่ากระแสในส่วน $\sigma_i(t)$ จากบล็อกการทำงานในรูปที่ 2.5 สัญญาณ $\sigma_i(t)$ จะถูกนำมาทำเป็นกำลังสอง และเฉลี่ยโดยช่วงเวลา T ปริมาณผลลัพธ์ที่ได้จาก $\sigma\frac{2}{I}(t)$ จะสอดคล้องและถูกกำหนดโดย (2.4) ทำการรวม (2.3) และ (2.8) จะสามารถหาขนาดของสัญญาณได้จาก

$$\overline{\sigma\frac{2}{I}(t)} = \frac{rQ^2}{T} \tag{2.9}$$

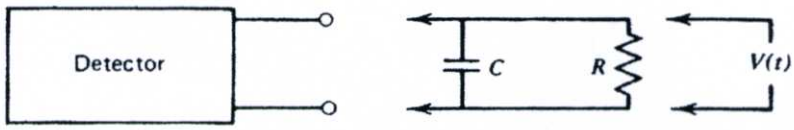
จากสมการ (2.9) จะเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณที่แปรผันตรงกับอัตราการเกิด (r) และค่ากำลังสองของประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลานั้น ในการวิเคราะห์การทำงานของโหมดนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบ Campbell และในบางครั้งจะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่า Campbelling Mode



รูปที่ 2.5 บล็อกการทำงานของโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน

ค) โหมดพัลส์ (Pulse Mode)

การทำงานในโหมดนี้ สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับจะนำมาต่อกับวงจรภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวงจรขยายภาคต้น (Preamplifier) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเสมือนได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดสัญญาณแบบโหมดพัลส์

ตัวต้านทานในวงจรเปรียบได้กับความต้านทานทางอินพุทของวงจรและตัวเก็บประจุเปรียบได้กับค่าความเก็บประจุรวมของตัวตรวจจับและวงจรเครื่องมือวัด ตัวอย่างเช่น วงจรขยายภาคต้นได้นำมาต่อกับตัวตรวจจับ ค่าความต้านทานคือ ค่าความต้านทานทางอินพุทของวงจรขยายภาคต้นและค่าความเก็บประจุจะเป็นผลรวมของค่าความเก็บประจุของตัวตรวจจับของสายนำสัญญาณที่ใช้ในการต่อระหว่างตัวตรวจจับกับวงจรขยายภาคต้นและค่าความเก็บประจุทางด่านอินพุทของวงจรขยายภาคต้น ดังนั้น เอาท์พุทที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) ของวงจรที่กำลังทำการวัด โดยที่ค่าคงที่ของเวลาได้จากผลคูณของค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุหรือ $\tau = RC$

1. ในกรณีค่า *RC* ต่ำ ($\tau << tc$)

ในกรณีค่าคงที่ของเวลาของวงจรภายนอกมีค่าต่ำกว่าเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุมากๆ กระแสที่ไหลผ่านโหลดความต้านทานจะไหลอย่างทันทีทันใด ดังนั้น แรงดันที่เกิดขึ้น (V(t)) ในกรณีนี้จะมีรูปร่างที่ใกล้เคียงค่ากระแสที่เกิดจากตัวตรวจจับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7b

2. ในกรณีค่า *RC* สูง ($\tau >> tc$)

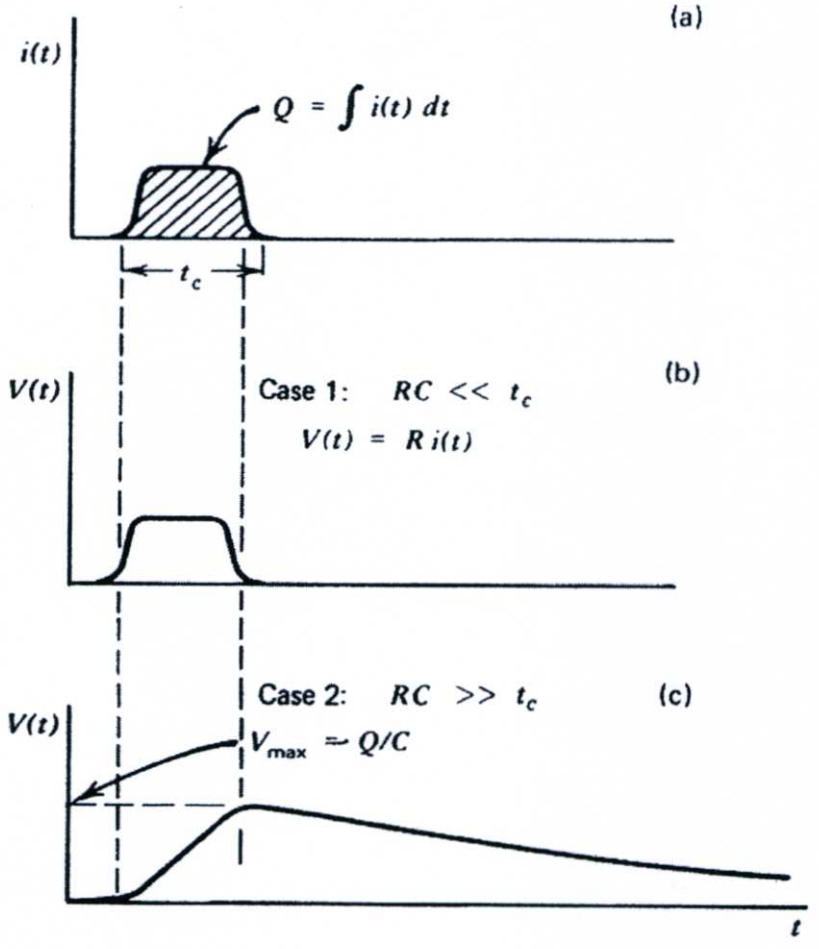
ในกรณีนี้จะแตกต่างจากกรณีแรกอย่างมาก เนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจจับไหลผ่านไปที่ตัวต้านทาน ประจุส่วนหนึ่งก็จะสะสมในตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสจากตัวตรวจจับมีค่าลดลง ตัวเก็บประจุจะคายประจุที่สะสมไว้ผ่านตัวต้านทาน ถ้าสมมุติให้ค่าเวลาระหว่างการเกิดสัญญาณแต่ละครั้งมีเวลานาน ตัวเก็บประจุยังคงคายประจุผ่านตัวต้านทานเรื่อยๆ จนกว่าประจุจะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าแรงดัน (V(t)) ที่ตกคร่อมตัวต้านทานแสดงในรูปที่ 2.7c และขนาดของแรงดันที่สอดคล้องกับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจจับมีค่าดังนี้

$$V_{max} = \frac{Q}{C} \tag{2.10}$$

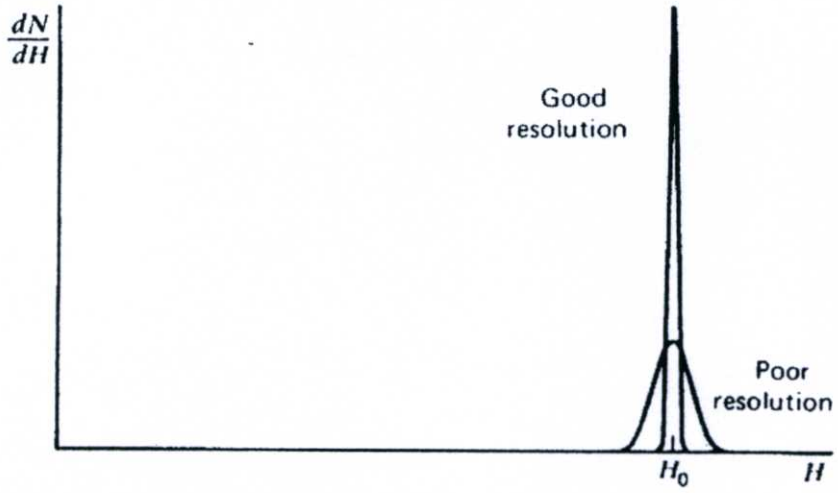
2.1.2) Energy Resolution

Energy Resolution เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของตัวตรวจจับรังสีเมื่อมีการตอบสนองต่อรังสี จากรูปที่ 2.8 แสดงความแตกต่างทางด้านความสูงของการกระจายตัวของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับเมื่อได้รับรังสีที่มีแหล่งพลังงานเดี่ยว ซึ่งการกระจายตัวของรูปคลื่นนี้เรียกว่า ฟังค์ชันการตอบสนอง (Response Function) ของตัวตรวจจับรังสี จากรูปที่ 2.8 พื้นที่ใต้ส่วนโค้งของทั้ง

สองรูปคลื่นมีขนาดที่เท่ากัน แต่การกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ย (H_0) มีความกว้างไม่เท่ากัน จากรูปคลื่นที่มีความสูงและแคบ แสดงถึงการตอบสนองของตัวตรวจจับที่ดี



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของสัญญาณจากวงจรที่มีค่าคงที่ของเวลาต่างกัน [5]



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของพลังงานที่แตกต่างกัน

2.1.3) ตัวตรวจจับที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง (Scintillation Detector)

โดยทั่วไปแล้วการตรวจจับเอกซเรย์สามารถทำได้หลายวิธี [5] เช่น Ionization Chambers, Proportional Counters, Geiger-Mueller Counters, Photomultiplier Tubes and Photodiodes, Scintillation detector Principles, Semiconductor Diode Detectors เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะตัวตรวจจับที่ใช้วิธีการเคลือบด้วยสารเรืองแสงลงบนอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Scintillation Detector Principles) เท่านั้น

หลังจากการค้นพบเอกซเรย์โดย วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น เมื่อปี ค.ศ. 1895 พบว่าฟิลม์ถ่ายรูปทั่วไปไม่สามารถตรวจจับเอกซเรย์ได้ เนื่องจากค่าการดูดกลืนพลังงานของฟิลม์ต่อเอกซเรย์มีค่าต่ำเกินไป ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาสารเรืองแสง (Phosphor) เข้ามาใช้ โดยสารเรืองแสงจะดูดกลืนพลังงานของเอกซเรย์ และคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับด้วยฟิล์มแบบทั่วไปได้นั่นเอง ซึ่งจากหลักการนี้เอง จึงทำให้มีการพัฒนาต่อ โดยเปลี่ยนตัวตรวจจับแสงเป็นชนิดอื่นนอกจากฟิล์ม ซึ่งถ้าสามารถรับแสงและเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า เราก็สามารถนำกระแสนี้มาใช้ในการตรวจจับเอกซเรย์ และสร้างภาพเอกซเรย์ได้ในที่สุด

ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจะขอกล่าวถึงหลักการและคุณสมบัติเฉพาะของสารเรืองแสง ซึ่งมีหลายชนิดแตกต่างกัน เพราะฉะนั้น การเข้าใจคุณสมบัติทางเคมีของสารเรืองแสงแต่ละชนิดจำเป็นอย่างยิ่งในการเลือกใช้เพื่อให้เหมาะสม (Match) กับอุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการทำตัวตรวจจับเอกซเรย์นั่นเอง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.2 หลักการและคุณสมบัติของสารเรืองแสง (Phosphor) และแผ่นเรืองแสง (Intensifying Screen)

หลักการพื้นฐานของสารเรืองแสง คือ แสงจะถูกปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนถ่ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยเอกซเรย์ระหว่างชั้นพลังงาน S_{10} และการสั่นของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (Ground state) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ถ้าให้ τ แทนเวลาในการลดสถานะจากชั้น S_{10} ดังนั้น ค่าความหนาแน่นของการเรืองแสงที่เกิดจากการกระตุ้นที่เวลา t จะเป็นไปตาม

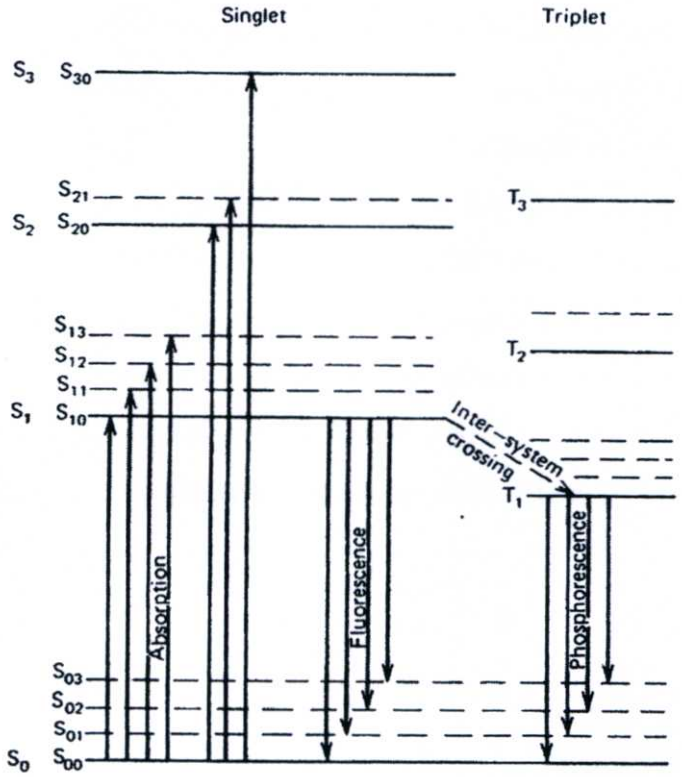
$$I = I_0 e^{-t/\tau} \tag{2.11}$$

เมื่อ I คือ ความหนาแน่นของการเรืองแสงที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยเอกซเรย์

I_0 คือ ความหนาแน่นของการเรืองแสงที่ชั้น S_{10}

T คือ เวลาในการลดสถานะจากชั้น S_{10}

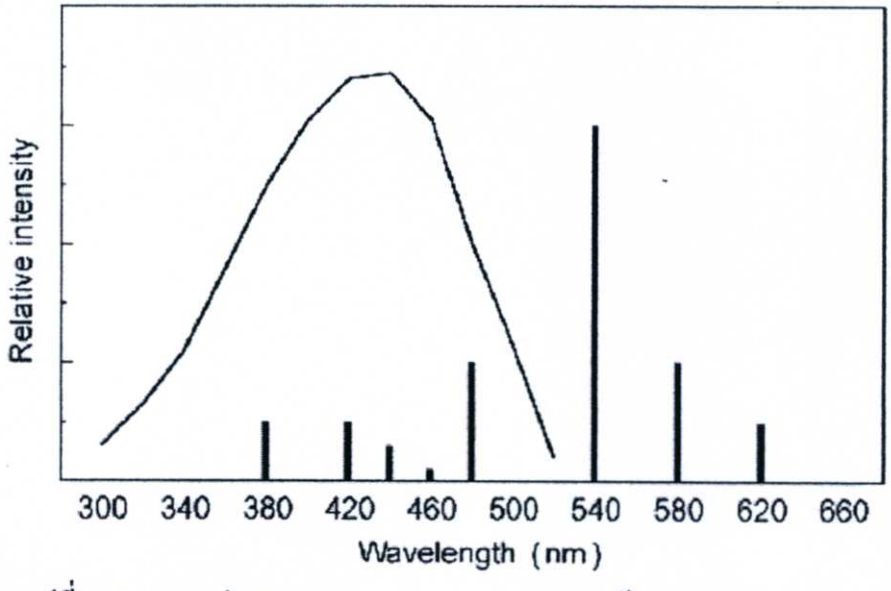
t คือ เวลาใดๆ



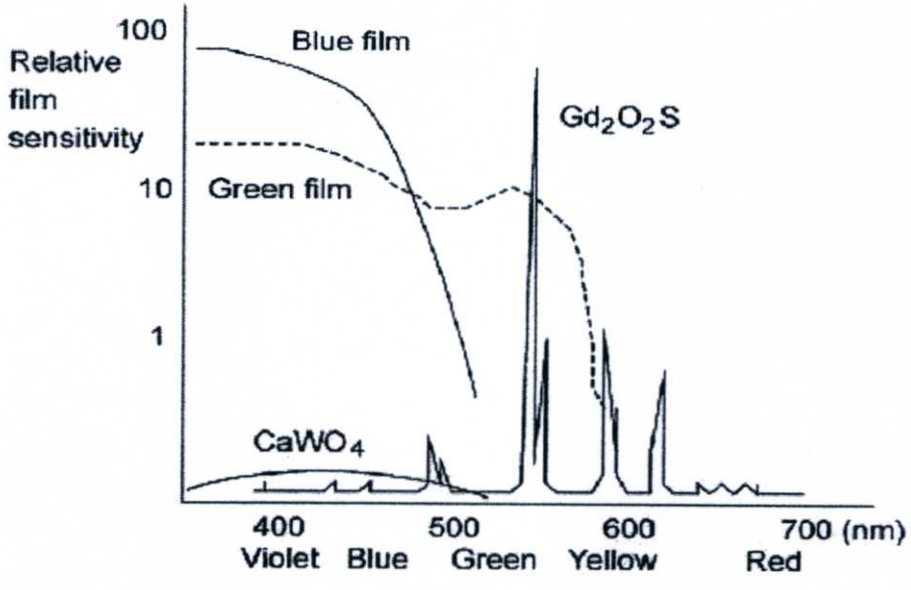
รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยเอกซเรย์ [5]

ในสารเรืองแสงที่ทำมาจากสารอินทรีย์ทั้งหมด ค่า τ จะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} วินาที ซึ่งหมายความว่า การเรืองแสงจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากเอกซเรย์นั่นเอง

107442



รูปที่ 2.10 แสดงค่า Emision Spectra ของ $CaWO_4$ (เส้น) และ Gd_2O_2S:Tb (บาร์แท่ง)



รูปที่ 2.11 จากภาพแสดงให้เห็นว่า $CaWO_4$ ปล่อยแสงออกมาในช่วงที่เหมาะกับ Blue film แต่ Gd_2O_2S:Tb มีค่าสูงสุดของสเปคตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาเหมาะสมกับฟิล์มชนิด Green film

จากหลักการนี้เอง จึงเป็นช่องทางในการพัฒนาไปสู่ตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดที่ใช้แผ่นเรืองแสง โดยเปลี่ยนตัวรับแสงจากฟิล์มเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photo-detector) นั่นเอง ซึ่งถ้าเราเข้าใจคุณสมบัติเฉพาะของสารเรืองแสงที่จะนำมาใช้ เราก็จะสามารถเลือกอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่เหมาะสมเข้ากันมาใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการตรวจจับแสง และนำไปสู่การพัฒนาตัวตรวจจับเอกซเรย์นั่นเอง

การตรวจจับรังสีโดยใช้สารเรืองแสงเป็นเทคนิคที่มีการใช้มาอย่างยาวนาน แต่ยังคงเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาและใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยที่คุณสมบัติของสารเรืองแสงที่ดีมีดังต่อไปนี้ [5]

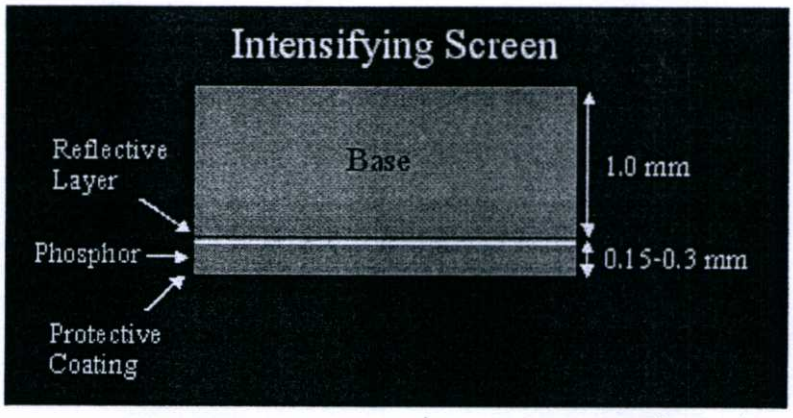
1. สามารถเปลี่ยนพลังงานพลังงานจลน์ของประจุให้เป็นพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับได้ด้วยค่าการเปลี่ยนถ่ายที่สูง
2. การเปลี่ยนถ่ายพลังงานนี้ควรมีการสนองที่เป็นเส้นตรงตลอดช่วงการเปลี่ยนถ่าย
3. ตัวกลางควรโปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน
4. เวลาที่ใช้ในลดลงของแสงหลังจากรับรังสีควรมีค่าสั้น
5. วัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีและมีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการนำมาทำตัวตรวจจับ ดัชนีการหักเหควรมีค่าใกล้เคียงกับกระจก (~1.5) เพื่อให้มีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดี

ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้ใช้แผ่นเรืองแสงที่ใช้กับฟิล์มเอกซเรย์ โดยเรียกทั่วไปว่า แผ่นสกรีน (Intensifying Screen) ซึ่งเป็นการประยุกต์นำสารเรืองแสงมาอัดให้เป็นแผ่นเพื่อให้สามารถใช้ร่วมกับฟิล์มเอกซเรย์ได้ง่าย การใช้แผ่นเรืองแสงร่วมกับระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์จะใช้ต้นทุนที่ไม่สูง เนื่องจากแผ่นเรืองแสงมีราคาไม่แพงมาก เมื่อเทียบกับการเคลือบสารเรืองแสงไปบนผิวของตัวรับแสง จึงเหมาะจะนำมาใช้กับระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ต้นแบบของงานวิจัยนี้

แผ่นเรืองแสงหรือแผ่นสกรีน (Intensifying Screen)

แผ่นเรืองแสงประกอบไปด้วยชั้นวัสดุที่มีหน้าที่ต่างๆ ทั้งสิ้น 4 ชั้น ดังรูปที่ 2.12 ได้แก่

1. ชั้นป้องกัน (Protective Coating) เป็นชั้นนอกสุดของแผ่นเรืองแสงซึ่งเป็นด้านที่สัมผัสกับอุปกรณ์รับแสง เช่น ฟิล์มเอกซเรย์ เป็นต้น โดยทำหน้าที่ปกป้องชั้นอื่นๆ ที่อยู่ภายใน ให้ความแข็งแรง ป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการเสียดสีกับฟิล์ม และสามารถเช็ดทำความสะอาดได้โดยไม่ทำลายชั้นฟอสเฟอร์ หนาประมาณ 10-20 μm
2. ชั้นสารเรืองแสง (Phosphor) มีความหนาตั้งแต่ 50-300 μm ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นเรืองแสง ประกอบไปด้วยสารเรืองแสงชนิดต่างๆ เช่น Calcium Tungstate หรือ Rare Earth เป็นต้น โดย Calcium Tungstate เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเอกซเรย์จะเปล่งแสงในช่วงสีน้ำเงิน แต่ Rare Earth จะเปล่งแสงในช่วงสีเขียวและเหลือง ดังนั้น แผ่นเรืองแสงแต่ละชนิดจึงเหมาะกับอุปกรณ์รับแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แผ่นเรืองแสงประเภท Rare Earth จะเหมาะกับ Green Film เท่านั้น เป็นต้น
3. ชั้นยึดติด (Reflective Layer) ทำหน้าที่ยึดชั้นสารเรืองแสงกับชั้นฐานไว้ด้วยกัน
4. ชั้นฐาน (Base) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่พยุงชั้นสารเรืองแสง หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.12 (รูปซ้าย) แสดงลักษณะของแผ่นสกรีนที่นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งโดยทั่วไปจะติดอยู่กับ Cassette และ (รูปขวา) แสดงโครงสร้างภายในของแผ่นเรืองแสงทั้ง 4 ชั้น

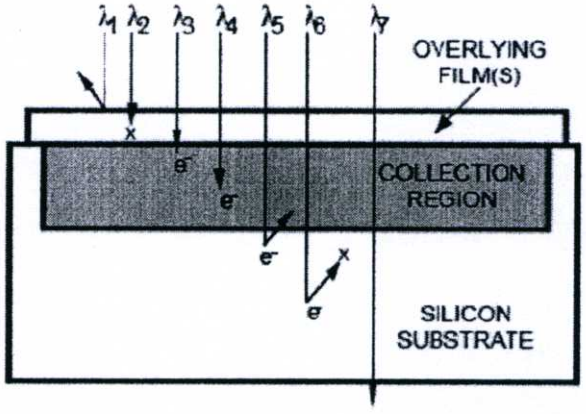
2.3 หลักการและคุณสมบัติของอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge-Coupled Device หรือ CCD)

