

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การออกแบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมโดยใช้เซนเซอร์แบบสัมผัส  
ภาพซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้เอฟพีจีเอ

**A DESIGN OF INDIRECT X-RAY DETECTOR USING CONTACT IMAGE  
SENSOR CONTROLLED BY FPGA**



T117891



กิตติพันธ์ น้อยมณี

KITTINAN NOIMANEE

กพ  
ก613ก  
2553

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **117891**  
วัน,เดือน,ปี **22 ต.ค. 2554**

b. 12350333  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2010-EN-M-045-041

**A DESIGN OF INDIRECT X-RAY DETECTOR USING CONTACT IMAGE  
SENSOR CONTROLLED BY FPGA**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN BIOMEDICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2010  
KMITL-2010-EN-M-045-041**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Thesis</b>            | A Design of Indirect X-Ray Detector using Contact Image Sensor controlled by FPGA |
| <b>Student</b>           | Mr. Kittinan Noimanee   |
| <b>Student ID.</b>       | 52611702  |
| <b>Degree</b>            | Master of Engineering   |
| <b>Program</b>           | Biomedical Engineering  |
| <b>Year</b>              | 2010  |
| <b>Thesis Advisor</b>    | Assoc. Prof. Dr. Manas Sangworasil  |
| <b>Thesis Co-advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Chuchat Pintavirooj  |

### Abstract

This thesis presents the design of indirect x-ray detector using contact image sensor that is controlled by FPGA, which focus all module consist of control signal of contact image sensor module, control signal of analog to digital converter module, digital clock management module, first in first out memory module, single port block memory module, and main control signal module. All control signals must be synchronized for transmit data to computer and construct x-ray image, by contact image sensor, which detect visible light from intensifying screen (transform x-ray to visible light). In addition, this thesis has an experimentation to test contact image sensor's resolution and receive data from many objects for implementation in the future.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากบุพการีอันประกอบด้วยบิดาและมารดา ผู้ให้ความเชื่อเหลือข้าพเจ้าและกำลังใจตลอดจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ สังวรศิลป์ และ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้พร้อมด้วยความสนับสนุนต่าง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าได้มีประสบการณ์ที่ดี และสามารถนำไปพัฒนาตนเองและผู้อื่นเพื่อให้เกิดคุณประโยชน์ต่อประเทศชาติในอนาคตต่อไป

ขอขอบคุณพระคุณ กฤษณพันธ์ มหาพรชัยกุล ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งกำลังใจต่าง ๆ ที่ได้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ วีระภัทร จันทรยิ่งยง สำหรับการร่วมทำงานและทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมไปถึงการออกแบบการทดลองต่าง ๆ และขอแนะนำเกี่ยวกับหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ สราวุธ มณีจรัส สำหรับแหล่งข้อมูลทั้งหมดที่มีประโยชน์สำหรับในการศึกษาและต่อยอดในการพัฒนาต่อสำหรับวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ พีระพัฒน์ ไฉฉนอมทรัพย์ สำหรับแหล่งข้อมูล พร้อมทั้งแนวคิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงเพื่อให้วิทยานิพนธ์สามารถดำเนินงานไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ จูติกานต์ โอโกวัฒน์ สำหรับคำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย รวมไปถึงแนวคิดและความรู้พื้นฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับการออกแบบที่ดีและการนำไปพัฒนาต่อยอดในงานอื่นได้

ขอขอบคุณพระคุณ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ทั้งสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับทุกความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกรายละเอียดต่าง ๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กิตตินันท์ น้อยมณี

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญรูป.....  | VI   |
| สารบัญตาราง.....  | IX   |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                 | 1    |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....  | 2    |
| <br>  |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                      | 3    |
| 2.1 หลักการทั่วไปของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-Ray Detector).....                  | 3    |
| 2.2 หลักการและคุณสมบัติของสารเรืองแสง (Phosphor).....                           | 12   |
| 2.3 แผ่นเรืองแสงหรือแผ่นสกรีน (Intensifying Screen).....                        | 15   |
| 2.4 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field Programmable Gate Array: FPGA).....        | 16   |
| 2.5 หลักการและคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพ (Contact Image Sensor: CIS)..... | 17   |
| 2.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....                            | 18   |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 21   |
| <br>  |      |
| บทที่ 3 การออกแบบระบบภายในเอฟพีจีเอ.....  | 24   |
| 3.1 โมดูล Digital Clock Management.....   | 26   |
| 3.2 โมดูลสร้างสัญญาณควบคุมซีไอเอสและ AD9814.....                                | 27   |
| 3.3 โมดูลควบคุมการทำงานหลัก.....  | 37   |
| 3.4 โมดูล FIFO Memory.....  | 40   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|                      |  |    |
|----------------------|--|----|
| 3.5                  | โมดูล Single Port Block Memory.....              | 41 |
| 3.6                  | โมดูล Transmit Data .....                        | 42 |
| บทที่ 4              | กระบวนการทดลอง.....                              | 43 |
| 4.1                  | การสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอ .....                 | 43 |
| 4.2                  | การทดลองกับรังสีเอกซ์.....                       | 44 |
| บทที่ 5              | ผลการทดลองและอภิปรายผล .....                     | 52 |
| 5.1                  | ผลการทดลองการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ ..... | 52 |
| 5.2                  | ผลการทดลองจากรังสีเอกซ์.....                     | 59 |
| บทที่ 6              | สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....                | 71 |
| เอกสารอ้างอิง .....  |  | 72 |
| ดัชนี .....          |  | 73 |
| ประวัติผู้เขียน..... |  | 76 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแส โดยที่ $t_c$ แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ [1] .....                                       | 5    |
| รูปที่ 2.2 แสดงการแผ่รังสีที่มีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน [1].....  | 5    |
| รูปที่ 2.3 แสดงการต่อวงจรของเครื่องวัดกระแส [1].....  | 6    |
| รูปที่ 2.4 ค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา ( $\sigma_f(t)$ ) [1].....  | 7    |
| รูปที่ 2.5 บล็อกการทำงานของโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน .....   | 8    |
| รูปที่ 2.6 แสดงการวัดสัญญาณแบบโหมดพัลส์ .....   | 9    |
| รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของสัญญาณจากวงจรที่มีค่าคงที่ของเวลาต่างกัน [1, 2].....  | 10   |
| รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของพลังงานที่แตกต่างกัน[1, 2].....   | 11   |
| รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานอิเล็กทรอนิกส์หลังจากได้รับกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ [2].....                              | 12   |
| รูปที่ 2.10 แสดงค่า Emission Spectra ของ $\text{CaWO}_4$ (เส้น) และ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (บาร์แท่ง) [1] ..... | 14   |
| รูปที่ 2.11 แสดงช่วงที่เหมาะสมกับ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ มีค่าเหมาะสมกับฟิล์มชนิด Green film [1].....           | 14   |
| รูปที่ 2.12 แสดงแผ่นสกรีนที่ใช้ในงานวิจัยและ โครงสร้างของแผ่นเรืองแสงทั้ง 4 ชั้น [1].....                                   | 16   |
| รูปที่ 2.13 แสดงเอฟพีจีเอที่ใช้ในงานวิจัย .....   | 16   |
| รูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณที่เกิดจากซีซีดี [4] .....  | 18   |
| รูปที่ 2.15 แสดงการตรวจหาช่วงของ Reference Level และ Data Level จากสัญญาณซีซีดี [4] ....                                    | 18   |
| รูปที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมการทำงานของ AD9814 [5].....   | 19   |
| รูปที่ 2.17 แสดง Timing Diagram ของ Serial Operation ภายใน AD9814 [5].....  | 20   |
| รูปที่ 2.18 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ทำจากโพโตทรานซิสเตอร์ของเอกภพ งามละเมียด [7] .....                                       | 21   |
| รูปที่ 2.19 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นจากโพโตทรานซิสเตอร์ของธนศ อังศุวัฒนากุล [1]....                                 | 22   |
| รูปที่ 2.20 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นจากซีซีดีโดย ชูศักดิ์ จันทโค [2].....   | 22   |
| รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของระบบทั้งหมด.....  | 24   |
| รูปที่ 3.2 แสดงระบบทั้งหมดซึ่งมีเอฟพีจีเอเป็นส่วนสร้างสัญญาณควบคุม.....   | 25   |
| รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่ภายในเอฟพีจีเอ .....   | 25   |
| รูปที่ 3.4 แสดงโมดูลภายในเอฟพีจีเอซึ่งใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม.....  | 26   |
| รูปที่ 3.5 แสดงโมดูลภายในของเอฟพีจีเอพร้อมชื่อของโมดูลย่อยทั้งหมด.....  | 26   |
| รูปที่ 3.6 แสดงเอฟพีจีเอที่ใช้ในงานวิจัยและวงจรกำเนิดความถี่ 50 MHz .....   | 27   |
| รูปที่ 3.7 แสดงโมดูล Digital Clock Management .....   | 27   |
| รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งของสัญญาณ CDSCLK1 และ CDSCLK2 [5].....  | 28   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.9 แสดงช่วงเวลาที่ใช้แต่ละช่วงสำหรับการสร้างสัญญาณควบคุม AD9814 [5] ..... | 29   |
| รูปที่ 3.10 สัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และ ADCCLK ในหน่วยนาโนวินาที [5].....          | 29   |
| รูปที่ 3.11 ช่วงเวลาของสัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และ ADCCLK ในหน่วยไซเคิล [5] .....  | 30   |
| รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณควบคุมซีไอเอสซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ SP และ MCLK [8].....      | 30   |
| รูปที่ 3.13 แสดงโมดูลสร้างสัญญาณควบคุมซีไอเอสและ AD9814 .....                     | 31   |
| รูปที่ 3.14 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ ADCCLK.....                       | 32   |
| รูปที่ 3.15 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ MCLK.....                         | 33   |
| รูปที่ 3.16 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ CDSCLK1 และ CDSCLK2.....          | 34   |
| รูปที่ 3.17 แสดงผังการทำงานของสัญญาณ SDATA.....                                   | 37   |
| รูปที่ 3.18 แสดงเวลาในการเปลี่ยนสถานะของโมดูลควบคุมการทำงานหลัก .....             | 39   |
| รูปที่ 3.19 แสดงผังการทำงานของโมดูลควบคุมการทำงานหลัก.....                        | 40   |
| รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการทำงานของ FIFO Memory .....                               | 40   |
| รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการเขียนข้อมูลจาก Single Port Block Memory.....             | 41   |
| รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการอ่านข้อมูลจาก Single Port Block Memory .....             | 41   |
| รูปที่ 4.1 แสดงความละเอียดต่าง ๆ ของวัตถุทดสอบความละเอียดมาตรฐาน .....            | 46   |
| รูปที่ 4.2 แสดงวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ.....                                    | 46   |
| รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของวงจรรวม .....  | 47   |
| รูปที่ 4.4 แสดงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....   | 47   |
| รูปที่ 4.5 แสดงวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน.....                  | 48   |
| รูปที่ 4.6 แสดงแผ่นอลูมิเนียมแบบขึ้น .....  | 49   |
| รูปที่ 4.7 แสดงวัตถุแบบสองมิติ.....   | 49   |
| รูปที่ 4.8 แสดงกระดุกสัตว์.....   | 50   |
| รูปที่ 4.9 แสดงแผ่นดิสเก็ต.....   | 51   |
| รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณควบคุมจากการจำลองการทำงานทั้งหมด.....                        | 52   |
| รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณความถี่ 50 MHz.....  | 53   |
| รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณความถี่ 60 MHz.....  | 53   |
| รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณ ADCCLK MCLK CDSCLK1 และ CDSCLK2.....                        | 54   |
| รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณ SDATA SCLK และ SLOAD.....                                   | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.6 แสดงการเริ่มการทำงานของสัญญาณ ADCCLK MCLK CDSCLK1 และ CDSCLK2 ..               | 54   |
| รูปที่ 5.7 แสดงการเกิดสัญญาณ SP และการเริ่มสถานะ Write Ram.....                           | 55   |
| รูปที่ 5.8 แสดงเปลี่ยนสถานะเมื่อเขียนข้อมูลลงใน Single Block Port Memory .....            | 56   |
| รูปที่ 5.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะอย่างละเอียดในการเขียนข้อมูลลงใน FIFO Memory .....          | 56   |
| รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณ MCLK ซึ่งสร้างจากเฟรควิเอนซี 3.75 MHz .....                        | 57   |
| รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และสัญญาณ ADCCLK สร้างจากเฟรควิเอนซี ..            | 58   |
| รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณผลลัพท์จากซีไอเอสไปยัง AD9814.....                                  | 58   |
| รูปที่ 5.13 แสดงความเข้มเฉลี่ยของการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจ็ับรังสีเอกซ์ .....       | 60   |
| รูปที่ 5.14 แสดงค่าเฉลี่ยของการทดลองความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจ็ับรังสีเอกซ์ .....        | 61   |
| รูปที่ 5.15 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุทดสอบความละเอียด .....                        | 62   |
| รูปที่ 5.16 แสดง Intensity Profile ช่วง A ของวัตถุทดสอบความละเอียด .....                  | 62   |
| รูปที่ 5.17 แสดง Intensity Profile ช่วง B C และ D ของวัตถุทดสอบความละเอียด .....          | 63   |
| รูปที่ 5.18 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ.....                    | 63   |
| รูปที่ 5.19 แสดง Intensity Profile ของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ.....                     | 64   |
| รูปที่ 5.20 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....                        | 64   |
| รูปที่ 5.21 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน ..... | 65   |
| รูปที่ 5.22 แสดง Intensity Profile ของวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน .....  | 66   |
| รูปที่ 5.23 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขึ้น.....                         | 66   |
| รูปที่ 5.24 แสดง Intensity Profile ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขึ้น.....                          | 67   |
| รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ของ Intensity Profile ของอลูมิเนียมกับทฤษฎีของ Lambert Beer . | 68   |
| รูปที่ 5.26 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุแบบสองมิติ .....                              | 68   |
| รูปที่ 5.27 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของกระดูกสัตว์.....                                   | 69   |
| รูปที่ 5.28 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุภายในแผ่นคิสเก็ต .....                        | 70   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 แสดงชื่อของแต่ละบิตในสัญญาณ SDATA .....                             | 20   |
| ตารางที่ 3.1 แสดงค่าภายในของ Register ต่าง ๆ ของสัญญาณ SDATA .....               | 34   |
| ตารางที่ 3.2 แสดงการทำงานของแต่ละบิตของ Configuration Register .....             | 35   |
| ตารางที่ 3.3 แสดงการทำงานของแต่ละบิตของ Mux Register .....                       | 36   |
| ตารางที่ 3.4 แสดงการทำงานของแต่ละบิตของ PGA Gain Register.....                   | 36   |
| ตารางที่ 3.5 แสดงการทำงานของแต่ละบิตของ Offset Register .....                    | 36   |
| ตารางที่ 4.1 แสดงการออกแบบตารางบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของซีไอเอส .....      | 44   |
| ตารางที่ 4.2 แสดงการออกแบบตารางบันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของซีไอเอส.....   | 45   |
| ตารางที่ 5.1 แสดงผลของการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ .....          | 59   |
| ตารางที่ 5.2 แสดงผลของความเข้มสัญญาณแต่ละช่องตามการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์..... | 60   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์เป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในงานอุตสาหกรรมระบบรักษาความปลอดภัย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางการแพทย์ จึงปฏิเสธไม่ได้ว่าระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์นั้นมีความสำคัญสูงสุดในการช่วยชีวิตผู้ป่วย จึงมีการพัฒนาในด้านนี้อย่างจริงจังและกว้างขวางมากยิ่งขึ้นในต่างประเทศ ซึ่งในขณะที่ภายในประเทศกลับไม่มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้อย่างจริงจัง จึงเป็นเหตุให้ประเทศต้องสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมากในการนำเข้าและบำรุงเทคโนโลยีที่มีราคาแพงเหล่านี้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและพัฒนาความรู้ความเข้าใจในเทคโนโลยีเหล่านี้ให้มากขึ้น เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาและอาจก่อให้เกิดผลในเชิงกว้างต่อการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้มากขึ้นภายในประเทศ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจจับรังสีเอกซ์และระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการพัฒนาความรู้และเทคโนโลยีในระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์โดยใช้เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพและควบคุมการทำงานโดยเอฟพีจีเอ มาเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 สร้างระบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ใช้วิธีสร้างภาพแบบทางอ้อมโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับคือเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพร่วมกับแผ่นเรืองแสงชนิดแถวเดียว
- 1.2.2 สร้างสัญญาณเพื่อควบคุมระบบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับภาพแบบสัมผัส โดยใช้เอฟพีจีเอและเพื่อควบคุมระบบการทำงานทั้งหมด

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ภาพที่ได้จากรังสีเอกซ์นั้นสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการต่าง ๆ ซึ่งวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นคือการใช้แผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ก็ยังมีวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถสร้างภาพที่ได้จากรังสีเอกซ์ โดยการแปลงพลังงานจากรังสีเอกซ์ให้เป็นพลังงานรูปแบบอื่นที่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ให้อยู่ในรูปแบบของแสง แล้วทำการเปลี่ยนพลังงานจากแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เข้าสู่กระบวนการประมวลผลต่อไป

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 สร้างระบบตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างภาพแบบทางอ้อมโดยใช้เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพเพื่อรับพลังจากแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสง
- 1.4.2 สร้างระบบการทำงานทั้งหมดให้อยู่ภายในเอพพีจีเออย่างเดียวเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

- 1.5.1 รวบรวมองค์ความรู้และศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัย
- 1.5.2 กำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษา รวมถึงตั้งสมมติฐานแนวความคิดของงานวิจัยและขอบเขตของงานวิจัย
- 1.5.3 เลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.4 ออกแบบระบบและการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบระบบ
- 1.5.5 วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองพร้อมสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทุกชนิดในระบบตรวจจับรังสีเอกซ์ ซึ่งการทำความเข้าใจในทฤษฎีต่าง ๆ เหล่านี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างระบบตรวจจับรังสีเอกซ์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

### 2.1 หลักการทั่วไปของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-Ray Detector)

ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-Ray Detector) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับพลังงานรังสีเอกซ์แล้วเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีเอกซ์เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปสร้างภาพหรือประมวลผลต่อไป โดยรังสีเอกซ์นั้น มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศจะมีความเร็วเท่ากับแสง คือ  $3 \times 10^8$  m/s นอกจากนั้น รังสีเอกซ์ยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา แต่ในการวัดพลังงานจะไม่เหมือนกับแสงทั่วไปที่จะวัดอนุภาคของแสงหรือโฟตอน การวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ ตัวตรวจจับจะต้องได้รับพลังงานทั้งหมดของรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์จะทำให้ตัวตรวจจับเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการวัดถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ทราบถึงพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบกับตัวตรวจจับได้ ในกระบวนการการทำงานตัวตรวจจับแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของตัวตรวจจับ อย่างไรก็ตาม ตัวตรวจจับเหล่านี้จะมีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมือนกัน เช่น ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) การกระจายตัวของพลังงาน (Energy Resolution)

#### 2.1.1 วิธีการบันทึกข้อมูลของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

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 และการทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้จะต้องหยุดลงอย่างรวดเร็ว (โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ  $10^{-9}$  s ในก๊าซ และ  $10^{-12}$  s ในของแข็ง) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยานี้มีค่าสั้นมาก ดังนั้น จึงมีการพิจารณาว่าการตอบสนองของตัวตรวจจับต่อพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีนั้นเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด

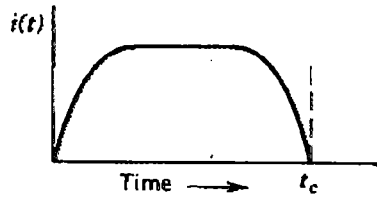
ผลที่ได้จากตัวตรวจจับเมื่อทำปฏิกิริยากับการแผ่รังสีก็คือ ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจจับในส่วนที่ได้รับการกระตุ้น ถ้าสมมุติให้แบบจำลองของตัวตรวจจับมีค่าประจุ  $Q$  เกิดขึ้นที่เวลา  $t = 0$  เมื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคเดี่ยว หรือควอนตัมของการแผ่รังสี ซึ่งประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการสะสมอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า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

ถ้าพิจารณาจากแบบจำลองของตัวตรวจจับการตอบสนองต่ออนุภาคเดี่ยวหรือควอนตัมที่เกิดจากการแผ่รังสีจะเป็นกระแสที่ไหลในช่วงเวลาที่มีค่าเท่ากับเวลาในการเก็บประจุทั้งหมด รูปที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแส โดยที่  $t_c$  แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ

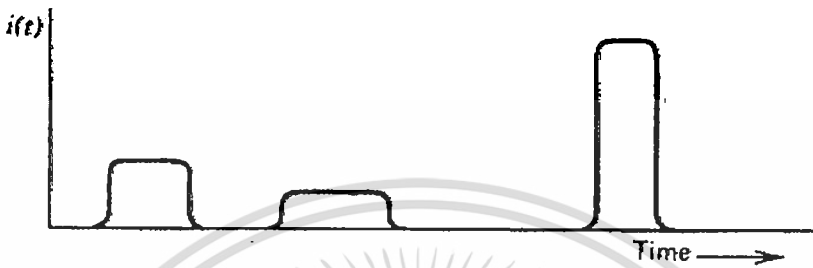
$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q$$

เมื่อ  $i(t)$  คือ กระแส ณ ช่วงเวลาต่างๆ  
 $Q$  คือ ผลรวมของประจุที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง  $t$

จากสมการแสดงค่าผลรวมของประจุ ( $Q$ ) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง  $t_c$  ในสถานการณ์จริงการแผ่รังสีมักเกิดเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ถ้าการแผ่รังสีเกิดขึ้นหลายครั้งอย่างรวดเร็ว จะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นในตัวตรวจจับเป็นค่ากระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีหลายครั้ง แต่ในที่นี้จะสมมุติให้อัตราการแผ่รังสีในแต่ละครั้ง เกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำอย่างเพียงพอที่จะพิจารณาว่ากระแสที่เกิดในตัวตรวจจับแต่ละครั้งเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีเพียงครั้งเดียว ขนาดและเวลาที่เกิดค่ากระแสในแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับที่เกิดปฏิกิริยาของการแผ่รังสีในแต่ละครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่  $t_c$  แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ [1]



รูปที่ 2.2 แสดงการแผ่รังสีที่มีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน [1]

### 2.1.1.2 รูปแบบการทำงานของตัวตรวจจับ (Modes of Detector Operation)

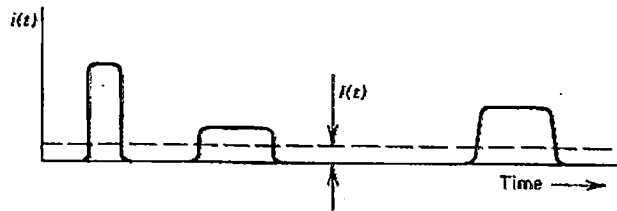
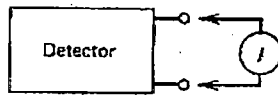
รูปแบบการทำงานพื้นฐานของตัวตรวจจับแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ โหมดพัลส์ (Pulse Mode), โหมดกระแส (Current Mode) และโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (Mean Square Voltage Mode) หรือบางครั้งจะเรียกว่า แคมเบลลิงโหมด (Campbelling Mode) จากโหมดการทำงานทั้ง 3 ชนิด โหมดพัลส์จะมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายที่สุด แต่โหมดกระแสจะมีการนำไปใช้งานมากที่สุด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

#### 2.1.1.2.1 โหมดกระแส (Current Mode)

ในการวัดค่ากระแสอุปกรณ์ที่ใช้ อย่างเช่น แอมมิเตอร์จะต่ออยู่ที่ขั้วไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของตัวตรวจจับ 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 [1]

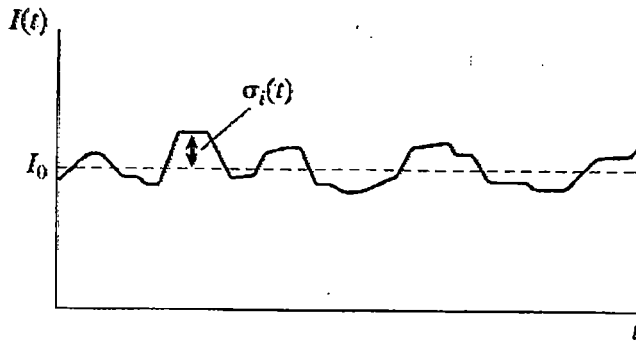
เนื่องจากการตอบสนองในช่วงเวลา  $T$  มีค่ายาวนานกว่าค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเกิดพัลส์กระแสที่เกิดจากตัวตรวจจับในแต่ละลูก ผลที่ได้คือ การเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นจากหลายๆพัลส์ภายในช่วงเวลาดังกล่าว

ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นได้จากผลรวมค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดประจุกับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง ดังนี้

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{W} q$$

|       |     |     |   |
|-------|-----|-----|---|
| เมื่อ | $r$ | คือ | อัตราการเกิดประจุ   |
|       | $Q$ | คือ | จำนวนประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง   |
|       | $E$ | คือ | พลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง  |
|       | $W$ | คือ | พลังงานเฉลี่ยที่ต้องการในแต่ละครั้งที่ทำให้เกิดคู่ประจุ (Electron-ion pair) |
|       | $q$ | คือ | $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$   |

สำหรับตัวตรวจจับที่ได้รับการแผ่รังสีที่มีค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของค่ากระแสแสดงที่ ( $I_0$ ) รวมกับค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา ( $\sigma_i(t)$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่  $\sigma_i(t)$  คือ ตัวแปรสุ่มที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการแผ่รังสีเมื่อทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.4 ค่ากระแสที่เกิดจากการผันแปรตามเวลา ( $\sigma_i(t)$ ) [1]

การวัดค่าทางสถิติที่เกิดจากองค์ประกอบที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเหล่านี้ ได้จากค่าเฉลี่ยการผันแปร (Variance) หรือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Value) ที่กำหนดโดยค่าเวลาเฉลี่ยของกำลังสองของความแตกต่างของกระแสที่เกิดการผันแปรตามเวลา ( $I(t)$ ) กับค่าเฉลี่ยของกระแส ( $I_0$ ) ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองนี้เป็นไปตาม

$$\overline{\sigma_{\frac{2}{I}}(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [I(t') - I_0]^2 dt' = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sigma_{\frac{2}{i}}(i') dt'$$

โดยค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นไปตาม

$$\sigma_I(t) = \sqrt{\overline{\sigma_{\frac{2}{I}}(t)}}$$

ถ้าพิจารณาจากสถิติ Poisson (Poisson Statistics) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่ได้รับการบันทึก  $n$  เป็นไปตาม

$$\sigma_n = \sqrt{n}$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนเหตุการณ์

ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการเกิด  $r$  ในช่วงเวลาที่ทำการวัด  $T$  คือ

$$\sigma_n = \sqrt{rT}$$

เมื่อ  $r$  คือ อัตราการเกิดเหตุการณ์

ถ้าการกระจายตัวของประจุในแต่ละพัลส์มีค่าเหมือนกัน สัดส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากการวัดกับสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มภายในช่วงเวลา T กำหนดโดย

$$\frac{\sigma_I t_0}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{rT}}$$

เมื่อ  $\sigma_I(t)$  คือ เวลาเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดกระแส เมื่อ T คือค่าเวลาการตอบสนองของเครื่องวัดกระแสและ  $I_0$  คือค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้จากเครื่องวัดโดยผลที่ได้จะนำมาใช้ในการประมวลผลความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัดแบบ Current Mode

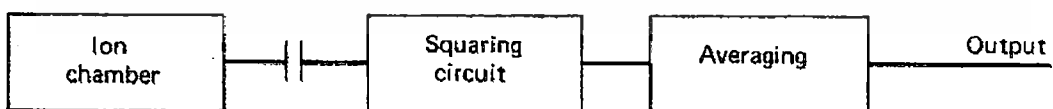
จากสมการ ประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง (Q) สมมติให้มีค่าคงที่ ดังนั้น ผลที่ได้นี้จะนำไปใช้กับช่วงเวลาสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเท่านั้น ไม่รวมถึงขนาดของสัญญาณ

#### 2.1.1.2.2 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  $\frac{2}{I}(t)$  จะสามารถหาขนาดของสัญญาณได้จาก

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

จากสมการจะเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณที่แปรผันตรงกับอัตราการเกิด r และค่ากำลังสองของประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลานั้น ในการวิเคราะห์การทำงานของโหมดนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบ Campbell และในบางครั้งจะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่า Campbelling Mode

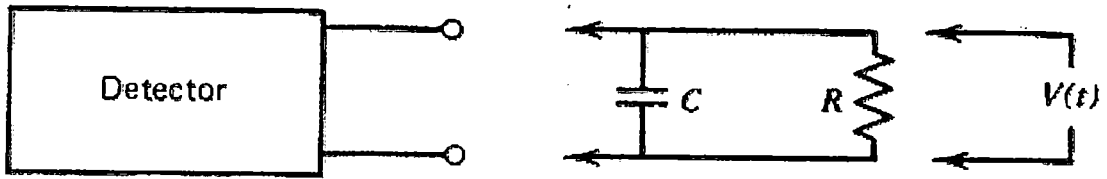


รูปที่ 2.5 บล็อกการทำงานของโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน

#### 2.1.1.2.3 โหมดพัลส์ (Pulse Mode)

การทำงานในโหมดนี้ สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับจะนำมาต่อกับวงจรภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวงจรขยายภาคต้น (Preamplifier) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเสมือนได้ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดสัญญาณแบบโหมคพัลส์

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

#### 2.1.1.2.3.1 ในกรณีค่า $RC$ ต่ำ ( $\tau \ll tc$ )

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

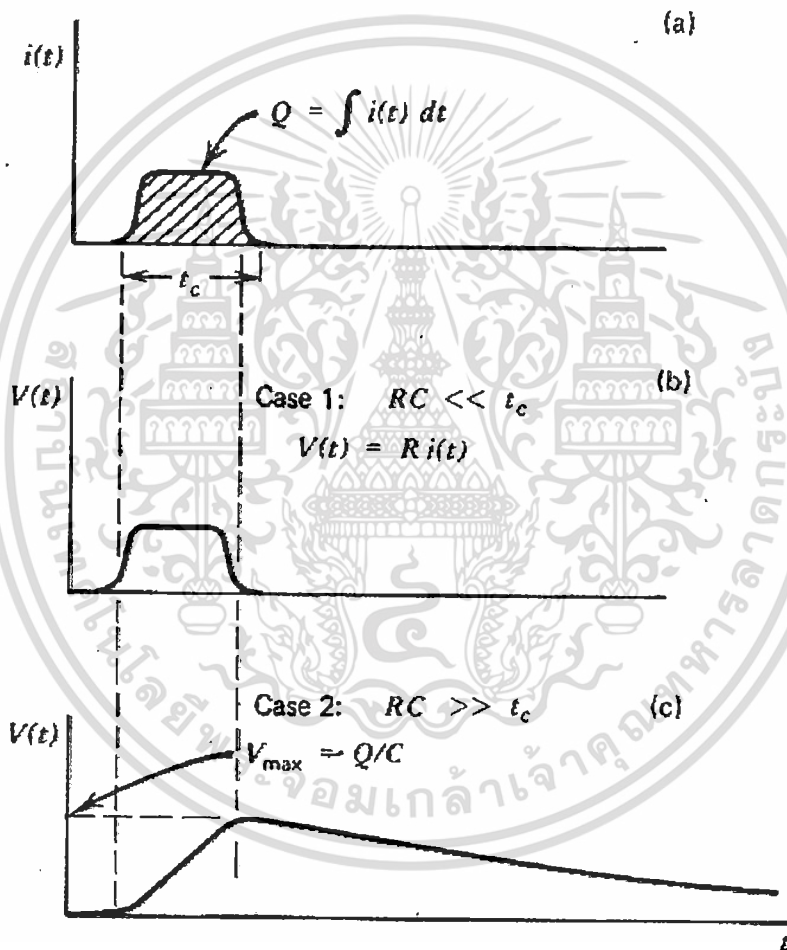
#### 2.1.1.2.3.2 ในกรณีค่า $RC$ สูง ( $\tau \gg tc$ )

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

$$V_{Max} = \frac{Q}{C}$$

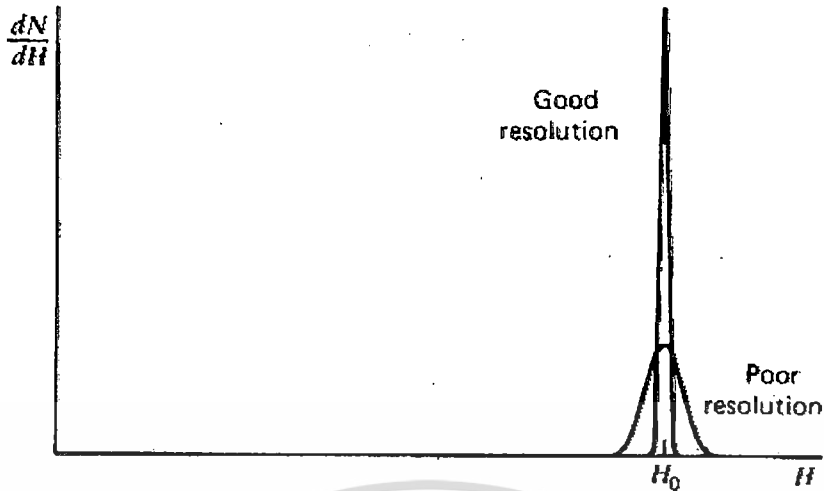
### 2.1.2 Energy Resolution

Energy Resolution เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของตัวตรวจจับรังสีเมื่อมีการตอบสนองต่อรังสี จากรูปที่ 2.8 แสดงความแตกต่างทางด้านความสูงของการกระจายตัวของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับเมื่อได้รับรังสีที่มีแหล่งพลังงานเดี่ยว ซึ่งการกระจายตัวของรูปคลื่นนี้เรียกว่า ฟังก์ชันการตอบสนอง (Response Function) ของตัวตรวจจับรังสี จากรูปที่ 2.8 พื้นที่ใต้ส่วนโค้งของทั้งสองรูปคลื่นมีขนาดที่เท่ากัน แต่การกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ย ( $H_0$ ) มีความกว้างไม่เท่ากัน จากรูปคลื่นที่มีความสูงและแคบ แสดงถึงการตอบสนองของตัวตรวจจับที่ดี



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของสัญญาณจากวงจรที่มีค่าคงที่ของเวลาต่างกัน [1, 2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของพลังงานที่แตกต่างกัน[1, 2]

### 2.1.3 ตัวตรวจจับที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง (Scintillation Detector)

โดยทั่วไปแล้วการตรวจจับรังสีเอกซ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น Ionization Chambers, Proportional Counters, Geiger-Mueller Counters, Photomultiplier Tubes and Photodiodes, Scintillation detector Principles, Semiconductor Diode Detectors เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง เฉพาะตัวตรวจจับที่ใช้วิธีการเคลือบด้วยสารเรืองแสงลงบนอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Scintillation Detector Principles) เท่านั้น

หลังจากการค้นพบรังสีเอกซ์โดย วิลเฮลม คอนราด เรินท์เก้น เมื่อปี ค.ศ. 1895 พบว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปไม่สามารถตรวจจับรังสีเอกซ์ได้ เนื่องจากค่าการดูดกลืนพลังงานของฟิล์มต่อรังสีเอกซ์มีค่าต่ำเกินไป ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาสารเรืองแสง (Phosphor) เข้ามาใช้ โดยสารเรืองแสงจะดูดกลืนพลังงานของรังสีเอกซ์ และคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับด้วยฟิล์มแบบทั่วไปได้นั่นเอง ซึ่งจากหลักการนี้เอง จึงทำให้มีการพัฒนาต่อ โดยเปลี่ยนตัวตรวจจับแสงเป็นชนิดอื่นนอกจากฟิล์ม ซึ่งถ้าสามารถรับแสงและเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า เราก็สามารถนำกระแสนี้มาใช้ในการตรวจจับรังสีเอกซ์ และสร้างภาพรังสีเอกซ์ได้ในที่สุด

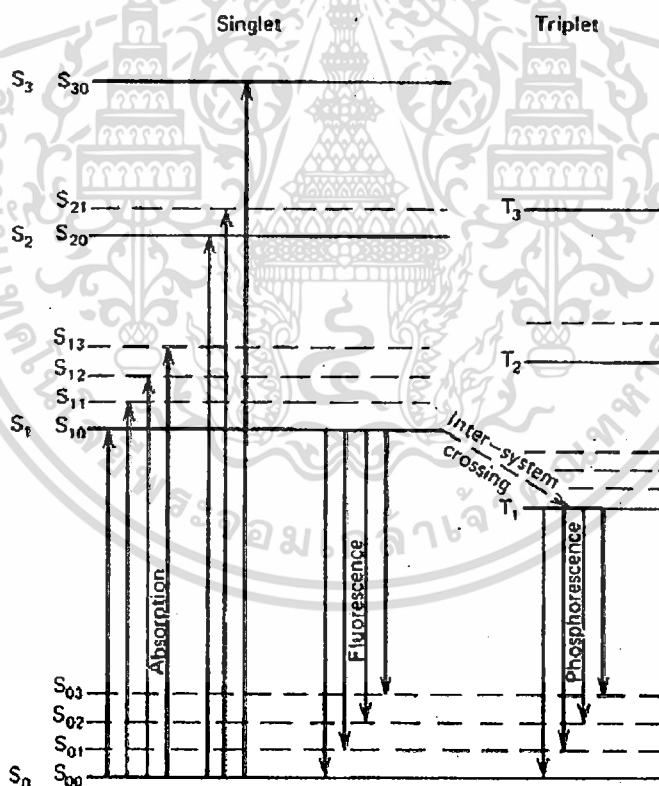
ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจะขอกล่าวถึงหลักการและคุณสมบัติเฉพาะของสารเรืองแสง ซึ่งมีหลายชนิดแตกต่างกัน เพราะฉะนั้น การเข้าใจคุณสมบัติทางเคมีของสารเรืองแสงแต่ละชนิดจำเป็นอย่างยิ่งในการเลือกใช้เพื่อให้เหมาะสม (Match) กับอุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการทำตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั่นเอง

## 2.2 หลักการและคุณสมบัติของสารเรืองแสง (Phosphor)

หลักการพื้นฐานของสารเรืองแสง คือ แสงจะถูกปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนถ่ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ระหว่างชั้นพลังงาน  $S_{10}$  และการสั่นของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (Ground state) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ถ้าให้  $\tau$  แทนเวลาในการลดสถานะจากชั้น  $S_{10}$  ดังนั้น ค่าความหนาแน่นของการเรืองแสงที่เกิดจากการกระตุ้นที่เวลา  $t$  จะเป็นไปตามทฤษฎีของ Lambert Beer

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

|       |       |     |   |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | $I$   | คือ | ความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อวัตถุทะลุผ่าน   |
|       | $I_0$ | คือ | ความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนการทะลุผ่านวัตถุ |
|       | $\mu$ | คือ | สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มของรังสีเอกซ์ |
|       | $x$   | คือ | ความหนาของวัตถุ                           |



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ [2]

ในสารเรืองแสงที่ทำมาจากสารอินทรีย์ทั้งหมด ค่า  $\tau$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-9}$  วินาที ซึ่งหมายความว่า การเรืองแสงจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากรังสีเอกซ์นั่นเอง

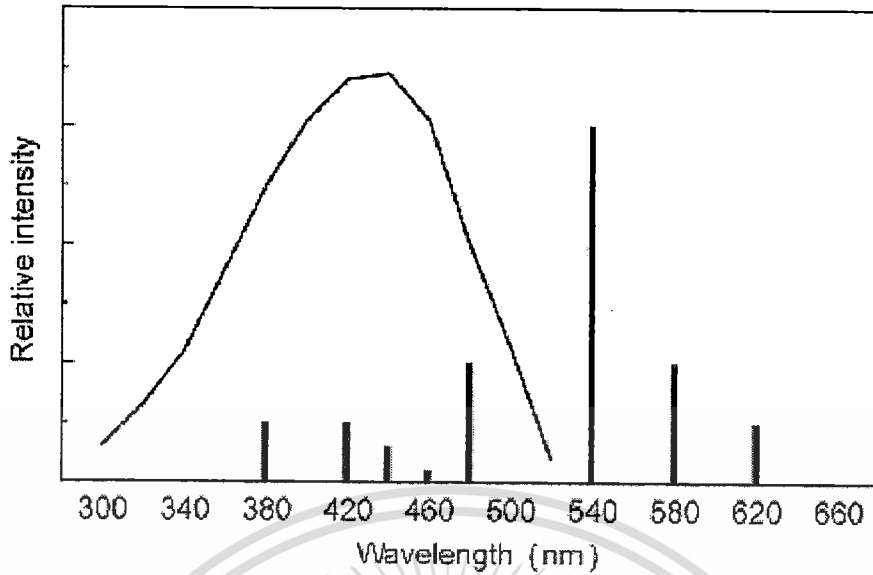
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเรืองแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ Calcium Tungstate ( $\text{CaWO}_4$ ) และ Rare Earth ซึ่งสารเรืองแสงทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน กล่าวคือ  $\text{CaWO}_4$  เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์จะเปล่งแสงในช่วงสีน้ำเงิน แต่ Rare Earth จะเปล่งแสงในช่วงสีเขียวและเหลือง ดังนั้น แผ่นเรืองแสงแต่ละชนิดจึงเหมาะกับอุปกรณ์รับแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แผ่นเรืองแสงประเภท Rare Earth จะเหมาะกับ Green Film เท่านั้น เป็นต้น

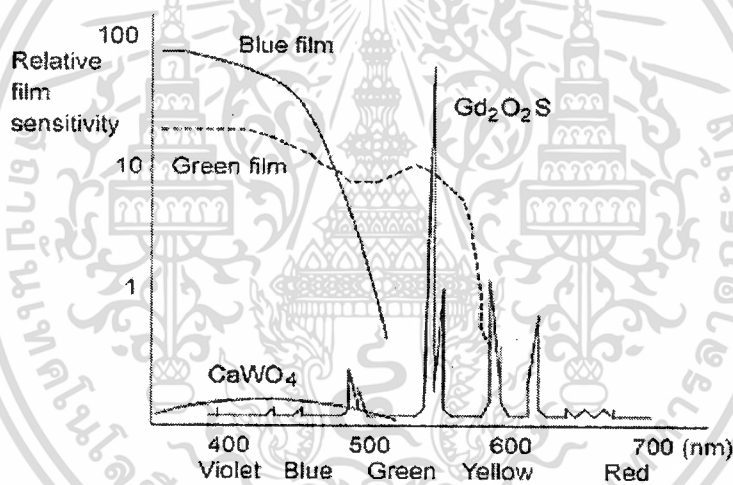
ปัจจุบัน สารเรืองแสงชนิด Rare Earth เข้ามาทดแทนสารเรืองแสงชนิด  $\text{CaWO}_4$  เนื่องจากสารเรืองแสงที่ผลิตจาก Rare Earth มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นแสง (Light Conversion Efficiency) สูงกว่า (ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นแสง (Light Conversion Efficiency) หมายความว่า ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในสารเรืองแสงและสามารถเปลี่ยนไปเป็นแสงได้) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นแสงของ  $\text{CaWO}_4$  กับ Rare Earth เมื่อให้ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เท่ากัน พบว่า Rare Earth จะให้แสงเปล่งออกมามากกว่า  $\text{CaWO}_4$  เพราะรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืนไว้สามารถเปลี่ยนไปเป็นแสงได้มากกว่านั่นเอง

นอกจากนั้น สารเรืองแสงจาก Rare Earth ยังสามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ไว้ได้มากกว่าสารเรืองแสงประเภท  $\text{CaWO}_4$  อีกด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดกลืน (Absorption Efficiency) ของสารเรืองแสงประเภท  $\text{CaWO}_4$  และ Rare Earth พบว่า 20% ของรังสีเอกซ์ที่ได้รับเท่านั้นที่  $\text{CaWO}_4$  จะสามารถดูดกลืนไว้ได้ แต่ Rare Earth สามารถดูดกลืนได้ถึง 60%

สารเรืองแสงชนิด Rare Earth ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$  ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์อีกอย่างที่แตกต่างกันจาก  $\text{CaWO}_4$  คือ ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจาก  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$  มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 540 nm ซึ่งเป็นช่วงของแสงสีเขียว แต่  $\text{CaWO}_4$  อยู่ที่ 430 nm ซึ่งเป็นช่วงของแสงสีน้ำเงินนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 นั้นหมายความว่า ตัวรับแสงจะต้องสามารถรับแสงในช่วงที่สารเรืองแสงแต่ละชนิดปล่อยออกมาให้ได้นั่นเอง ซึ่งจะต้องเหมาะสม (Match) กัน ซึ่งช่วงเริ่มต้นที่สร้างสารเรืองแสงเพื่อใช้กับฟิล์มรังสีเอกซ์นั้น ก็เพราะคำนึงถึงปัจจัยนี้ จึงต้องใช้ฟิล์มให้เหมาะสมกับชนิดของสารเรืองแสง หรือใช้สารเรืองแสงให้เหมาะสมกับชนิดของฟิล์มนั่นเอง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงค่า Emission Spectra ของ  $\text{CaWO}_4$  (เส้น) และ  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$  (บาร์แท่ง) [1]



รูปที่ 2.11 แสดงช่วงที่เหมาะสมกับ  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$  มีค่าเหมาะสมกับฟิล์มชนิด Green film [1]

จากหลักการนี้เอง จึงเป็นช่องทางในการพัฒนาไปสู่ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิดที่ใช้แผ่นเรืองแสง โดยเปลี่ยนตัวรับแสงจากฟิล์มเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photo-detector) นั่นเอง ซึ่งถ้าเราเข้าใจคุณสมบัติเฉพาะของสารเรืองแสงที่จะนำมาใช้ เราก็จะสามารถเลือกอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่เหมาะสมเข้ากันมาใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการตรวจจับแสง และนำไปสู่การพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั่นเอง

การตรวจจับรังสีโดยใช้สารเรืองแสงเป็นเทคนิคที่มีการใช้มาอย่างยาวนาน แต่ยังคงเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาและใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยที่คุณสมบัติของสารเรืองแสงที่ดีมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถเปลี่ยนพลังงานพลังงานจลน์ของประจุให้เป็นพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับได้ด้วยค่าการเปลี่ยนถ่ายที่สูง
- การเปลี่ยนถ่ายพลังงานนี้ควรมีการสนองที่เป็นเส้นตรงตลอดช่วงการเปลี่ยนถ่าย
- ตัวกลางควร โปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน
- เวลาที่ใช้ในลดลงของแสงหลังจากรับรังสีควรมีค่าสั้น
- วัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีและมีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการนำมาทำตัวตรวจจับ
- ดัชนีการหักเหควรมีค่าใกล้เคียงกับกระจก ( $\sim 1.5$ ) เพื่อให้มีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดี

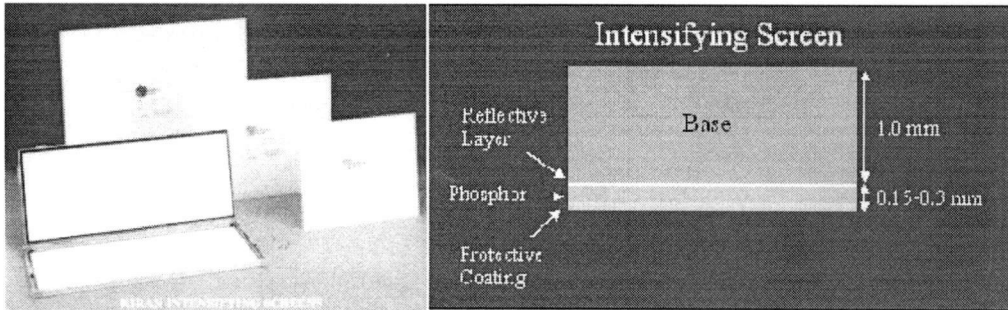
ระบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้ใช้แผ่นเรืองแสงที่ใช้กับฟิล์มรังสีเอกซ์ โดยเรียกทั่วไปว่า แผ่นสกรีน (Intensifying Screen) ซึ่งเป็นการประยุกต์นำสารเรืองแสงมาอัดให้เป็นแผ่นเพื่อให้สามารถใช้ร่วมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ได้ง่าย การใช้แผ่นเรืองแสงร่วมกับระบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์จะใช้ต้นทุนที่ไม่สูง เนื่องจากแผ่นเรืองแสงมีราคาไม่แพงมาก เมื่อเทียบกับการเคลือบสารเรืองแสงไปบนผิวของตัวรับแสง จึงเหมาะจะนำมาใช้กับระบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ต้นแบบของงานวิจัยนี้

### 2.3 แผ่นเรืองแสงหรือแผ่นสกรีน (Intensifying Screen)

แผ่นเรืองแสงประกอบไปด้วยชั้นวัสดุที่มีหน้าที่ต่างๆ ทั้งสิ้น 4 ชั้น ดังรูปที่ 2.12 ได้แก่

- ชั้นป้องกัน (Protective Coating) เป็นชั้นนอกสุดของแผ่นเรืองแสงซึ่งเป็นด้านที่สัมผัสกับอุปกรณ์รับแสง เช่น ฟิล์มรังสีเอกซ์ เป็นต้น โดยทำหน้าที่ปกป้องชั้นอื่นๆ ที่อยู่ภายใน ให้ความแข็งแรง ป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการเสียดสีกับฟิล์ม และสามารถเช็ดทำความสะอาดได้โดยไม่ทำลายชั้นฟอสเฟอร์ หนาประมาณ 10-20  $\mu\text{m}$
- ชั้นสารเรืองแสง (Phosphor) มีความหนาตั้งแต่ 50-300  $\mu\text{m}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นเรืองแสง ประกอบไปด้วยสารเรืองแสงชนิดต่างๆ เช่น Calcium Tungstate หรือ Rare Earth เป็นต้น โดย Calcium Tungstate เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์จะเปล่งแสงในช่วงสีน้ำเงิน แต่ Rare Earth จะเปล่งแสงในช่วงสีเขียวและเหลือง ดังนั้น แผ่นเรืองแสงแต่ละชนิดจึงเหมาะกับอุปกรณ์รับแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แผ่นเรืองแสงประเภท Rare Earth จะเหมาะกับ Green Film เท่านั้น เป็นต้น
- ชั้นยึดติด (Reflective Layer) ทำหน้าที่ยึดชั้นสารเรืองแสงกับชั้นฐานไว้ด้วยกัน
- ชั้นฐาน (Base) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่พยุงชั้นสารเรืองแสง หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