อุปกรณ์ถ่ายเทประจุ หรือซีซีดี (Charge-Couple Device; CCD) ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในช่วงปลายทศวรรษ 1960 โดย Bell Labs โดยเบื้องต้นมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนา Computer memory circuit และในปี ค.ศ. 1970 ได้ถูกนำออกมาสาธิตการใช้งาน อย่างไรก็ตามซีซีดียังสามารถนำไปใช้งานในด้านอื่นๆ ได้อีก รวมไปถึงการประมวลผลของสัญญาณ (Signal Processing) และการสร้างภาพ (Imaging) ในที่สุดซีซีดีก็ได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถตอบสนองกับแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.1 ไมโครเมตร/ไมครอน (ช่วงสเปคตรัมของแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาคือ 0.4-0.7 ไมโครเมตร/ไมครอน) ในปัจจุบัน การนำซีซีดีมาใช้ในการสร้างหน่วยความจำจึงลดลง แต่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและสร้างภาพ (Imaging Sensor) กันอย่างแพร่หลาย

2.3.1) การสร้างภาพของซีซีดี มี 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> การเปลี่ยนจากแสง (โฟตอน) เป็นประจุไฟฟ้า

การทำงานเริ่มขึ้นเมื่อแสงในรูปของโฟตอนให้ตกลงไปยังภาพเป็น Array ของพิกเซล และจะเกิดการดูดซับโฟตอน โดยซิลิกอนและทำให้เกิดการตอบโต้ขึ้น เป็นการสร้างหลุมอิเล็คตรอน (Electron Hold) ดังรูปที่ 2.13

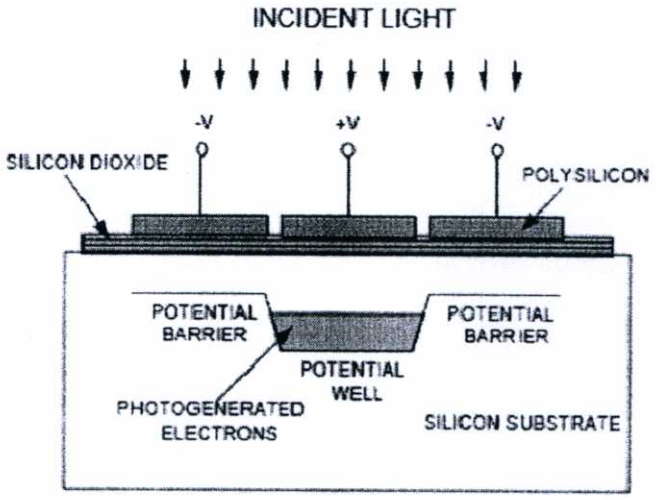


รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาของโฟตอนกับซิลิกอน (Photon Interaction with Silicon)

จำนวนของอิเล็กตรอนที่ได้ในแต่ละพิกเซลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานแสงและแสงที่ฉายลงไป และเป็น Non-Linear กับความยาวคลื่น (Wave Length) ดังนั้น จึงมีการฉาบฟิล์มบางๆ บนผิวของซิลิกอนเพื่อลดการหักเหของแสงที่อาจเกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุ จากรูป 2.13 จะเห็นว่าโฟตอนจะถูกดูดซับที่ความลึกต่างๆ กันของซิลิกอนแล้วแต่ความยาวคลื่นของโฟตอน และบางส่วนไม่สามารถตรวจจับได้

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> Potential Wells and Barriers

ซีซีดีถูกผลิตขึ้นตามหลักของ MOS (Metal Oxide Semiconductor) โครงสร้างซีซีดีจึงประกอบไปด้วยชั้นต่างๆ ซ้อนกันตามแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.14 โดยจะมีชิ้นของตัวนำวางอยู่บนสารกึ่งตัวนำซึ่งแยกออกจากกันโดยใช้ Silicon dioxide



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของซีซีดีชนิด Potential Wells and Barriers

การจ่ายแรงดันให้กับ Polysilicon gate จะทำให้ความต่างศักย์ของไฟฟ้าสถิตของซิลิกอนเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดความต่างศักย์ที่สามารถตรวจจับได้เมื่อมีการสร้างอิเล็กตรอนจากแสงที่ตกกระทบ (Incident light) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ Gate เหล่านั้นนั่นเอง

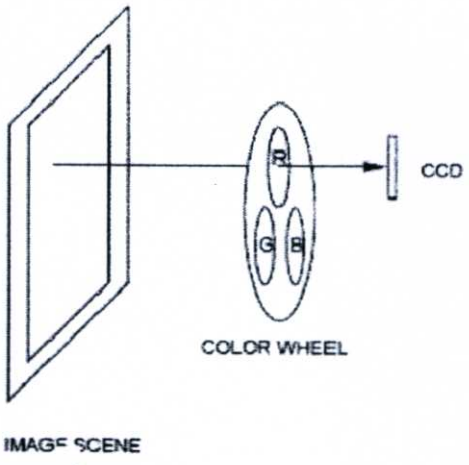
<u>ขั้นตอนที่ 3</u> Readout Techniques

ประจุที่ได้จะถูกส่งเป็นผลลัพธ์ไปยังอุปกรณ์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดัน โดยเทคนิคในการเปลี่ยนนี้ก็คือ การใช้ Floating diffusion sense node ตามด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันตามแหล่งจ่ายของวงจร ในการทำงานเริ่มจากการเคลียร์อุปกรณ์ผ่านทาง reset gate และ reset drain เพื่อเป็นการคายประจุ จากนั้น แรงดันที่จ่ายเข้าไปใหม่จะไปทำการชาร์ตประจุอีกครั้งและทำการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง และส่งไปยัง Output ของอุปกรณ์

2.3.2) เทคโนโลยีของซีซีดี

2.3.2.1) การใช้ซีซีดีในการสร้างภาพสีเดียว (Monochrome) ทำให้ไม่เป็นธรรมชาติในการที่จะระบุสีต่างๆ ดังนั้น จึงมีวิธีการในการที่จะแยกสีต่างๆ ออก 3 วิธี

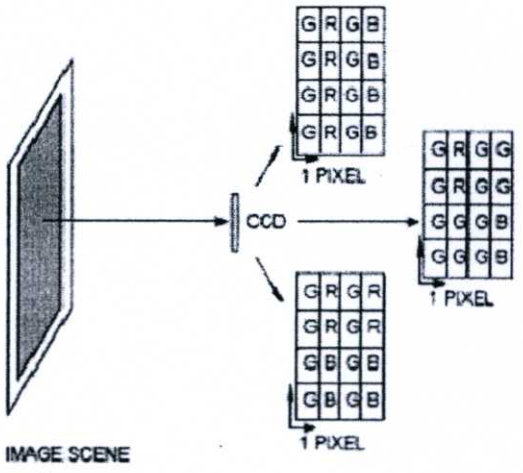
- Color Sequential วิธีการนี้จะทำให้การใช้การฉายแสงสลับกันไปทีละสี โดยใช้ตัวกรองแสงตามแต่ละสีที่ต้องการ และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นรูปใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ข้อดีของวิธีนี้คือ จะได้คุณภาพของภาพเหมือนเดิมกับการใช้ซีซีดีสีเดียว ส่วนข้อเสียคือ การใช้แหล่งกำเนิดแสงสามแหล่งจะทำให้ลดจำนวนภาพในแต่ละหน่วยเวลาลงถึง 3 เท่า



รูปที่ 2.15 Color sequential capture

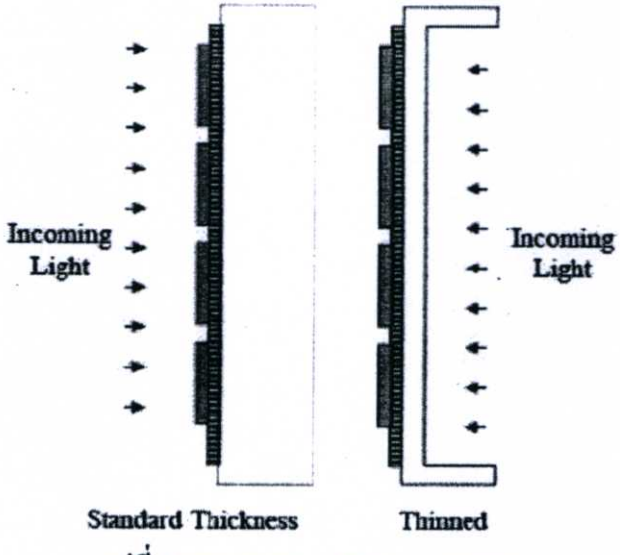
- Three-Chip Color จะเป็นการใช้การสลับสี โดยใช้วงจรของ Filter การใช้ Three-Chip Color จะใช้แสงในการแยกภาพออกเป็น 3 ภาพย่อย (ตามสีที่แยกได้) และให้ซีซีดีในแต่ละช่วงสี ซึ่งวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมและอ่านค่าพร้อมๆ กัน วิธีชี้ภาพจะถูกสร้างขึ้นโดยการ Synchronizing Output ระหว่างซีซีดี ถึง 3 แสง นำมาสร้างเป็นภาพเดียว ดังรูป 2.15 ข้อดีของวิธีนี้ คือ มีอัตราการทำงานเท่ากับการใช้ซีซีดีเพียงชุดเดียว แต่ข้อเสียคือ มีความซับซ้อนสูงมาก, การปรับค่าของซีซีดีแต่ละหน่วยเป็นไปได้ยาก และ effective data rate เป็น 3 เท่า

- Integral Data Filter Array แทนที่จะใช้ในการสร้าง chip ซึ่งแยกสีต่างๆ เป็น 3 สี วิธีนี้จะมีการสร้างคุณสมบัติพิเศษบน Chip ให้สามารถตอบสนองต่อสีทั้ง 3 ได้ด้วยตนเองในแต่ละพิกเซล โดยการใช้ Photo resists ในรูปแบบต่างๆ แต่การตรวจรับจะได้สีในรูปแบบ CMY (Cyan, Magenta, Yellow) ดังรูป 2.16 วิธีนี้จะทำให้ได้รูปที่ไม่เป็นธรรมชาติเนื่องจากไม่ได้สีเป็นแบบ RGB อีกทั้งข้อมูลยังสูญหายไปบางส่วน ทำให้รายละเอียดของภาพลดลงจึงต้องเพิ่ม Sampling และมีการสร้างพิกเซลที่มีข้อมูลของสีที่ขาดหายไปขึ้นมาใหม่



รูปที่ 2.16 Integral Color Filter Array Patterns

2.3.2.2) การทำให้ซิลิกอนบางลง (Silicon Thinning) ดังที่กล่าวมาแล้ว ฟิล์มบางๆ จะช่วยในการดูดซับการสะท้อนแสงตามความยาวคลื่น แล้วอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นด้านบนของพื้นผิว (ปกติจะเป็นแสงอัลตราไวโอเลตและแสงสีน้ำเงิน) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเกิดการสูญหายไปโดยการทำปฏิกิริยากับพื้นผิวซิลิกอน ในการเพิ่มการตอบสนองให้กับซีซีดีนั้นจำเป็นจะต้องทำให้ด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์บางลงซึ่งมีความหนาประมาณ 10-15 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.17 วิธีนี้ทำให้การตอบสนองของแสงสีน้ำเงินและอัลตราไวโอเลตดีขึ้น แต่ว่าราคาแพงและหยิบจับยากอีกด้วย

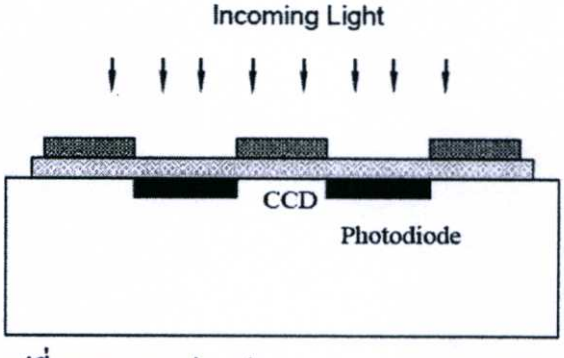


รูปที่ 2.17 Normal and Thinned CCD

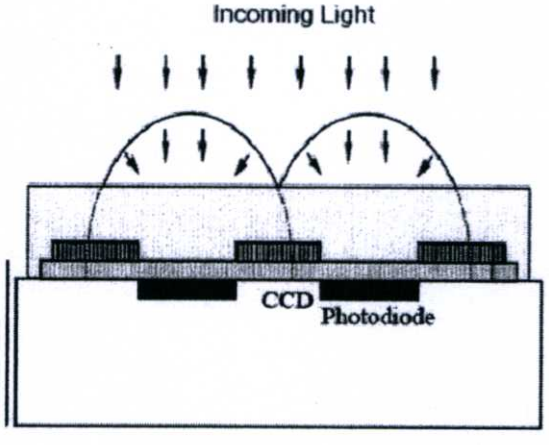
2.3.2.3) UV Enhancement Coating เนื่องจากว่าการทำให้ซิลิกอนบางลง (Silicon Thinning) นั้นทำได้ยาก ดังนั้นจะมีการเพิ่มฟอสเฟอร์ (Phosphor) ลงไปที่ด้านบนของซีซีดี โดยฟอสเฟอร์นี้จะ

มีลักษณะใสและหนาประมาณ 0.45 ไมโครเมตร ซึ่งจะทำให้ดูดซับ UV และแสงสีน้ำเงินให้มีความยาวคลื่นได้สูงขึ้น แต่ว่าในกรณีที่เกิดการกระเจิงของแสงจะทำให้ข้อมูลสูญหายได้

2.3.2.4) Microlenticular Array เนื่องจากการอ่านโดยใช้เทคนิค Inline (IL) จะทำให้มีความไวต่ำเนื่องจากต้องมีการเพิ่มแถวของโฟโตไดโอดขึ้น ดังนั้น เพื่อจะปรับปรุงความไวแสงให้มากขึ้นจะได้มีการสร้างเลนส์เล็กๆ คร่อมขึ้นในแต่ละพิกเซล ซึ่งเลนส์เหล่านี้จะทำการรวมแสงที่ส่งไปยังอุปกรณ์ซึ่งไม่ไวต่อแสง ให้ส่งไปยังบริเวณที่ไวต่อแสง (Photo Diode) เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 วิธีการนี้ทำให้ซีซีดีมีความไวแสงเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า แต่ทว่าวิธีการสร้างและออกแบบอุปกรณ์และเลนส์ทำได้ยากมาก



รูปที่ 2.18 แสดงส่วนประกอบของ Interline CCD



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบของ Interline CCD กับ Microlentcular Array

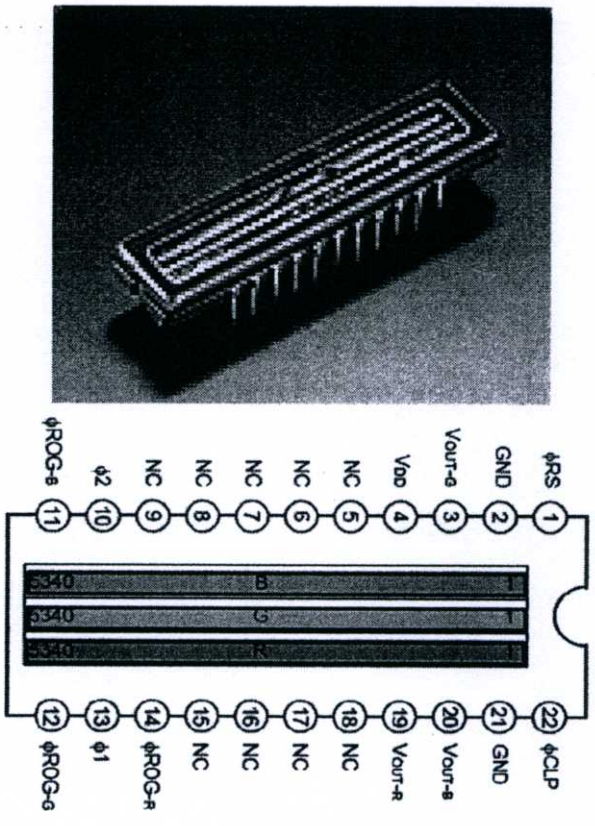
2.3.2.5) ซีซีดีความเร็วสูง (High Speed CCD) ในการพัฒนาซีซีดีให้สามารถรองรับอัตราการทำงานได้มากขึ้นนั้นจำเป็นต้องพัฒนาซีซีให้มีความไวสูงขึ้นตามไปด้วย เช่น

- การสร้างวงจรขยายสัญญาณบนซีซีดี ซึ่งจะต้องระมัดระวังไม่ให้ใช้พลังงานมากเกินไป เพราะจะทำให้คุณภาพของการอ่านข้อมูลลดลง

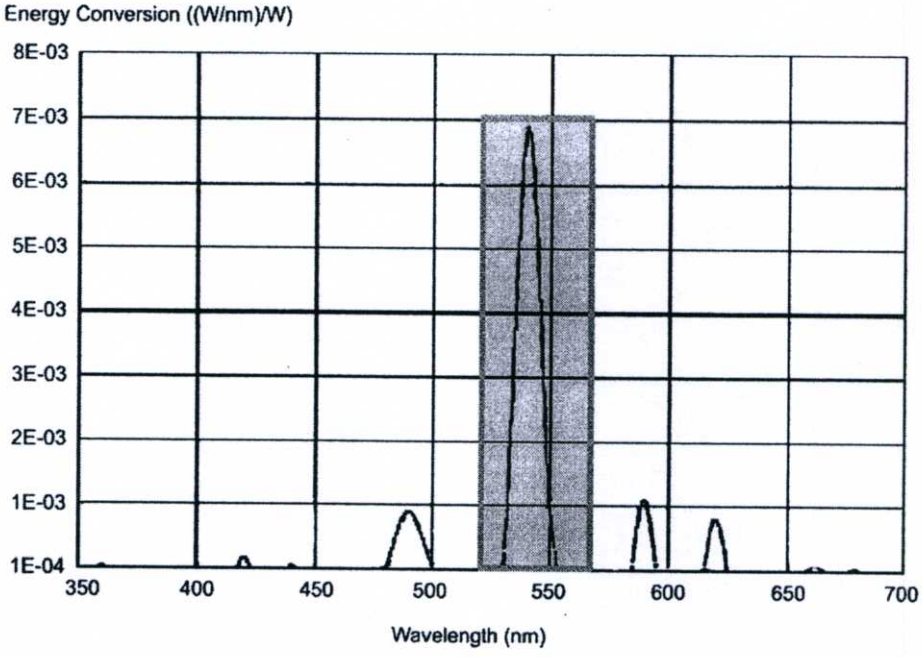
- การทำให้ซีซีดีมีหลายๆ output โดยการแบ่งกลุ่มของซีซีดีออกเป็นบล็อกแล้ว สามารถทำให้การอ่านข้อมูลทำพร้อมๆ กันได้ แต่จะต้องไม่ให้มีจำนวน output มากเกินไปจะทำให้การประมวลผลยุ่งยากนั่นเอง

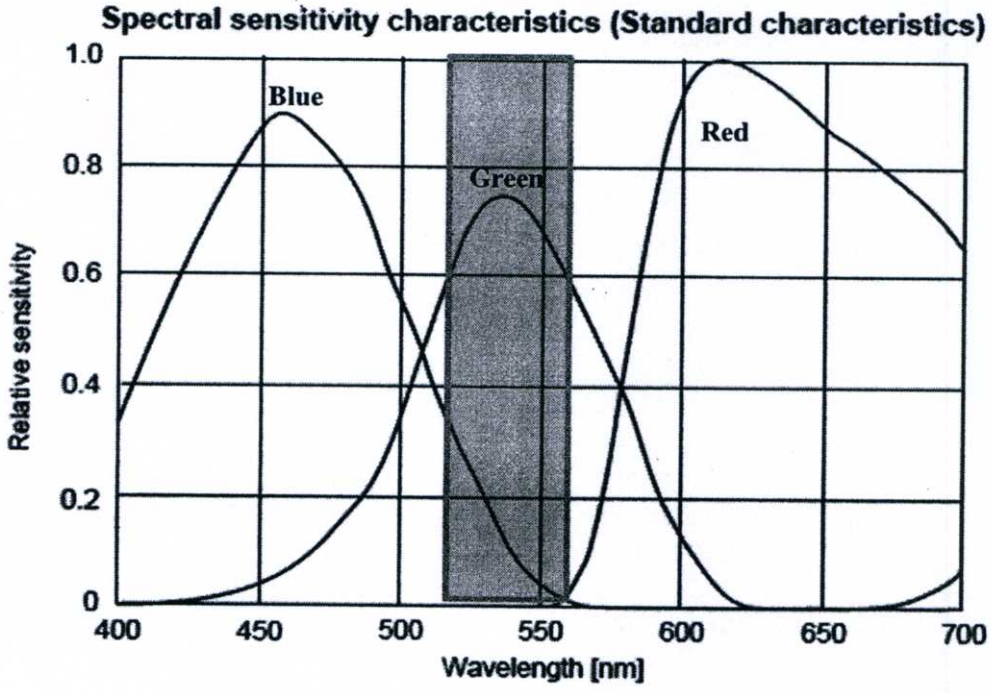
สำหรับการประยุกต์ใช้ในวงการแพทย์นั้น ได้มีการนำซีซีดีมาใช้ในการสร้างภาพเอกซเรย์ในเครื่อง Fluoroscory และ Digital Cineradiography เป็นต้น โดยจะมีวิธีการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ร่วมกับ Image Intensifier แล้วรวมแสงที่ได้ไปยังเลนส์ (lenses) หรือ Fiber Optic ที่อยู่บนซีซีดี

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Linear CCD รุ่น SONY ILX584 ขนาด 5340 pixel ขนาด 4x4 μm ซึ่งถือว่ามีความละเอียดสูงมาก และสามารถป้อนความถี่ในการอ่านได้สูงสุด 5 MHz โครงสร้างภายในประกอบด้วยตัวรับภาพเป็นแถว 3 แถวได้แก่ ตัวรับภาพสีแดง เขียว และน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งแต่ละสีจะมีคุณสมบัติในการตรวจจับสัญญาณแสงในแต่ละช่วงความถี่แสงแตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ช่องสัญญาณในการตรวจจับแสงเป็นสีเขียวเนื่องจากมีความสอดคล้องกันกับแผ่นเรืองแสงที่เลือกใช้ด้วย ดังแสดงในรูป 2.21



รูปที่ 2.20 Linear CCD รุ่น SONY ILX548 (รูปบน) ภายในประกอบไปด้วยตัวรับภาพ 3 แถว ได้แก่ ตัวรับภาพสีแดง เขียว และน้ำเงิน (รูปล่าง)

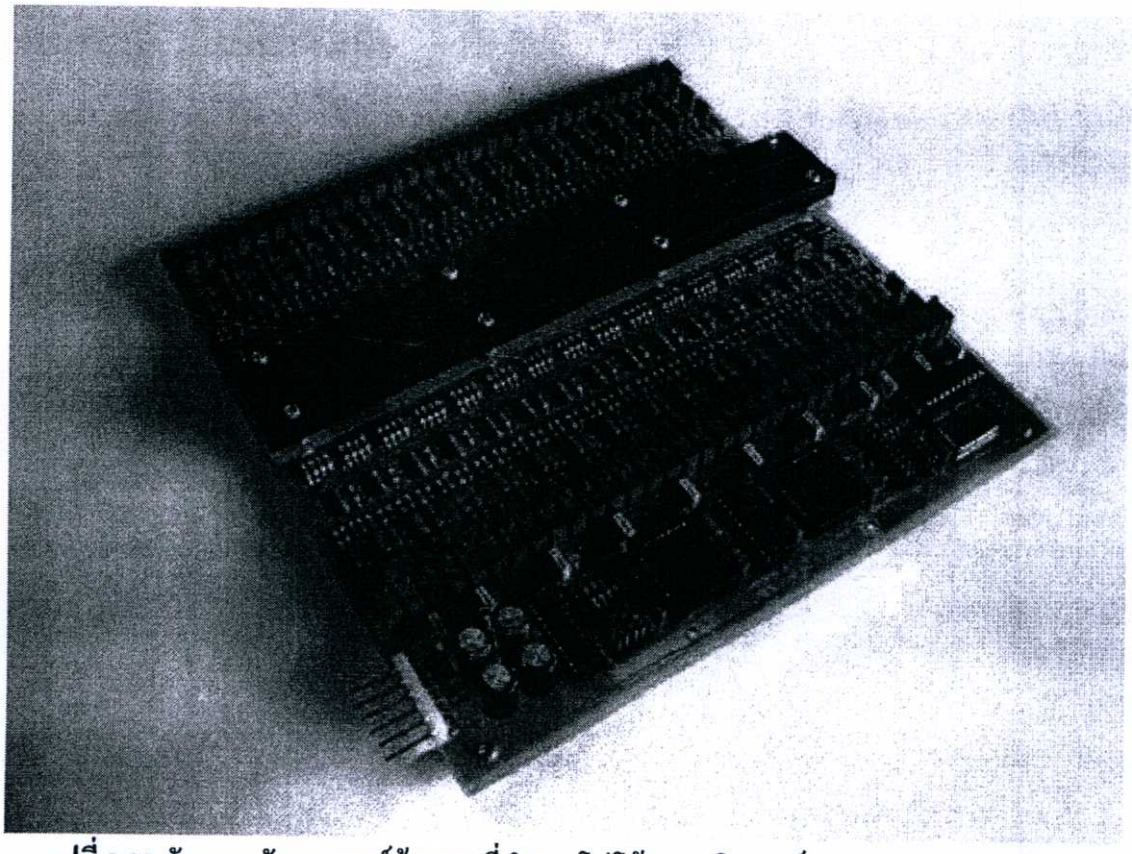




รูปที่ 2.21 (รูปบน) แสดงสเปคตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาจากแผ่นเรืองแสงชนิด Gd_2O_2S:Tb ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าช่วง Peak สูงสุดของสเปคตรัมอยู่ที่ประมาณ 540 nm, (รูปล่าง) กราฟแสดงช่วงการตอบสนองของแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ โดยซีซีดีสามารถตอบสนองต่อแสงได้ 3 สีดังรูป คือ น้ำเงิน เขียว และแดง ซึ่งเราจะเลือกใช้ช่วงตอบสนองต่อแสงสีเขียวเนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 nm ซึ่งตรงกันกับความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงนั่นเอง