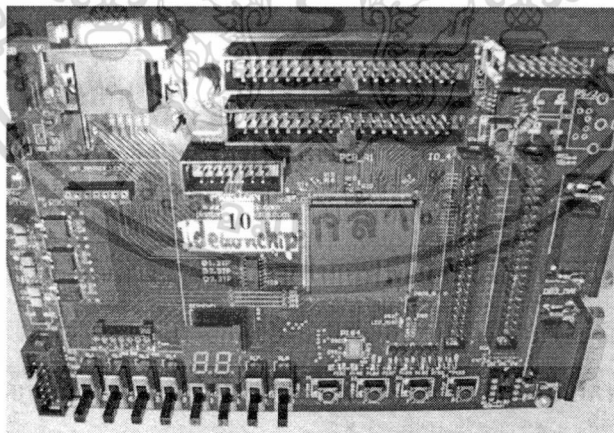


รูปที่ 2.12 แสดงแผ่นสกรีนที่ใช้ในงานวิจัยและโครงสร้างของแผ่นเรืองแสงทั้ง 4 ชั้น [1]

#### 2.4 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field Programmable Gate Array: FPGA)

เอฟพีเจเอ็นั้นถือเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพราะการออกแบบโมดูลทุก ๆ อย่างนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เอฟพีเจเอในการออกแบบ เพราะข้อดีของเอฟพีเจเอคือความสามารถในการทำงานของโมดูลต่าง ๆ ให้ทำงานสอดคล้องกันได้ (Synchronization) อีกทั้งยังเป็นการลดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้อยู่ภายในเอฟพีเจเอเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้วงจรมีขนาดเล็กด้วย ดังนั้นจึงจะต้องศึกษาถึงรายละเอียดของเอฟพีเจเอก่อนการนำมาใช้งานจริง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Spartan-3E ตระกูล XC3S250E [3] ซึ่งมีเกตทั้งหมด 250,000 เกต มี Block RAM bits ทั้งหมด 216K และมีโมดูล DCM ทั้งหมด 4 โมดูล ซึ่งเป็นบอร์ดที่มีการออกแบบมาภายในห้องวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งมีความถี่ที่ติดมากับบอร์ดคือ 50 MHz



รูปที่ 2.13 แสดงเอฟพีเจเอที่ใช้ในงานวิจัย

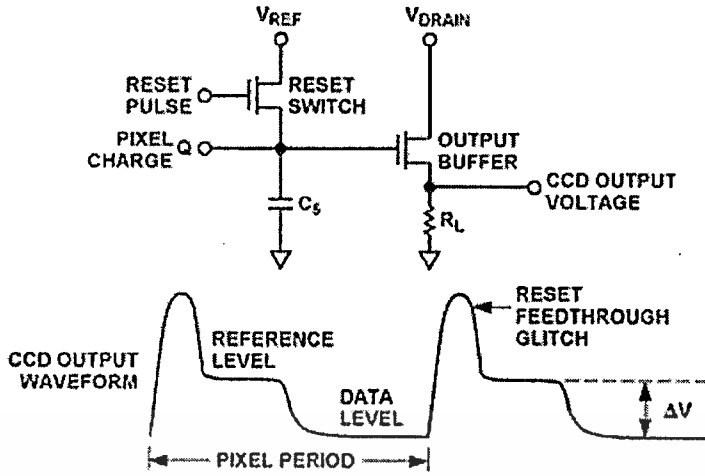
ภาษาที่ใช้สำหรับการเขียน โปรแกรมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมต่าง ๆ จะใช้ภาษา VHDL (VHSIC Hardware Description Language) ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้สำหรับการบรรยายพฤติกรรมเชิงฮาร์ดแวร์ได้ โดยมีลักษณะการเขียน โปรแกรม 3 แบบด้วยกันคือ ลักษณะการเขียนแบบ Data Flow ซึ่งลักษณะการเขียน โปรแกรมแบบนี้ ทุก ๆ บรรทัดของโปรแกรมจะทำงานพร้อมกันหมด ซึ่งเป็นเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเกินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเขียนที่กระชับ และเป็นการประหยัดจำนวนบรรทัดอีกด้วย การเขียนโปรแกรมลักษณะนี้จึงเป็นการเขียนในเชิงฮาร์ดแวร์โดยแท้จริง อีกลักษณะการเขียนหนึ่ง คือลักษณะการเขียนแบบ Behavioral ซึ่งลักษณะการเขียนจะเป็นการทำงานแบบ Process โดยภายใน Process นั้นจะมีลักษณะการทำงานเป็น Sequential ซึ่งหมายถึงลักษณะการทำงานที่ละบรรทัด ซึ่งจะต่างกับลักษณะการทำงานของ Data Flow ซึ่งจะทำงานกันแบบ Concurrent ซึ่งทุกบรรทัดจะทำงานพร้อมกันหมด ซึ่งถือเป็นการดึงประสิทธิภาพของภาษา VHDL ออกมาได้มากที่สุด และแบบสุดท้ายคือการเขียนโปรแกรมในลักษณะ Structural โดยการอ้างอิงโมดูลย่อยต่าง ๆ ประกอบกันเป็นโมดูลใหญ่ ซึ่งลักษณะการเขียนโปรแกรมลักษณะนี้ จะทำให้มองเห็นภาพรวมของโปรแกรมได้ชัดเจน เพราะจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการอธิบายโดยใช้บล็อกไดอะแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้ทุกวิธีการเขียนโปรแกรม เพราะลักษณะการเขียนโปรแกรมแต่ละแบบนี้ จะมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป

## 2.5 หลักการและคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพ (Contact Image Sensor: CIS)

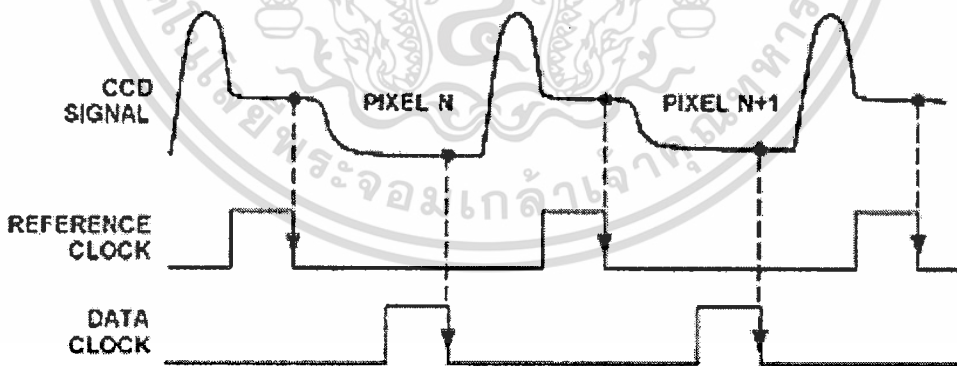
สำหรับซีไอเอสนั้นลักษณะการทำงานพื้นฐานหลัก ๆ แล้วจะมาจากการทำงานแบบซีซีดี ซึ่งแตกต่างกันที่สัญญาณผลลัพธ์ที่ได้นั่นเอง ดังนั้นหากจะศึกษาให้ถ่องแท้ ก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาลักษณะสัญญาณของซีซีดีเสียก่อน

ลักษณะสัญญาณของซีซีดี [4] นั้นจะอ้างอิงได้จากรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของซีซีดีนั้น เป็นเพียงการชาร์จประจุผ่านยังตัวเก็บประจุ ซึ่งเมื่อตัวเก็บประจุทำการคายพลังงานออกมา ค่าที่ได้นั้นก็จะเป็นค่าของแต่ละ Pixel ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้สำหรับรูปภาพนั่นเอง โดยจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการกด Reset Pulse ซึ่งจากจุดนี้ ทุกครั้งที่มีการกด Reset Pulse ก็จะทำให้เกิดสัญญาณขึ้น ซึ่งก็คือ Reset Feedthrough Glitch นั่นเอง ซึ่งตัวเก็บประจุ  $C_s$  ก็คือ Reference Level นั่นเอง ซึ่งเป็นสัญญาณที่จะใช้อ้างอิงช่วงของข้อมูลได้ ซึ่ง Reference Level นี้จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อมีสัญญาณเข้ามาซึ่งเป็นสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแสง ก็จะทำให้เกิด Data Level ขึ้นซึ่งเป็นค่าที่จะขึ้นลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อการนำเอาสัญญาณเหล่านี้ไปใช้งาน จึงจำเป็นที่จะต้องใช้การทำงานต่าง ๆ เข้ามาช่วย เช่น Correlated Double Sampling และ DC Restoration (Clamping) รวมถึงการปรับค่า Gain Offset และ A/D Conversion ด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณที่เกิดจากซีซีดี [4]

ส่วนการทำงานหลักคือ Correlated Double Sampling (CDS) ซึ่งประกอบด้วยส่วนการทำงานหลักสองส่วนด้วยกัน นั่นคือ CDS จะทำการคำนวณหาช่วงความต่างของแรงดันในช่วง Data Level ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของ Pixel ออกมาได้ ประกอบกับยังช่วยลดสัญญาณรบกวนบางส่วน of สัญญาณซีซีดีอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ ค่า Pixel Period จะเท่ากับ 266.67 ns ซึ่งนับเป็นคาบของ ความถี่ 3.75 MHz นั่นเอง ดังนั้นในการสร้างสัญญาณเพื่อทำการตรวจหาช่วงของ Data Level จึง จำเป็นที่จะต้อง Data Clock ตามรูปที่ 2.15 เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่เป็น Pixel และในทำนองเดียวกัน ก็ จะต้องหาช่วงของ Reference Level โดยใช้สัญญาณ Reference Clock ในการตรวจหาอีกเช่นกัน

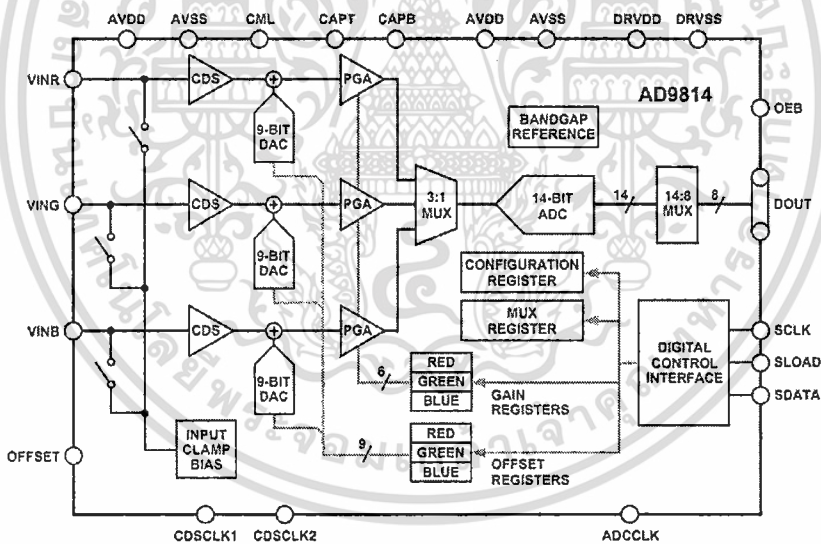


รูปที่ 2.15 แสดงการตรวจหาช่วงของ Reference Level และ Data Level จากสัญญาณซีซีดี [4]

## 2.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ดังนั้นเมื่อทราบที่มาของสัญญาณที่ได้จากซีซีดีแล้ว ก็ต้องวิเคราะห์สัญญาณของซีไอเอส ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนั้นผู้วิจัยได้เลือกใช้ซีไอเอสที่มีลักษณะสัญญาณเหมือนกับ เอกสสัญญาณของซีซีดี ดังนั้นลักษณะการทำงานจึงเหมือนกัน กล่าวคือจะมีช่วงของ Reference Level ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

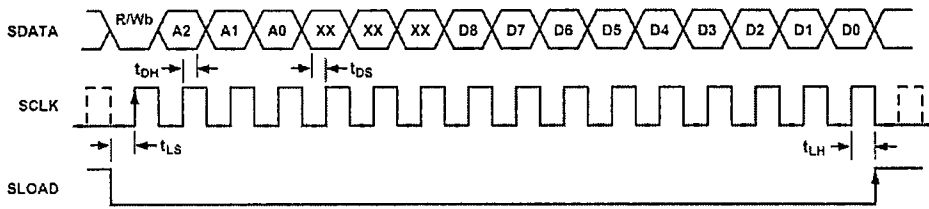
และ Data Level นั้นเอง ซึ่งหลังจากเข้าใจหลักการทำงานแล้ว ก็ต้องทำการแปลงข้อมูลจากซีไอเอสที่อยู่ในรูปสัญญาณอนาล็อก ให้เป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปดิจิทัล ดังนั้นจึงจะต้องทำการศึกษาและค้นหาอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และจะต้องมี Correlated Double Sampling ด้วย เพื่อทำการสร้างช่วงของ Reference Level กับ Data Level ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ในท้องตลาดมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่ชื่อว่า AD9814 [5] และ AD9826 [6] อยู่ ดังนั้นจึงจะต้องศึกษาระบบการทำงานทั้งหมดก่อน ซึ่งพบว่าการทำงานของทั้งสองมีลักษณะที่เหมือนกัน แต่ต่างกันในเรื่องของความละเอียด และต่างกันในเรื่องของราคา ซึ่ง AD9814 ซึ่งมีราคาต่ำกว่า มีความละเอียดคือ 14 บิต มี Sampling Rate คือ 10 MSPS ในขณะที่ AD9826 มีความละเอียดคือ 16 บิต มี Sampling Rate คือ 15 MSPS แต่ลักษณะการทำงานจะเหมือนกัน เช่น การเลือกโหมดการทำงาน การปรับค่า Register ต่าง ๆ อันได้แก่ Configuration Register และ Multiplex Register ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมการทำงานได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นไดอะแกรมการทำงานของ AD9814 โดยในหลักการทำงานนั้น ก่อนเริ่มการใช้งานระบบจะต้องทำการปรับเปลี่ยค่าการใช้งานเสียก่อน



รูปที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมการทำงานของ AD9814 [5]

สำหรับการปรับเปลี่ยค่าการใช้งาน จะต้องทำการปรับเปลี่ยค่าผ่าน Digital Control Interface ซึ่งต้องสร้างสัญญาณควบคุมทั้งหมด 3 สัญญาณอันประกอบด้วยสัญญาณ SCLK สัญญาณ SLOAD และสัญญาณ SDATA โดยทั้งสามสัญญาณนี้จะมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกัน โดยเริ่มจากสัญญาณ SCLK จะเป็นสัญญาณที่ทำให้การใช้งานในส่วนของ Digital Control Interface เริ่มทำงาน ซึ่งต้องใช้ความถี่อย่างน้อยที่สุดคือ 10 MHz และสัญญาณ SLOAD นั้นจะเป็นสัญญาณเพื่อสั่งให้ Digital Control Interface รับรู้ถึงการนำข้อมูลจากภายนอกเข้าไปเขียนภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่หรืขายนด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD9814 นั้นเอง ดังนั้นในส่วนสุดท้ายก็จะเป็นสัญญาณ SLOAD ซึ่งมีมาตรฐานการส่งข้อมูลดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 แสดง Timing Diagram ของ Serial Operation ภายใน AD9814 [5]

หลักการการทำงานของสัญญาณ SDATA จะแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 16 บิตด้วยกัน ซึ่งแต่ละบิตนั้นจะทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยจะประกอบไปด้วย

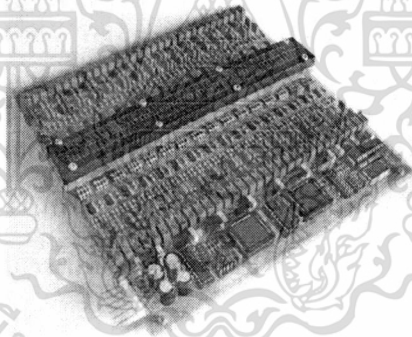
| ลำดับของบิต | ชื่อประจำบิต | หน้าที่             | ลำดับของบิต | ชื่อประจำบิต | หน้าที่ |
|-------------|--------------|---------------------|-------------|--------------|---------|
| บิตที่ 1    | W/R          | เขียน/อ่าน          | บิตที่ 9    | D7           | ข้อมูล  |
| บิตที่ 2    | A2           | ที่อยู่ของ Register | บิตที่ 10   | D6           |         |
| บิตที่ 3    | A1           |                     | บิตที่ 11   | D5           |         |
| บิตที่ 4    | A0           |                     | บิตที่ 12   | D4           |         |
| บิตที่ 5    | xx           | Don't Care          | บิตที่ 13   | D3           |         |
| บิตที่ 6    | xx           |                     | บิตที่ 14   | D2           |         |
| บิตที่ 7    | xx           |                     | บิตที่ 15   | D1           |         |
| บิตที่ 8    | D8           | ข้อมูล              | บิตที่ 16   | D0           |         |

ตารางที่ 2.1 แสดงชื่อของแต่ละบิตในสัญญาณ SDATA

จากตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงจำนวนบิตต่าง ๆ และหน้าที่ของแต่ละบิต จะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ของ AD9814 ได้ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ต้องการปรับเปลี่ยนค่าได้แก่ การเปลี่ยนโหมดการทำงาน การเลือกใช้ค่าสี การปรับกำลังขยาย และการปรับค่าออฟเซตนั่นเอง ดังนั้นหลังจากการปรับเปลี่ยนค่าเรียบร้อยแล้ว จึงจะสามารถใช้งาน AD9814 ได้โดยการจ่ายสัญญาณจากซีไอเอส ผ่านมายังช่องทางขาเข้าของ AD9814 เพื่อนำเอาผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังเอฟพีจีเอต่อไป

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

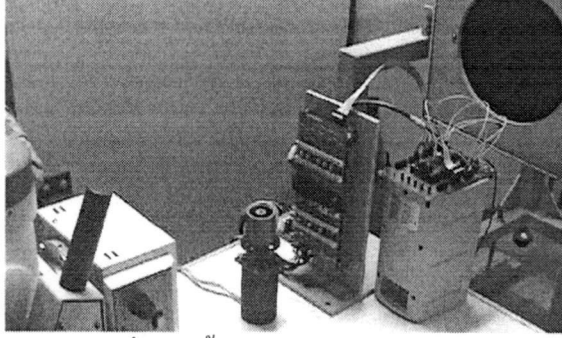
ในปี พ.ศ. 2548 เอกภพ งามละเมียดและคณะ [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ ชนิดแถวยาวที่สร้างภาพแบบทางอ้อมโดยใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) จำนวน 64 ตัวเป็น Image Sensor โดยนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ขึ้น โดยใช้หลักการสร้างภาพทางอ้อม ซึ่งใช้สารเรืองแสงชนิด  $Gd_2O_2S:Tb$  เข้ามาช่วยในการแปลงสัญญาณรังสีเอกซ์ให้กลายเป็นสัญญาณภาพ ใช้ FPGA เป็นตัวควบคุมตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ และส่งข้อมูลไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และนำระบบตัวตรวจจับเอกเรย์ที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางแบบลำแสงพัด (Fan Beam) จากผลการทดลองพบว่า โฟโตทรานซิสเตอร์นั้นสามารถนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับรังสีเอกซ์ได้ แต่ยังพบข้อจำกัดคือ ขนาดของโฟโตทรานซิสเตอร์นั้นยังคงมีขนาดใหญ่อยู่ (ประมาณ 5mm/pixel) จึงทำให้ได้ภาพรังสีเอกซ์ที่ยังไม่มีความละเอียดเพียงพอ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเคลือบสารเรืองแสงลงบนโฟโตทรานซิสเตอร์โดยตรง ซึ่งยังพบปัญหาของความไม่สม่ำเสมอของสารเรืองแสงอยู่ รูปที่ 2.18 แสดงตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิดแถวยาวต้นแบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยของ เอกภพ งามละเมียด



รูปที่ 2.18 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ทำจากโฟโตทรานซิสเตอร์ของเอกภพ งามละเมียด [7]

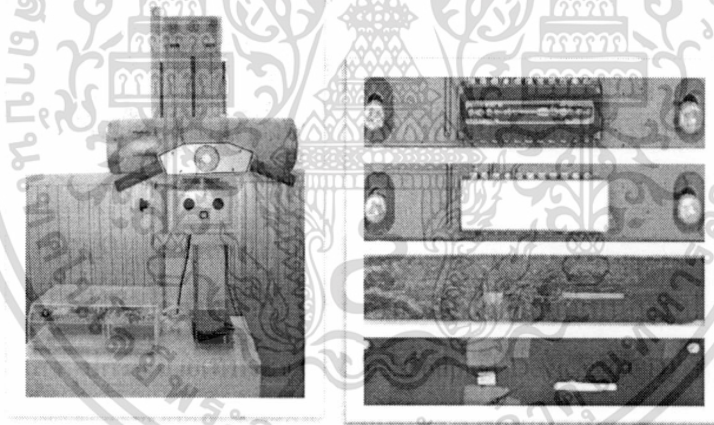
ในปี พ.ศ. 2550 ธเนศ อังศวพัฒนากุล และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวรับแสง โดยลดขนาดของโฟโตทรานซิสเตอร์ลงจาก 5 mm/pixel เป็น 1 mm/pixel และเพิ่มตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แถวยาวจาก 64 ตัว เป็น 256 ตัว นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้การเคลือบสารเรืองแสงบนตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แต่อย่างใด แต่เป็นการนำแผ่นเรืองแสงที่สามารถหาได้ง่ายกว่าในห้องทดลองมาใช้แทน ซึ่งทำให้แสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงมีความสม่ำเสมอว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบสารเรืองแสงบนโฟโตทรานซิสเตอร์โดยตรง จากผลการทดลอง พบว่า ความละเอียดของภาพ (Resolution) ที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ อยู่ที่ 5 line pair/ inch ซึ่งถือว่ายังมีความละเอียดของภาพไม่สูงนัก รูปที่ 2.19 แสดงภาพตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยของ ธเนศ อังศวพัฒนากุล

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางการแพทย์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการค้า หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นจากโฟโตทรานซิสเตอร์ของเรนส อังสุวัฒนากุล [1]

ในปีต่อ พ.ศ. 2551 ชูศักดิ์ จันทโค และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาแนวทางในการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ในลักษณะเดียวกัน คือเป็นแบบทางอ้อม หากแต่เป็นการเปลี่ยนชนิดของตัวรับแสงจากแผ่นเรืองแสงอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge Coupled Device: CCD) ซึ่งมีความละเอียดสูงถึง 10 lp/inch และมีตัวตรวจจับอยู่ถึง 5,340 ตัวภายในซีซีดี ซึ่งเป็นจำนวนที่มากและมีความละเอียดที่สูง แต่ในขณะเดียวกันยังมีข้อจำกัดอยู่นั่นคือขนาดของซีซีดีมีขนาดเล็กคือประมาณ 3 เซนติเมตร ซึ่งทำให้เป็นขีดจำกัดในการนำไปใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นจากซีซีดีโดย ชูศักดิ์ จันทโค [2]

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษาจากการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์โดยใช้โฟโตทรานซิสเตอร์และซีซีดีจะประสบปัญหาที่แตกต่างกันไปคือ

ช่วง Spectral Sensitivity ของโฟโตทรานซิสเตอร์นั้นไม่ตรงกันกับช่วงเปล่งแสงสูงสุดที่ออกมาจากแผ่นเรืองแสงหรือสารเรืองแสง ซึ่งโดยปรกติแล้ว โฟโตทรานซิสเตอร์จะไวต่อแสงสีแดง ในขณะที่แผ่นเรืองแสงที่นำมาใช้ในงานวิจัยกลับเปล่งแสงสีเขียวซึ่งมีย่านความถี่ที่ไม่สอดคล้องกัน จึงทำให้ไม่สามารถดึงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์มาใช้ได้อย่างเต็มที่ ทั้งยังไม่สอดคล้องกับแสงที่ต้องการตรวจจับ ทำให้ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์มี Sensitivity ต่ำนั่นเอง แต่ในงานวิจัยที่ใช้ซีซีดีเป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั้นสามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ เพราะสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนเวสหาหรับการเขางานเพื่อกการศึกษาเทานน เมืออนุญาตเนาไปเซประเยชนดานการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับแสงได้ถึง 3 ย่านความถี่อันได้แก่ย่านความถี่ของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งตรงกับย่านความถี่ของแผ่นเรืองแสงซึ่งเปล่งแสงสีเขียวที่ใช้ในงานวิจัยนั่นเอง

นอกจากปัญหาดังกล่าวแล้ว ยังพบว่าปัญหาเรื่องของขนาดของโฟโตทรานซิสเตอร์ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดคือ 1 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ภาพที่ได้จากโฟโตทรานซิสเตอร์นั้นมีความละเอียดที่จำกัด แต่ในขณะที่เดียวกันที่ปัญหาดังกล่าวสามารถทำการแก้ไขจากงานวิจัยที่ใช้ซีซีดีเป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ ซึ่งทำให้ภาพที่ได้มีความละเอียดที่สูงมาก แต่ในขณะที่เดียวกันนั้นเอง ด้วยขนาดเล็ก จึงทำให้ภาพที่ได้ ถึงแม้ว่าจะมีความละเอียดที่สูง แต่ก็ส่งผลให้ภาพที่ได้มีขนาดเล็กเช่นกัน

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ถึงปัญหาและข้อจำกัดต่าง ๆ ของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นจากโฟโตทรานซิสเตอร์และซีซีดี จึงได้ข้อสรุปว่า การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมโดยใช้แผ่นเรืองแสง จำเป็นจะต้องเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม ซึ่งหมายความว่า จะต้องตรวจจับสัญญาณแสงได้ดีในช่วงที่สอดคล้องกับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงให้ได้มากที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับรังสีเอกซ์ให้สูงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญก็คือในเรื่องของความละเอียดของภาพรังสีเอกซ์ที่ได้ รวมไปถึงขนาดของภาพที่ได้เช่นกันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายประเภทในอนาคตต่อไป

จากการศึกษาของงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของเซนเซอร์รับแสงชนิดต่าง ๆ ผู้วิจัยพบว่าเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพหรือซีไอเอส (Contact Image Sensor: CIS) นั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้งานร่วมกับแผ่นเรืองแสงได้ดี เนื่องจากซีไอเอสสามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่ของแสงได้ถึง 3 สีคือ สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง โดยมีช่วงการตอบสนองของแสงสีเขียวสูงสุดตรงกันกับช่วงสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงสีเขียว นอกจากนี้ขนาดความละเอียดของซีไอเอสซึ่งขึ้นอยู่กับพิทเชลของซีไอเอสที่มีความละเอียดสูงสุดถึง 4800 dpi (Dot per Inch) ส่งผลให้ความละเอียดของซีไอเอสสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งจะมีความละเอียดสูงกว่าโฟโตทรานซิสเตอร์หลายเท่าตัว แต่ทั้งนี้ความละเอียดดังกล่าวของซีไอเอสก็อาจจะค่าเท่ากับความละเอียดของซีซีดี เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ แม้ความละเอียดจะใกล้เคียงกัน แต่ขนาดในการตรวจจับแสงนั้นถ้าเทียบกันแล้วซีไอเอสจะมีช่วงการตรวจจับที่กว้างกว่าซีซีดี เพราะซีซีดีจะต้องอาศัยเลนส์ในการรวมแสง ทำให้โมดูลที่ได้มีขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดของซีไอเอสจะเป็นการเรียง โมดูลเป็นแถบยาวและมีเลนส์ทรงกระบอกเพื่อรวมแสง โดยเฉพาะ ทำให้มีขนาดที่กว้างกว่านั่นเอง ซึ่งหากนำความสามารถและประสิทธิภาพของระบบประกอบการส่งผ่านข้อมูลอย่างรวดเร็ว ก็จะสามารถพัฒนาเป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่มีประสิทธิภาพได้

ด้วยเหตุนี้ ซีไอเอสจึงเป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาเพื่อนำมาพัฒนาและวิจัยสำหรับตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ให้มีประสิทธิภาพโดยใช้ควบคู่กับแผ่นเรืองแสงชนิด

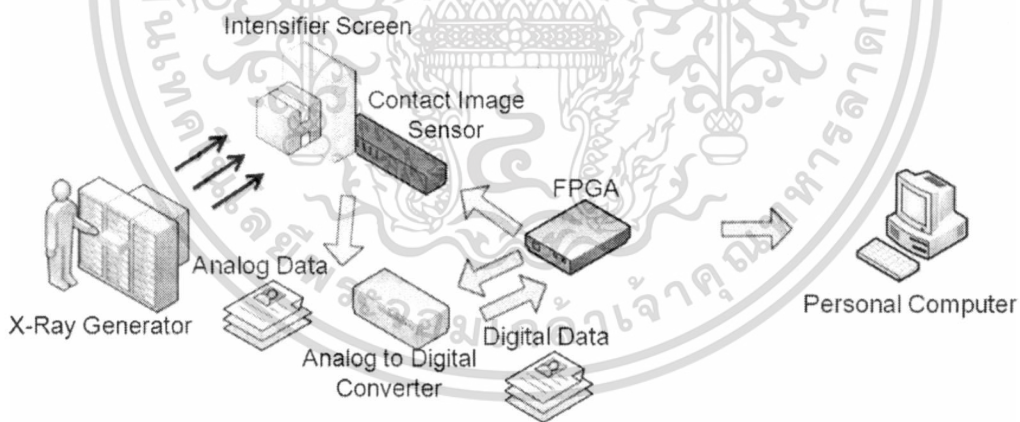
Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S: Tb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบระบบภายในเอฟพีจีเอ

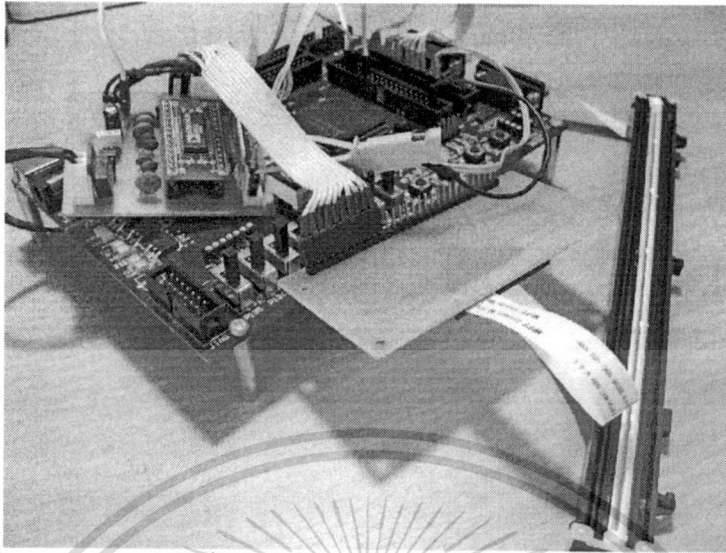
ในการศึกษาและวิจัยนี้ ได้นำเอฟพีจีเอมาใช้งานสำหรับการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด ซึ่งก่อนการออกแบบระบบมีความจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ภาพรวมของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งส่วนที่จะทำการออกแบบก็คือส่วนของการบันทึกภาพทางการแพทย์จากรังสีเอกซ์โดยบันทึกจากแผ่นเรืองแสงซึ่งจะเรืองแสงก็ต่อเมื่อรังสีเอกซ์มากระทบกับแผ่นเรืองแสง ดังนั้นในกระบวนการทำงานทั้งหมดจะประกอบด้วยการให้กำเนิดรังสีเอกซ์จากเครื่องให้กำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray generator) หลังจากนั้นรังสีเอกซ์จะลดทอนระดับตามวัตถุที่อยู่ด้านหน้าของฉากเรืองแสง (Intensifier screen) ซึ่งจะทำให้ปรากฏภาพทางด้านหลังของฉากเรืองแสง ชุดตรวจจ็ับรังสีเอกซ์ที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังฉากเรืองแสงก็จะทำการเก็บข้อมูลซึ่งเป็นข้อมูลทางอนาล็อก (Analog information) โดยจะทำการแปลงข้อมูลทางอนาล็อกเป็นข้อมูลทางดิจิทัล (Digital information) จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อสำหรับการประยุกต์ใช้ข้อมูลดังกล่าวต่อไป โดยเอฟพีจีเอ ได้เข้ามามีบทบาทในการควบคุมการทำงานของชุดตรวจจ็ับรังสีเอกซ์ พร้อมทั้งควบคุมชุดแปลงสัญญาณข้อมูลทางอนาล็อกเป็นข้อมูลสัญญาณทางดิจิทัล



รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของระบบทั้งหมด

ซึ่งระบบรวมทั้งหมดสามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสัญญาณควบคุมทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เอฟพีจีเอ ซึ่งสัญญาณควบคุมทั้งหมดที่อยู่ภายในเอฟพีจีเอจะสามารถแสดงในบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมที่ออกจากเอฟพีจีเอนั้นมีจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นจะต้องให้สัญญาณแต่ละสัญญาณมีความสอดคล้องกันตามสัญญาณเวลา จึงไม่สามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เพราะจะต้องให้โมดูลทุกอย่างอยู่ภายในเอฟพีจีเอและให้ทำงานพร้อมกันทั้งระบบนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงระบบทั้งหมดซึ่งมีเอฟพีจีเอเป็นส่วนสร้างสัญญาณควบคุม

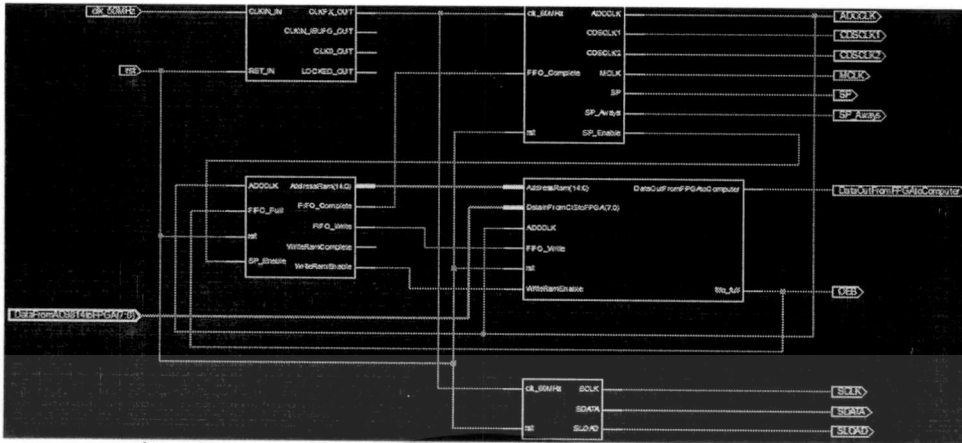


รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่ภายในเอฟพีจีเอ

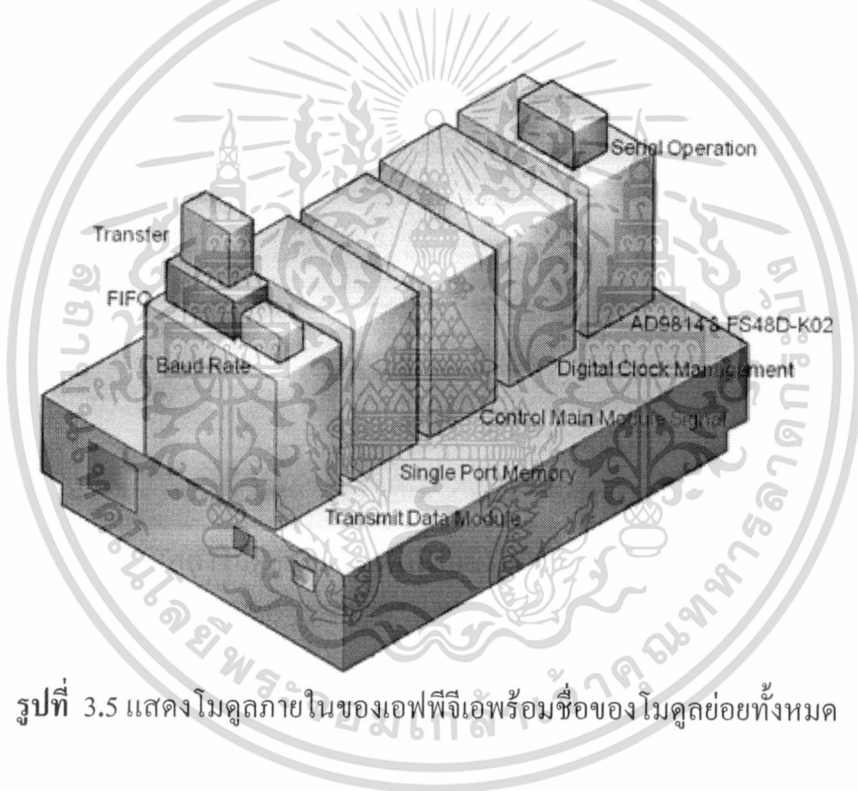
สำหรับการออกแบบระบบทั้งหมดจะสามารถออกแบบออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ด้วยคือคือส่วนของเอฟพีจีเอ เพื่อใช้ในการควบคุมชุดตรวจจذبรังสีเอกซ์กับควบคุมอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางอนาลอกเป็นสัญญาณทางดิจิตอล และอีกส่วนหนึ่งคือส่วนของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการรับข้อมูลเพื่อไปประมวลผลและเพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้

การออกแบบโมดูลการทำงานภายในเอฟพีจีเอ นั้นจะต้องออกแบบเพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้สำหรับการรับภาพทางการแพทย์จากจากเครื่องแสงอันได้แก่ ซีไอเอส และอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล ซึ่งการทำงานทั้งหมดสามารถออกแบบได้ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงโมดูลทั้งหมดภายในเอฟพีจีเอเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ซึ่งภายในเอฟพีจีเอจะประกอบไปด้วยโมดูลทั้งหมด 5 โมดูลหลักด้วยกันซึ่งสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงโมดูลภายในเอฟพีจีเอซึ่งใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม

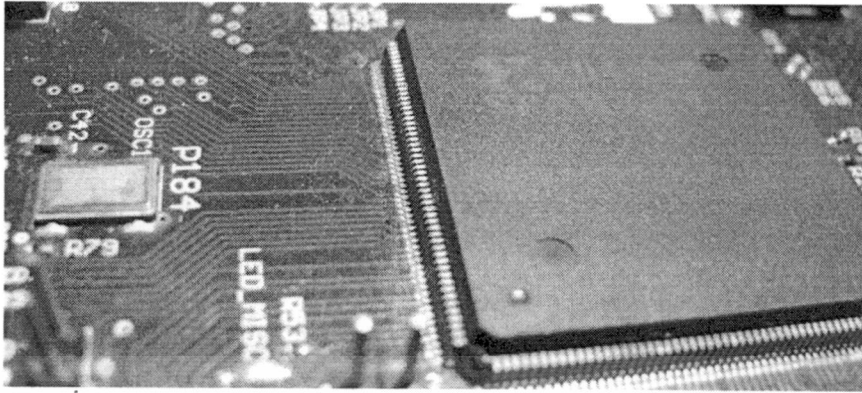


รูปที่ 3.5 แสดงโมดูลภายในของเอฟพีจีเอพร้อมชื่อของโมดูลย่อยทั้งหมด

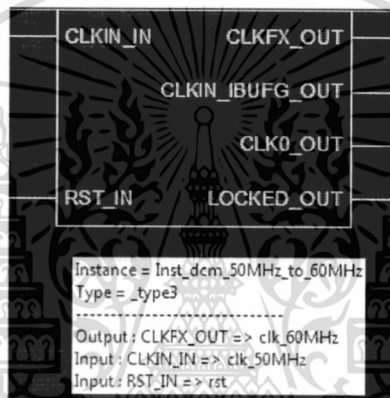
### 3.1 โมดูล Digital Clock Management

โมดูล Digital Clock Management นี้ถูกออกแบบมาเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก ความถี่หลักให้เป็นความถี่ที่ต้องการได้ ซึ่งหลักการสร้างนั้นจะใช้วงจรนับร่วมกับวงจรฟลิปฟลอป ซึ่งความถี่หลักของเอฟพีจีเอนั้นมีความถี่ 50 MHz ตามความถี่บนบอร์ดที่ใช้ในห้องวิจัยดังรูปที่ 3.6 ซึ่งความถี่หลักที่ใช้ภายในงานวิจัยทั้งหมดคือ 3.75 MHz แต่เนื่องจากความถี่ 50 MHz นั้นไม่สามารถทำการสร้างความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงความถี่จาก 50 MHz เป็น 60 MHz เพราะว่าความถี่ 60 MHz คิดเป็นสัดส่วนเดียวกันกับ 3.75 MHz นั้นเอง ซึ่ง

โมดูล Digital Clock Management จะแสดงดังรูปที่ 3.7 เช่นนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงเอฟพีจีเอที่ใช้ในงานวิจัยและวงจรกำเนิดความถี่ 50 MHz



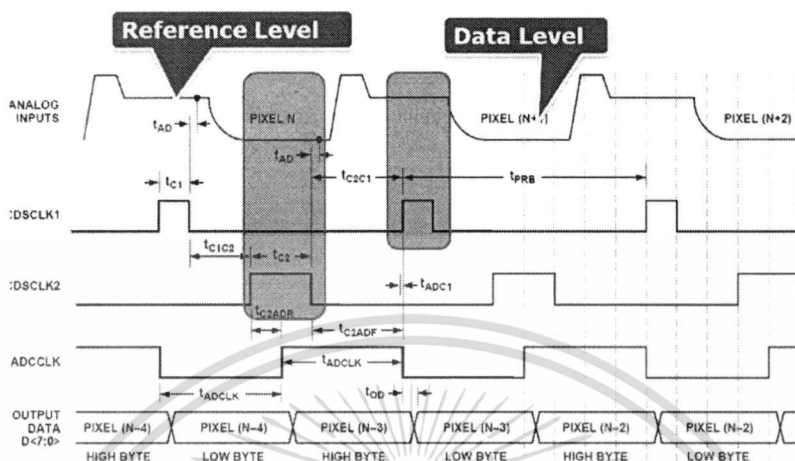
รูปที่ 3.7 แสดง โมดูล Digital Clock Management

### 3.2 โมดูลสร้างสัญญาณควบคุมซีไอเอสและ AD9814

โมดูลนี้คือโมดูลสำหรับการสร้างสัญญาณควบคุมทั้งซีไอเอสและ AD9814 ซึ่งเหตุผลที่นำเอาการสร้างสัญญาณทั้งสองมารวมกันในโมดูลเดียวเป็นเพราะความถี่ที่ต้องใช้ทั้ง 2 โมดูลนี้จะต้องเท่ากัน เนื่องจากซีไอเอสที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ FS48D-K02 [8] ซึ่งจะทำงานที่ความถี่ 3.75 MHz ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากซีไอเอสก็จะส่งผ่านมายัง AD9814 ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล ความถี่ที่จะทำให้ AD9814 ทำงานก็ต้องต้องเท่ากับ 3.75 MHz ด้วย เพื่อให้สามารถทำงานสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่จะได้มาจากซีไอเอส เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าที่ไม่ผิดพลาดนั่นเอง ดังนั้นในโมดูลนี้จะมีโมดูลย่อยเพื่อทำการแปลงความถี่จาก 60 MHz ที่ได้จาก Digital Clock Management เพื่อแปลงเป็นความถี่ 3.75 MHz ซึ่งจะใช้สร้างสัญญาณ ADCCLK ซึ่งเป็นสัญญาณหลักในการควบคุมการทำงานของ AD9814

นอกจากนี้ยังมีสัญญาณ CDSCLK1 กับ CDSCLK2 ซึ่งจะทำงานสอดคล้องกับสัญญาณ ADCCLK ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งสัญญาณ CDSCLK1 จะต้องเกิดขึ้นภายในช่วง Reference Level เพื่อทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับช่วงของข้อมูลจากซีไอเอส และสัญญาณ CDSCLK2 จะเป็นสัญญาณที่จะตรวจจับสัญญาณข้อมูลซึ่งเป็นค่า Pixel ของแต่ละข้อมูลรูปภาพโดยตรง



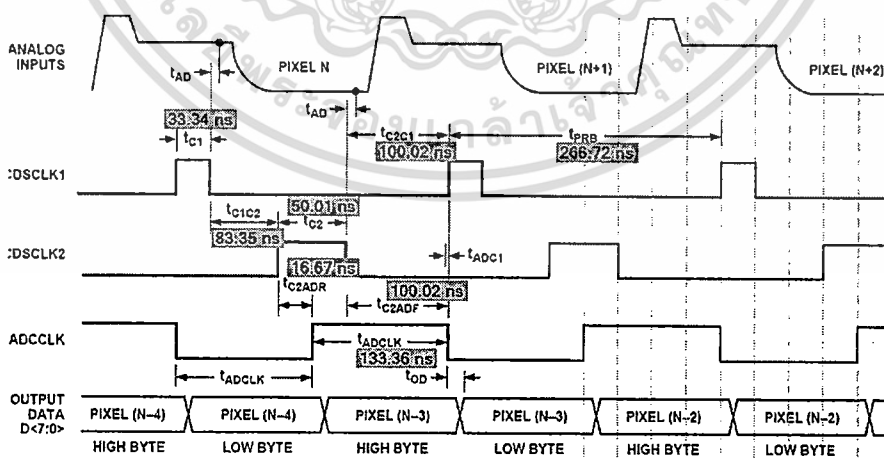
รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งของสัญญาณ CDSCLK1 และ CDSCLK2 [5]

ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณ CDSCLK1 และสัญญาณ CDSCLK2 นั้น จะต้องอ้างอิงจากสัญญาณความถี่ 60 MHz ซึ่งมาจาก Digital Clock Management ซึ่งจะใช้สำหรับสร้างสัญญาณ ADCCLK ซึ่งมีความถี่ 3.75 MHz นั้นเอง แต่สำหรับสัญญาณ CDSCLK1 และสัญญาณ CDSCLK2 จะใช้สัญญาณความถี่ 60 MHz โดยตรง ซึ่งจะใช้ควบคู่กับวงจรมัลติเพลกซ์และวงจรถ่ายกลับ และทั้งนี้ก่อนที่จะทำการสร้างสัญญาณนั้น จะต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดก่อน ซึ่งสัญญาณ CDSCLK1 เมื่อทำการวิเคราะห์เทียบกับสัญญาณ ADCCLK แล้ว จะพบว่าสัญญาณ CDSCLK1 จะเกิดในช่วงขอบล่างของสัญญาณ ADCCLK และจะเกิดขึ้นเพียงอย่างน้อยที่สุด 40 นาโนวินาที [5] และเช่นเดียวกันกับสัญญาณ CDSCLK2 ซึ่งจะเกิดขึ้นก่อนช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณ ADCCLK ซึ่งเกิดก่อนอย่างน้อยที่สุด 10 นาโนวินาที [5] และจะเกิดต่อไปอีกเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุดอีก 40 นาโนวินาที [5] ดังนั้นสำหรับสัญญาณความถี่ 60 MHz ซึ่งคิดเป็นคาบคือ 16.67 นาโนวินาทีต่อหนึ่งไซเคิล (ns per cycle) จะสามารถคำนวณค่าน้อยที่สุดสำหรับการสร้างสัญญาณแต่ละช่วงดังรูปที่ 3.9

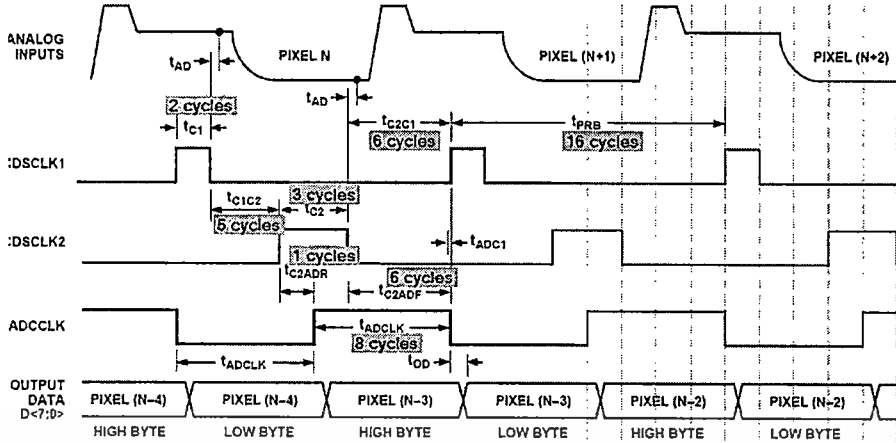
| Parameter                         | Symbol  | Min | Type      | Max | Units  | Used   | Cycles |
|-----------------------------------|---------|-----|-----------|-----|--------|--------|--------|
| <b>Clock Parameters</b>           |         |     |           |     |        |        |        |
| 3-Channel Pixel Rate              | IPRA    | 300 |           |     | ns     |        |        |
| 1-Channel Pixel Rate              | IPRB    | 140 | 500       |     | ns     | 266.72 | 15     |
| ADCCLK Pulsewidth                 | tADCCLK | 45  |           |     | ns     | 133.36 | 8      |
| CDSCLK1 Pulsewidth                | tC1     | 20  |           |     | ns     | 33.34  | 2      |
| CDSCLK2 Pulsewidth                | tC2     | 40  |           |     | ns     | 50.01  | 3      |
| CDSCLK1 Falling to CDSCLK2 Rising | tC1C2   | 0   |           |     | ns     | 83.35  | 5      |
| ADCCLK Falling to CDSCLK2 Rising  | tADC2   | 10  |           |     | ns     |        |        |
| CDSCLK2 Rising to ADCCLK Rising   | tC2ADR  | 10  |           |     | ns     | 16.67  | 1      |
| CDSCLK2 Falling to ADCCLK Rising  | tC2ADF  | 50  |           |     | ns     | 100.02 | 6      |
| CDSCLK2 Falling to CDSCLK1 Rising | tC2C1   | 50  |           |     | ns     | 100.02 | 6      |
| ADCCLK Falling to CDSCLK1 Rising  | tADC1   | 0   |           |     | ns     |        |        |
| Aperture Delay for CDS Clocks     | tAD     |     | 3         |     | ns     |        |        |
| <b>Signal Interface</b>           |         |     |           |     |        |        |        |
| Maximum SCLK Frequency            | fSCLK   | 10  |           |     | MHz    |        |        |
| SLOAD to SCLK Set-Up Time         | tLS     | 10  |           |     | ns     |        |        |
| SCLK to SLOAD Hold Time           | tEH     | 10  |           |     | ns     |        |        |
| SDATA to SCLK Rising Set-Up Time  | tDS     | 10  |           |     | ns     |        |        |
| SCLK Rising to SDATA Hold Time    | tDH     | 10  |           |     | ns     |        |        |
| SCLK Falling to SDATA Valid       | tRDV    | 10  |           |     | ns     |        |        |
| <b>Data Output</b>                |         |     |           |     |        |        |        |
| Output Delay                      | tOD     |     | 5         |     | ns     |        |        |
| 3-State to Data Valid             | tDV     |     | 16        |     | ns     |        |        |
| Output Enable High to 3-State     | tHZ     |     | 5         |     | ns     |        |        |
| Latency (Pipeline Delay)          |         |     | 3 (Fixed) |     | Cycles |        |        |