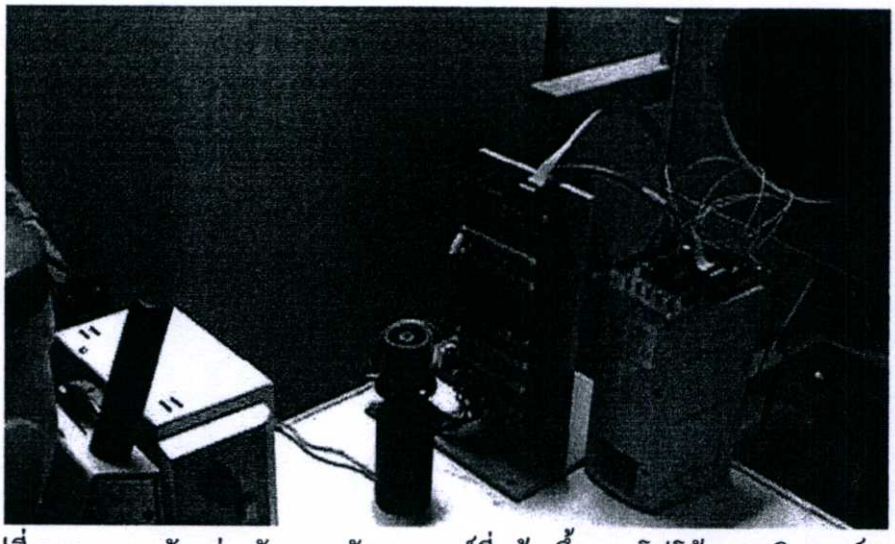
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2548 เอกภพ งามละเมียด [2] และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจจับเอกซเรย์โดยใช้โฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo-transister) เป็น Image Sensor โดยนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ขึ้น โดยใช้หลักการสร้างภาพทางอ้อม ซึ่งใช้แผ่นเรืองแสง ชนิด Gd_2O_2S:Tb เข้ามาช่วยในการแปลงสัญญาณเอกซเรย์ให้กลายเป็นสัญญาณภาพ ใช้ FPGA เป็นตัวควบคุมตัวตรวจจับเอกซเรย์ และส่งข้อมูลไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และนำระบบตัวตรวจจับเอกเรย์ที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางแบบลำแสงพัด (Fan Beam) จากผลการทดลองพบว่า โฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้นสามารถนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับเอกซเรย์ได้ โดยได้ความละเอียดของภาพ (Resolution) อยู่ที่ 5 line pair/ inch ซึ่งถือว่ายังมีความละเอียดของภาพไม่สูงนัก รูปที่ 2.22 แสดงตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดแถวยาวต้นแบบ



รูปที่ 2.22 ตัวตรวจจับเอกซเรย์ต้นแบบที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ของเอกภพ งามละเมียด

ในปี พ.ศ. 2550 ธเนศ อังศุวัฒนากุล และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้โฟโต้ทรานซิสเทอร์เป็นตัวรับแสง โดยเพิ่มตัวตรวจจับเอกซเรย์แถวยาวจาก 64 ตัว เป็น 256 ตัว อีกทั้งยังเปลี่ยนแปลงชนิดของโฟโต้ทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดที่เล็กลงกว่าเดิมเพื่อเพิ่มความละเอียดของภาพ นอกจากนั้น ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้การเคลือบสารเรืองแสงบนตัวตรวจจับเอกซเรย์แต่อย่างใด แต่เป็นการนำแผ่นเรืองแสงที่สามารถหาได้ง่ายกว่าในท้องตลาดมาใช้แทน จากผลการทดลอง พบว่า ความละเอียดของภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ สามารถแยกรายละเอียดในภาพได้ 1.1 mm



รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ของธเนศ อังศุวัฒนากุล

จากงานวิจัยทั้งสอง ที่ได้ศึกษาการสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์โดยใช้โฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้น ต่างประสบปัญหาคล้ายๆ กัน คือ ช่วง Spectral Sensitivity ของโฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้น ไม่ตรงกันกับช่วง Peak ของแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงหรือสารเรืองแสง ซึ่งโดยปกติแล้ว โฟโต้ทรานซิสเตอร์จะไวต่อแสงสีแดง ในขณะที่แผ่นเรืองแสงที่นำมาใช้ในงานวิจัยกลับเปล่งแสงสีเขียว ซึ่งมีย่านความถี่ไม่สอดคล้องกัน จึงทำให้ไม่สามารถดึงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์มาใช้ได้อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังไม่สอดคล้องกับแสงที่ต้องทำการตรวจจับ ทำให้ตัวตรวจจับเอกซเรย์มี Sensitivity ต่ำ นอกจากนั้น ปัญหาในเรื่องข้อจำกัดของตัวโฟโตทรานซิสเตอร์เอง ได้แก่ ขนาดของพิกเซลของโฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้นเล็กสุดมีขนาด 1.1 mm ซึ่งส่งผลให้ภาพที่ได้จากโฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้นมีความละเอียดจำกัด นอกจากนั้น ปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอของหัววัดในแต่ละพิกเซล ก็เป็นปัญหาสำคัญให้โฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้นมีความไม่สม่ำเสมอของการวัดสัญญาณใน 1 Line Scan

จากงานวิจัยก่อนหน้า ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ถึงปัญหา และข้อจำกัดต่างๆ ของ Image Sensor แต่ละตัว จนได้ข้อสรุปว่า การจะสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์ชนิดสร้างภาพทางอ้อม โดยใช้แผ่นเรืองแสงที่มีอยู่ในท้องตลาด ราคาไม่แพงมาก และสามารถหาได้ในประเทศนั้น จำเป็นจะต้องเลือกใช้ Image Sensor ที่มีประสิทธิภาพ ที่สำคัญจะต้องมีความเหมาะสมอีกด้วย คือ จะต้องเป็น Image Sensor ที่สามารถตรวจจับสัญญาณแสงได้ดีในช่วงที่สอดคล้องกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงให้ได้มากที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับเอกซเรย์ให้สูงขึ้น นอกจากนั้น ประเด็นในเรื่องของความละเอียดของภาพเอกซเรย์ที่ได้เป็นประเด็นสำคัญที่ต้องแก้ไขและพัฒนาให้ดีขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้สามารถนำตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่พัฒนาขึ้นนี้มาใช้งานได้จริงกับงานได้หลากหลายประเภทนั่นเอง

จากการค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของ Image Sensor ชนิดต่างๆ ผู้วิจัยพบว่า อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดี (Charge-Coupled Device; CCD) นั้น มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้งานร่วมกับแผ่นเรืองแสงได้ดี เนื่องจากซีซีดีสามารถตอบสนองต่อแสงได้ 3 สี คือ น้ำเงิน เขียว และแดง โดยมีช่วง Peak ของแสงสีเขียวตรงกันกับช่วง Peak ของสเปคตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง นอกจากนั้น ขนาดของพิกเซลของซีซีดีนั้น มีขนาดเล็กมากถึง 4 ไมครอน ซึ่งส่งผลให้สามารถสแกนรายละเอียดของภาพได้สูงกว่าโฟโตทรานซิสเตอร์หลายเท่าตัว ยิ่งมีการพัฒนาในแง่ของความสามารถและประสิทธิภาพของระบบให้สามารถส่งถ่ายข้อมูลและประมวลผลได้รวดเร็วด้วยแล้ว ดังนั้น ซีซีดีก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เหมาะสมจะนำมาศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเป็นตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกซีซีดีมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง โดยใช้งานควบคู่กับแผ่นเรืองแสงชนิด Gd_2O_2S:Tb ในระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่จะสร้างขึ้นนั่นเอง

บทที่ 3
ระเบียบวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงขั้นตอนในการศึกษาวิจัย เพื่อสร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์จากอุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดีชนิดแถวยาวร่วมกับแผ่นเรืองแสง และการทดลองนำระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นนี้ไปทดลองสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติ ดังกล่าวไว้ในวัตถุประสงค์งานวิจัยในบทนำนั่นเอง โดยขั้นตอนในการวิจัยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

3.1) การออกแบบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์และการเชื่อมต่อตัวตรวจจับเอกซเรย์เข้ากับคอมพิวเตอร์

3.2) การทดลองทางแสงเพื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจจับเอกซเรย์

3.3) การทดลองกับเอกซเรย์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์และสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติ

โดยจะขออธิบายขั้นตอนการวิจัยต่างๆ โดยละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-ray Detector System Design)

ในส่วนนี้ขออธิบายโครงสร้างของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยระบบประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

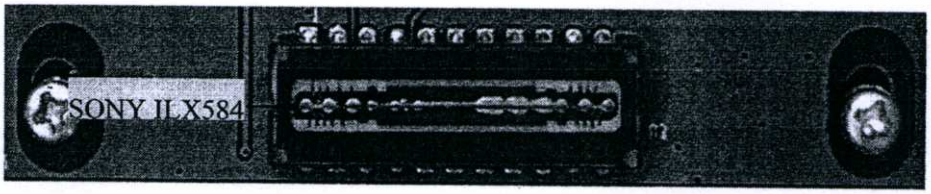
3.1.1) อุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดีชนิดแถวยาว (Linear CCD)

ในส่วนที่หนึ่ง เป็นส่วนของหน่วยตัวตรวจจับเอกซเรย์ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ถ่ายเทประจุหรือซีซีดีชนิดแถวยาวที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ SONY ILX584 ขนาด 5,340 pixel โดยมีขนาดต่อหนึ่งพิกเซลเท่ากับ 4x4 μm ซึ่งถือว่าเป็นซีซีดีที่มีความละเอียดสูงมากและสามารถป้อนความถี่ในการอ่านได้สูงสุดถึง 5 MHz โครงสร้างภายในประกอบด้วยตัวรับภาพเป็นแถวจำนวน 3 แถว ได้แก่ ตัวรับภาพสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งตัวรับภาพทั้งสามชนิดนี้จะมีคุณสมบัติในการตรวจจับสัญญาณแสงที่ความถี่ที่แตกต่างกัน

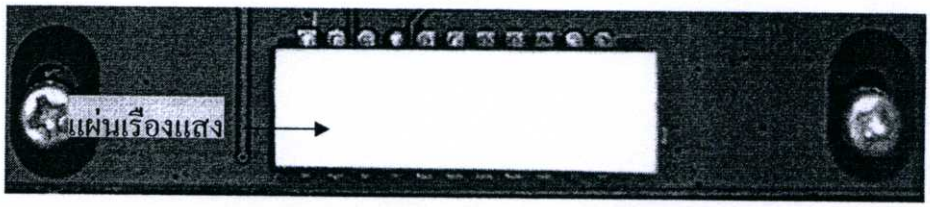
เนื่องจากว่าระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้มีระบบการสร้างภาพเอกซเรย์แบบทางอ้อม ซึ่งจะใช้สารเรืองแสงชนิด Rare Earth ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ $Gd_2O_2S:Tb$ เป็นตัวแปลงสัญญาณเอกซเรย์เป็นสัญญาณแสงสีเขียว โดยทำการแปะแผ่นเรืองแสงบนหน้าสัมผัสของซีซีดี ดังรูปที่ 3.1 โดยซีซีดีจะถูกนำมาใช้เป็นตัวรับสัญญาณแสงเพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซีซีดีที่เป็นตัวรับภาพสีเขียวเพื่อให้เหมาะสมกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงที่เลือกใช้นั่นเอง

ซีซีดีที่นำมาใช้ในการตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงนั้นจะได้รับเอกซเรย์ที่มาตกกระทบโดยตรง ดังนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากคลื่นเอกซเรย์ซึ่งมีความถี่สูงมารบกวน จึงต้องทำการปิดกั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากเอกซเรย์ด้วยแผ่นตะกั่ว ดังรูปที่ 3.1 แล้ว

จึงทำการปิดทับด้วยแผ่นอะคริลิคสีดำอีกชั้นเพื่อป้องกันความเสียหายและเพิ่มความแข็งแรงให้หน่วยตรวจจับเอกซเรย์

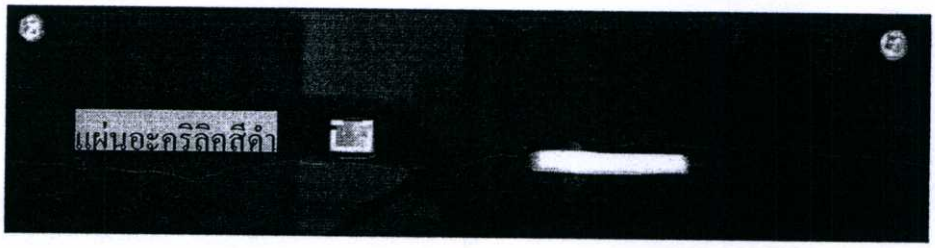


(A)

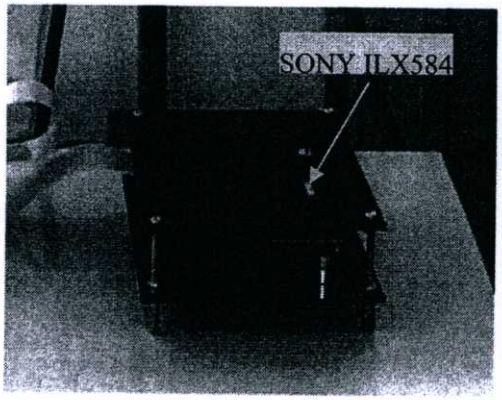


(B)

(C)



(D)



(E)

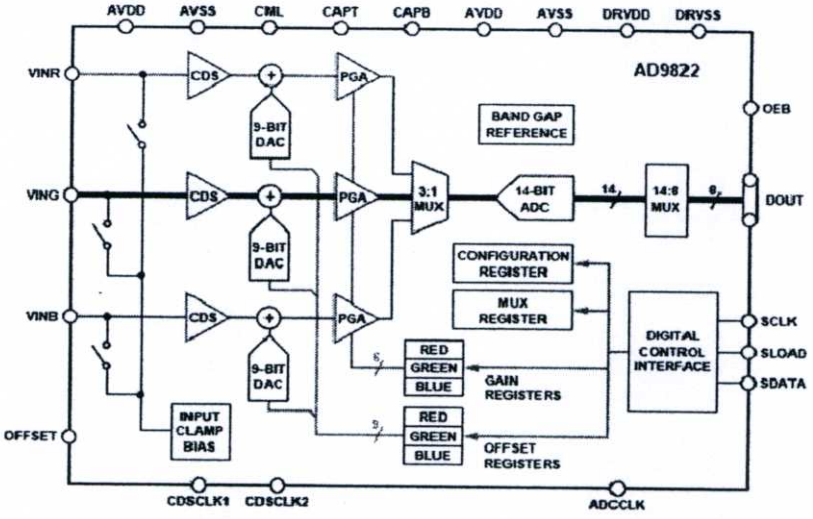
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการประกอบหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ รูป (A) ซีซีดีที่ใช้ในงานวิจัย, รูป (B) นำแผ่นเรืองแสงมาปิดแนบกับหน้าสัมผัสซีซีดี, รูป (C) แผ่นตะกั่วที่ปิดทับบนแผ่นเรืองแสงและซีซีดี, รูป (D) แผ่นอะคริลิคสีดำปิดทับแผ่นตะกั่วเป็นชั้นสุดท้าย, และ รูป (E) หน้าตาของหน่วยตรวจจับเอกซเรย์ที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.1.2) ภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก (Analog Frontend)

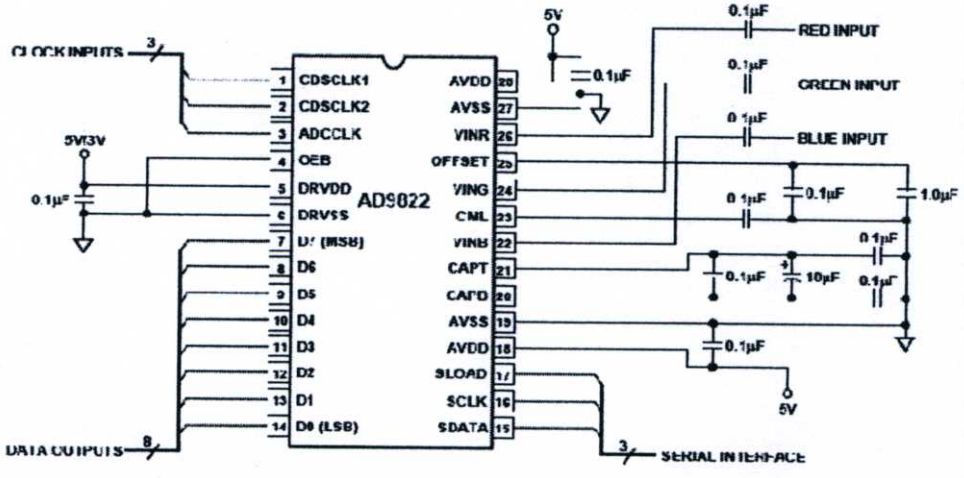
ในส่วนที่สอง เป็นส่วนของการจัดการสัญญาณแอนะลอกที่ซีซีดีรับได้จากแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง โดยภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก หรือ Analog Frontend นี้จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแอนะลอกที่รับได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ชนิด AD9822 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เฉพาะทางกับตัว Flat Scan หรือ Linear CCD นั่นเอง

โครงสร้างภายใน AD9822 ประกอบด้วย ADC ขนาด 14 bit, Input Clamp, CDS (Correlated Double Sampling), Gain Calibrations, และ Offset Calibration เป็นต้น AD9822 สามารถควบคุมการทำงานได้โดยง่าย โดยสามารถโปรแกรมผ่านทางพอร์ตอนุกรม (Serial Port)

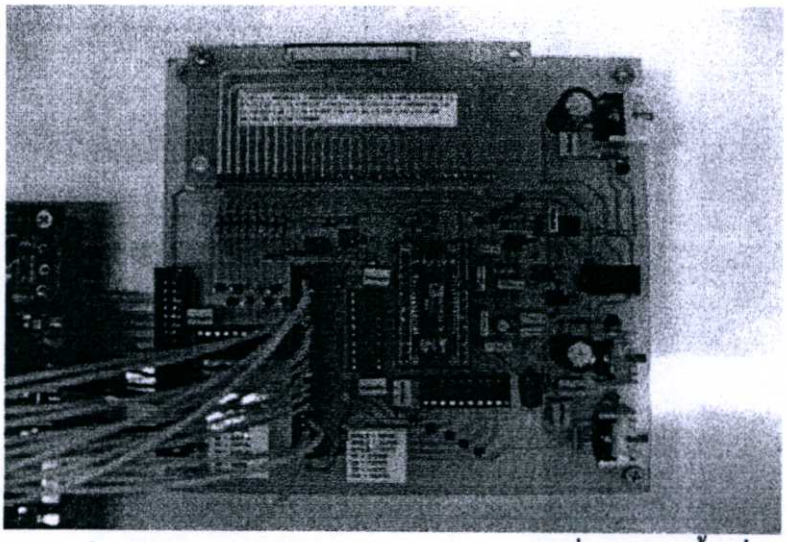
รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในของ AD9822, รูปที่ 3.3 แสดงการต่อใช้งานวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก และ รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอกที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของโครงสร้างภายใน AD9822



รูปที่ 3.3 แสดงการต่อใช้งานวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอก



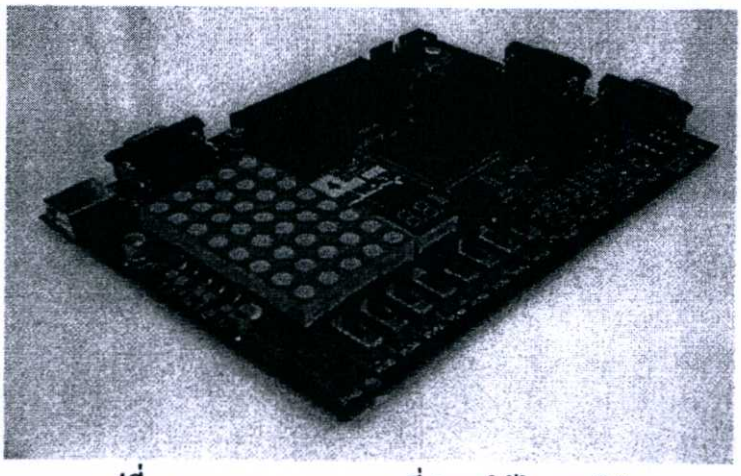
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรในส่วนของภาคจัดการสัญญาณแอนะลอกที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัย

3.1.3) Field Programmable Gate Array (FPGA)

ส่วนที่สาม เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ทั้งหมด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Field Programmable Gate Array หรือ FPGA โดยมีหน้าที่หลักๆ 3 ประการ ได้แก่

- สร้างสัญญาณควบคุมซีซีดี และAnalog Frontend
- เป็นตัวเก็บและส่งผ่านข้อมูล
- เป็นตัวจัดการข้อมูล

โดยเลือกใช้ FPGA ตระกูล SPATAN3 ชนิด S250 ซึ่งมี Logic Gate ภายในจำนวน 250,000 Gates FPGA นั้นเหมาะสำหรับการใช้งานในด้านการสร้างสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆ เป็นอย่างมาก เนื่องจาก FPGA สามารถทำงานเป็น Parallel ได้ จึงทำให้สามารถรับส่งสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆ ได้รวดเร็ว นอกจากนั้น ในการออกแบบฮาร์ดแวร์ในวงจรดิจิตอลก็สามารถทำได้โดยง่าย เนื่องจากใช้ภาษาในการอธิบายพฤติกรรมเชิงฮาร์ดแวร์ หรือ ภาษา VHDL ซึ่งสามารถแก้ไขปรับปรุงได้โดยง่าย รูปที่ 3.5 แสดงรูปถ่ายวงจร FPGA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.5 แสดงวงจร FPGA ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

FPGA จะทำการสร้างสัญญาณต่างๆ ที่สำคัญต่อการควบคุมระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ ดังต่อไปนี้

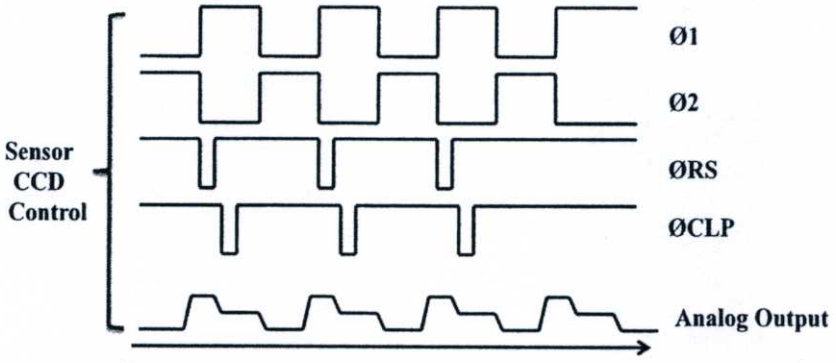
1) สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุมซีซีดี ซึ่งต้องการสัญญาณต่างๆ (ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7) ได้แก่

- สัญญาณ ROG หรือสัญญาณ Shutter ภาพ: ใช้ในการติดต่อเพื่อเก็บสัญญาณภาพและทำหน้าที่บอกตำแหน่งเริ่มต้นในการอ่านข้อมูลจากตัวซีซีดี