รูปที่ 3.9 แสดงช่วงเวลาที่ใช้แต่ละช่วงสำหรับการสร้างสัญญาณควบคุม AD9814 [5]

ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ช่วงเวลาสัญญาณทั้งหมดจะได้ช่วงเวลาทั้งหมดดังรูปที่ 3.10 ในหน่วยนาโนวินาทีและรูปที่ 3.11 ในหน่วยไซเคิล ซึ่งสัญญาณทั้ง CDSCLK1 และ CDSCLK2 นี้จะเป็นแกนหลักของงานวิจัยนี้ เพราะการสร้างสัญญาณนั้นจะต้องอ้างอิงจากสัญญาณผลลัพธ์จากซีไอเอสด้วย ดังนั้นจะต้องทำการวัดช่วง Reference Level และช่วง Data Level ของซีไอเอสประกอบไปด้วย เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่เกิดความคลาดเคลื่อน และนอกจากนี้สัญญาณที่จะใช้เพื่อสร้างสัญญาณ ADCCLK นั้นจะต้องเป็น 3.75 MHz เท่านั้น เพราะถ้าหากต่ำกว่านี้หรือมากกว่านี้ ระบบการทำงานของ AD9814 จะไม่มีปัญหาแต่อย่างใด แต่สิ่งที่จะมีปัญหานั้นก็คือในวงจรของ FS48D-K02 ของซีไอเอสนั้น จะมีวงจรกรองความถี่อยู่ เพื่อให้ความถี่ที่เข้าไปนั้นอยู่ในช่วง 3.75 MHz เท่านั้น ดังนั้นถ้าหากทำการเพิ่มความถี่หรือลดความถี่จากเดิม จะทำให้วงจรไม่ทำงานนั่นเอง



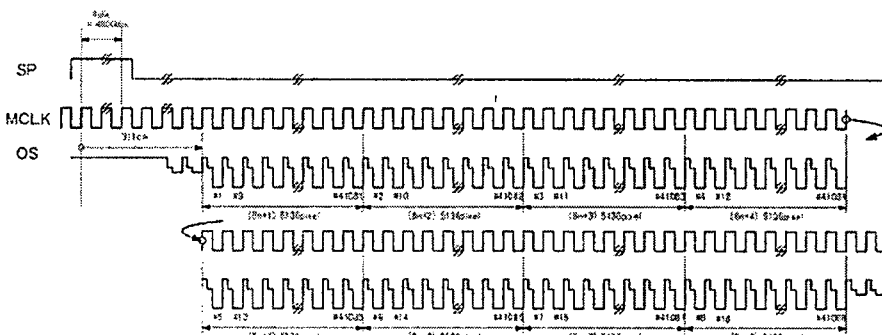
รูปที่ 3.10 สัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และ ADCCLK ในหน่วยนาโนวินาที [5]



รูปที่ 3.11 ช่วงเวลาของสัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และ ADCCLK ในหน่วยไซเคิล [5]

ส่วนต่อมาเป็นส่วนของการสร้างสัญญาณควบคุมซีไอเอส ซึ่งจะประกอบไปด้วยสัญญาณ MCLK หรือ Master Clock กับสัญญาณ SP หรือ Start Pulse นั่นเอง ซึ่งสัญญาณทั้งสองมีความสำคัญคือ สัญญาณ MCLK จะเป็นสัญญาณควบคุมการทำงานของซีไอเอสซึ่งมีความถี่เดียวกันกับสัญญาณ ADCCLK คือ 3.75 MHz ดังนั้นอีกสัญญาณหนึ่งคือสัญญาณ SP นั้นมีหน้าที่ทำการเริ่มจัดเก็บข้อมูล โดยจะเป็นการสั่งงานให้ซีไอเอสเริ่มทำการส่งข้อมูลภาพ ซึ่งจะมีความยาวแตกต่างกันดังรูปที่ 3.12 ซึ่งความยาวของสัญญาณ SP จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของซีไอเอสด้วย โดยมีหน่วยเป็น DPI (Dot Per Inch) ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการทดลองที่ความละเอียด 300 DPI ซึ่งเมื่อทำการคำนวณแล้ว จะทำให้ได้ความยาวของสัญญาณ SP คือ 200.04 นาโนวินาที จากนั้นสัญญาณก็จะอยู่ในสถานะต่ำไปอีก 47,992.93 นาโนวินาที ก่อนที่จะปรากฏสัญญาณ SP อีกครั้งหนึ่ง

| Parameter       | Symbol         | Min      | Type | Max  | Units | Used     | Cycles | Cycles/2 |
|-----------------|----------------|----------|------|------|-------|----------|--------|----------|
| Clock Frequency | f(MCLK) (MCLK) | 266.67   |      | 3.75 | MHz   | 3.75     |        |          |
| DPI 300         | SP             | 200.04   |      |      | ns    | 266.72   | 16     | 8        |
|                 | OS             | 47992.93 |      |      | ns    | 200.04   | 12     |          |
|                 |                |          |      |      |       | 47992.93 | 2,579  |          |



รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณควบคุมซีไอเอสซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ SP และ MCLK [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

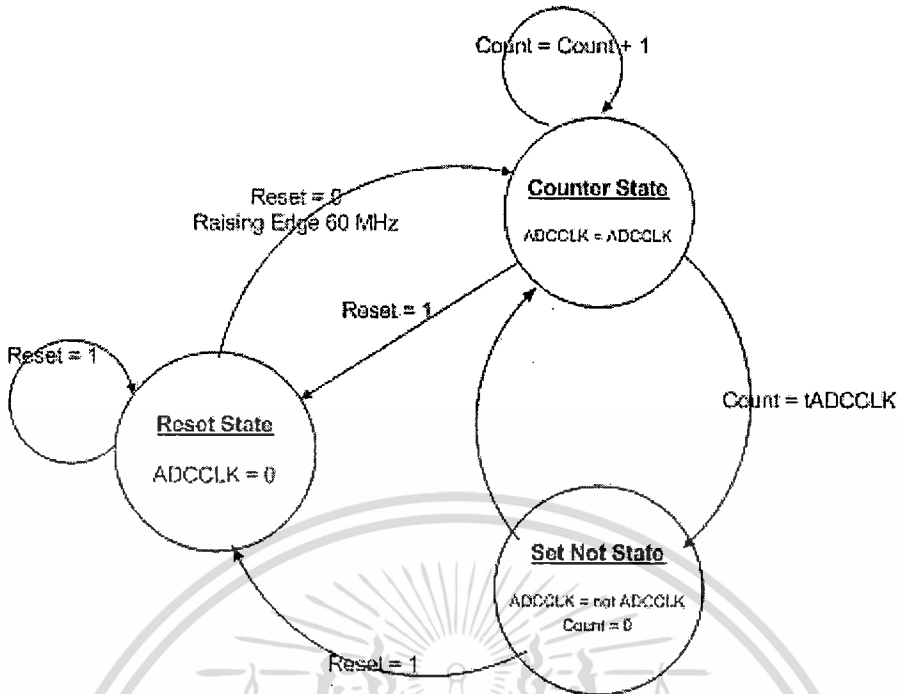
ดังนั้นสัญญาณจะเหลือสัญญาณ FIFO\_Complete SP\_Aways และสัญญาณ SP\_Enable ซึ่งทั้งสามสัญญาณนี้จะมีหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งสัญญาณทั้ง 3 นี้มีไว้เพื่อการส่งข้อมูลจาก AD9814 ไปยังคอมพิวเตอร์ แต่ทั้งนี้ การส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเป็นการส่งข้อมูลแบบ Serial ดังนั้นทำให้ข้อมูลถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ได้ช้า จึงจะต้องมีระบบเก็บข้อมูลเอาไว้ ซึ่งโมดูลสำหรับเก็บข้อมูลก็คือโมดูล FIFO และโมดูล Single Port Block Memory ซึ่งถ้าหากระหว่างส่งข้อมูล โมดูล FIFO เก็บข้อมูลจนไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ ก็จะต้องมีการส่งสัญญาณมาบอกกับระบบให้ทำการหยุดส่งข้อมูลนั่นเอง ดังนั้นสัญญาณ FIFO\_Complete จึงมาจากโมดูล FIFO เพื่อเป็นการส่งสัญญาณมาเพื่อให้หยุดการส่งข้อมูลที่จะมาจาก AD9814 นั่นเอง

สำหรับสัญญาณ SP\_Aways และสัญญาณ SP\_Enable นั้น ถูกสร้างขึ้นสำหรับหยุดการสร้างสัญญาณ SP เพราะถ้าหากข้อมูลภายในโมดูล FIFO เต็ม สัญญาณ SP\_Enable จะสั่งให้หยุดการสร้างสัญญาณ SP ทันที เพื่อป้องกันไม่ได้ซีไอเอสนำสัญญาณมายัง AD9814 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.13



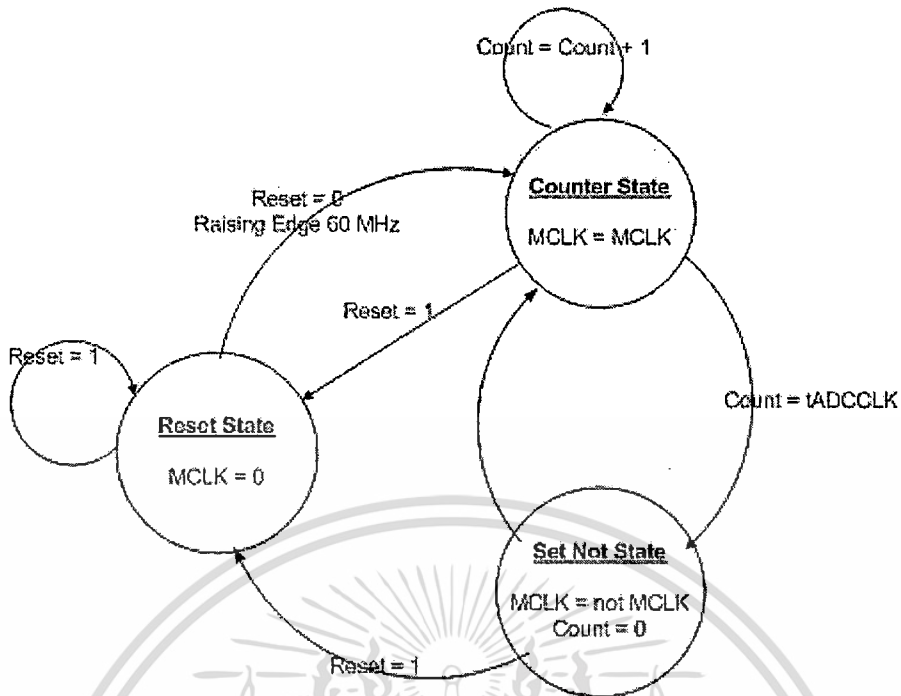
รูปที่ 3.13 แสดงโมดูลสร้างสัญญาณควบคุมซีไอเอสและ AD9814

ดังนั้นเมื่อทราบข้อมูลทั้งหมดแล้ว จึงจะต้องทำการออกแบบการทำงานตาม Finite State Machine ซึ่งจะแบ่งการทำงานออกเป็นสัญญาณหลัก ๆ นั่นคือ สัญญาณ ADCCLK ดังแสดงในรูปที่ 3.14



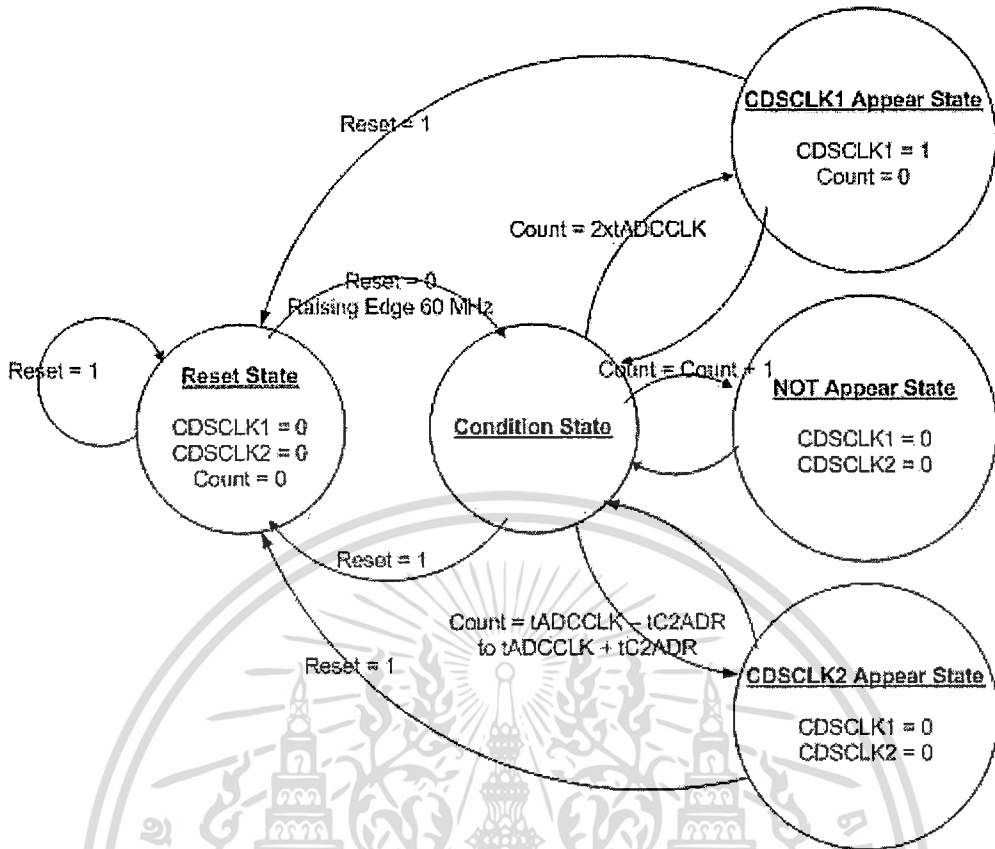
รูปที่ 3.14 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ ADCCLK

สำหรับการทำงาานนั้น จะเริ่มจากสถานะ Reset ซึ่งเป็นสถานะในการจัดการล้าค่าของสัญญาณ ADCCLK เพื่อกรณีที่ต้องการทำการปิดระบบโดยเร่งด่วน ซึ่งถ้าหาก Reset=0 และเป็นขอบขาขึ้นของสัญญาณความถี่ 60 MHz ระบบจะเข้าสู่สถานะ Counter ซึ่งในสถานะนี้ ระบบจะทำการนับค่าของ Count ไปจนกว่าจะถึงค่า tADCCLK[5] ซึ่งจากการคำนวณดังรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 จะทำให้ทราบว่าต้องสร้างสัญญาณดังกล่าว 8 ไชเกิด ดังนั้นถ้า Count = 8 ระบบก็จะเข้าสู่สถานะ Set Not ซึ่งในสถานะนี้จะทำการกลับสัญญาณ ADCCLK นั้นเอง ซึ่งหลักการทำงานของระบบนี้จะเป็นการทำงานควบคู่กันระหว่างวงจรมับกับวงจรฟลิปฟลอปนั่นเอง ซึ่งจะเป็นลักษณะเดียวกันกับการสร้างสัญญาณ MCLK ดังรูปที่ 3.15 เพราะสัญญาณทั้งสองจะต้องเท่ากัน



รูปที่ 3.15 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ MCLK

สัญญาณต่อมาคือสัญญาณ CDSCLK1 และ CDSCLK2 ซึ่งการสร้างสัญญาณทั้งสองนี้จะมีเงื่อนไขอยู่หลายขั้นตอนด้วยกัน เพราะจะต้องใช้สัญญาณ ADCCLK อ้างอิงในการสร้างสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งลักษณะการทำงานนั้นจะเริ่มจากสถานะ Reset อีกเช่นเคย จากนั้นระบบจะทำงานที่ Reset=0 ซึ่งจะใช้สัญญาณความถี่ 60 MHz เช่นเดียวกับสัญญาณ ADCCLK โดยจะเข้าสู่สถานะ Condition เพื่อทำการทำตามเงื่อนไขต่าง ๆ โดยจะใช้ตัวนับเดียวกับสัญญาณ ADCCLK นั่นคือ Count ซึ่งถ้าหาก  $\text{Count} = 2 \times t_{\text{ADCCLK}}$  ก็จะเข้าสู่สถานะ CDSCLK1 Appear ซึ่งจะเป็นการสร้างสัญญาณ CDSCLK1 นั่นเอง โดยทุกครั้งที่เข้าสู่สถานะเสร็จก็จะทำการกลับมายังสถานะ Condition อีกเช่นเคย เพื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขอีกว่าจะต้องไปยังสถานะใดต่อ ซึ่งถ้าเกิดกรณีที่  $\text{Count} = t_{\text{ADCCLK}} - t_{\text{C2ADR}}$  ก็จะเข้าสู่สถานะ CDSCLK2 Appear เพื่อทำการสร้างสัญญาณ CDSCLK2 นั่นเอง



รูปที่ 3.16 แสดง Finite State Machine ของสัญญาณ CDSCLK1 และ CDSCLK2

ส่วนสุดท้ายคือผังการทำงานซึ่งอธิบายการทำงานของการทำงานของการสร้างสัญญาณ SDATA ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยมีการทำงานคือจะต้องเริ่มต้นระบบโดยการปรับค่าทั้งหมดเสียก่อน โดยเริ่มแรกให้สัญญาณ SDATA=0 และจากนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดัง

| Register               | Data             |
|------------------------|------------------|
| Configuration Register | 0000000011011000 |
| Mux Register           | 0001000010100000 |
| PGA Gain Register      | 0011000000000000 |
| Offset Register        | 0110000000000000 |

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าภายในของ Register ต่าง ๆ ของสัญญาณ SDATA

โดยค่าหมายใน Register จะมีทั้งหมด 16 บิต ซึ่งความหมายของแต่ละบิตนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของ Register นั้น ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Configuration Register

สำหรับ Configuration Register นั้นจะแบ่งบิตการทำงานออกเป็น ส่วน ๆ ดังตารางที่ 3.2

| W/R | A2 | A1 | A0 | XX | XX | XX | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |

ตารางที่ 3.2 แสดงการทำงานแต่ละบิตของ Configuration Register

สามารถอธิบายการทำงานได้โดย W/R=0 ซึ่งหมายถึงการเขียนข้อมูลเข้าไปยัง AD9814 นั้นเอง ส่วนบิต A2 A1 และ A0 เท่ากับ 0 0 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งเป็น Address ที่ระบุที่อยู่ของ Configuration Register นั้นเอง ต่อมาบิต XX ทั้งสามบิตให้เป็น 0 ทั้งหมด และสุดท้ายจะเป็นบิตข้อมูล ซึ่งใน Configuration Register นั้น บิต D8 D1 และ D0 ต้องปรับให้เป็น 0 เสมอ ส่วนบิต D7 จะหมายถึงช่วงของข้อมูลขาเข้า ถ้าปรับเป็น 0 ข้อมูลขาเข้าจะอยู่ในช่วง 2 โวลต์ แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ที่ 4 โวลต์ ดังนั้นต้องปรับ D7=1 นั้นเอง ต่อมาบิต D6 หรือ Internal VREF ซึ่งจะทำให้การเปิดการใช้งานโดยเลือกให้ D6=1 ต่อมาคือบิต D5 ซึ่งหมายถึงโหมดการทำงาน หากเลือกเป็น 1 จะหมายถึงการทำงานทั้ง 3 ช่องทางขาเข้า อันได้แก่สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการเฉพาะสีเขียว เพราะจะรับแสงที่เปล่งออกมาจากจากเครื่องแสงสีเขียวมันเอง ดังนั้น D5=0 นั้นเอง ต่อมาบิต D4 คือโหมดการเลือก CDS ซึ่งสัญญาณที่ได้จากซีไอเอส (FS48D-K02) จะมีลักษณะเดียวกันกับสัญญาณซีซีดี ดังนั้นจึงต้องเลือก CDS Mode ซึ่งก็คือ D4=1 ต่อมาคือบิต D3 นั่นคือการเลือก Input Clamp Bias โดยปกติจะเลือกเป็น 4 โวลต์ ซึ่งหมายถึง D3 = 1 นั้นเอง ต่อมาบิตสุดท้ายคือ D2 หรือ Power Down โดยปกติจะเลือกเป็น 0

- Mux Register

จากตารางที่ 3.3 บิต W/R=0 เพื่อเป็นการเขียนข้อมูลเช่นเดียวกับ Configuration Register ซึ่งบิต A2 A1 และ A0 ซึ่งมีค่าประจำบิตคือ 0 0 และ 1 จะแสดง Address ของ Mux Register นั้นเอง โดยการทำงานของ Mux Register จะเป็นการเลือกช่องทางการทำงานและเลือกประเภทการทำงานของ AD9814 ซึ่งให้บิต D3 D2 D1 และ D0 ให้เป็น 0 ต่อจากนั้นบิต D7 เป็นการเลือกโหมดการทำงาน ซึ่งมี 2 ประเภทคือแบบ B-G-R และ R-G-B ซึ่งในการทดลองนี้เลือกการใช้งานแบบ R-G-B ดังนั้น D7 = 1 นั้นเอง ต่อมา D6 เป็นบิตที่เลือกการทำงานว่าต้องการใช้สีแดงหรือไม่ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้สีแดง ดังนั้น D6 = 0 นั้นเอง ต่อมาบิต D5 เป็นบิตที่เลือกการทำงานของสีเขียว ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจจับแสงสีเขียวมันเอง ดังนั้นต้องเลือกให้บิตนี้ทำงานโดย D5=1 นั้นเอง ต่อมาบิตสุดท้ายคือ D4 เป็นการเลือกการทำงานของสีน้ำเงิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการตรวจจับแสงสีน้ำเงิน จึงทำการปิดบิตนี้ไปโดย D4=0 นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| W/R | A2 | A1 | A0 | XX | XX | XX | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

ตารางที่ 3.3 แสดงการทำงานแต่ละบิตของ Mux Register

- PGA Gain Register

จากตารางที่ 3.4 ซึ่งแสดงการทำงานภายในบิตของ PGA Gain Register ซึ่งในการปรับตั้งค่านั้นจะเลือกการปรับตามค่าที่ได้มาจากโรงงานการผลิต

| W/R | A2 | A1 | A0 | XX | XX | XX | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0   | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

ตารางที่ 3.4 แสดงการทำงานแต่ละบิตของ PGA Gain Register

- Offset Register

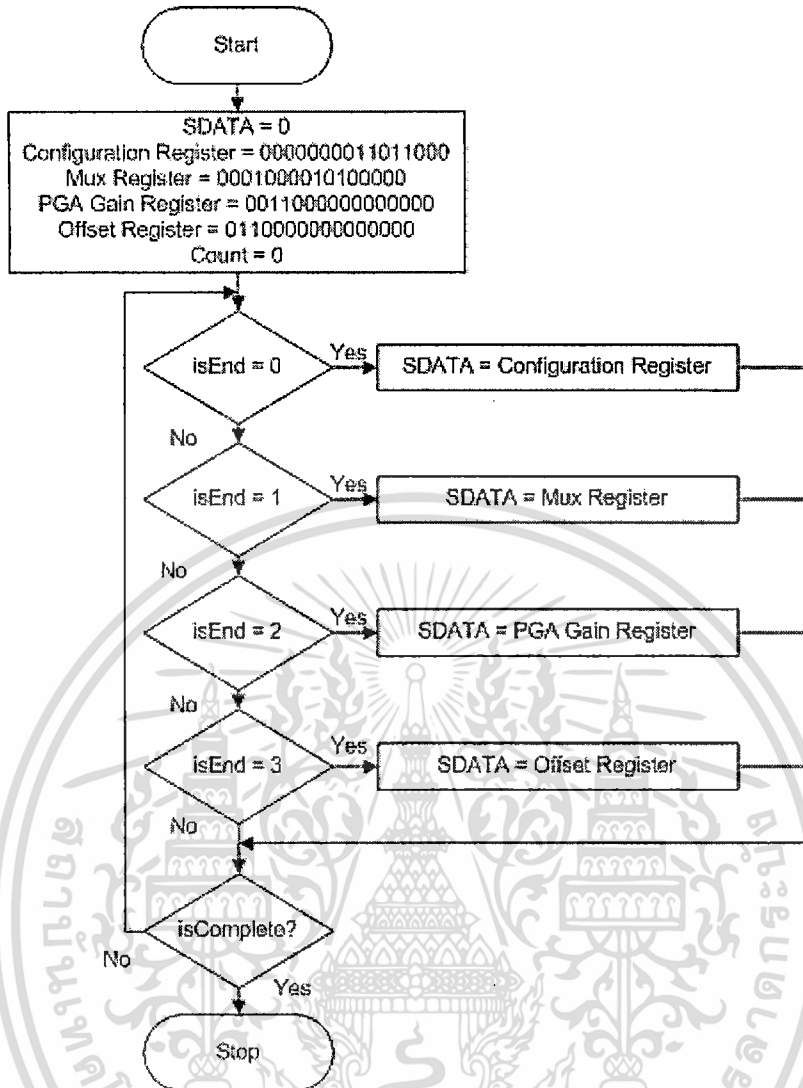
จาก ตารางที่ 3.5 ซึ่งแสดงการทำงานภายในบิตของ Offset Register ซึ่งในการปรับตั้งนั้นจะเลือกค่าหลักที่ได้มาจากโรงงานการผลิต

| W/R | A2 | A1 | A0 | XX | XX | XX | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0   | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

ตารางที่ 3.5 แสดงการทำงานแต่ละบิตของ Offset Register

ดังนั้นเมื่อทราบรายละเอียดของ Register ทุกตัวแล้ว ก็เข้าสู่การอธิบายการทำงานตามรูปที่ 3.17 โดยหลังจากการกำหนดค่าให้กับ Register ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องเข้าสู่เงื่อนไขการเลือกชุดข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะทำการ โหลดข้อมูลทั้งหมดในช่วงแรกสุดก่อนการใช้งานเสมอ ดังนั้นจะต้องกำหนดตัวแปร isEnd ขึ้นมา โดยให้มีค่าสูงสุดคือ 4 ซึ่งหมายถึงระบบจะทำการโอนข้อมูลต่าง ๆ ลงไปใน Register ทั้งหมด 4 ครั้งด้วยกัน ครั้งแรกเป็นข้อมูลของ Configuration Register ครั้งที่สองเป็นข้อมูลของ Mux Register ครั้งที่สามเป็นข้อมูลของ PGA Gain Register และครั้งสุดท้ายคือข้อมูลของ Offset Register ซึ่งทุกครั้งที่โอนข้อมูลลงไปใน SDATA เรียบร้อยแล้ว ค่าของตัวแปร isEnd ก็จะมีเพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง ดังนั้นเมื่อทำการโหลดข้อมูลต่าง ๆ ลงบน SDATA เรียบร้อยแล้ว ก็เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการโหลดข้อมูล เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งาน AD9814 โดยความถี่ที่ใช้ในการทำงานของโมดูลส่วนนี้จะใช้ SCLK ซึ่งมีความถี่ 10 MHz นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงผังการทำงานของสัญญาณ SDATA

### 3.3 โมดูลควบคุมการทำงานหลัก

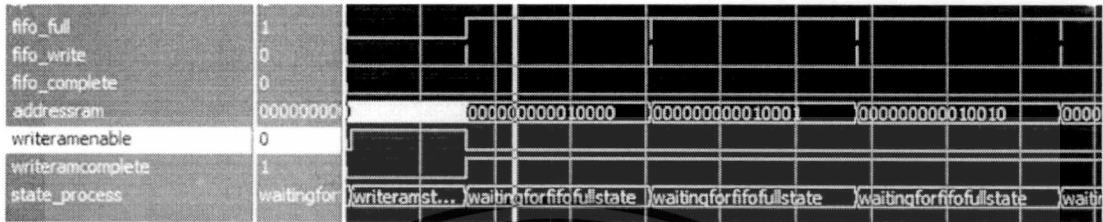
สำหรับ โมดูลควบคุมการทำงานหลักนี้ ได้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานทั้งหมด เพราะการทำงานของทุก โมดูลนั้นจะต้องสัมพันธ์กันหมด เนื่องจากการส่งข้อมูลจากเอฟพีจีเอไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเป็นแบบ Serial ซึ่งจะใช้เวลาในการส่งข้อมูลที่มาก ดังนั้นเพื่อป้องกันการเปิดข้อมูลสูญหาย จึงต้องทำการออกแบบ โมดูลควบคุมการทำงานหลักขึ้น เพื่อให้จัดการกับข้อมูลที่ได้รับมาจากซีไอเอสผ่านไปยัง AD9814 ซึ่งการทำงานทั้งหมดนั้นจะขึ้นอยู่กับ การส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เป็นหลัก

เนื่องจากการส่งข้อมูลจากเอฟพีจีเอไปยังคอมพิวเตอร์นั้น ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการส่งข้อมูลแบบ Serial ซึ่งเป็นวิธีการส่งข้อมูลที่ช้าเมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลจากซีไอเอสมายัง AD9814 ดังนั้น ปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากการส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์ก็คือปัญหาของการสูญหายของข้อมูล ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตเห็น ไปถึงประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้โดยการสร้างระบบพักข้อมูล ดังนั้นจึงจะต้องศึกษาวิธีการพักข้อมูลที่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่ได้จากซีไอเอส ซึ่งจากระบบโดยรวมทั้งหมด ข้อมูลจากซีไอเอสจะถูกส่งมายัง AD9814 ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งมาตลอดเวลาที่มีการเรียกใช้งาน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จาก AD9814 มายังเอฟพีจีเอก็จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งโมดูลพักข้อมูลควรจะแทรกเข้ามาในส่วนนี้ ซึ่งหมายถึง หลังจากที่ข้อมูลจาก AD9814 ถูกส่งผ่านมายังเอฟพีจีเอแล้ว แทนที่จะนำข้อมูลดังกล่าวส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ก็ให้ทำการส่งข้อมูลไปยังโมดูลพักข้อมูลก่อน ซึ่งโมดูลพักข้อมูลจะต้องมีขนาดที่ใหญ่เพื่อรองรับการส่งข้อมูลจาก AD9814 ซึ่งจะเข้ามาตลอดเวลา หลังจากนั้นข้อมูลที่อยู่ในโมดูลพักข้อมูลก็จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งทางภาคส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์นั้นจะต้องมีโมดูลพักข้อมูลอีกเช่นกัน ซึ่งจะใช้ต่างชนิดกัน สำหรับโมดูลพักข้อมูลเพื่อรับข้อมูลจาก AD9814 จะใช้ Single Port Block Memory ส่วนโมดูลพักข้อมูลที่ใช้กับภาคส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์จะใช้ FIFO Memory (First In First Out Memory) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานที่ต่างกัน สำหรับหลักการการทำงานของโมดูลพักข้อมูลทั้งสองนั้นจะอธิบายในส่วนถัดไป ดังนั้นเมื่อได้โมดูลพักข้อมูลแล้ว ก็ต้องทำการออกแบบการทำงานทุกอย่างให้สอดคล้องกันกับการรับข้อมูลจากซีไอเอสและ AD9814 ซึ่งการทำงานทั้งหมด

การทำงานของโมดูลควบคุมการทำงานหลักนั้น จะเริ่มโดยเข้าสู่สถานะ Ready ซึ่งในสถานะนี้จะรอการส่งสัญญาณมาจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งหากมีการส่งสัญญาณมาเพื่อบอกให้ระบบเริ่มต้นทำการเก็บภาพจากซีไอเอส สถานะก็จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสถานะ Write Single Port Memory ซึ่งในสถานะนี้ เอฟพีจีเอจะเริ่มทำการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อไปควบคุมทั้งซีไอเอสและ AD9814 ซึ่งหมายความว่า ซีไอเอสก็จะเริ่มทำงานแล้ว และจะเริ่มส่งข้อมูลมายัง AD9814 ดังนั้นเอฟพีจีเอก็จะรับข้อมูลมาจาก AD9814 และเขียนข้อมูลลงใน Single Port Block Memory ทันที หลังจากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ Write FIFO ซึ่งในสถานะนี้จะเริ่มทำงานโดยหลังจากที่เขียนข้อมูลไปยัง Single Port Block Memory เรียบร้อยแล้ว ก็นำข้อมูลที่ถูกเขียนภายในโมดูลดังกล่าวเขียนไปยัง FIFO Memory ทันที เพื่อเตรียมส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลังจากนั้นระบบก็จะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ Waiting for FIFO Full ซึ่งในสถานะนี้จะทำการตรวจสอบข้อมูลภายใน FIFO Memory ว่ามีข้อมูลอยู่จนเต็มหรือไม่ ซึ่งถ้าหากทำการเขียนข้อมูลลงใน FIFO Memory เรื่อย ๆ จะทำให้ข้อมูลเต็ม ซึ่งถ้าหากข้อมูลภายใน FIFO Memory เต็ม ก็จะต้องอยู่ในสถานะนี้ไปจนกว่า FIFO Memory ยังมีที่ว่างสำหรับข้อมูล ซึ่งข้อมูลภายใน FIFO Memory จะถูกใช้เพื่อส่งไปยังคอมพิวเตอร์นั่นเอง ซึ่งเมื่อข้อมูลภายใน FIFO Memory มีที่ว่างแล้ว ก็จะเข้าสู่สถานะ Write FIFO อีกครั้ง เพื่อนำข้อมูลมาจาก Single Port Block Memory อีกครั้ง และเพื่อส่งไปยังคอมพิวเตอร์ต่อไป ซึ่งเมื่อทำการส่งข้อมูลหมดเรียบร้อยแล้วก็จะเข้าสู่สถานะ Complete เพื่อทำการล้างค่าต่าง ๆ เพื่อเข้าสู่สถานะ Ready เพื่อรอการร้องขอการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ต่อไป ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

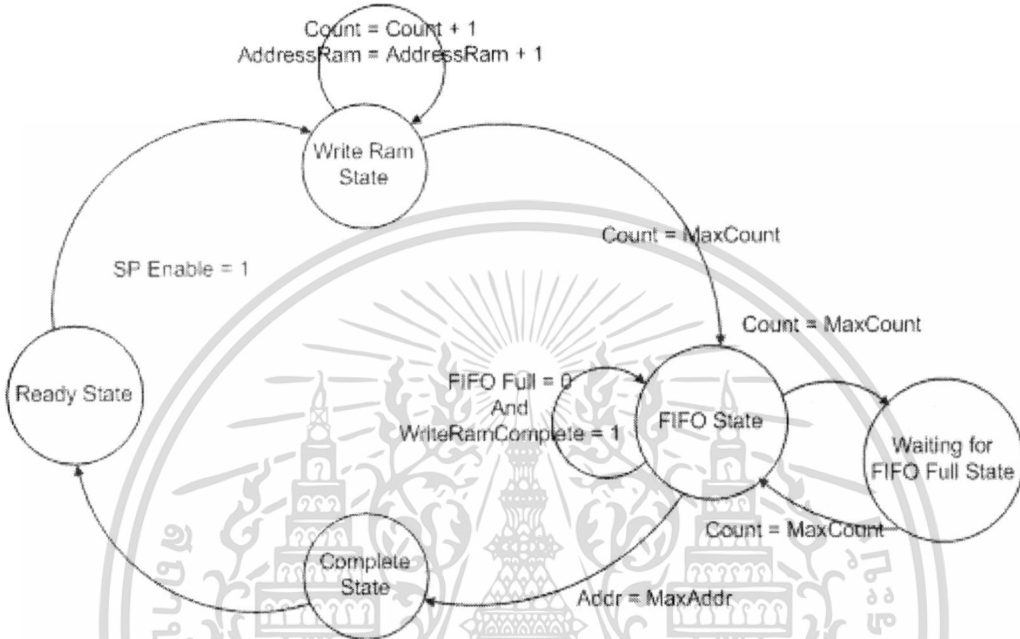
สามารถแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งจากรูปจะสังเกตว่า ข้อมูลภายใน FIFO Memory จะเต็มเร็วมาก ซึ่งจะทำให้มีโอกาสในการเขียนข้อมูลไปยัง FIFO Memory ได้น้อยมาก จึงทำให้ใช้เวลาในการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ช้าเช่นกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญญาณ fifo\_write และสัญญาณ fifo\_full



รูปที่ 3.18 แสดงเวลาในการเปลี่ยนสถานะของโมดูลควบคุมการทำงานหลัก

ดังนั้นขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็น Finite State Machine ของการทำงานทั้งหมด โดยจะเริ่มที่สถานะ Ready ซึ่งในสถานะนี้ จะทำการตั้งค่า Write Ram Enable=0 Address=0 FIFO Write=0 และ Count=0 เพื่อเป็นการตั้งค่าสำหรับการเริ่มทำงานต่าง ๆ ดังนั้นเมื่อทำการตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว หลังจากที่มีสัญญาณ SP Enable มาเพื่อให้ระบบเริ่มทำงาน การทำงานหลักก็จะเปลี่ยนไปทำงานยังสถานะ Write Ram ซึ่งในสถานะนี้ จะเป็นการนำข้อมูลทั้งหมดจากซีไอเอส เขียนเข้าไปยัง Single Block Port Memory ซึ่งก่อนจะทำการเขียนข้อมูลลงไป จะต้องทำการอ้าง Address ก่อนเสมอ ซึ่งจะทำการเขียนข้อมูลลงไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเขียนข้อมูลจนหมด ซึ่งการเพิ่มค่าของ Address จะกำหนดจาก AddressRam = AddressRam + 1 นั่นเอง ซึ่งในขณะที่เขียนข้อมูลนั้น FIFO Write จะเท่ากับ 0 เพราะยังไม่ถึงขั้นตอนการทำงานของ FIFO Memory ในขณะเดียวกันสัญญาณ Write Ram Enable จะเท่ากับ 1 เพราะเป็นการเขียนข้อมูลลงไปนั่นเอง ดังนั้นเมื่อทำการเขียนข้อมูลจนหมด (จนถึงค่า MaxCount) ก็จะเข้าสู่สถานะ FIFO ซึ่งในสถานะนี้ จะทำการเขียนข้อมูลลงไปยัง FIFO Memory ซึ่งโดยหลักการแล้ว มีสิ่งที่พึงระวังอยู่สิ่งหนึ่ง นั่นคือ การเขียนข้อมูลลงไปใน FIFO Memory นั้นจะไม่สามารถเขียนได้ถ้าหาก FIFO Memory เต็ม ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้น ข้อมูลส่วนเกินก็จะเกิดการสูญหาย ทำให้ข้อมูลปลายทางไม่ครบนั่นเอง ซึ่งวิธีการแก้ไขนั้น จะต้องทำให้ระบบทุกอย่างเชื่อมต่อกันทั้งหมด ซึ่งสามารถแก้ไขได้ในสถานะนี้นั่นเอง ซึ่งการทำงานนั้นจะมีการตรวจสอบก่อนว่าภายใน FIFO Memory นั้นเต็มอยู่หรือไม่ นอกจากนั้นยังต้องตรวจสอบด้วยว่า การเขียนข้อมูลลงไป Single Block Port Memory เสร็จสมบูรณ์แล้วหรือยัง กรณีที่เสร็จเรียบร้อยแล้วถึงจะค่อยทำการเขียนข้อมูลลงไป FIFO Memory โดยการอ้างอิงทีละ Address ของ Single Block Port Memory นั่นเอง แต่อีกกรณีหนึ่ง นั่นคือ ถ้าหากเกิดกรณีที่ FIFO Full = 1 หรือก็คือกรณีที่ FIFO Memory เต็ม ระบบก็จะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะที่ชื่อว่า Waiting For นี้ FIFO Full นั่นเอง ซึ่งการทำงานในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะนี้ จะทำการตรวจสอบว่าข้อมูลภายใน FIFO Memory ว่างหรือไม่ ซึ่งถ้าหากเกิดกรณีที่ FIFO Memory ว่างขึ้น ระบบก็จะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ FIFO เพื่อทำการเขียนข้อมูลลงไปใน FIFO Memory ทันที ซึ่งเมื่อทำการเขียนข้อมูลจนหมดเรียบร้อยแล้ว ระบบก็จะเข้าสู่สถานะ Complete เพื่อทำการล้างค่าต่าง ๆ และรอการส่งข้อมูลใหม่จาก SP Enable ต่อไป



รูปที่ 3.19 แสดงผังการทำงานของโมดูลควบคุมการทำงานหลัก

### 3.4 โมดูล FIFO Memory

หลักการการทำงานของโมดูล FIFO Memory นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับลักษณะการทำงานของ Data Structure แบบ Queue ซึ่งโมดูล FIFO Memory นี้จะไม่มีการอ้างอิงถึง Address ซึ่งการทำงานนั้น จะเป็นเพียงการนำข้อมูลไปพักไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งมีข้อกำหนดว่าการนำข้อมูลจาก FIFO Memory ออกไปใช้งานนั้น จะต้องทำการนำข้อมูลที่ถูกนำเข้ามาใน โมดูลตัวแรกสุดก่อนเสมอ หรือที่เรียกว่า First In First Out ซึ่งมีลักษณะเหมือนการต่อแถวเพื่อซื้อสินค้า ผู้ที่อยู่หัวแถวก็จะมีสิทธิ์ได้ซื้อสินค้าก่อน หากมีผู้ที่มาใหม่ ก็จะต้องต่ออยู่ด้านหลังสุดของแถวเสมอนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าข้อมูลที่เข้ามาก่อน ก็จะถูกนำไปใช้งานก่อนนั่นเอง

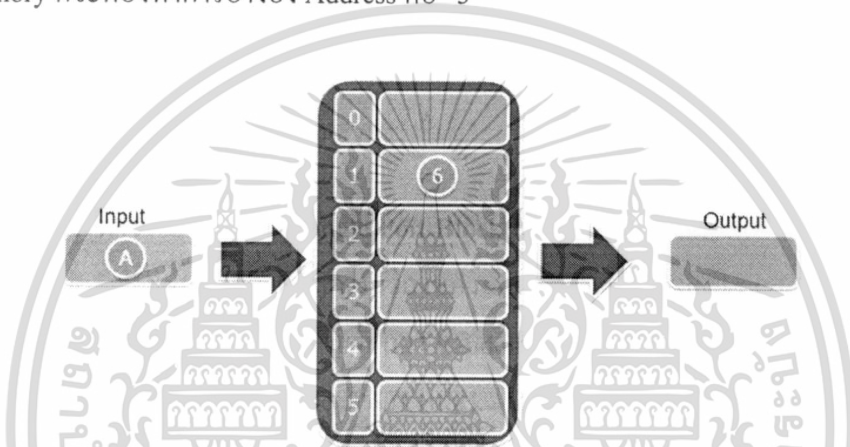


รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการทำงานของ FIFO Memory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

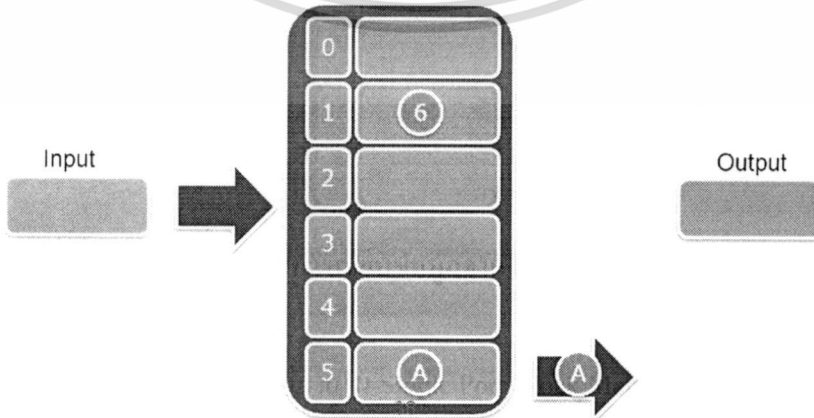
### 3.5 โมดูล Single Port Block Memory

หลักการการทำงานของโมดูล Single Port Block Memory นั้นจะต่างกับลักษณะการทำงานของ FIFO Memory ซึ่งมีข้อแตกต่างหลักในเรื่องของ Address เพราะ Single Port Block Memory สามารถเข้าถึง Address แบบสุ่มได้หรือที่เรียกว่า Random Access Memory โดยการทำงานนั้น จะเริ่มด้วยการนำข้อมูลมาเก็บไว้ใน Single Port Block Memory ซึ่งก่อนจะทำการนำข้อมูลมาเก็บ จะต้องทำการอ้างอิง Address ที่จะทำการเก็บข้อมูลเสียก่อนดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งแสดงการเขียนข้อมูลใน Single Port Block Memory โดยถ้าหากต้องการเขียนข้อมูล “A” ไปใน Single Port Block Memory ก็จะต้องทำการอ้างอิง Address คือ “5”



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการเขียนข้อมูลจาก Single Port Block Memory

สำหรับการอ่านข้อมูลที่มีอยู่ภายใน Single Port Block Memory ก็จะมีลักษณะที่คล้ายกันกับการเขียนข้อมูลลงไป Single Port Block Memory นั่นคือ จะต้องทำการอ้างอิง Address ก่อนการอ่านข้อมูล ซึ่งหากต้องการข้อมูล “A” ก็ต้องอ้างอิง Address “5” ก่อน



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการอ่านข้อมูลจาก Single Port Block Memory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 โมดูล Transmit Data

โมดูลสำหรับการส่งข้อมูลจากเอพพีจีเอไปยังคอมพิวเตอร์นั้น มีหลักการการทำงานการส่งข้อมูลแบบ Serial ซึ่งจะส่งข้อมูลไปที่ละบิต ดังนั้นในการติดต่อยังคอมพิวเตอร์นั้น จะต้องมีมาตรฐานในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วย ซึ่งก็คือ Baud Rate นั่นเอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Baud Rate คือ 9600 เพราะเน้นความถูกต้อง และไม่ได้เน้นความเร็วในการส่งมาก เพราะระบบได้มีการสร้างโมดูลพักข้อมูลเพื่อป้องกันข้อมูลสูญหายเรียบร้อยแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### กระบวนการทดลอง

การทดลองนั้น แบ่งการทดลองออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งแต่ละส่วนนั้นจะประกอบไปด้วยสาม ส่วนหลักด้วยกันอันได้แก่ ส่วนของการทดลองการสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอ ส่วนการทดลองทางแสง และส่วนการทดลองกับรังสีเอกซ์

#### 4.1 การสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอ

การสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอนั้นจะต้องทำการจำลองการสร้างสัญญาณก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างสัญญาณควบคุมจริง ดังนั้น ในการสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอนั้นจะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ

การจำลองเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอนั้น จะเป็นการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ในเบื้องต้นก่อนการสร้างสัญญาณควบคุมจริงจากเอฟพีจีเอ เพื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลจากซีไอเอสไปยังเอฟพีจีเอ ซึ่งในการสร้างสัญญาณควบคุมนั้นจะต้องคำนึงถึงความเร็วในการส่งข้อมูลและการสูญหายของข้อมูลเป็นหลัก เพราะการส่งข้อมูลจากเอฟพีจีเอไปยังคอมพิวเตอร์นั้นใช้เวลาที่นาน หากข้อมูลสูญหายระหว่างทาง จะทำให้ข้อมูลที่ไปปรากฏยังคอมพิวเตอร์นั้น จะทำให้ภาพที่ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์หรือในงานอื่น ๆ ได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมทั้งหมดที่ต้องทำการจำลองสร้างจากเอฟพีจีเอนั้นจะประกอบไปด้วยสัญญาณความถี่ 50 MHz สัญญาณความถี่ 60 MHz สัญญาณ MCLK สัญญาณ ADCCLK สัญญาณ CDSCLK1 สัญญาณ CDSCLK2 สัญญาณ SDATA สัญญาณ SLOAD สัญญาณ SCLK สัญญาณ SP สัญญาณ SP\_Enable และสัญญาณเพื่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของ Single Block Port Memory

##### 4.1.2 การสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ

สำหรับการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอนั้น จะทำการวัดสัญญาณจากเอฟพีจีเอ ซีไอเอส และ AD9814 โดยตรง ซึ่งการตรวจวัดสัญญาณนั้นสำคัญมาก เพราะสัญญาณที่ได้จากซีไอเอสนั้นจำเป็นจะต้องใช้สัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอที่เที่ยงตรงเสมอและต้องสอดคล้องกับสัญญาณอื่น ๆ ดังนั้นการวัดสัญญาณ จะสามารถวิเคราะห์การทำงานทั้งหมดของระบบได้ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดระหว่างการส่งสัญญาณจากซีไอเอสไปยังเอฟพีจีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองกับรังสีเอกซ์

สำหรับการทดลองกับรังสีเอกซ์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในการทดลองจะทำการฉายรังสีเอกซ์ไปยังวัตถุ จะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ที่ได้จากซีไอเอส หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer กล่าวตามสมการคือ

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

เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อวัตถุทะลุผ่าน  
 $I_0$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนการทะลุผ่านวัตถุ  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มของรังสีเอกซ์  
 $x$  คือ ความหนาของวัตถุ

กล่าวคือความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนา  $x$  จะถูกลดทอนแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากสมการจะทำให้ได้ภาพจากรังสีเอกซ์นั่นเอง โดยการทดลองนั้นจะแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนย่อย ๆ อันจะประกอบไปด้วย

### 4.2.1 การทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

การทดลองเพื่อทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั้น จะเป็นการฉายรังสีเอกซ์ไปยังฉากเรืองแสง โดยจะทำการฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที ซึ่งจะทำการฉายรังสีเอกซ์ไปยังฉากเรืองแสงเป็นจำนวน 5 ครั้ง แล้วทำการบันทึกข้อมูลของความเข้มของสัญญาณและนำข้อมูลดังกล่าวบันทึกลงในตารางที่ 4.1 ซึ่งออกแบบมาเพื่อบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของซีไอเอส โดยจะทำการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองทั้ง 5 ครั้ง

| ช่องสัญญาณของซีไอเอส    | ความเข้มของสัญญาณแต่ละช่อง |            |            |            |            |
|-------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | ครั้งที่ 1                 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
| ช่องสัญญาณที่ 1         |                            |            |            |            |            |
| ช่องสัญญาณที่ 2         |                            |            |            |            |            |
| .                       |                            |            |            |            |            |
| .                       |                            |            |            |            |            |
| .                       |                            |            |            |            |            |
| ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ |                            |            |            |            |            |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน     |                            |            |            |            |            |