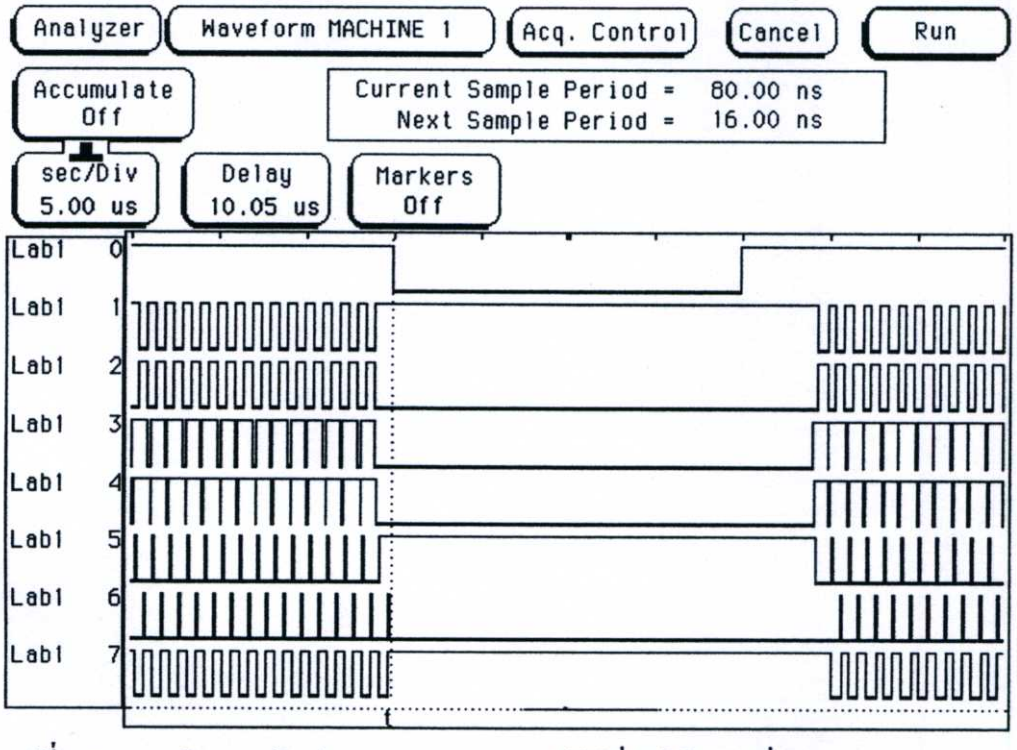
- สัญญาณ PHASE 1 และ PHASE 2: ใช้ในการซิงโครไนซ์สัญญาณภาพแต่ละพิกเซลให้มีความสอดคล้องในขณะที่อ่านข้อมูลแต่ละจุด

- สัญญาณ RS: ใช้ในการรีเซทสัญญาณในแต่ละพิกเซลของตัวซีซีดีในขณะที่อ่านข้อมูลในแต่ละจุด

- สัญญาณ CLP: ใช้ในการเปิดในส่วนของวงจรยกระดับสัญญาณในขณะที่อ่านข้อมูลในแต่ละจุด



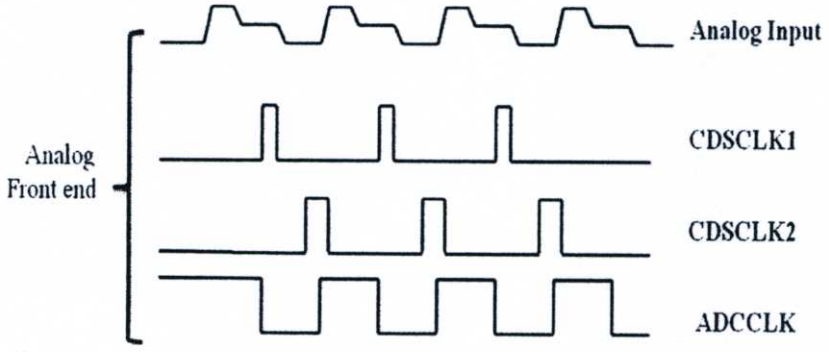
รูปที่ 3.6 สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุมซีซีดีที่ FPGA สร้างขึ้น



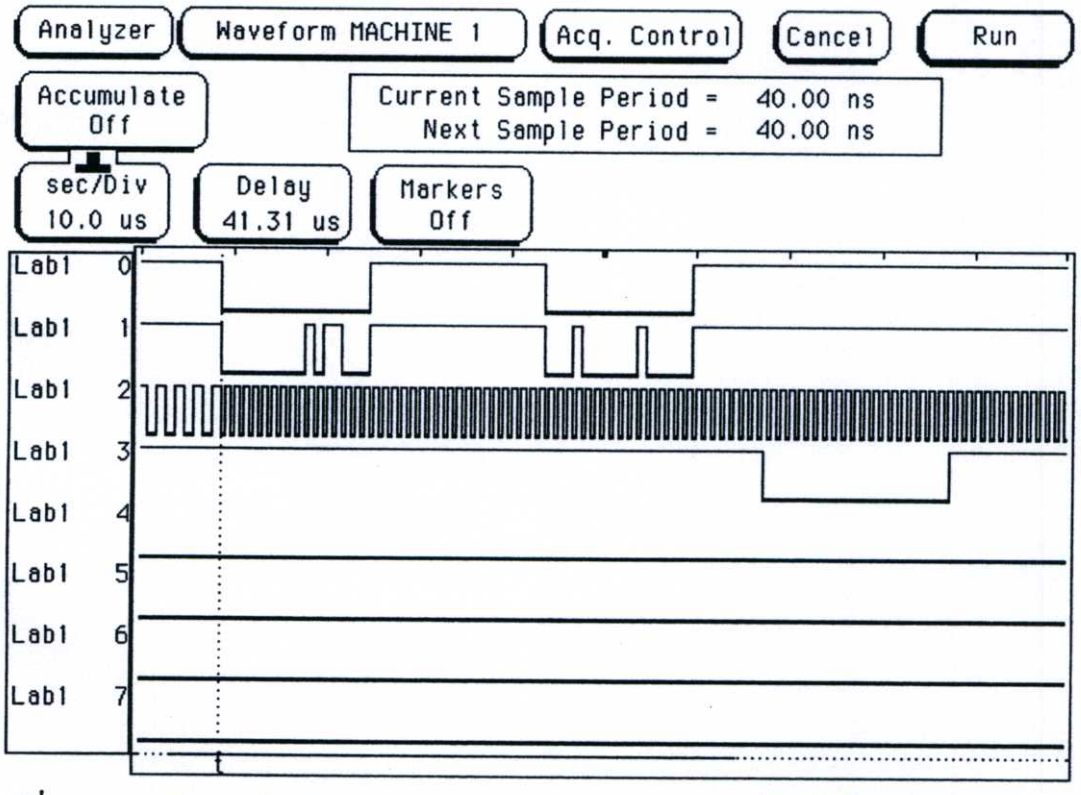
รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณในส่วนของวงจรควบคุมซีซีดีที่วัดได้จากเครื่อง Digital Analyzer

2) สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุม Analog Frontend ซึ่งต้องการสัญญาณต่างๆ (ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9) ได้แก่

- สัญญาณ CDSCLK1: ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสัญญาณเอาท์พุตของซีซีดี
- สัญญาณ CDSCLK2: ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสัญญาณเอาท์พุตของซีซีดีที่มีการเปลี่ยนแปลงตามแสงที่ตรวจจับได้
- สัญญาณ ADCCLK: เป็นสัญญาณการควบคุมช่วงการทำงานของการแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และใช้สัญญาณนี้ในการอ่านข้อมูลดิจิตอลเพื่อส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย



รูปที่ 3.8 สัญญาณในส่วนของวงจรควบคุม Analog Frontend ที่ FPGA สร้างขึ้น



รูปที่ 3.9 แสดงสัญญาณในส่วนของวงจรควบคุม Analog Frontend ที่วัดได้ด้วย Digital Analyzer

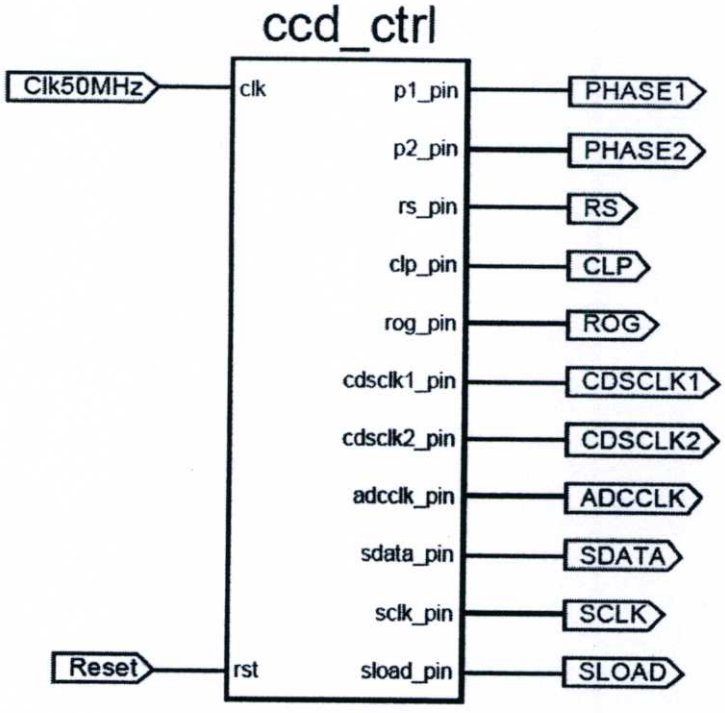
3) สัญญาณในส่วนของการตั้งค่าพารามิเตอร์ให้กับวงจรควบคุม Analog Frontend ซึ่งต้องการสัญญาณต่างๆ ได้แก่

- สัญญาณ SLOAD: เป็นสัญญาณแสดงช่วงการทำงานที่ใช้ในการโหลดข้อมูลในการตั้งโหมดการทำงานของตัววงจร (คอนฟิค)

- สัญญาณ SDATA: เป็นสัญญาณที่ใช้ในการเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร ได้แก่ โหมดการทำงานของอุปกรณ์อินพุต เช่น ซีซีดีใช้ CDS mode หรือ CIS ใช้ SHA mode, การปรับค่าการเลือกทำงานของอินพุตที่เลือกใช้ (MUX), การปรับค่าอัตราการขยาย (Gain), การปรับค่าชดเชยความไวของอุปกรณ์ (Offset) เป็นต้น

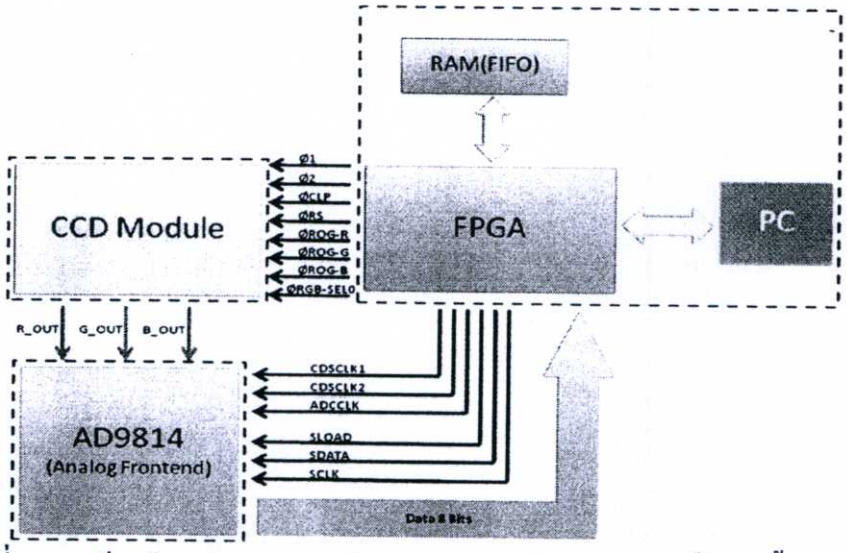
- สัญญาณ SCLK: เป็นสัญญาณควบคุมช่วงการทำงานให้สัญญาณมีความสอดคล้องในขณะที่ทำการโหลดข้อมูลลงในตัวไอซี (ซิงโครไนซ์)

สัญญาณต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นด้วย FPGA โดยสัญญาณควบคุมระบบต่างๆ ของระบบที่ FPGA สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.10

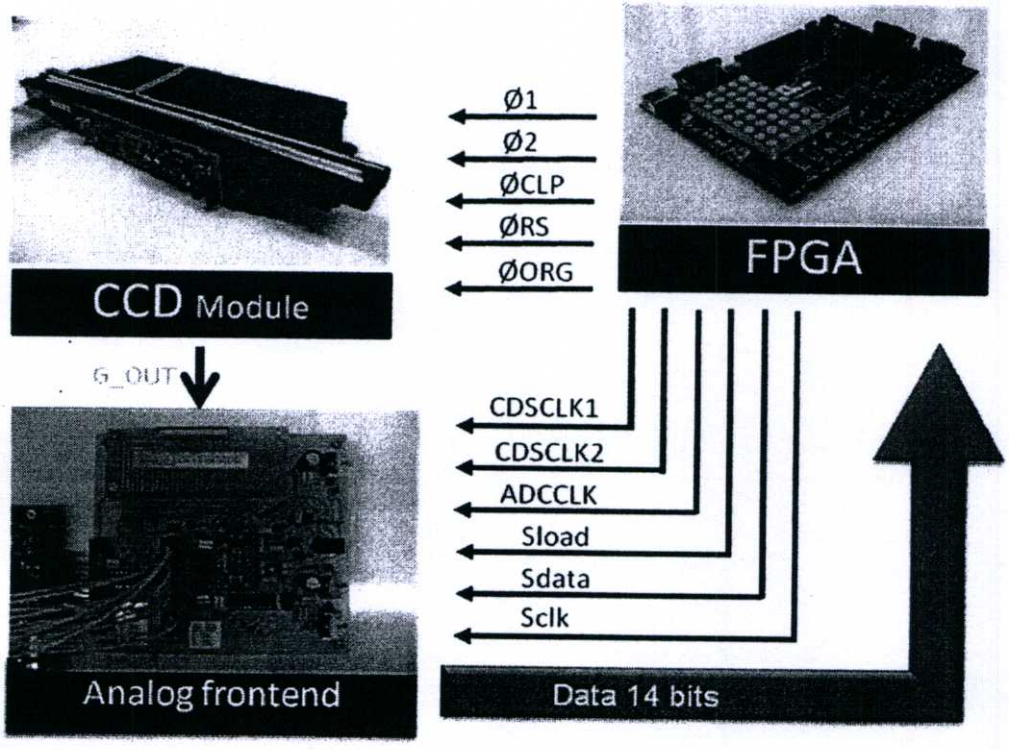


รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงสัญญาณควบคุมระบบต่างๆ ที่ FPGA สร้างขึ้น

นอกจากสัญญาณดังกล่าวข้างต้น ยังต้องมีการสร้างสัญญาณต่างๆ เพื่อใช้ในการควบคุมการอ่านข้อมูลดิจิตอลเพื่อส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12

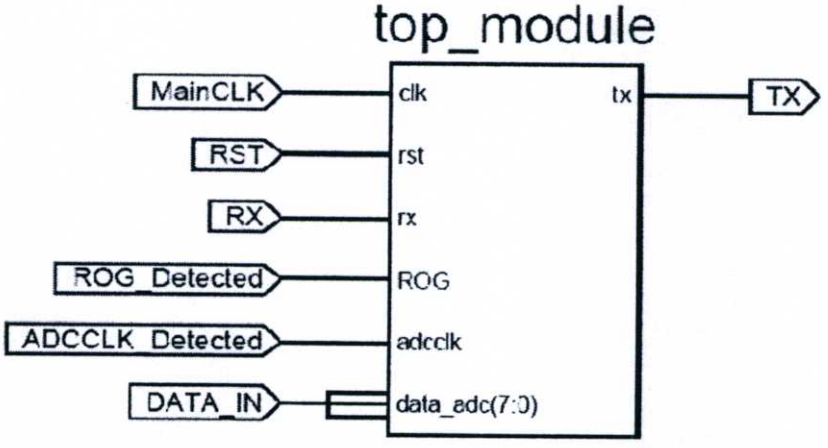


รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆ ที่สร้างขึ้นด้วย FPGA



รูปที่ 3.12 ภาพอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ของระบบและสัญญาณควบคุมในส่วนต่างๆที่สร้างด้วย FPGA

ในส่วนของหน่วยความจำชั่วคราว (RAM) จะมีลักษณะเป็นแบบ FIFO โดยใช้โครงสร้างของ FPGA ซึ่งอาศัยการทำงานของโปรแกรม Xilink ISE 9.0 ในการสร้างโครงสร้างของหน่วยความจำชั่วคราวขึ้นมา ซึ่งข้อมูลดิจิตอลที่ออกมาจาก AD9822 จะเป็นข้อมูลดิจิตอลซึ่งมีขนาดประมาณ 5500 ข้อมูล โดยข้อมูลทั้งหมดดังกล่าว จะถูกส่งต่อโดยอาศัยโมดูล (Module) การสื่อสารแบบ RS232 หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่าน USB Port ด้วยไอซี FT232 เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13

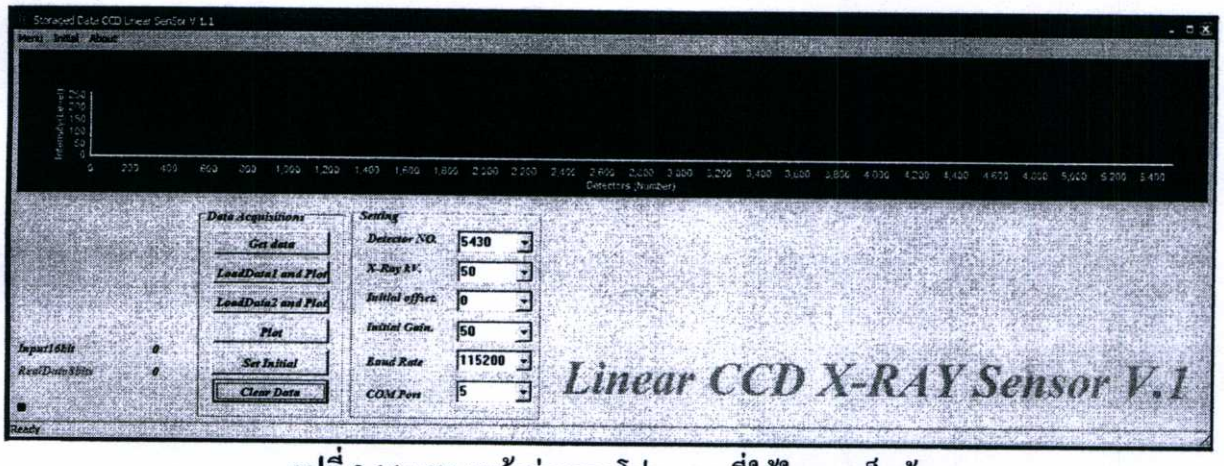


รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมแสดงการรับสัญญาณดิจิตอลและส่งออกผ่าน USB Port

3.1.4) ส่วนแสดงผล

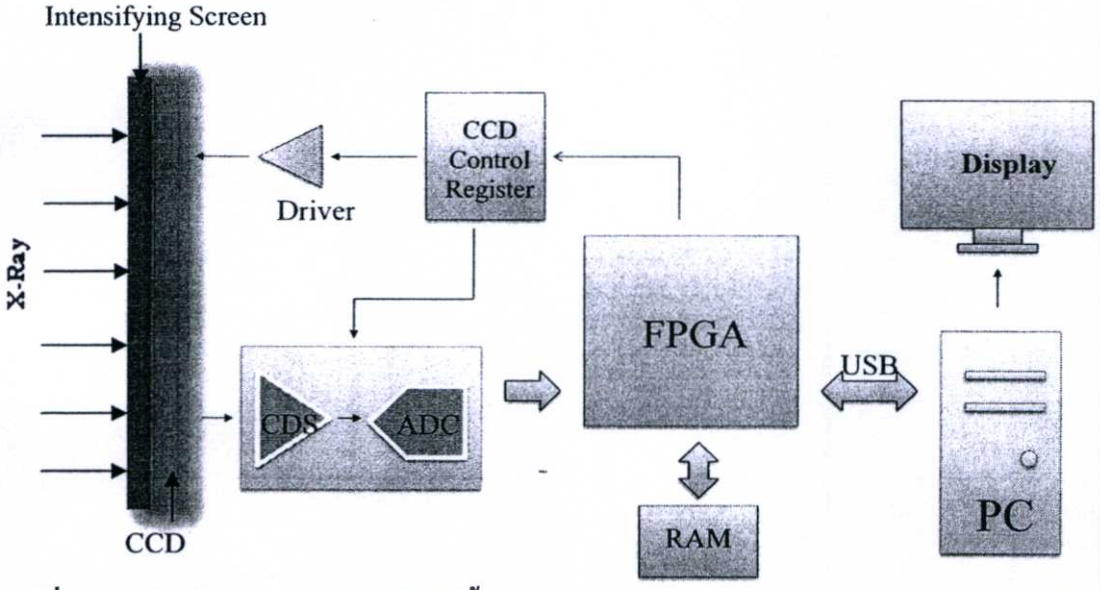
จากข้อมูลที่ได้รับผ่าน USB Port จะถูกส่งเข้ามาเก็บและประมวลผล และแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมเก็บข้อมูลที่เขียนขึ้นด้วย C-Builder เวอร์ชั่น 6.0

ข้อมูลที่ได้จากเอกซเรย์เป็นข้อมูลแบบโปรไฟล์ (Profile) หรือมีลักษณะของข้อมูลแบบเส้น (Line Data) โปรแกรมจะแสดงผลข้อมูลออกมาเป็นกราฟ และสามารถบันทึกผลเพื่อนำข้อมูลไปปรับปรุงและวิเคราะห์ได้ หน้าต่างของโปรแกรมเก็บผลที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ในขั้นตอนสุดท้าย นำส่วนประกอบทั้งหมด 4 ส่วนที่กล่าวมาในข้างต้น มาประกอบกันเป็นโครงสร้างของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้มีโครงสร้างการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วนต่างๆ ของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ออกแบบไว้ในงานวิจัย

จากรูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการเก็บข้อมูลเอกซเรย์ โดยเริ่มจากผู้ควบคุมจะสั่งงานที่เครื่องคอมพิวเตอร์ว่าจะทำการเก็บข้อมูลเอกซเรย์ เมื่อ FPGA ได้รับสัญญาณจากเครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะสร้างสัญญาณควบคุมไปยังวงจรควบคุมซีซีดีให้ทำการอ่านค่าข้อมูลจากแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง จากนั้นสัญญาณแอนะลอกที่ได้จะถูกส่งไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยผ่านส่วน Analog Frontend สัญญาณดิจิตอลที่ได้จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่หน่วยความจำชั่วคราว และ FPGA จะค่อยๆดึงข้อมูลจากหน่วยความจำชั่วคราวผ่าน USB Port ไปเก็บไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมเก็บผล โปรแกรมจะทำการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการทดสอบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองทางแสง และการทดลองกับเอกซเรย์ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.2 การทดลองทางแสง

การทดลองทางแสงเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางแสงของตัวตรวจจับเอกซเรย์ และความเป็นไปได้ในการนำตัวตรวจจับเอกซเรย์มาใช้ในการเก็บผลกับเอกซเรย์ โดยเริ่มจากการทดสอบกับแสงไฟปกติเสียก่อนว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์มีการตอบสนองต่อแสงอย่างไร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่

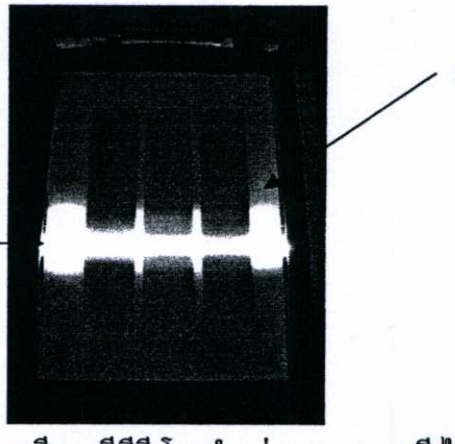
1. ทดสอบความสามารถในการแยกระดับสัญญาณแสงสีต่างๆ ของซีซีดี
2. ทดสอบการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล
3. ทดสอบการปรับระดับสัญญาณ และค่าออฟเซท