เอกสารนี้เป็น **ตารางที่ 4.1** แสดงการออกแบบตารางบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของซีไอเอสด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

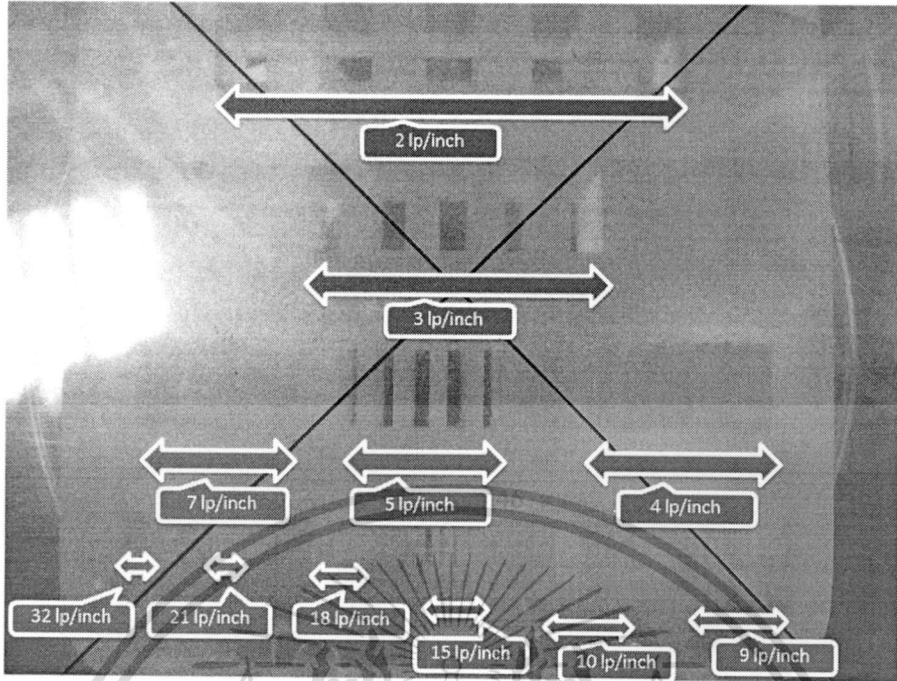
การทดลองเพื่อทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั้น จะทำการฉายรังสีเอกซ์ที่ระดับความต่างศักย์ต่าง ๆ ตั้งแต่ 80 จนถึง 90 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นตารางบันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของซีไอเอส จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อไป

| ช่องสัญญาณของซีไอเอส               | ความเข้มของสัญญาณแต่ละช่องตามการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ (kV) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|------------------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
|                                    | 80  | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |  |
| ช่องสัญญาณที่ 1<br>ช่องสัญญาณที่ 2 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ            |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน                |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

ตารางที่ 4.2 แสดงการออกแบบตารางบันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของซีไอเอส

#### 4.2.3 การทดสอบความละเอียดของภาพจากตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

การทำการทดสอบความละเอียดของซีไอเอสนั้น จะต้องทำการทดลองฉายรังสีเอกซ์ไปยังวัตถุทดสอบความละเอียดมาตรฐาน ซึ่งจะสามารถวัดความละเอียดในหน่วยของ Line pair per inch (lp/inch) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะสามารถแบ่งความละเอียดได้ออกเป็น 4 แถว โดยแถวบนสุดจะทดสอบความละเอียดได้ 2 lp/inch แถวที่สอง สามารถทดสอบความละเอียดได้ 3 lp/inch แถวที่เริ่มต้นจากทางด้านขวาของรูปสามารถทดสอบความละเอียดได้ 4, 5 และ 7 lp/inch ตามลำดับ และแถวสุดท้ายโดยเริ่มต้นจากทางด้านขวาสุดของรูปสามารถทดสอบความละเอียดได้ 9, 10, 15, 18, 21 และ 32 lp/inch นั้นเอง

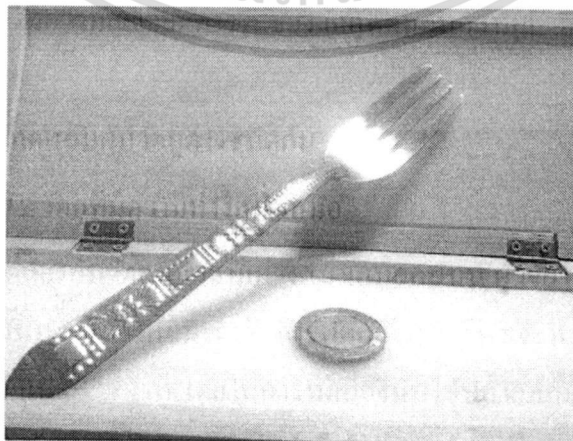


รูปที่ 4.1 แสดงความละเอียดต่าง ๆ ของวัตถุทดสอบความละเอียดมาตรฐาน

4.2.4 การทดสอบกับวัตถุต่างชนิดกัน

4.2.4.1 วัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ

สำหรับการทดลองกับวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอกันนั้น ผู้วิจัยได้เลือกวัตถุที่มีความห่างที่สม่ำเสมอกัน โดยใช้ด้านปลายของส้อม ซึ่งในการทดลองนั้น ผู้วิจัยจะทำการฉายรังสีเอกซ์ที่ช่วง 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที โดยในการทดลองนั้นใช้ปลายส้อมซึ่งมีความหนาของวัตถุคือ 1 มิลลิเมตร จากนั้นหลังจากการฉายรังสีเอกซ์เพื่อทำการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์เรียบร้อยแล้ว ก็จะเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อทำการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์นั่นเอง

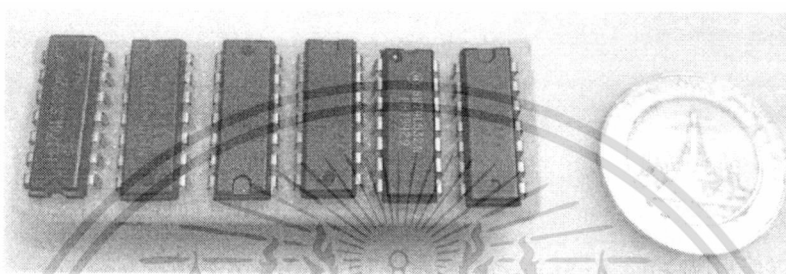


รูปที่ 4.2 แสดงวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.2 วงจรรวม

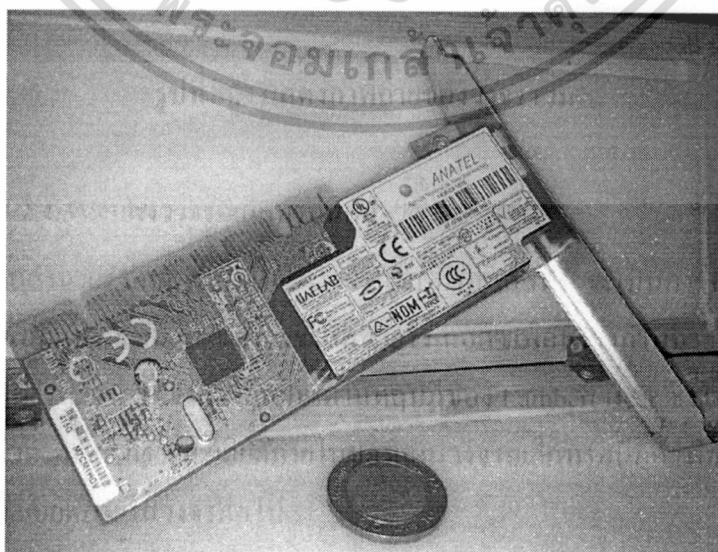
การทดลองกับวงจรรวมนั้นจะเป็นการทดลองฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที ซึ่งจะหลังจากสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์แล้ว ก็จะเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อทำการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบการนำระบบไปใช้ในการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์กับวัตถุที่มีขนาดเล็กและมีรายละเอียดมาก ซึ่งจะมีประโยชน์ในการตรวจค้นวัตถุได้ในอนาคต



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของวงจรรวม

#### 4.2.4.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองฉายรังสีเอกซ์ไปยังแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะเป็นการฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที ซึ่งหลังจากที่ฉายรังสีเอกซ์เพื่อสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์แล้ว ก็จะเข้าสู่กระบวนการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ตามทฤษฎีของ Lambert Beer ซึ่งในการทดลองนี้ จะเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบรายละเอียดภายในของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์รายละเอียดภายในวงจรต่อไป

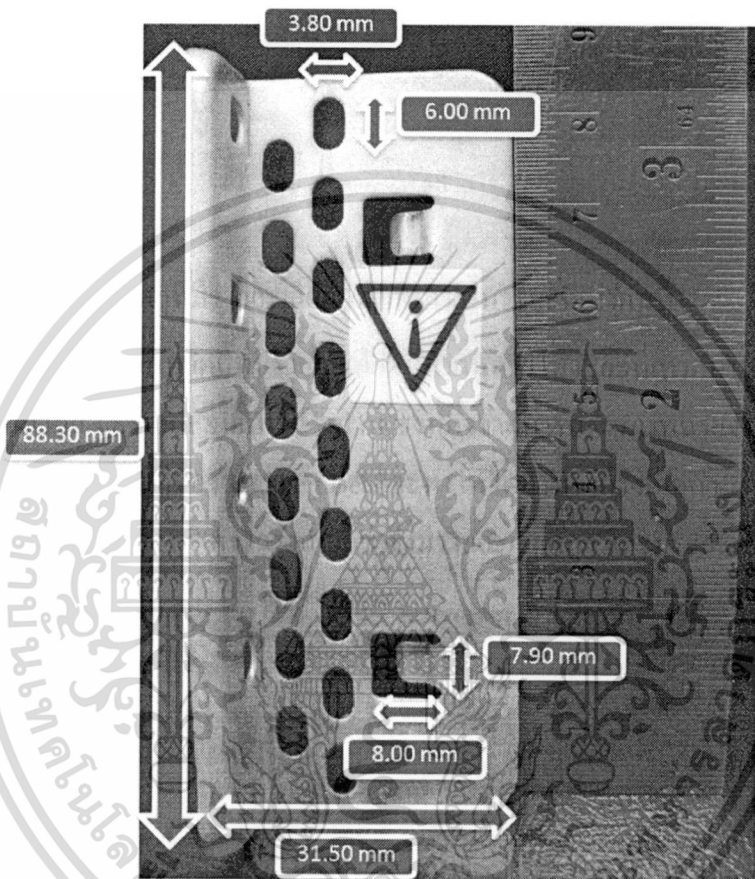


รูปที่ 4.4 แสดงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.4 วัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน

การทำการทดลองกับวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากันนั้น จะทำการฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที ซึ่งหลังจากการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์แล้ว จะเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer จะทำให้ได้ภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในการทดลองนั้น จะเป็นการทดสอบการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งมีรายละเอียดสูง และมีระยะที่หลากหลาย

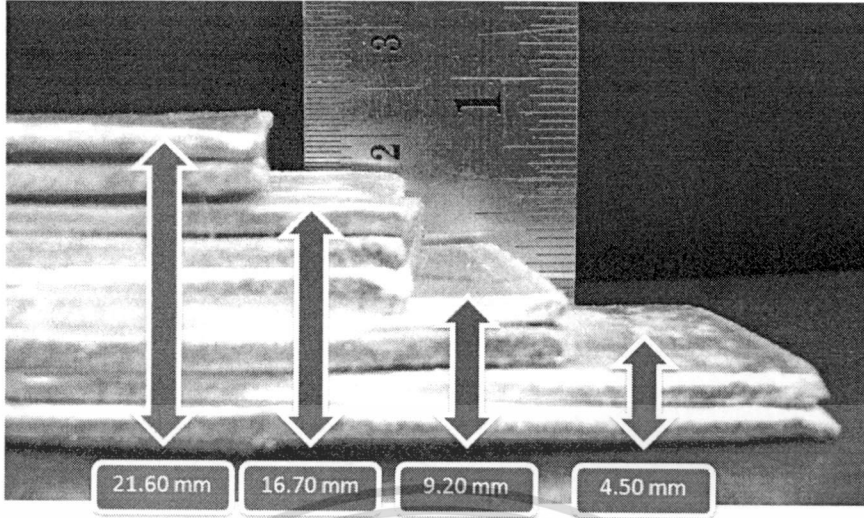


รูปที่ 4.5 แสดงวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน

#### 4.2.4.5 แผ่นอคูมิเนียมแบบขั้น

การทดลองนี้เป็นการทดลองกับแผ่นอคูมิเนียมแบบขั้น ซึ่งทำการฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมแปร์ 5 วินาที เพื่อทำการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์ จากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อทำให้ได้ภาพจากรังสีเอกซ์ โดยการทดลองนั้นจะเป็นการทดสอบการลดทอนความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ความหนาระยะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

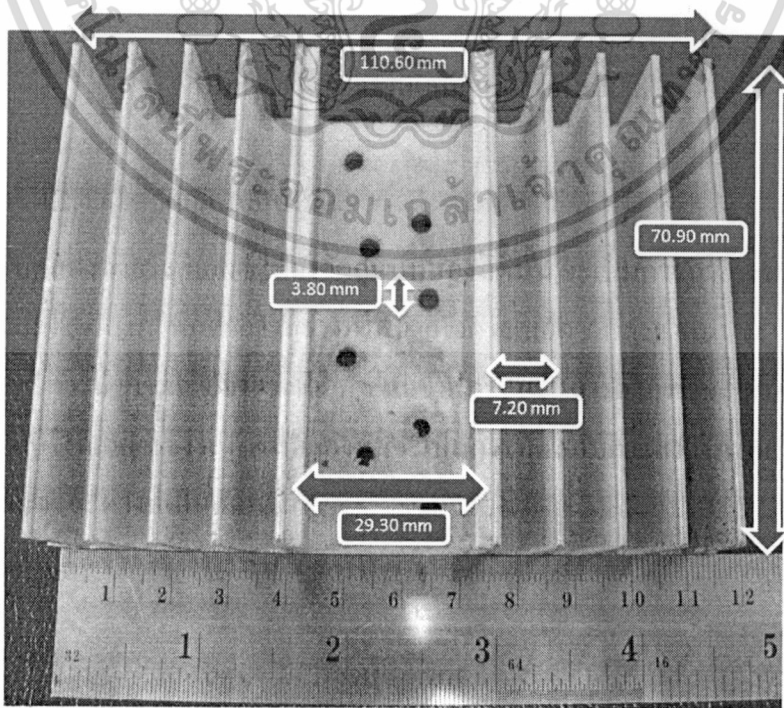
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงแผ่นอลูมิเนียมแบบชั้น

4.2.4.6 วัสดุแบบสองมิติ

การทดลองฉายรังสีเอกซ์ไปยังวัสดุแบบสองมิตินั้น จะเป็นการฉายรังสีเอกซ์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมป์ 5 วินาที เพื่อทำการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์ หลังจากนั้นจะทำการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์โดยการนำภาพฉายจากรังสีเอกซ์ไปเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อให้ได้ภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในการทดลองนั้นจะเป็นการทดสอบการสร้างภาพกับวัสดุแบบสองมิติที่มีรูปร่างและระยะห่างที่เป็นสัดส่วน

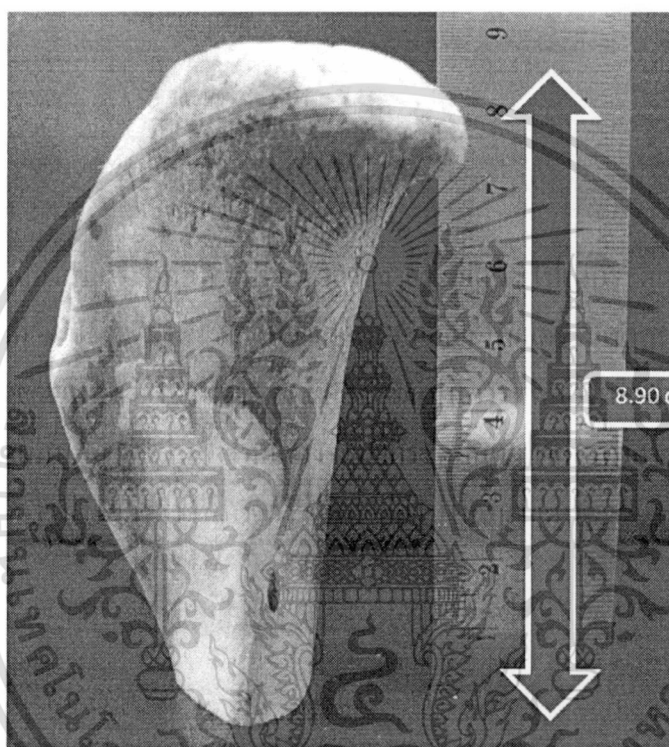


รูปที่ 4.7 แสดงวัสดุแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.7 กระจุกสัตว์

การทดลองกับกระจุกสัตว์นั้นจะทำการฉายรังสีเอกซ์ไปยังกระจุกสัตว์ที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมป์ 5 วินาที ซึ่งจะทำการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์ เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อทำการทดสอบกับวัตถุที่ใกล้เคียงกับกระจุกมนุษย์ โดยในการทดลองจะนำกระจุกสัตว์มาเพื่อทำการทดสอบการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.8 แสดงกระจุกสัตว์

#### 4.2.4.8 วัตถุภายในแผ่นคิสเก็ต

การทดลองฉายรังสีเอกซ์ไปยังวัตถุที่อยู่ภายในแผ่นคิสเก็ตนั้น จะทำการฉายรังสีเอกซ์ไปที่ 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมป์ 5 วินาที เพื่อทำการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์ สำหรับเตรียมเข้าสู่กระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer เพื่อให้ได้ภาพจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในการทดลองจะเป็นการตรวจหาวัตถุที่อยู่ภายในแผ่นคิสเก็ต เพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจหาวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ภายในอีกที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงแผ่นดิสเก็ต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลการทดลองและอภิปรายผล

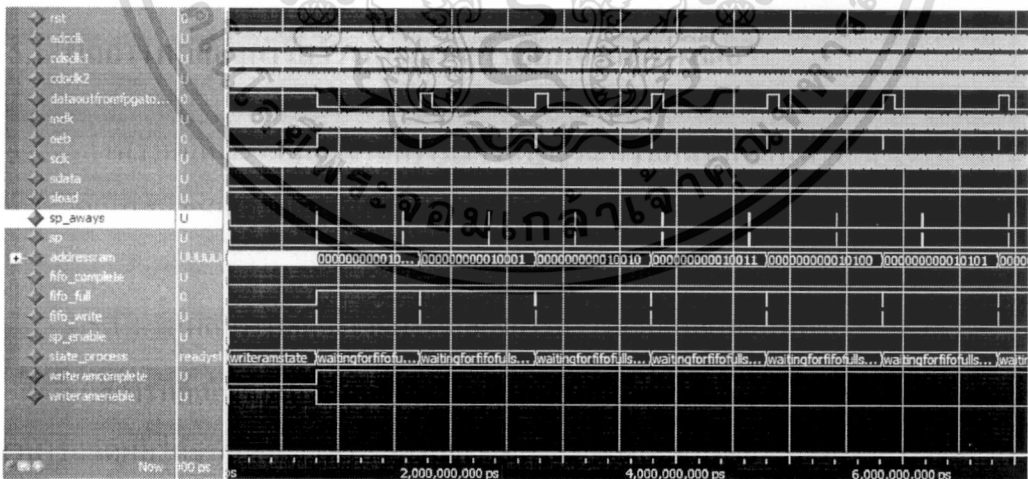
สำหรับผลการทดลองนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกันคือส่วนผลการทดลองการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ ส่วนของผลการทดลองทางแสงและผลการทดลองกับรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 5.1 ผลการทดลองการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ

สำหรับผลการทดลองจากการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอนั้นจะแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วนด้วยกัน อันจะประกอบไปด้วย

#### 5.1.1 ผลการทดลองจากการจำลองการสร้างควบคุมจากเอฟพีจีเอ

ผลการทดลองของการจำลองการทำงานภายในเอฟพีจีเอนั้น จะแสดงการทำงานต่าง ๆ ที่ไม่สามารถวัดผลได้จากเครื่องวัด เพราะสัญญาณต่าง ๆ จะเกิดขึ้นภายในระยะเวลาที่เร็วมาก โดยสัญญาณควบคุมทั้งหมดสามารถแสดงดังรูปที่ 5.10 ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

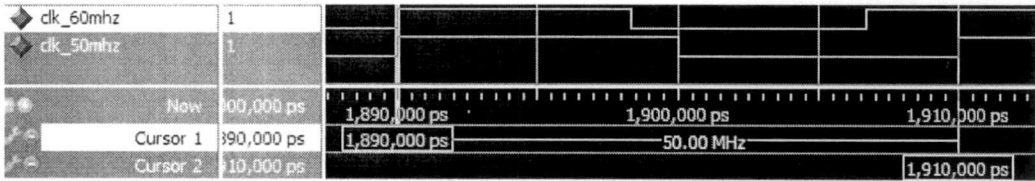


รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณควบคุมจากการจำลองการทำงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.1 สัญญาณความถี่ 50 MHz

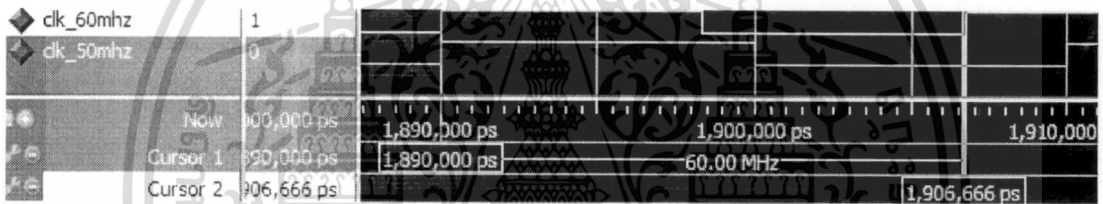
สัญญาณความถี่ 50 MHz นั้นสามารถแสดงดังในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณความถี่ 50 MHz

5.1.1.2 สัญญาณความถี่ 60 MHz

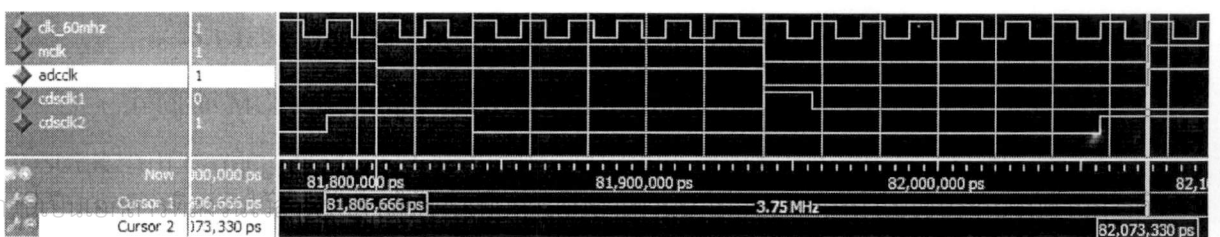
สัญญาณความถี่ 60 MHz นั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจากผลการจำลองสัญญาณพบว่าสัญญาณที่ได้จะได้อะไร 60 MHz พอดี



รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณความถี่ 60 MHz

5.1.1.3 สัญญาณ MCLK, ADCCLK, CDSCLK1 และ CDSCLK2

สัญญาณ MCLK และสัญญาณ ADCCLK โดยเทียบกับสัญญาณ CDSCLK1 กับสัญญาณ CDSCLK2 พบว่า สัญญาณ MCLK และสัญญาณ ADCCLK นั้นมีความถี่อยู่ที่ 3.75 MHz พอดี ซึ่งเมื่อทำการวัดเทียบกับสัญญาณ 60 MHz ก็จะได้จำนวนเท่าของสัญญาณความถี่พอดิ ซึ่งทำให้ทราบว่าสัญญาณความถี่ 60 MHz สามารถสร้างสัญญาณ MCLK และสัญญาณ ADCCLK ได้ โดยนอกจากนั้นยังถูกนำมาใช้สร้างสัญญาณ CDSCLK1 กับ สัญญาณ CDSCLK2 ด้วย ซึ่งสัญญาณ CDSCLK1 จะมีช่วงความยาวอยู่ที่ 1 ไชเคิล โดยจะปรากฏในช่วงขอบขาลงของสัญญาณ ADCCLK และสัญญาณ CDSCLK2 จะมีความยาวอยู่ที่ 3 ไชเคิล จะเกิดก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณ ADCCLK นั่นเอง