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทางแสง มีดังต่อไปนี้

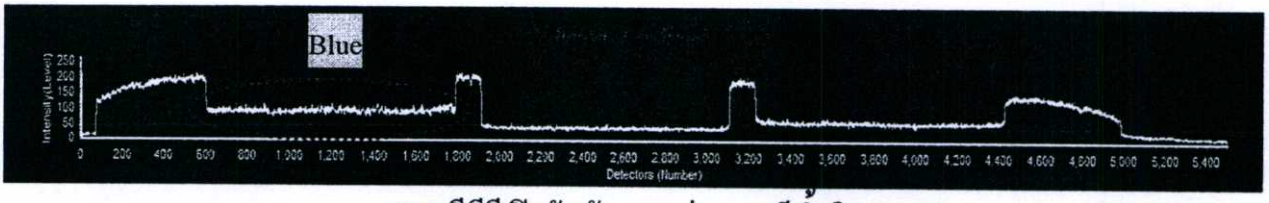
1. Oscilloscope
2. Digital Analyzer
3. Digital Multi-meter
4. Multi-function Power Supply
5. คอมพิวเตอร์
6. แหล่งกำเนิดแสง

3.2.1) ทดสอบความสามารถในการแยกระดับสัญญาณของแสงสีต่างๆ ของซีซีดี

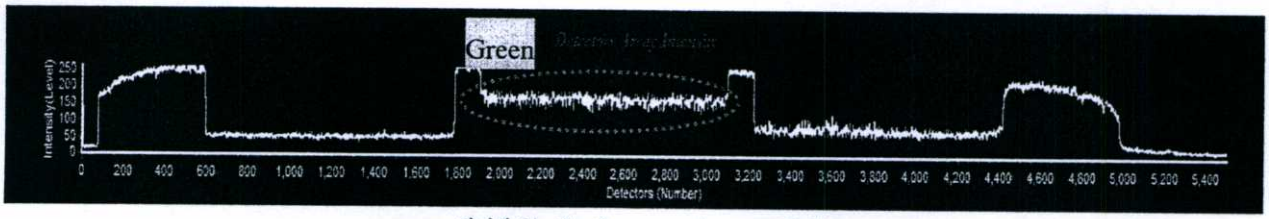
ทำการทดสอบความสามารถในการแยกคุณสมบัติของการตรวจจับแสงสีต่างๆ ของซีซีดี เพื่อตรวจเช็คว่ามีความเป็นไปได้และเหมาะสมหรือไม่ที่จะนำซีซีดีมาตรวจจับคลื่นแสงในช่วงสีเขียว (ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง) โดยการทดลองจะให้แหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านแผ่นกระดาษที่มีแถบสี 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีตามน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.16 เพื่อทำการจำลองแสง 3 สีที่ไปตกกระทบที่ซีซีดีนั่นเอง ผลการทดสอบความสามารถในการแยกระดับสัญญาณของแสงสีต่างๆ ของซีซีดี แสดงในรูปที่ 3.17



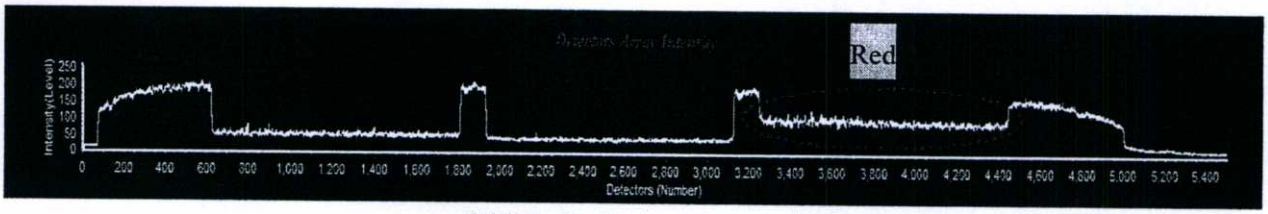
รูปที่ 3.16 แสดงการทดลองการแยกแสงสีของซีซีดี โดยนำแผ่นกระดาษ 3 สี ได้แก่ น้ำเงิน เขียว และแดง (จากซ้ายไปขวา) วางบนหลอดไฟ แล้วสะท้อนลงไปที่ตัวซีซีดี



(A) ซีซีดีเปิดรับสัญญาณช่วงแสงสีน้ำเงิน



(B) ซีซีดีเปิดรับสัญญาณช่วงแสงสีเขียว



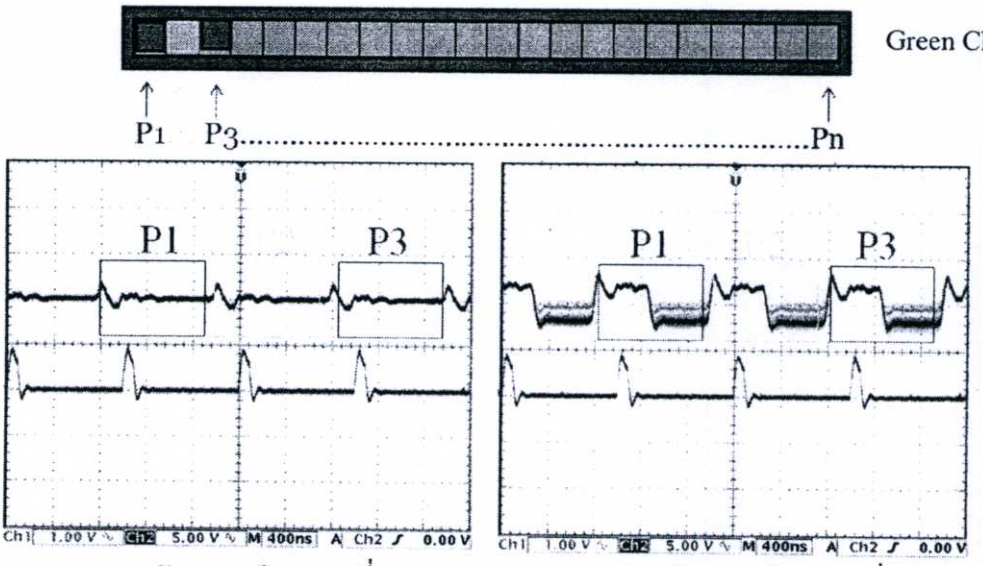
(C) ซีซีดีเปิดรับสัญญาณช่วงแสงสีแดง

รูปที่ 3.17 แสดงผลการทดลองความสามารถในการแยกระดับสัญญาณของแสงสีต่างๆ ของซีซีดี (แกนนอน คือ Detector Number และ แกนตั้ง คือ ระดับความเข้มของสัญญาณที่วัดได้)

จากรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นว่าซีซีดีสามารถรับสัญญาณแสงได้ทั้ง 3 ระดับ คือ น้ำเงิน เขียว และแดง จึงยืนยันได้ว่า ซีซีดีเป็นอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับแสงสีเขียวที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง ดังนั้น ตลอดการทดลองกับเอกซเรย์นั้น จะให้ซีซีดีเปิดรับสัญญาณในช่วงแสงสีเขียวเท่านั้น

3.2.2) ทดสอบการแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล

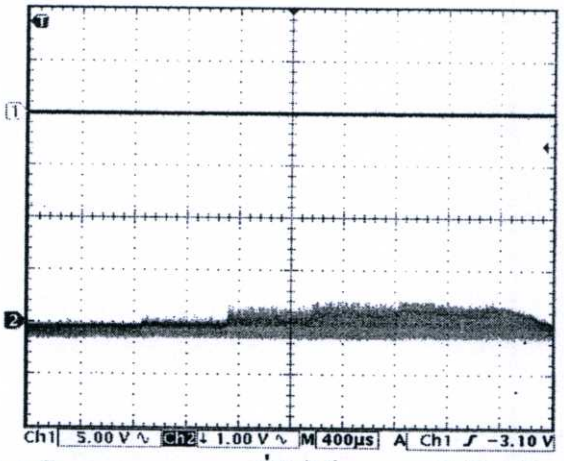
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการทดสอบการแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอกที่วัดได้จากซีซีดี เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลต่อไปได้ จากรูปที่ 3.18 แสดงสัญญาณแอนะลอกที่วัดได้ในแต่ละพิกเซลในขณะที่ซีซีดีไม่ได้รับแสง (รูปซ้าย) และได้รับแสง (รูปขวา) และรูปที่ 3.19 แสดงสัญญาณดิจิตอลที่วัดได้หลังจากผ่านส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลแล้ว โดยรูป 3.19 A แสดงสัญญาณแอนะลอกที่วัดได้จากออสซิโลสโคป และ 3.19 B แสดงสัญญาณดิจิตอลที่ผ่านการแปลงสัญญาณแล้ว



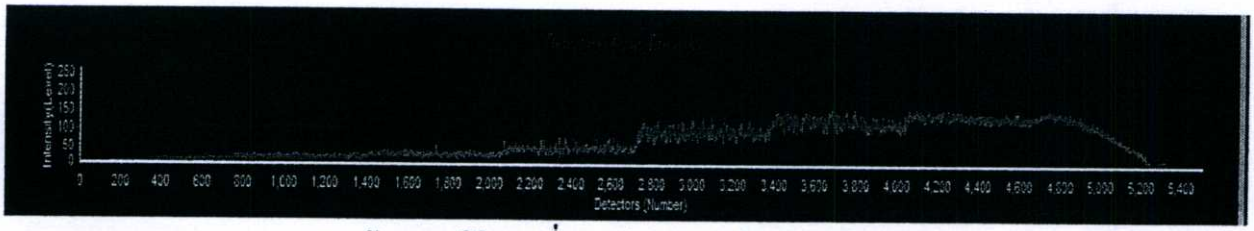
แสดงสัญญาณในขณะที่ไม่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล

แสดงสัญญาณในขณะที่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล

รูปที่ 3.18 สัญญาณเอาท์พุตของลิเนียร์ซีซีดีซึ่งเป็นสัญญาณแอนะลอกเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (ADCCLK1) (รูปซ้าย) แสดงสัญญาณเอาท์พุตในขณะที่ไม่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล (รูปขวา) แสดงสัญญาณเอาท์พุตในขณะที่ได้รับแสงในแต่ละพิกเซล



(A) สัญญาณแอนะลอกที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



(B) สัญญาณดิจิตอลที่ถูกแปลงมาจากสัญญาณแอนะลอก

(แกนนอน คือ Detector Number และ แกนตั้ง คือ ระดับความเข้มของสัญญาณที่วัดได้)

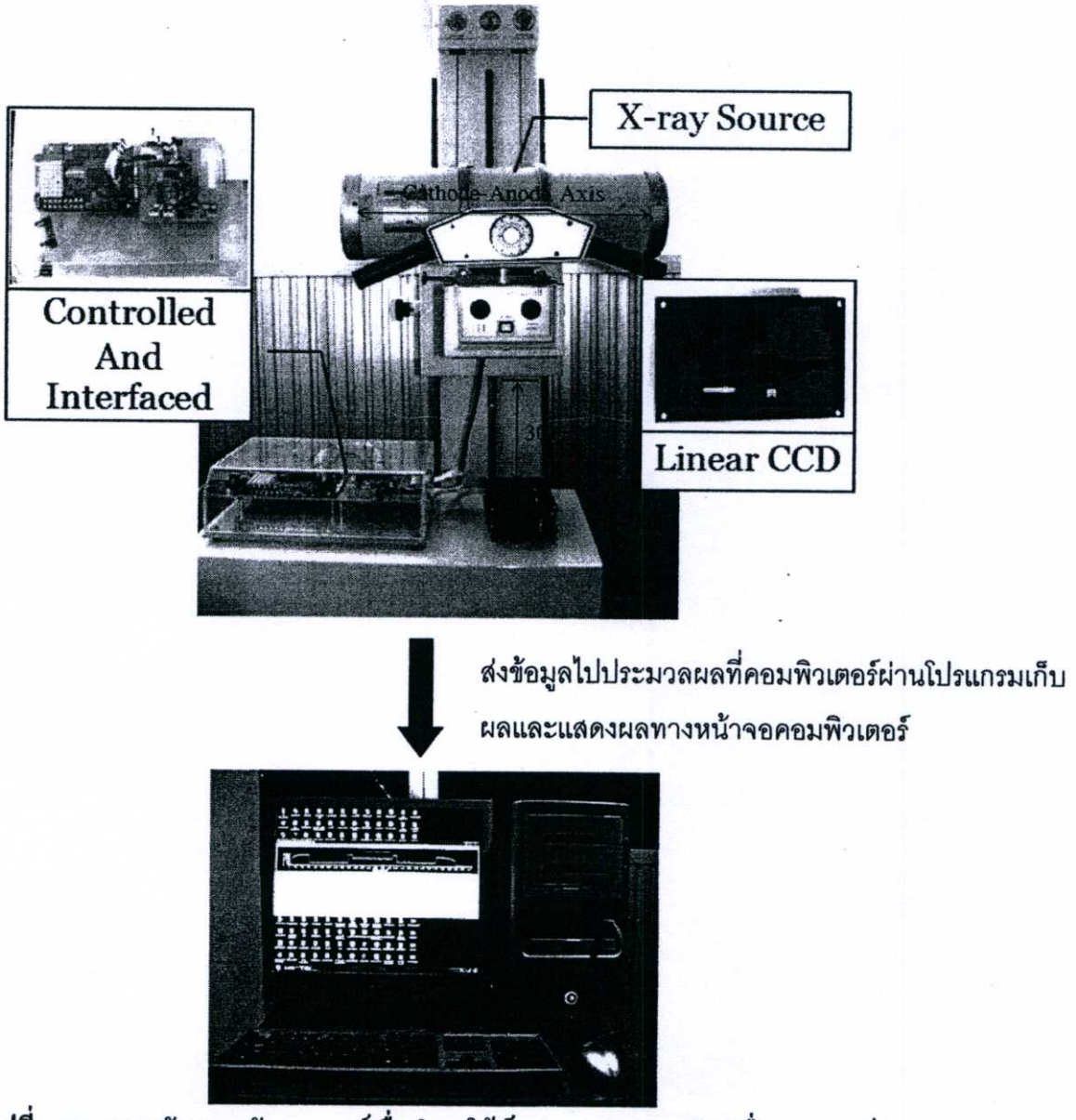
รูปที่ 3.19 แสดงให้เห็นความสามารถของระบบในการแปลงสัญญาณจากแอนะลอกเป็นดิจิตอล

3.2.3) ทดสอบการปรับระดับสัญญาณ และค่าออฟเซท

เพื่อทดลองปรับระดับสัญญาณเอาท์พุตที่ออกจากตัวซีซีดีให้มีความเหมาะสมกับระดับความเข้มแสงที่จะตรวจจับ โดยแบ่งเป็นการปรับระดับสัญญาณขึ้น(Gain) และยกระดับสัญญาณจากระดับพื้น (Offset) โดยพิจารณาในขณะที่มีการเรืองแสงของแผ่นเรืองแสง ตัวตรวจจับต้องมีระดับความเข้มของสัญญาณที่สูงสุด

3.3 การทดลองกับเอกซเรย์

เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของงานวิจัย คือ การทดสอบความสามารถในการตรวจจับเอกซเรย์และสร้างภาพเอกซเรย์ของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้น รูปที่ 3.20 แสดงภาพรวมของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์เมื่อนำมาใช้งานจริงกับเครื่องเอกซเรย์



รูปที่ 3.20 ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์เมื่อนำมาใช้เก็บผลการทดลองกับเครื่องเอกซเรย์

ก่อนที่จะนำตัวตรวจจับเอกซเรย์ไปสร้างภาพเอกซเรย์นั้น จะต้องทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ในหลายๆ ด้าน โดยตลอดการทดลองทางเอกซเรย์นั้น จะต้องกระทำในระบบปิด คือ ทำให้ห้องที่มืดสนิท เพื่อให้ระบบตัวตรวจเอกซเรย์ตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงเท่านั้น

นอกจากนั้น ในการทดลองกับเอกซเรย์จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์ Heel Effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหลอดเอกซเรย์ ผลของปรากฏการณ์นี้ คือ จะทำให้ปริมาณรังสีที่ปล่อยออกมาจากหลอดเอกซเรย์นั้นไม่มีความสม่ำเสมอในแนวขั้วบวก-ลบ ของหลอดเอกซเรย์ (Cathode-Anode Axis) ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเอกซเรย์เกิดความผิดพลาด ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจาก Heel Effect จึงต้องทำการวางตัวตรวจจับเอกซเรย์ในแนวตั้งฉากกับแนว Cathode-Anode Axis เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองกับเอกซเรย์ออกเป็น การทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์ 4 การทดลอง และการทดลองสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติจากวัตถุ 1 การทดลอง ดังต่อไปนี้

3.3.1) ทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Uniformity)

ทดลองฉายเอกซเรย์ที่ 100 kV 50mA 2mS ไปยังตัวตรวจจับเอกซเรย์ โดยไม่ผ่านวัตถุใดๆ จำนวน 5 ครั้ง ทำการบันทึกข้อมูลความเข้มของสัญญาณจากทุกช่องสัญญาณด้วยโปรแกรมเก็บค่า และนำข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่บันทึกได้ไปผ่านกระบวนการเพื่อกำจัด Noise ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 บันทึกข้อมูลความเข้มของสัญญาณลงในตารางที่ 3.1 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ตลอด Line Scan ของการทดลองทั้ง 5 ครั้ง แล้วจึงหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 5 ครั้งออกมา เพื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของการตรวจจับสัญญาณใน 1 Line Scan ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณใน 1 Line Scan

ช่องสัญญาณของซีซีดี	**ความเข้มของสัญญาณที่แต่ละช่องสัญญาณวัดได้**				
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**
ช่องสัญญาณที่ 1					
ช่องสัญญาณที่ 2					
ช่องสัญญาณที่ 3					
.					
.					
.					
ช่องสัญญาณที่ 5,340					
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)					

→ **ค่า SD เฉลี่ย**

3.3.2) ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Linearity)

ทดลองฉายเอกซเรย์โดยไม่ผ่านวัตถุใดๆ ที่ระดับความต่างศักย์ต่างๆ ตั้งแต่ 90-100 kV 50mA 2mS โดยเพิ่มระดับขั้นของความต่างศักย์ครั้งละ 1 kV บันทึกความเข้มของสัญญาณด้วยโปรแกรมเก็บค่า แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปผ่านกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0

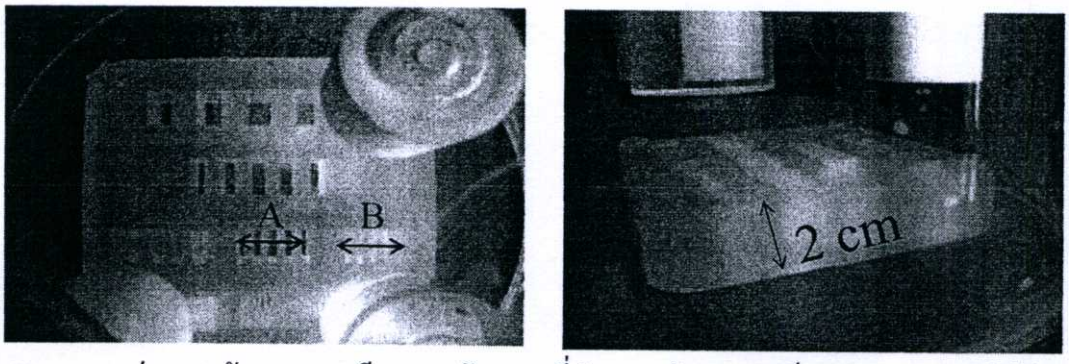
นำข้อมูลที่ได้จากทุกช่องสัญญาณ (ทั้งหมด 5,340 ช่องสัญญาณ) ไปหาค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณในแต่ละ kV ดังแสดงในตารางที่ 3.21 หลังจากนั้น นำค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้ในแต่ละ kV มา Plot กราฟหาความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อไป

ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์

ช่องสัญญาณของซีซีดี	ความเข้มของสัญญาณที่ความต่างศักย์ (kV) ต่างๆ										
	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
ช่องสัญญาณที่ 1 ช่องสัญญาณที่ 2 ช่องสัญญาณที่ 3 . . . ช่องสัญญาณที่ 5,340											
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)											
ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ											

3.3.3) ทดสอบความละเอียดของภาพ (Resolution)

ทดลองฉายเอกซเรย์ที่ 100 kV 50mA 2mS ไปยังแฟนทอมวัดความละเอียด (Resolution Phantom) ของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถตรวจจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยหาว่าระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถแยกรายละเอียดของสัญญาณได้มากที่สุดที่กี่ line pair/inch

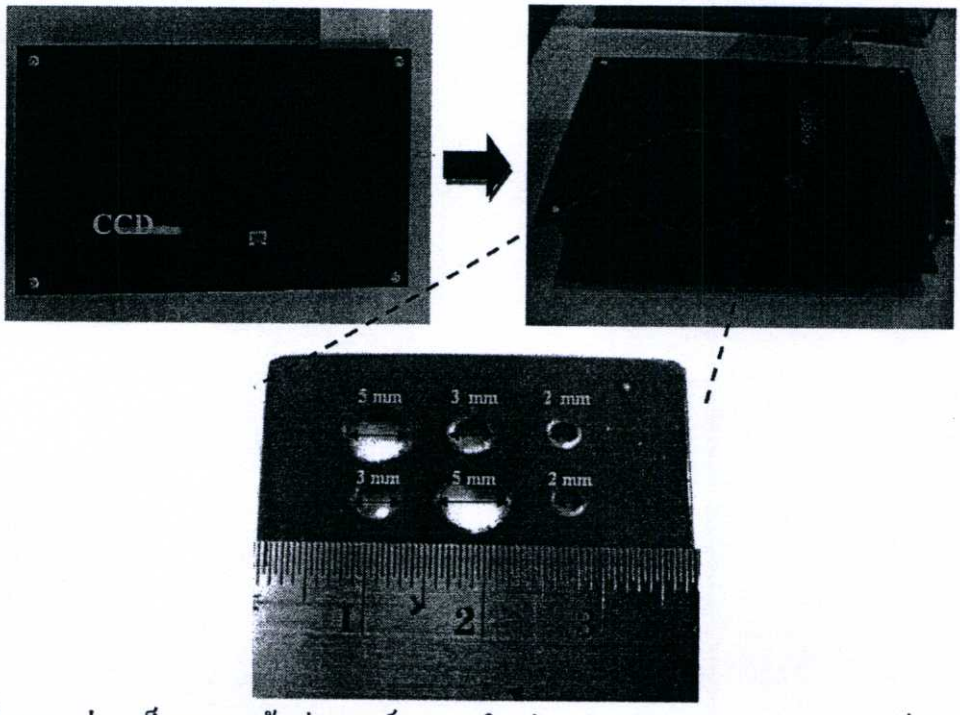


รูปที่ 3.21 แสดงแฟนทอมวัดความละเอียดของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถตรวจจับได้ โดยทำมาจากอะคริลิคหนา 2 เซนติเมตร โดยระยะ A ยาว 2.5 cm มีความละเอียด 5 lp/inch และระยะ B ยาว 1.25 cm มีความละเอียด 10 lp/inch

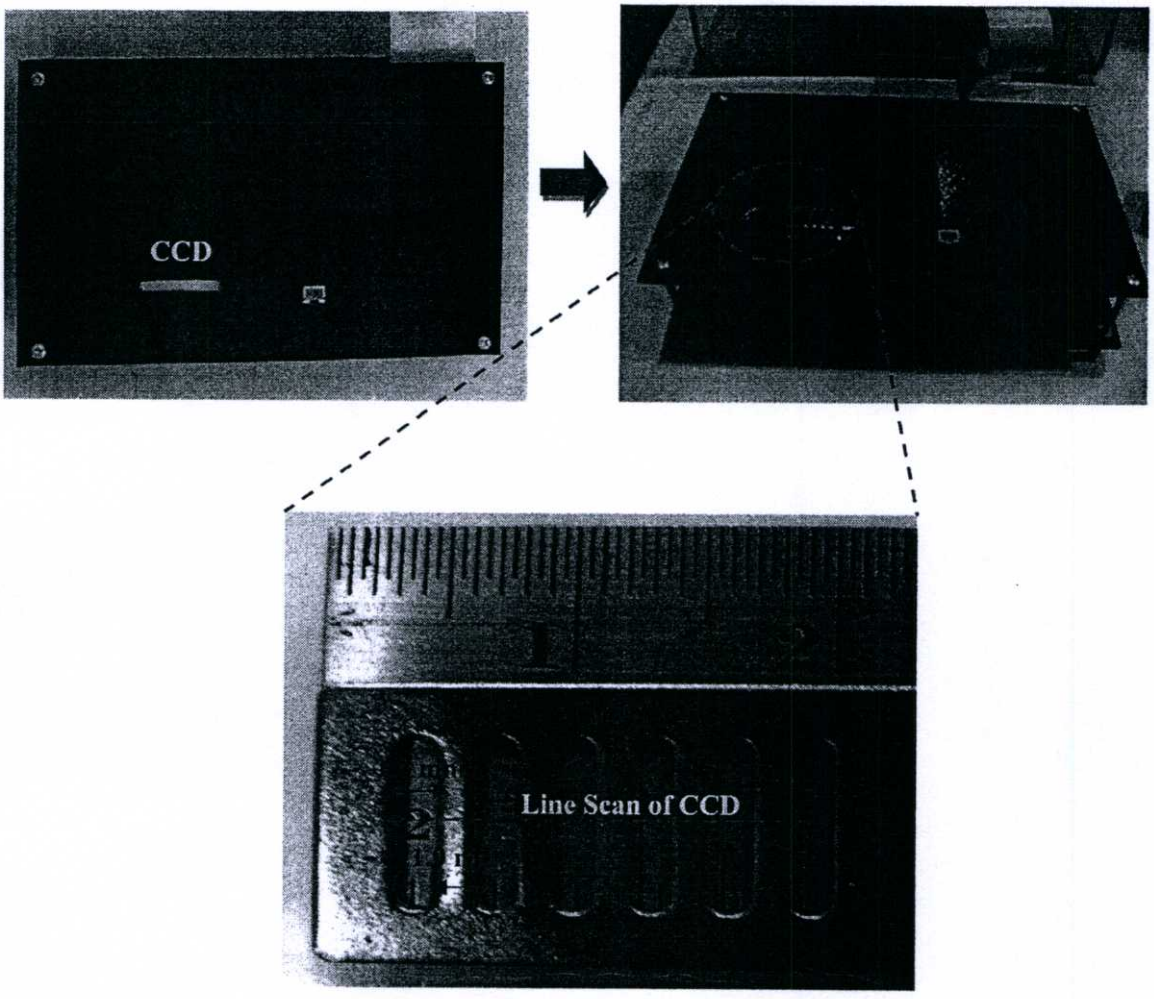
3.3.4) การทดลองตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ

เป็นการทดลองวัดสัญญาณเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ โดยผู้วิจัยได้สร้างอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นเอง เพื่อเพิ่มความหลากหลายของวัตถุที่นำมาทดสอบ ทำการฉายเอกซเรย์ไปยังวัตถุเหล่านั้น เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์เพื่อนำมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ

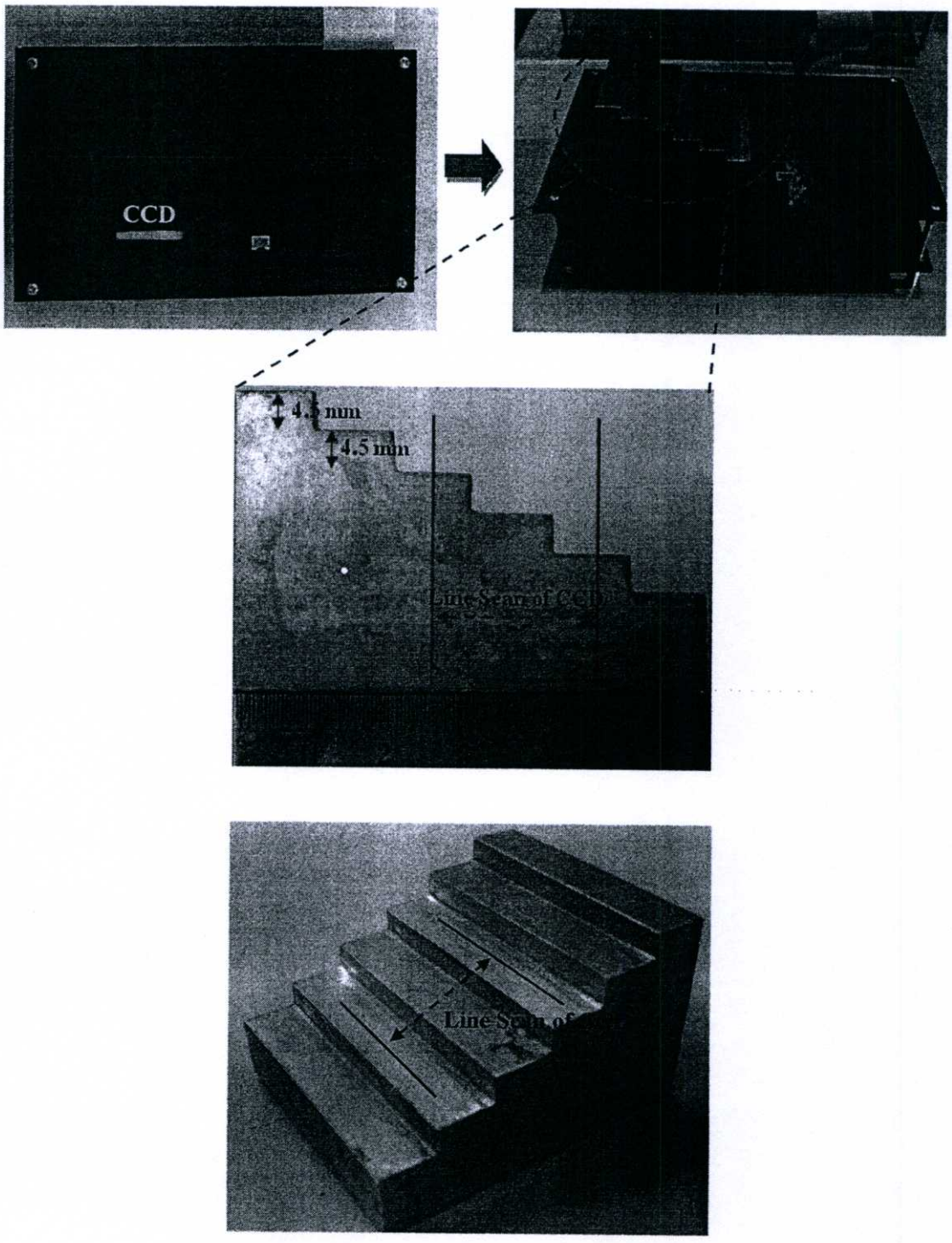
รูปที่ 3.22-3.25 แสดงวัตถุแบบต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์ โดยในแต่ละรูปจะระบุไว้ว่าวางวัตถุอย่างไรตามแนว Line Scan ของซีซีดี ทำการบันทึกโปรไฟล์ของระดับความเข้มของสัญญาณ (Intensity Level Profile) ที่ได้จากวัตถุแต่ละชนิด ผ่านกระบวนการลด Noise ของสัญญาณที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป



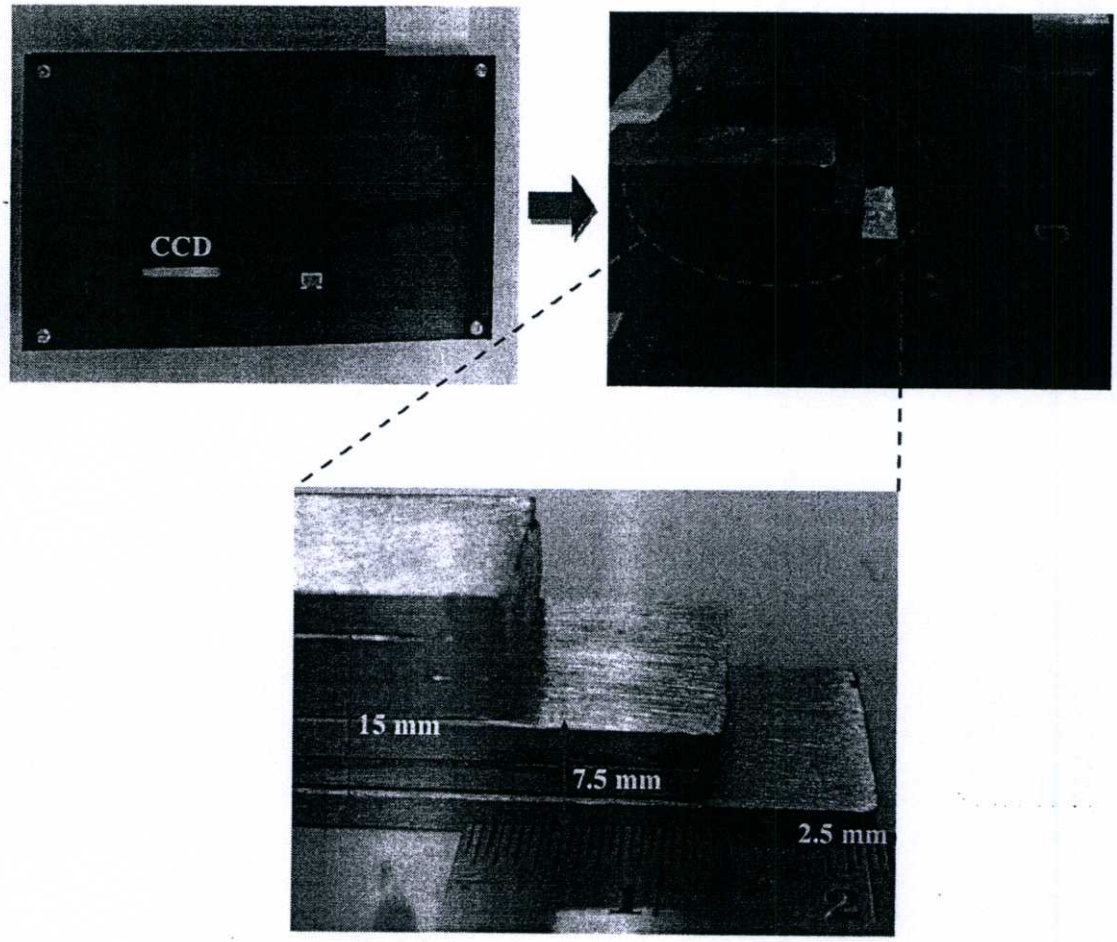
รูปที่ 3.22 แผ่นเหล็กเจาะรู เส้นผ่านศูนย์กลางวงใหญ่ขนาด 5 mm, กลาง 3 mm, และเล็ก 2 mm



รูปที่ 3.23 แผ่นเหล็กเจาะรูเป็นวงรีกว้าง 1.5 mm วางตัวห่างกันช่องละ 1 mm (เส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี)



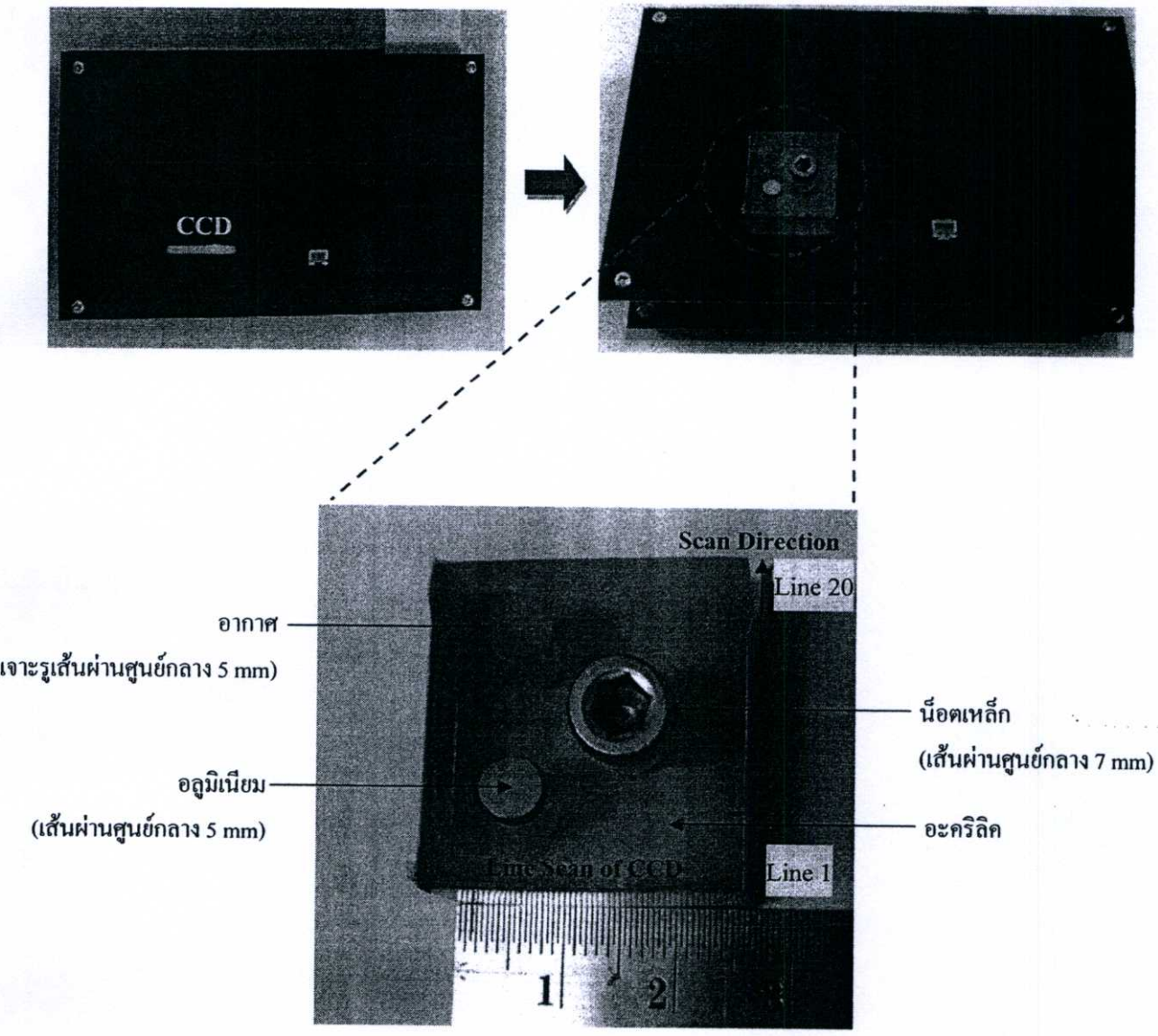
รูปที่ 3.24 Aluminum Step Wedge หนาขั้นละ 4.5 mm (เส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี)



รูปที่ 3.25 แผ่นอะลูมิเนียมวางซ้อนกัน หนาแผ่นละ 2.5 mm โดยขั้นบนสุดมีความหนารวม 15 mm ชั้นกลางมีความหนารวม 7.5 mm และชั้นล่างสุดมีความหนา 2.5 mm

3.3.5) เก็บภาพเอกซเรย์สองมิติ

ภายหลังจากที่เราได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเอกซเรย์จนมั่นใจว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอสามารถนำมาใช้สร้างภาพเอกซเรย์ได้ ขั้นตอนต่อไปจึงเป็นขั้นตอนในการเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติจากวัตถุที่สร้างขึ้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.26 โดยเป็นการสร้างภาพจากหลายๆ Line Scan นำมาเรียงต่อกันจนครบ Volume ของวัตถุกลายเป็นภาพเอกซเรย์สองมิตินั่นเอง



รูปที่ 3.26 แสดงวัตถุที่จะทำการเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติ ภายในวัตถุประกอบไปด้วยวัตถุเล็กๆ 4 ชนิดที่มีความหนาแน่นและมีค่า Attenuation ที่แตกต่างกันดังรูป จากภาพเส้นประแสดงบริเวณ Line Scan ของซีซีดี ณ จุดเริ่มต้นการสแกน และลูกศรชี้แสดงทิศทางการสแกนตลอด Volume ของวัตถุ โดยทำการสแกนทั้งหมด 20 Line Scan ห่างกัน Line ละ 1 mm

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะขอแสดงผลการทดลองกับเอกซเรยที่ได้จาก 5 การทดลองดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้แก่

4.1 ความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Uniformity)

4.2 ความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Linearity)

4.3 ความละเอียดของภาพที่ได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Resolution)

4.4 ทดสอบการวัดเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ และ

4.5 การเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติจากวัตถุ

4.1 ความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Uniformity)

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ โดยทำการฉายเอกซเรย์ที่ 100 kV 50mA 2mS ลงบนตัวตรวจจับเอกซเรย์ (ไม่ผ่านวัตถุ) แล้วทำการเก็บข้อมูลสัญญาณด้วยโปรแกรมเก็บผล โดยนำข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่ผ่านขบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 ทำซ้ำกันจำนวน 5 ครั้ง จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

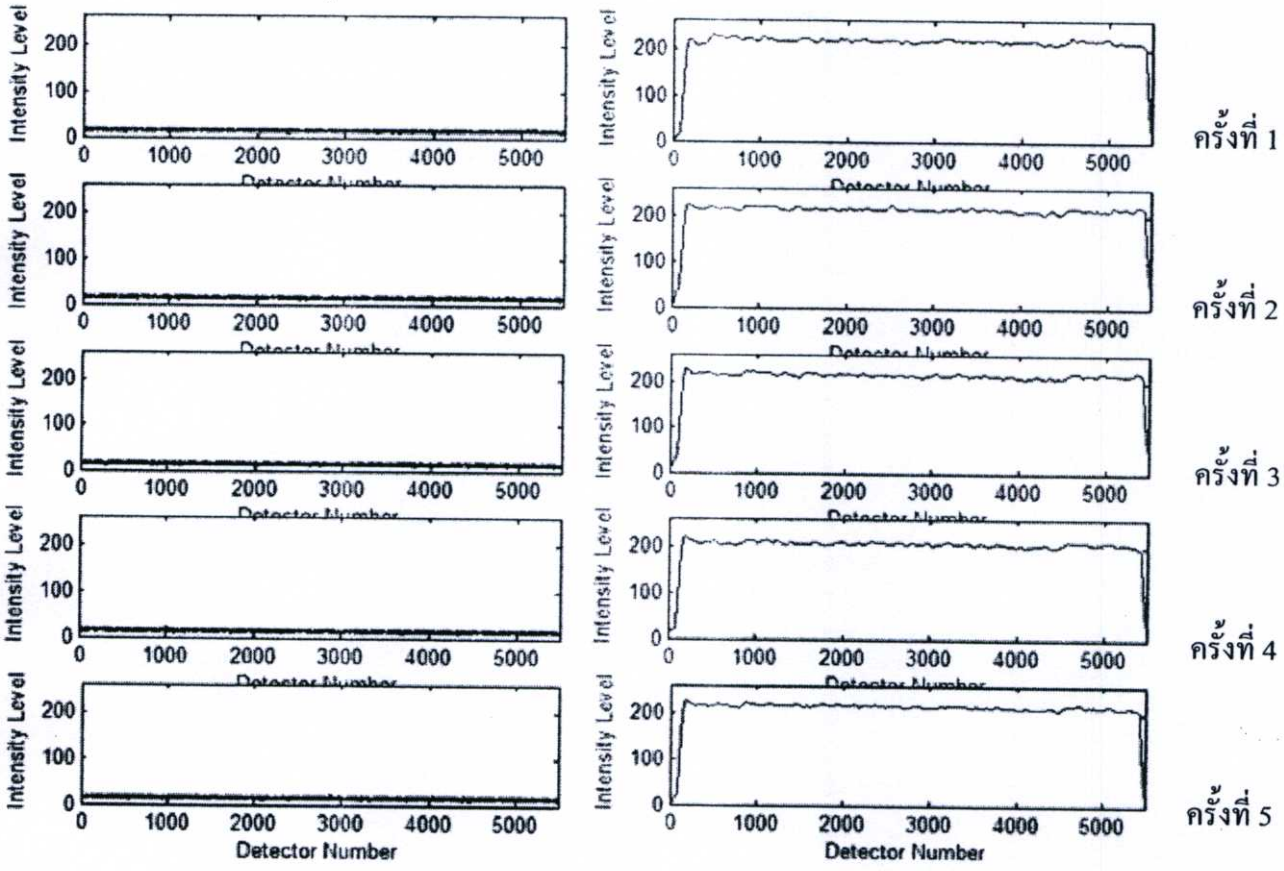
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของสัญญาณทั้ง 5,340 ช่องสัญญาณ หรือ 1 Line Scan ของซีซีดี เฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.4 ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ที่จะนำไปใช้งาน

นอกจากนั้น รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสม่ำเสมอของสัญญาณที่วัดได้ใน 1 Line Scan จากการทดลองครั้งที่ 1-5 โดยเปรียบเทียบก่อนฉายเอกซเรย์ (รูปซ้าย) และหลังฉายเอกซเรย์ (รูปขวา)

ตารางที่ 4.1 ผลของค่าความเข้มของสัญญาณ (Intensity Level) ที่วัดได้โดยตัวตรวจจับเอกซเรย์ใน 1 Line Scan (ช่องสัญญาณที่ 1-5,340) ที่ความต่างศักย์ 100 kV 50mA 2mS

ช่องสัญญาณของซีซีดี	ความเข้มของสัญญาณที่แต่ละช่องสัญญาณวัดได้				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ (ช่องสัญญาณที่ 1-5,340)	218.8	214.1	214.6	206.9	215.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	**10.06**	**7.69**	**7.95**	**8.06**	**8.13**

➡ **ค่า SD เฉลี่ย ร้อยละ 8.4**



รูปที่ 4.1 แสดง Intensity Profile ที่ได้จากการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับเอกซเรย์จำนวน 5 ครั้ง โดยแกน x คือ Detector Number และแกน y คือ ระดับความเข้มของสัญญาณ (Intensity Level)

4.2) ความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Linearity)

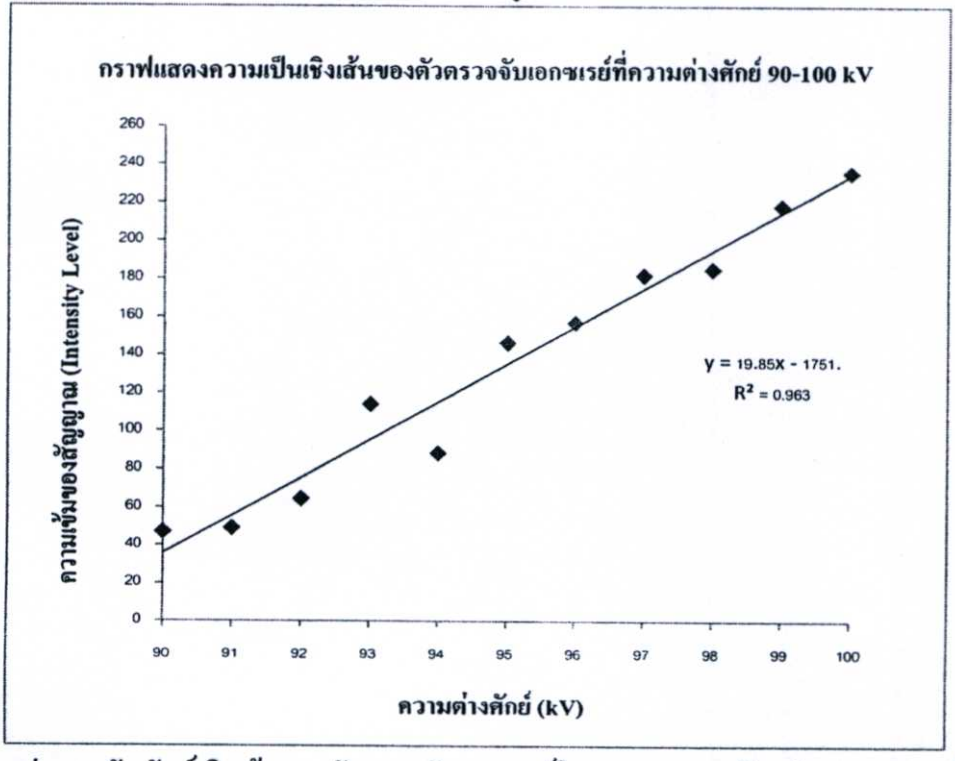
ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ว่าระบบสามารถตรวจจับความเข้มของสัญญาณได้สอดคล้องกับปริมาณพลังงานเอกซเรย์ที่ให้แก่ระบบหรือไม่ โดยนำข้อมูลความเข้มของสัญญาณจากทุกช่องสัญญาณ (ทั้งหมด 5,340 ช่องสัญญาณ) ที่ผ่านขบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 เรียบร้อยแล้ว มาทำการ Plot กราฟที่ kV ต่างๆ ตั้งแต่ 90-100 kV 50mA 2mS (เพิ่ม Step ละ 1 kV) ว่าความเข้มของสัญญาณมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า kV ที่เพิ่มขึ้นหรือไม่

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 นำค่าเฉลี่ยของสัญญาณใน 1 Line Scan (ช่องสัญญาณที่ 1-5,340) ที่ความต่างศักย์ต่างๆ ตั้งแต่ 90-100 kV มา Plot กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังรูปที่ 4.2 พบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ โดยได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น R^2= 0.95 ซึ่งอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ แสดงระดับความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณต่างๆ ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ความต่างศักย์ 90-100 kV

ช่องสัญญาณของซีซีดี	ความเข้มของสัญญาณที่ความต่างศักย์ (kV) ต่างๆ										
	90	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**	**98**	**99**	**100**
1	47.88	48.91	65.17	83.01	111.5	149.2	158.0	177.5	185.7	218.3	234.8
2	45.98	49.22	62.13	86.62	118.4	147.9	159.5	181.4	183.2	217.4	235.2
3	46.13	50.13	63.41	90.05	117.5	144.2	158.6	182.1	184.4	217.4	233.1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
5,340	46.02	50.51	62.24	89.59	115.2	145.2	157.5	180.4	185.9	218.0	234.9
(SD)	1.63	1.93	4.51	3.32	7.28	5.56	6.43	8.34	3.82	4.26	3.43
ค่าเฉลี่ย	**47.02**	**49.01**	**64.42**	**88.43**	**114.0**	**147.0**	**157.6**	**182.7**	**184.9**	**218.2**	**235.8**

Plot กราฟหาความสัมพันธ์เชิงเส้น



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวตรวจจับเอกซเรย์ใน 1 Line Scan โดยทำการทดลองที่ความต่างศักย์ 90-100 kV 50mA 2mS ได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น R^2= 0.95 อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองความเป็นเชิงเส้น (ประมาณร้อยละ 5) ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ พบว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น อาจเกิดมาจาก 2 สาเหตุ ได้แก่

1. ช่วงความต่างศักย์ (kV) ของหลอดเอกซเรย์มีช่วงแคบมากเพียง 10 kV (เพิ่ม Step ละ 1 kV) ซึ่งเป็นช่วงความต่างศักย์ที่แคบมาก และอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอของปริมาณเอกซเรย์ที่ปล่อยออกมาจากหลอดเอกซเรย์แต่ละ kV ได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น ที่ 91 kV นั้น ปริมาณเอกซเรย์อาจไม่แตกต่างจากที่ความต่างศักย์ 90 kV เลยก็เป็นได้ เป็นต้น ซึ่งแท้จริงแล้วเราสามารถวัดได้ว่าปริมาณเอกซเรย์ออกมาตามที่ตั้งค่าไว้หรือไม่ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสี (Ion Chamber) แต่ทว่า เครื่องมือดังกล่าวมีราคาสูงมาก และผู้วิจัยไม่มีอุปกรณ์ดังกล่าวในการทำวิจัย จึงมิได้พิสูจน์ข้อสันนิษฐานดังกล่าว

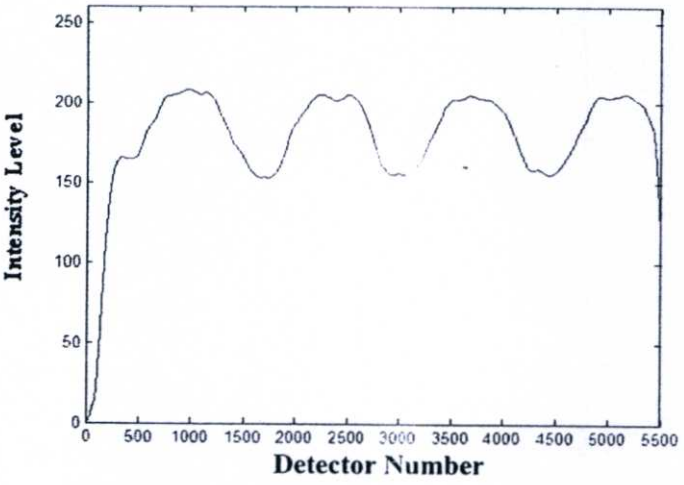
   เหตุผลที่ผู้วิจัยจำเป็นต้องใช้ช่วงความต่างศักย์ที่แคบขนาดนี้ เนื่องจากข้อจำกัดของตัวตรวจจับเอกซเรย์เอง คือ ที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 80 kV นั้น ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณจากเอกซเรย์ได้ และที่ความต่างศักย์สูงกว่า 100 kV ก็ไม่มีการตอบสนองต่อสัญญาณเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดสำคัญของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ และยังต้องหาสาเหตุของปัญหาเพื่อพัฒนาและแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวในอนาคตต่อไป

2. สาเหตุประการที่สองคือ อาจเกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากไม่สามารถจับสัญญาณแสงช่วงที่ Peak ที่สุดที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงได้ หรือจับสัญญาณในช่วงเวลาที่แตกต่างกันของช่วงการเปล่งแสงของแผ่นเรืองแสง ในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงการทำทดลองในเบื้องต้นเพื่อที่จะหาคุณสมบัติประสิทธิภาพ และความเป็นไปได้ในการนำซีซีดีมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับเอกซเรย์ จึงใช้คนในการสั่งเก็บภาพผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม จึงอาจเกิดความผิดพลาดดังกล่าวข้างต้นได้ นักวิจัยเห็นว่า จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการทำส่วนของวงจร Trigger สัญญาณในช่วงที่ Peak ที่สุดของแสงที่เปล่งออกจากแผ่นเรืองแสง ซึ่งสมควรนำไปพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคตต่อไป

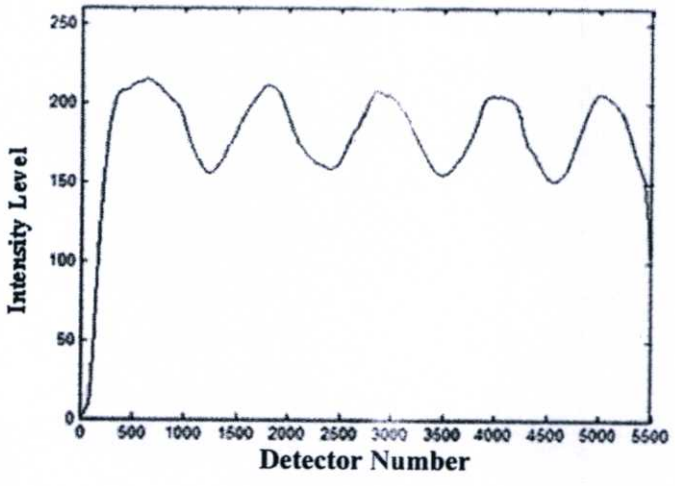
4.3 ความละเอียดของภาพที่ได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์ (Resolution)

ผลการทดลองแสดงระดับความเข้มของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกรายละเอียดได้ โดยจะพบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุได้สูงสุดอยู่ที่ 10 lp/inch หรือพูดได้ว่า สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่อยู่ห่างกันได้น้อยที่สุด 1.3 mm นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ เอกภพ งามละเมียด ในปี พ.ศ. 2548 [2] และ ธเนศ อังศุวัฒนากุล ในปี พ.ศ. 2550 [3] ซึ่งได้สร้างตัวตรวจจับเอกซเรย์จากโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) พบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์จากโฟโต้ทรานซิสเตอร์นั้นสามารถแยกรายละเอียดได้สูงสุดเพียง 5 lp/inch เท่านั้น ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีความละเอียดน้อยกว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

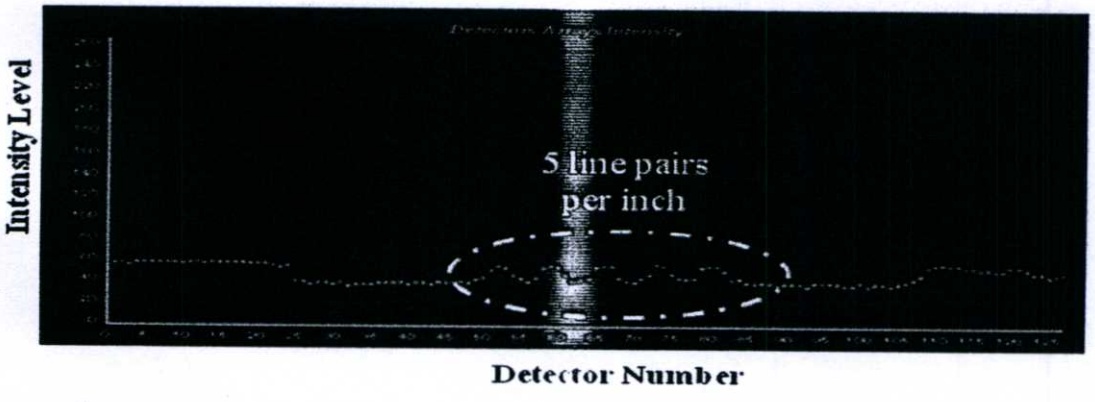


(A) Intensity profile from 5 lp/inch



(B) Intensity profile from 10 lp/inch

รูปที่ 4.3 แสดง Intensity Profile ที่ได้จากการทดสอบความละเอียดของตัวตรวจจับเอกซเรย์ จากภาพจะพบว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกรายละเอียดสัญญาณได้สูงสุดที่ 10 lp/inch ดังแสดงในรูป (B)

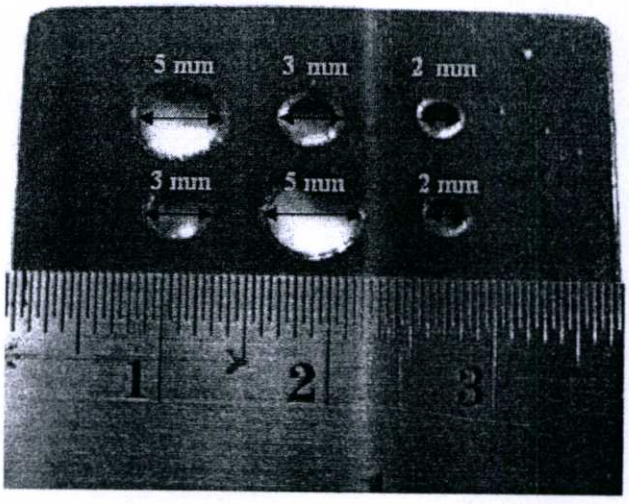


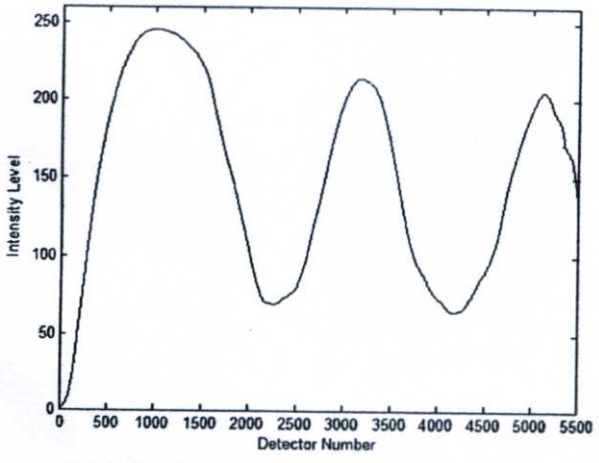
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์จำนวน 128 ตัว [3] พบว่าสามารถแยกสัญญาณได้สูงสุดเพียง 5 lp/inch

เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุว่าทำไมตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ใช้ CCD Image Sensor จึงให้รายละเอียดของภาพที่ดีว่า Phototransistor ผู้วิจัยพบว่า ซีซีดีนั้นมีขนาดของพิกเซลละเอียดที่สุดถึงระดับ 4 ไมครอน แต่ขนาดพิกเซลของโฟโต้ทรานซิสเตอร์เล็กสุดอยู่ที่ 2 mm เท่านั้น นั่นแสดงว่า ข้อจำกัดในด้านความละเอียดของภาพเกิดจากลักษณะและคุณสมบัติเฉพาะของ Image Sensor แต่ละชนิดนั่นเอง

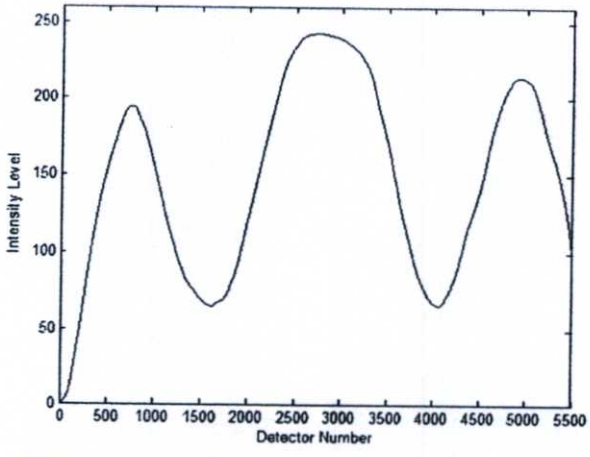
4.4) ผลการทดสอบความสามารถในการตรวจจับเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุแบบต่างๆ

ผลการทดสอบการตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ที่ผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับเอกซเรย์ของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้น โดยได้ผล Intensity Profile ที่ทดสอบกับ แผ่นเหล็กเจาะรูวงกลม, แผ่นเหล็กเจาะรูวงรี, Aluminum Step Wedge, และแผ่นอลูมิเนียมซ้อนกันเป็นขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.8 ตามลำดับ



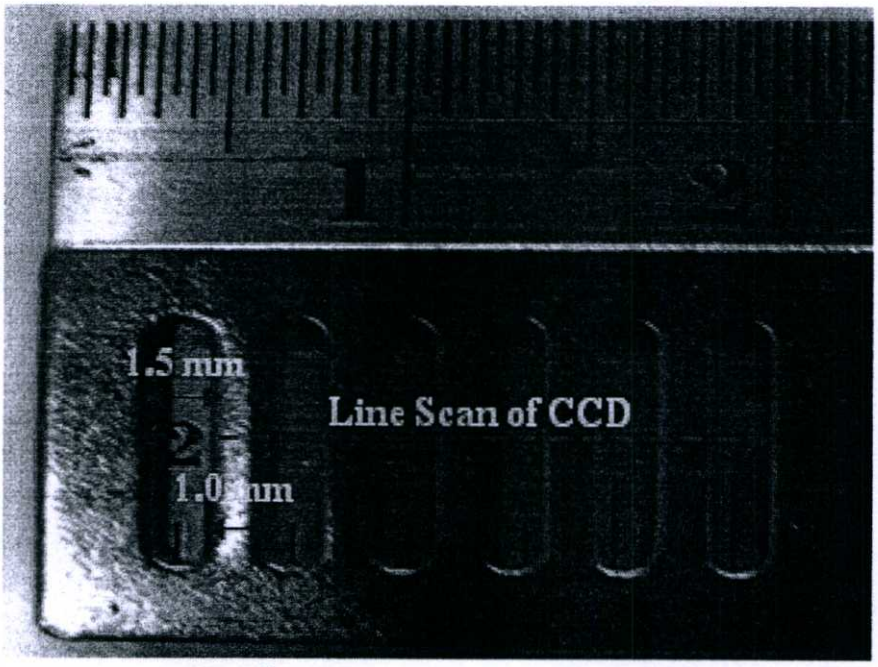


(A) Intensity profile from upper line

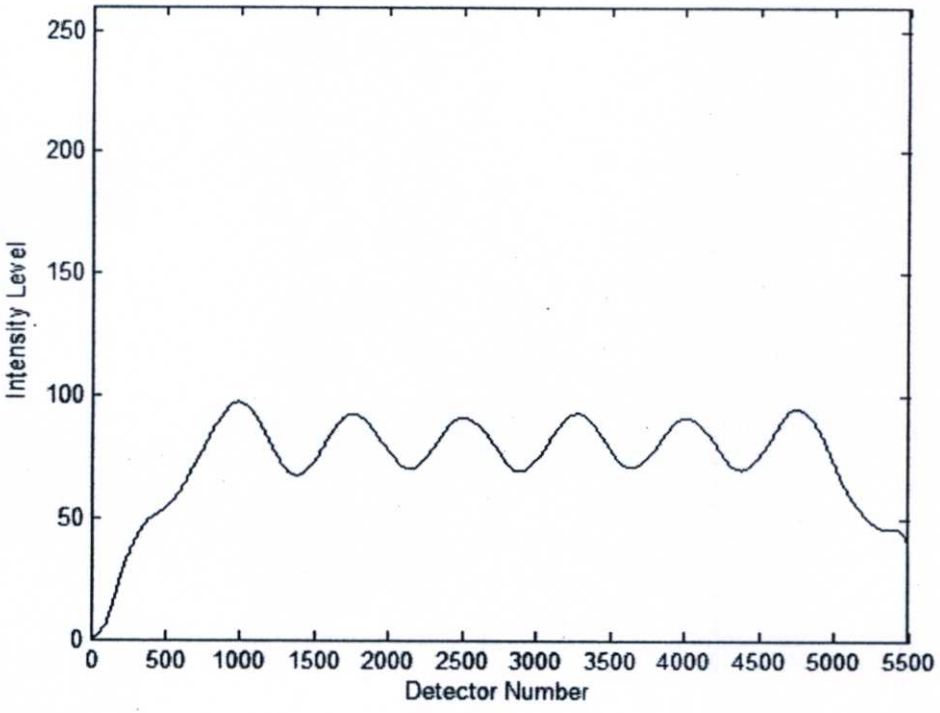


(B) Intensity profile from lower line

รูปที่ 4.5 แสดงผล Intensity Profile ที่ 100kV 50mA 2mS
ได้จากแผ่นเหล็กเจาะรูวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน

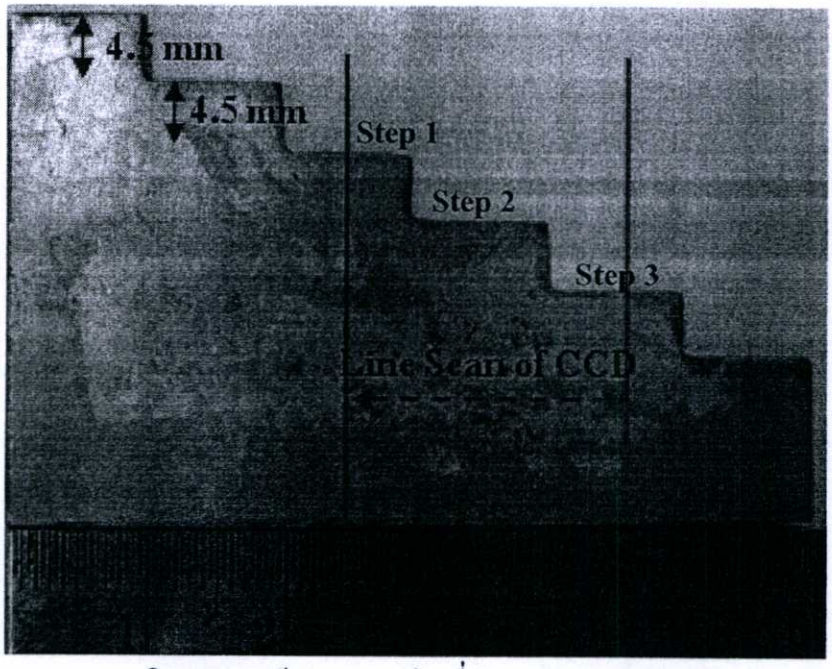


(A) เส้นประสีแดงแสดงบริเวณ Line Scan

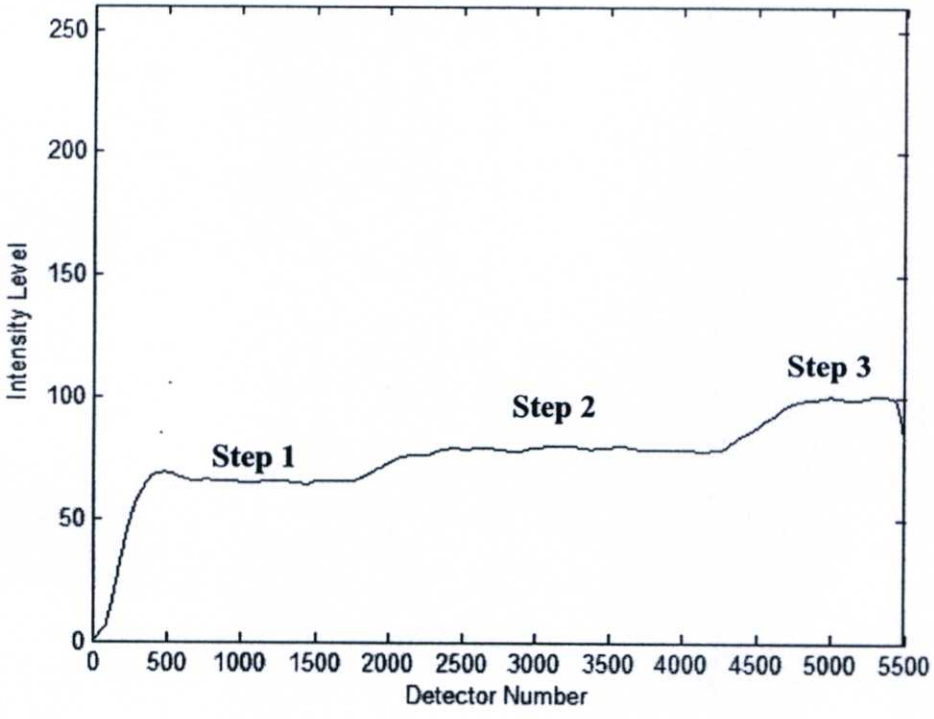


(B)

รูปที่ 4.6 แสดง Intensity Profile ที่ 90kV 50mA 2mS
ได้จากแผ่นเหล็กเจาะรูเป็นวงรีกว้าง 1.5 mm

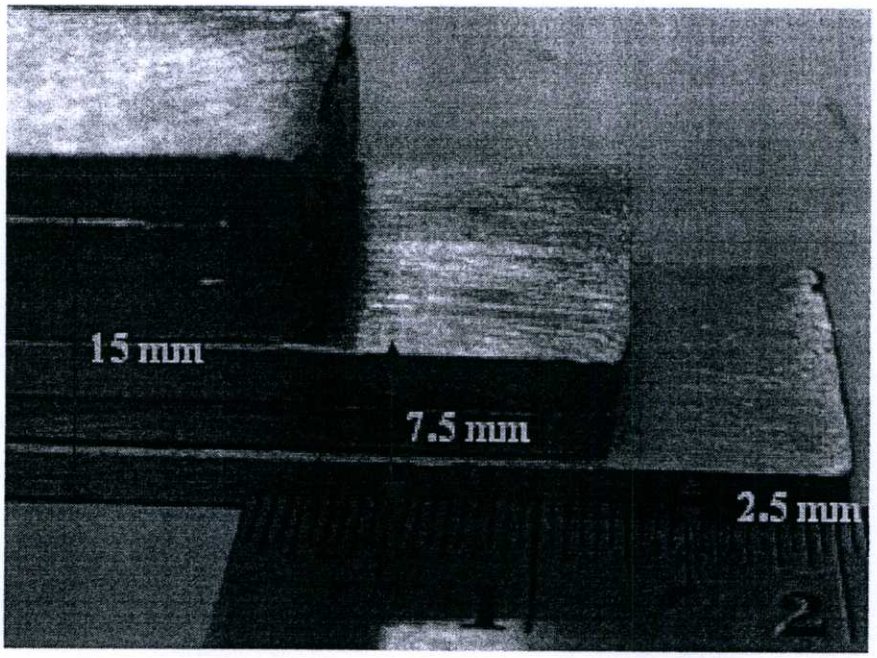


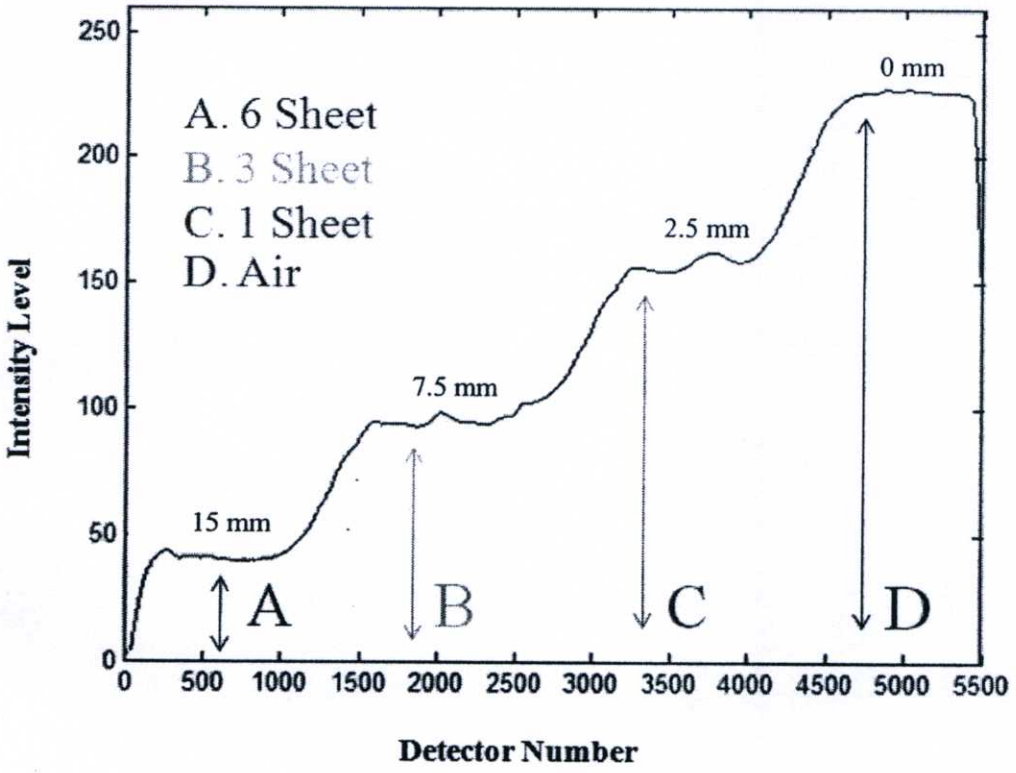
บริเวณลูกศรสีแดงแสดงช่วงที่ทำการ Line Scan



รูปที่ 4.7 แสดง Intensity profile ที่ 90kV 50mA 2mS

ได้จากแผ่นอลูมิเนียมขั้นบันได (Aluminum Step Wedge) แต่ละขั้นบันไดจะมีค่า Attenuation ที่แตกต่างกัน ทำให้ Intensity Level แสดงให้เห็นเป็นลักษณะขั้นบันได 3 ขั้น แต่เห็นไม่เป็นขั้นบันไดชัดเจนนัก เนื่องจากช่วงการสแกนที่สั้น และแต่ละขั้นมีความหนาแตกต่างกันไม่มากนัก





รูปที่ 4.8 แสดง Intensity Profile ที่ 100kV 50mA 2mS
ได้จากการเอกซเรย์ผ่านแผ่นอลูมิเนียมที่วางซ้อนกัน โดยที่ความหนาแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน (บอกเป็นจำนวนแผ่นอลูมิเนียม) จึงมีค่า Attenuation แตกต่างกันไปด้วย ทำให้ความเข้มของสัญญาณที่วัดเห็นเป็นลักษณะขั้นบันไดที่มีความสูงไม่เท่ากัน

จากผลการดังรูปที่ 4.5 พบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันได้ จากรูปจะเห็นว่ารูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างกว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์จะจับสัญญาณได้ Intensity Profile ที่มีช่วงพิกเซลกว้างกว่ารูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแคบนั่นเอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 พบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกความแตกต่างระดับ 1.5 mm ได้ โดยที่ Intensity Profile มีความกว้างของพิกเซล และแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่า การทดลองกับ Aluminum Step Wedge ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกความแตกต่างของแต่ละขั้นได้ โดยปรากฏเป็นลักษณะสัญญาณแบบขั้นบันได แต่เนื่องจากมีความแตกต่างของความสูงของแต่ละขั้นไม่มาก (เพียง 4.5 mm) ทำให้เห็นเป็นขั้นบันไดได้ไม่ชัดเจนนัก

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่า แผ่นอลูมิเนียมที่นำมาซ้อนกันเป็นขั้นบันได มีความหนาในแต่ละขั้นไม่เท่ากัน (แตกต่างกับ Aluminum Step Wedge) และมีความแตกต่างของแต่ละชั้นอย่างชัดเจน ทำให้ปรากฏเห็น Intensity Profile เป็นขั้นบันไดชัดเจน และแต่ละขั้นก็มีความสูงไม่เท่ากัน เมื่อนำค่าความเข้มของสัญญาณมาหาความสัมพันธ์ของการลดทอนเทียบกับทฤษฎี Lambert-Beer's Law ที่กล่าวว่า "ความเข้มของเอกซเรย์เมื่อทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนา x จะถูกลดทอนแบบ Exponential ตามสมการที่ 4.1

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{4.1}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของเอกซเรย์เมื่อทะลุผ่านวัตถุ

I_0 คือ ความเข้มของเอกซเรย์ก่อนจะทะลุผ่านวัตถุ

μ คือ Linear Attenuation Coefficient

x คือ ความหนาของวัตถุ

นำค่าความเข้มสัญญาณเฉลี่ยในแต่ละขั้นมา Plot กราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ โดยที่

x คือ ความหนาของอะลูมิเนียมแต่ละขั้น

I_0 คือ 225 (ระดับความเข้มสัญญาณเมื่อเอกซเรย์ไม่ผ่านวัตถุที่วัดได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์),

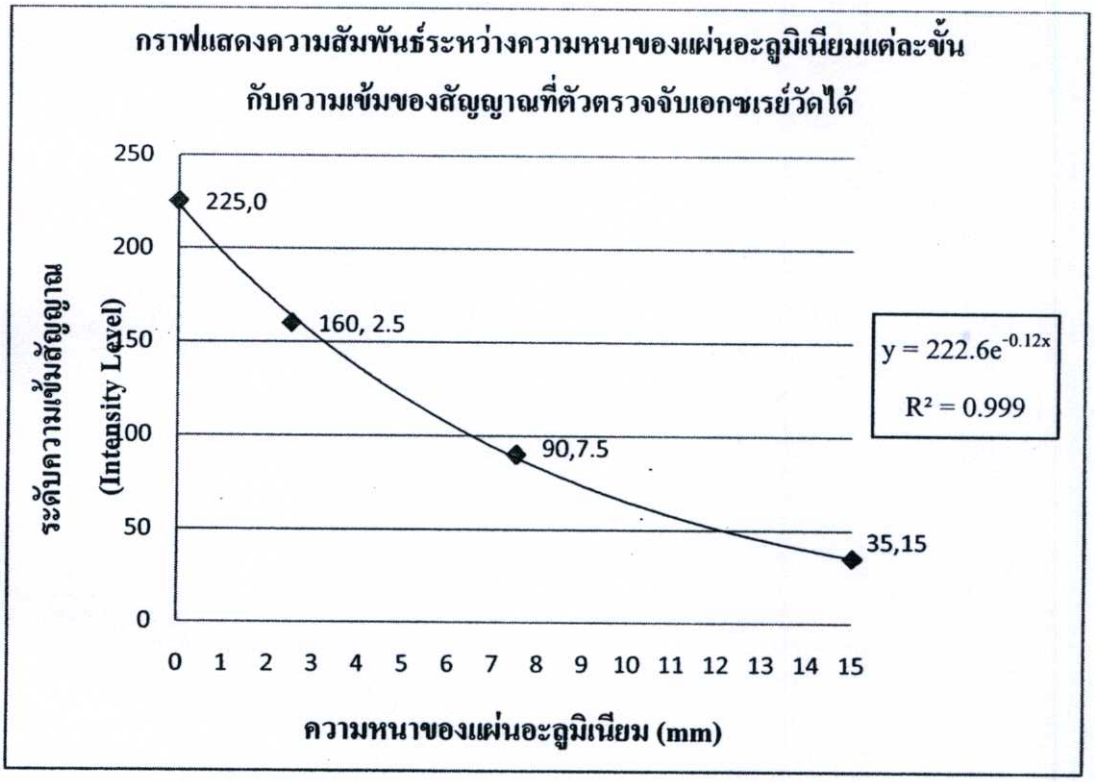
I คือ ความเข้มสัญญาณเมื่อเอกซเรย์เคลื่อนที่ผ่านอะลูมิเนียมความหนาต่างๆ ที่ขั้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 แสดงผลการคำนวณค่า μ ซึ่งคำนวณจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับเอกซเรย์

ลำดับขั้นของอลูมิเนียม	ความหนา Al (mm) (x)	Intensity Level* (I)
อากาศ	0	225 (คือ I_0 นั่นเอง)
ขั้นที่ 1 (ซ้อน 1 แผ่น)	2.5	160
ขั้นที่ 2 (ซ้อน 3 แผ่น)	7.5	90
ขั้นที่ 2 (ซ้อน 6 แผ่น)	15.0	35

* Intensity Level ได้จากการเฉลี่ยค่าระดับความเข้มของสัญญาณในแต่ละขั้นดังรูป 4.8

รูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์จับได้ในแต่ละขั้นบันได โดยพบว่า ความเข้มสัญญาณที่ตรวจจับได้ในแต่ละขั้นบันไดนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบ Exponential (R^2= 0.999, $y = 222.6e^{-0.12x}$) สอดคล้องกับทฤษฎีของ Lambert-Beer's Law



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอลูมิเนียมแต่ละขั้นกับค่าความเข้มของสัญญาณที่ตัวตรวจจับเอกซเรย์วัดได้

นอกจากนั้น ผู้วิจัยยังพบว่า อุปสรรคสำคัญที่ทำให้การวิเคราะห์ผลเป็นไปได้ยาก คือ ข้อจำกัดของตัวตรวจจับเอกซเรย์ในแง่ของการมี Field of View ที่แคบ โดยใน 1 Line Scan มีความยาวเพียง 2 cm เท่านั้น จึงทำให้เก็บผลการทดลองได้ในช่วงที่สั้น ไม่สามารถครอบคลุมชั้นต่างๆ ทั้งหมดของแผ่นอลูมิเนียมที่ซ้อนกันได้ จึงได้จำนวนชั้นในการวิเคราะห์เพียงแค่ 3 ชั้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้ก็เพียงพอที่จะประเมินผลในเบื้องต้นได้ว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถแสดงระดับสัญญาณให้เห็นเป็นขั้นบันไดได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังสามารถตรวจจับเอกซเรย์ที่ระดับการลดทอนต่างๆ ได้สอดคล้องกับทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 4.8

4.4) ผลการเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติจากวัตถุต้นแบบ

ผลการทดลองแสดงระดับความเข้มของสัญญาณที่ผ่านขบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 ที่ Line Scan ต่างๆ ที่100kV 50mA 2mS จนครบ Volume ของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (รูปซ้าย) เป็น

จากผลการทดลองเก็บ Intensity Profile ดังรูปที่ 4.10 พบว่า

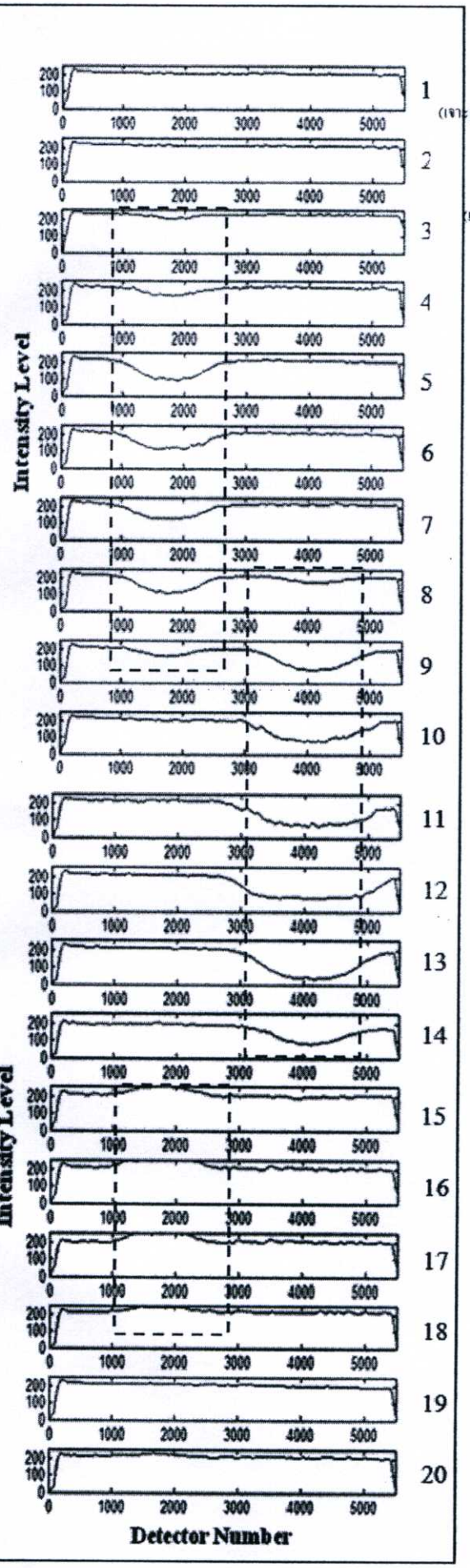
- Line 3-9 ที่บริเวณ Detector No. 1,000-2,500 นั้น มีการลดทอนของรังสีในระดับหนึ่ง สังเกตุได้จากระดับความเข้มของสัญญาณที่ลดลงประมาณ 20-120 ระดับ ดังรูป

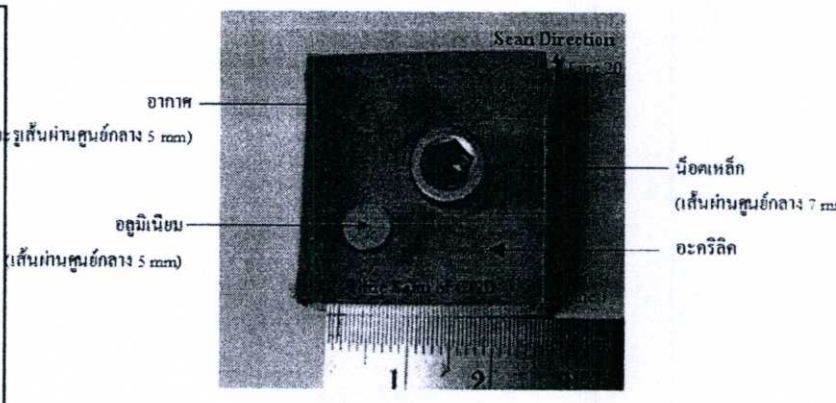
- Line 8-14 ที่บริเวณ Detector No. 3,000-5,000 มีการลดทอนของสัญญาณที่มากกว่าที่พบใน Line 3-9 โดยลดลงมาเกือบเป็น 0 ที่บริเวณ Line 13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน่าจะมีการสแกนผ่านบริเวณที่เอกซเรย์ทะลุผ่านได้น้อยนั่นเอง

- Line 15-18 พบว่ามีการเพิ่มระดับความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นจากปกติ แสดงว่าน่าจะสแกนผ่านบริเวณที่เอกซเรย์ทะลุผ่านได้ดีกว่าอะคริลิคนั่นเอง จึงสรุปได้ว่า

1. บริเวณ Line 3-9 คือ บริเวณที่สแกนผ่านอลูมิเนียม
2. บริเวณ Line 9-14 คือ บริเวณที่สแกนผ่านน็อตเหล็ก
3. บริเวณ Line 15-18 คือ บริเวณที่สแกนผ่านอากาศ (เจาะรู)

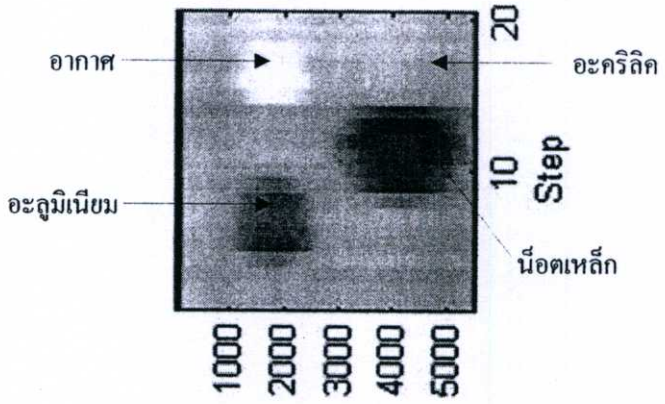
เมื่อนำ Intensity Profile ในแต่ละ Line Scan มาเรียงต่อกันจนครบ Volume ของวัตถุแล้ว ก็จะได้ภาพเอกซเรย์สองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 B และ C นั่นเอง โดยที่ภาพB ผ่านขบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ โดยนำข้อมูลที่ได้มาทำการฟิลเตอร์แบบ Butterworth IIR filter Order2 และที่ภาพ C เป็นภาพที่ผ่านขบวนการปรับปรุงภาพแบบ median filter โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0





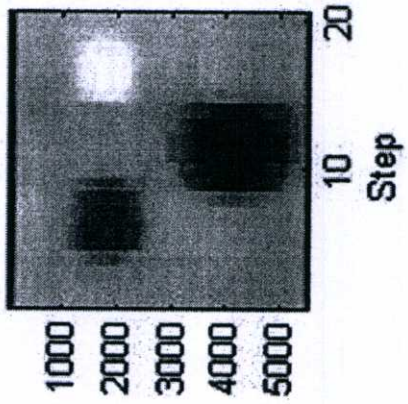
(A)

วัตถุที่ใช้ในการสแกนเพื่อสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติ



(B)

ภาพเอกซเรย์สองมิติที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสัญญาณ



(C)

ภาพเอกซเรย์สองมิติ ที่ปรับปรุงสัญญาณแล้ว

รูปที่ 4.10 (รูปซ้าย) แสดง Intensity Profile จากการสแกนวัตถุจนครบ Volume ทั้งหมด 20 Line Scans เว้นระยะห่าง Line ละ 1 mm และ (รูปขวา) แสดงภาพเอกซเรย์สองมิติที่ได้จากการสแกนทั้งที่ยังไม่ได้ปรับปรุง (B) และปรับปรุงสัญญาณแล้ว (C)

ในความเป็นจริง ซีซีดีมีขนาดพิกเซลเล็กถึง 4 ไมครอน ซึ่งหมายความว่า สามารถสแกนวัตถุได้ละเอียดถึงระดับ 4 ไมครอนเลยทีเดียว แต่ทว่าไม่สามารถมองเห็นความละเอียดในระดับนี้ด้วยตาเปล่าได้ อีกทั้งยังใช้มือเลื่อนวัตถุ จึงทำการสแกนได้เป็นระดับมิลลิเมตรเท่านั้น แต่จากการทดลองในเบื้องต้นก็เพียงพอที่จะสรุปได้ว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ในการสร้างภาพเอกซเรย์ได้ และหากต้องการให้สามารถถ่ายภาพเอกซเรย์ได้เร็ว และมีความละเอียดของภาพดีขึ้น ก็สามารถพัฒนาได้โดยการนำซีซีดีมาเรียงต่อกันเป็น Multimodule หรือเขียนโปรแกรมเพื่อให้ซีซีดีสแกนในแต่ละ Line ให้ห่างกันเป็นระยะสั้นๆ แทนการเลื่อนวัตถุด้วยมือ เป็นต้น ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ผู้วิจัยต้องนำไปขบคิดเพื่อให้สามารถพัฒนาระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจจับเอกซเรย์ (X-ray Detector) ที่สร้างภาพเอกซเรย์แบบทางอ้อม (Indirect Imaging) เพื่อประดิษฐ์ตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่มีราคาถูกและสามารถใช้งานได้ โดยทำการคัดเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีความเหมาะสมมากที่สุด สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ และสามารถสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจากงานวิจัยอื่นๆ [2,3] ก่อนหน้านี้ให้ได้

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่เหมาะสม และนำไปทดลองทางแสง เพื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นว่าสามารถนำมาใช้ในการตรวจจับเอกซเรย์ด้วยวิธีทางอ้อมผ่านการตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงได้หรือไม่ โดยทำการทดลอง 3 การทดลอง ได้แก่

1) การทดลองความสามารถในการคัดแยกสี 3 สีของซีซีดี

2) การทดลองความสามารถในการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลของระบบ

3) การทดลองปรับค่า Gain และ Offset

สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

1) ซีซีดีสามารถคัดแยกแสงสีได้ 3 สี ได้แก่ น้ำเงิน เขียว และแดง ซึ่งแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงนั้น เป็นแสงสีเขียว ดังนั้น ซีซีดีจึงเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมและมีความสามารถเพียงพอในการนำมาตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงนั่นเอง และตลอดการทดลองจะทำการเปิดรับแสงสีเขียวเท่านั้น

2) ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลได้

3) ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถปรับค่า Gain และ Offset ให้เหมาะสมกับระดับสัญญาณที่รับได้

เมื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจจับเอกซเรย์ว่าสามารถนำมาใช้งานได้แล้ว ต่อมาจึงทำการทดลองกับเอกซเรย์ โดยทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ 4 การทดลอง และทดลองสแกนภาพเอกซเรย์สองมิติกับวัตถุจริง 1 การทดลอง ดังต่อไปนี้

1) หาความสม่ำเสมอของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์

2) หาความเป็นเชิงเส้นของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์

3) หาความละเอียดของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์

4) ทดลองเอกซเรย์กับวัตถุรูปแบบต่างๆ

5) ทดลองเก็บภาพเอกซเรย์สองมิติกับวัตถุ

สรุปผลการทดลอง ได้ดังต่อไปนี้

1) ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นมีความสม่ำเสมอของสัญญาณ (Uniformity) อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ (SD = 8.4%) ซึ่งดีกว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ [2,3] ซึ่งมีข้อเสียคือมีความสม่ำเสมอของสัญญาณต่ำ เนื่องจากธรรมชาติของอุปกรณ์

2) ระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์นั้นมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ (R^2= 0.95)

3) ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกรายละเอียดได้สูงสุดอยู่ที่ 10 lp/inch (หรือแยกวัตถุที่อยู่ห่างกันน้อยที่สุด 1.3 mm ได้) ซึ่งสูงกว่าตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่ทำจากโฟโต้ทรานซิสเตอร์ (5 lp/inch) [2,3]

4) การทดลองกับวัตถุรูปแบบต่างๆ พบว่า ตัวตรวจจับเอกซเรย์สามารถแยกระดับสัญญาณในวัตถุที่หลากหลายได้ โดยสามารถแยกขนาดของวัตถุที่แตกต่างกันได้ อีกทั้งยังสามารถเห็นความเข้มของสัญญาณเป็นระดับขั้นบันไดเมื่อทำการทดสอบกับ Aluminum Step Wedge และแผ่นอลูมิเนียมที่วางซ้อนกันได้ โดยที่ค่าความลดทอนของเอกซเรย์ยังสอดคล้องกับทฤษฎี Lambert-Beer's Law อีกด้วย นอกจากนั้นเมื่อทำการสแกนตลอดปริมาตรของวัตถุ และนำ Intensity Profile ในแต่ละ Line Scan มาเรียงต่อกันก็จะสามารถสร้างภาพเอกซเรย์สองมิติออกมาได้

จากงานวิจัยพบว่า ซีซีดีสามารถนำมาใช้ในการตรวจจับเอกซเรย์ด้วยวิธีทางอ้อมได้ดี โดยได้คุณภาพของภาพที่ดีกว่าโฟโต้ทรานซิสเตอร์ และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดของภาพสูงมาก ได้แก่ งานด้านความปลอดภัย เช่น หาอาวุธหรือวัตถุต้องสงสัย และงานด้านอุตสาหกรรม เช่นหารอยแยกรอยแตกของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยังคงพบข้อจำกัดหลายๆ ประการของระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ และต้องการการพัฒนาเพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อจำกัดต่างๆ เพื่อให้เกิดการพัฒนาระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นให้สามารถนำมาใช้งานได้จริง อีกทั้งยังคงต้องมีการศึกษาต่อยอดเพื่อพัฒนาระบบตัวตรวจจับเอกซเรย์ดังกล่าวให้สามารถสร้างภาพเอกซเรย์ที่มีความละเอียดของภาพสูงขึ้น จึงจะเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ได้

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อสร้างและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำซีซีดีมาใช้เป็นตัวตรวจจับเอกซเรย์ จึงใช้ซีซีดีเพียงหนึ่งตัวในการทดลอง ในอนาคตผู้วิจัยเห็นสมควรให้มีการนำซีซีดีมาเรียงต่อกันเป็น Multimodule เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับภาพเอกซเรย์ให้กว้างขึ้นและสามารถนำไปใช้งานกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ซึ่งเป็นงานที่ท้าทายและน่าศึกษาพัฒนาต่อยอดในอนาคตอันใกล้อีกด้วย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชูศักดิ์ จันทโค
วัน เดือน ปีเกิด	27 กันยายน 2526
ที่อยู่	21 หมู่ 1 ต.หนองกระเจ็ด อ.บ้านลาด จ.เพชรบุรี 76150
ประวัติการศึกษา	2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. C. Jantaco, T. Chanwimalueang, S. Aootaphao, W. Senawong and C. Pintavirooj, "A CORRECTION FOR IMPERFECT ALIGNMENT OF X-RAY TUBE AND DETECTOR FOR X-RAY RADIOGRAPH TOMOGRAPHY" ICEAST
2. C. Jantaco, W. Iampa, C. Pintavirooj and M. Sangworasil "DESIGN AND CONSTRUCTION OF LINEAR ARRAY X-RAY DETECTORS" The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008)
3. C. Jantaco, S. Maneejamrut, C. Nantajiwakornchai, M. Sangworasil, C. Pintavirooj "INDIRECT X-RAY ARRAY DETECTOR SYSTEM WITH LINEAR CHARGE COUPLE DEVICE (CCD)" The 2nd Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON 2009)