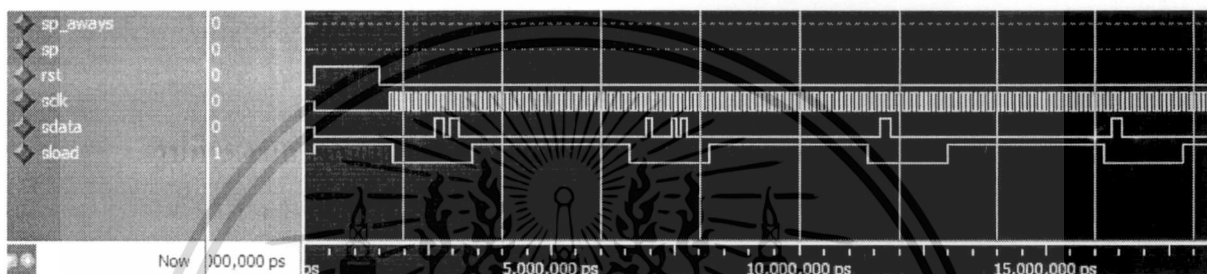
เอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณ ADCCLK MCLK CDSCLK1 และ CDSCLK2

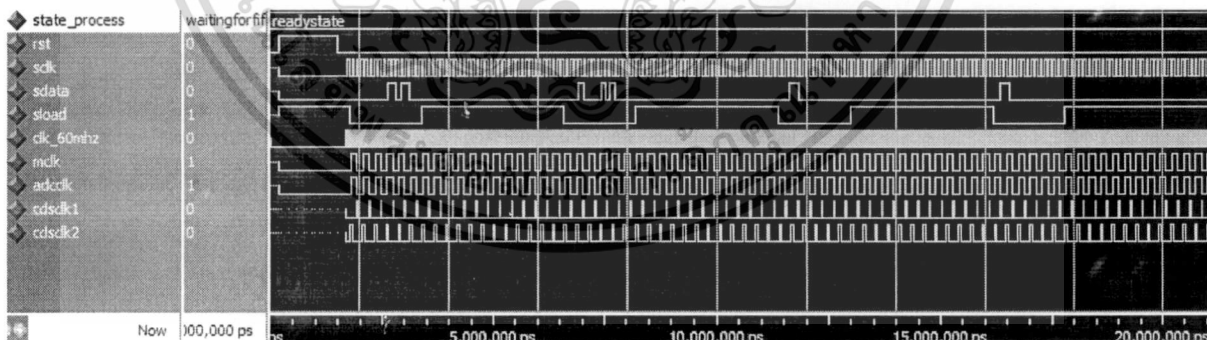
5.1.1.4 สัญญาณ SDATA สัญญาณ SLOAD และ สัญญาณ SCLK

จากรูปที่ 5.5 คือผลการทดลองจากการจำลองการสร้างสัญญาณจากเอฟพีจีเอ ซึ่งพบว่า จะเกิดช่วง SLOAD ทั้งหมด 4 ช่วงด้วยกัน เพราะต้องทำการปรับค่า Register ทั้งหมด 4 Register ด้วยกันอันได้แก่ Configuration Register กับ Mux Register กับ PGA Gain Register และ Offset Register โดยจะสังเกตว่าสัญญาณ SP จะไม่ปรากฏ ซึ่งหมายถึงว่าการทำการโหลดข้อมูลต่าง ๆ ไปยัง Register นั้น จะกระทำในช่วงก่อนการใช้นั้นเอง



รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณ SDATA SCLK และ SLOAD

ซึ่งในขณะที่ทำการโหลดข้อมูลไปยัง Register ต่าง ๆ ระบบจะทำการสร้างสัญญาณควบคุมต่าง ๆ แล้ว ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ MCLK สัญญาณ ADCCLK สัญญาณ CDSCLK1 และ สัญญาณ CDSCLK2 ซึ่งสามารถสังเกตได้ดังรูปที่ 5.6

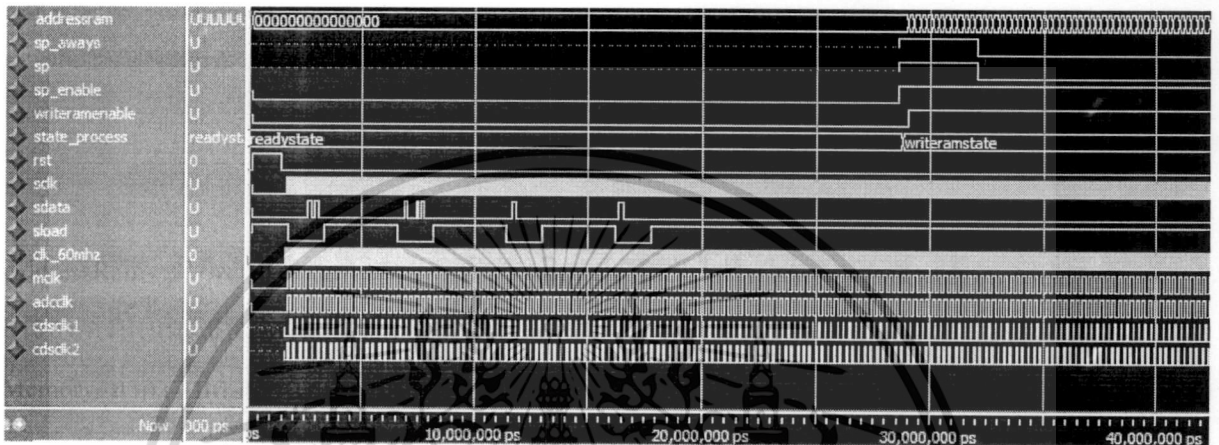


รูปที่ 5.6 แสดงการเริ่มการทำงานของสัญญาณ ADCCLK MCLK CDSCLK1 และ CDSCLK2

5.1.1.5 สัญญาณ SP และสัญญาณ SP Enable

จากรูปที่ 5.7 จะพบว่าการทำงานต่าง ๆ จะเริ่มขึ้นอยู่ก่อนแล้ว ยกเว้นสัญญาณ SP ซึ่งเมื่อมีการร้องขอสัญญาณ SP แล้ว ระบบก็จะทำการเปลี่ยนจากสถานะ Ready เป็นสถานะ Write Ramทันที เพื่อทำการเริ่มเขียนข้อมูลลงใน Single Block Port Memory ซึ่งในขณะนี้สัญญาณ SP Enable ก็จะเป็น 1 เรียบร้อยแล้ว ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยง่ายจากการเปลี่ยนแปลงของค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AddressRam ซึ่งมีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเขียนข้อมูลลงไป ใน Single Block Port Memory นั้นเอง ดังนั้นสัญญาณ Write Ram Enable จะเป็น 1 เพื่อทำการ Activate ให้ Single Block Port Memory ทำการเปิด Port เพื่ออนุญาตให้ทำการเขียนข้อมูลลงไปได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้ซีไอเอสจะทำการส่งข้อมูลต่าง ๆ ผ่านมายัง AD9814 เรียบร้อยแล้ว นอกจากนั้นก็จะได้ข้อมูลมาจาก AD9814 อีกแล้วเช่นกัน

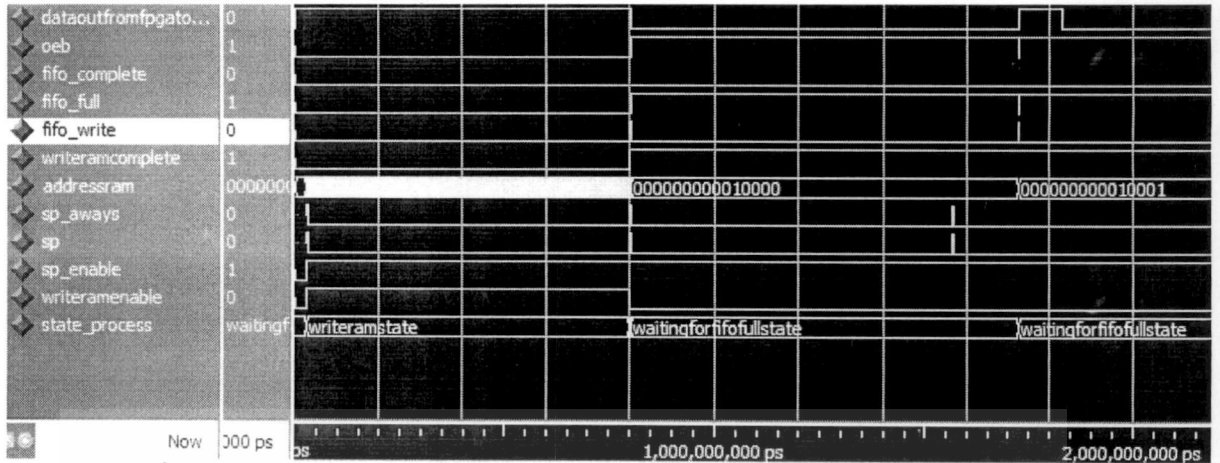


รูปที่ 5.7 แสดงการเกิดสัญญาณ SP และการเริ่มสถานะ Write Ram

#### 5.1.1.6 การเปลี่ยนสถานะเมื่อเขียนข้อมูลลงใน Single Block Port Memory เรียบร้อย

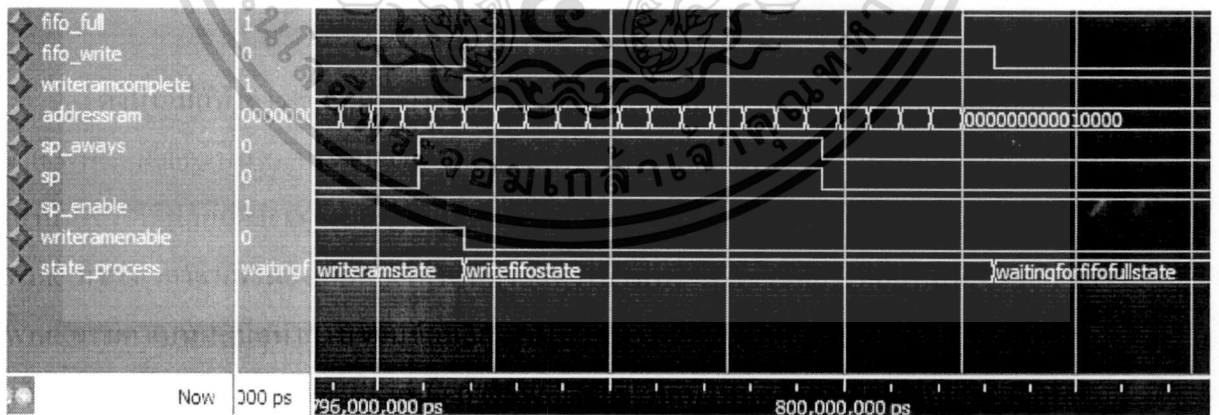
สามารถสังเกตการเปลี่ยนสถานะได้จากสัญญาณ State Process ซึ่งจากรูปที่ 5.8 จะพบว่าเมื่อทำการเขียนข้อมูลลงใน Single Block Port Memory เรียบร้อยแล้ว ระบบก็จะเข้าสู่สถานะใหม่จากสถานะ Write Ram เป็นสถานะ FIFO Write แต่เมื่อสังเกตจากรูปที่ 5.8 จะพบว่าไม่ปรากฏสถานะ FIFO Write แต่ปรากฏเฉพาะสถานะ Waiting for FIFO Full และจะปรากฏสัญญาณ FIFO Write เป็นระยะเท่านั้น ประกอบกับสัญญาณ FIFO Full จะเป็น 0 เป็นระยะเท่านั้น ซึ่งหมายถึงข้อมูลภายใน FIFO Memory นั้นเต็มบ่อยมากนั่นเอง ทำให้การเขียนข้อมูลลงไป ใน FIFO Memory มีช่วงในการเขียนที่น้อยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อสังเกตจาก Address ก็พบว่า การเปลี่ยน Address จะค้างเป็นเวลานานมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงเปลี่ยนสถานะเมื่อเขียนข้อมูลลงใน Single Block Port Memory

ดังนั้นเมื่อทำการตั้งเกตในช่วงระยะเวลาที่แคบลงจะพบว่า แท้จริงแล้วมีการเปลี่ยนสถานะจาก Write Ram เป็นสถานะ FIFO Write เช่นกัน แต่จะเข้ามายังสถานะนี้เพียงแค่ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเหตุผลคือ FIFO Memory นั้นเต็มเร็วมากนั่นเอง ทำให้ช่วงเวลาในการเกิดสถานะ FIFO Write มีช่วงเวลาที่จำกัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งระหว่างที่อยู่ในสถานะนี้ FIFO Write จะมีค่าเป็น 1 เมื่อทำการเขียนข้อมูลลงไป ใน FIFO Memory เพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ต่อไปได้ แต่เมื่อ FIFO Memory เต็ม FIFO Write ก็จะกลับไปมีค่าเป็น 0 อีกเช่นเดิมเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็น Waiting for FIFO full เพื่อรอการส่งข้อมูลครั้งต่อไป โดยการส่งข้อมูลจะดำเนินต่อไปจนกว่าข้อมูลจะหมดและสัญญาณ SP Enable มีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 5.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะอย่างละเอียดในการเขียนข้อมูลลงใน FIFO Memory

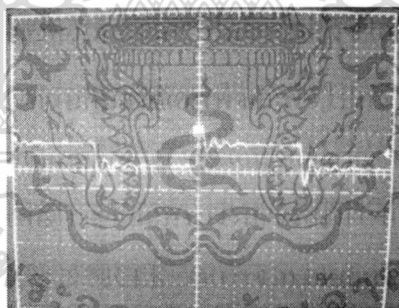
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ผลการทดลองของสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอ

ผลการทดลองของการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก อันได้แก่สัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอไปยังซีไอเอส สัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอไปยัง AD9814 และสัญญาณผลลัพธ์ทั้งหมดของซีไอเอสไปยัง AD9814 ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1.2.1 สัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอไปยังซีไอเอส

จากการสร้างสัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอเพื่อไปควบคุมซีไอเอสนั้น จะต้องทำการสร้างสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณอันได้แก่สัญญาณ SP และสัญญาณ MCLK ซึ่งสัญญาณ MCLK นั้นจะต้องมีความถี่คือ 3.75 MHz เพื่อให้ซีไอเอสทำงาน ซึ่งสามารถวัดผลได้ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งแสดงภาพสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงของสัญญาณ MCLK ซึ่งการจากวัดผลการทดลองนั้น พบว่าสัญญาณที่ได้จะเกิดสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากแหล่งจ่ายไฟที่มีความไม่เสถียร ประกอบกับขาดวงจรกรองความถี่นั่นเอง แต่ทั้งนี้สัญญาณดังกล่าวก็ยังสามารถทำงานในช่วงความถี่ 3.75 MHz ได้ดี ซึ่งในส่วนนี้จะไม่มีผลกับค่าความละเอียดของระบบตรวจจับรังสีเอกซ์ (วัดค่าจาก Digital phosphor oscilloscope two channel color; Tektronix)

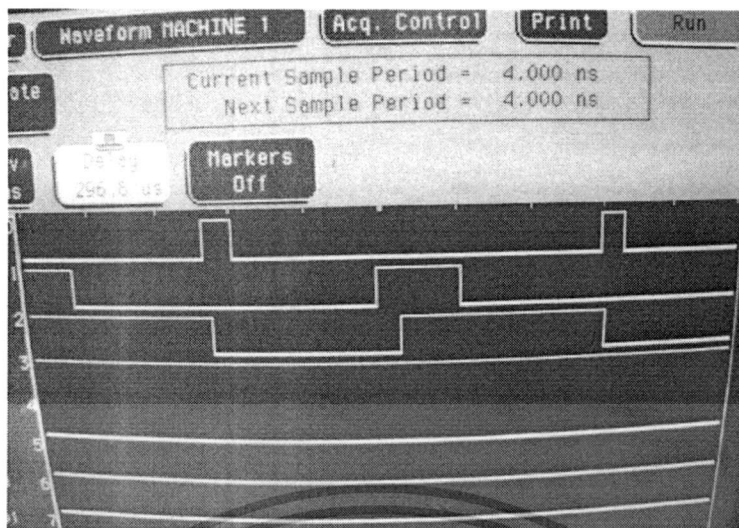


รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณ MCLK ซึ่งสร้างจากเอฟพีจีเอวัดความถี่ได้ 3.75 MHz

#### 5.1.2.2 สัญญาณควบคุมจากเอฟพีจีเอไปยัง AD9814

การวัดสัญญาณจากเอฟพีจีเอไปยัง AD9814 นั้น เพื่อความละเอียดในการวัด มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดที่มีความถี่สูงและดังนั้นจะต้องจึงใช้ Logic analyzer 1664A; Agilent ซึ่งสามารถวัดได้มากกว่า 20 ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งสัญญาณดังรูปจะประกอบไปด้วย CDSCLK1 CDSCLK2 และ ADCCLK ตามลำดับ เรียงจากบนลงล่าง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ CDSCLK1 จะปรากฏในช่วงขอบขาลงของสัญญาณ ADCCLK พอดีในทุก ๆ ช่วงของสัญญาณ ADCCLK และสัญญาณ CDSCLK2 จะปรากฏก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณ ADCCLK

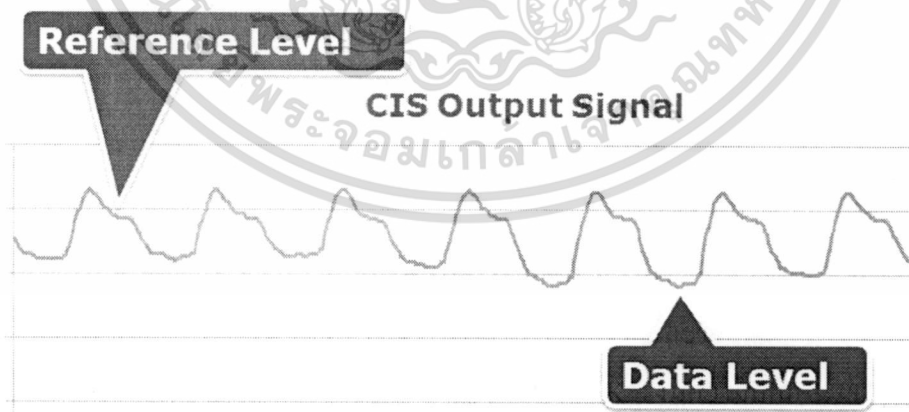
เอกสาร AD9814 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณ CDSCLK1 CDSCLK2 และสัญญาณ ADCCLK สร้างจากเอฟพีจีเอ

### 5.1.2.3 สัญญาณผลลัพธ์ทั้งหมดของซีไอเอสไปยัง AD9814

สัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จากซีไอเอสก่อนจะเข้าไปยัง AD9814 นั้นสามารถวัดและบันทึกผลลงในคอมพิวเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งจากภาพนั้นจะสังเกตเห็นว่าปรากฏช่วงของ Reference Level ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถค้นหาช่วงของ Data Level ได้ง่ายและชัดเจน ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะต้องมีความถี่เท่ากับสัญญาณ ADCCLK และสัญญาณ MCLK ซึ่งมีความถี่คือ 3.75 MHz เพื่อให้การทำงานทุกขั้นตอนมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นในการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ก็จะต้องใช้ความถี่ที่เท่ากันในการแปลงข้อมูลด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณผลลัพธ์จากซีไอเอสไปยัง AD9814

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการทดลองจากรังสีเอกซ์

ผลการทดลองจากรังสีเอกซ์นั้นจะแบ่งผลการทดลองออกเป็นส่วนหลัก ๆ 4 ส่วนด้วยกัน โดยสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

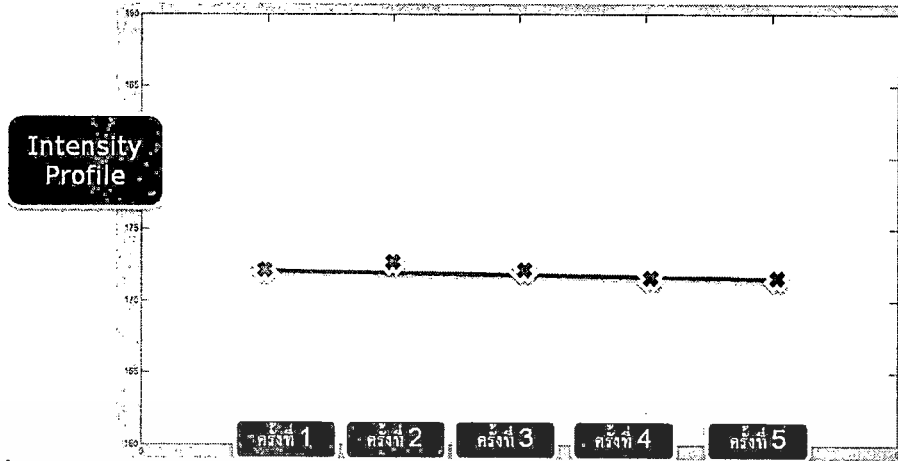
### 5.2.1 ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอกซ์

จากผลการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอกซ์จากตารางดังตารางที่ 5.1 ซึ่งบันทึกผลการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอกซ์ พบว่าแต่ละช่องสัญญาณนั้นจะได้ค่า Intensity Profile ที่มีช่วงที่ใกล้เคียงกันในแต่ละครั้ง ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จากค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 5 ครั้ง พบว่าค่าเฉลี่ยทั้งหมดจะอยู่ที่ประมาณ 172 ซึ่งหมายความว่าเมื่อทำการทดลองที่แรงดัน 97 กิโลโวลต์ 8 มิลลิแอมป์ 5 วินาที จะทำให้ได้ค่า Intensity Profile ที่ประมาณ 172 เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมีค่าประมาณ 8 ซึ่งความเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้เกิดจากสัญญาณรบกวนอันเกิดจากรังสีเอกซ์นั่นเอง ทำให้ Intensity Profile ที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนมาก

| ช่องสัญญาณของซีไอเอส    | จำนวนครั้งการทดลอง |            |            |            |            |
|-------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | ครั้งที่ 1         | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
| ช่องสัญญาณที่ 1         | 175                | 174        | 165        | 175        | 163        |
| ช่องสัญญาณที่ 2         | 169                | 172        | 176        | 174        | 174        |
| ช่องสัญญาณที่ 3         | 157                | 160        | 173        | 164        | 167        |
| ช่องสัญญาณที่ 4         | 156                | 154        | 163        | 157        | 157        |
| ช่องสัญญาณที่ 5         | 164                | 161        | 159        | 162        | 156        |
| .                       | .                  | .          | .          | .          | .          |
| .                       | .                  | .          | .          | .          | .          |
| .                       | .                  | .          | .          | .          | .          |
| ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ | 172.1257           | 172.6551   | 172.3615   | 171.5430   | 171.7891   |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน     | 8.4864             | 8.3869     | 8.2419     | 8.0913     | 8.2543     |

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



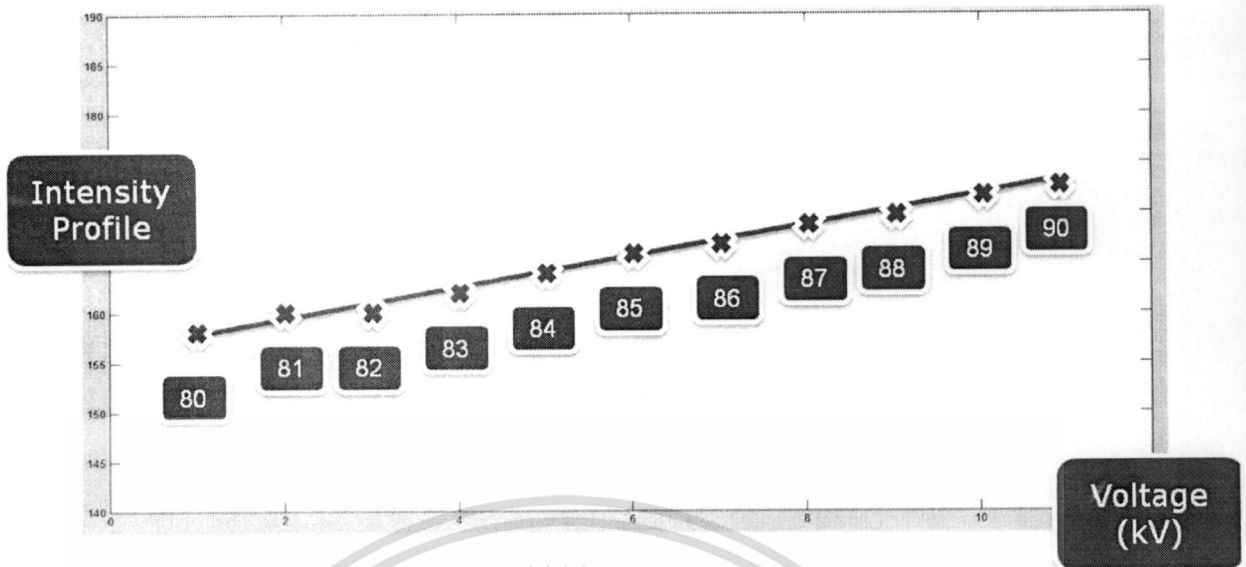
รูปที่ 5.13 แสดงความเข้มเฉลี่ยของการทดสอบความสม่ำเสมอของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

### 5.2.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าที่แรงดันต่าง ๆ จะได้ค่า Intensity Profile ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณในแต่ละช่วงความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นพบว่าตั้งแต่ช่วงความต่างศักย์ที่ 80 ถึง 90 กิโลโวลต์ ค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 5.14

| ช่องสัญญาณของ ซีไอเอส   | ความเข้มของสัญญาณแต่ละช่องตามการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ (kV) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 80  | 81    | 82    | 83    | 84    | 85    | 86    | 87    | 88    | 89    | 90    |
| ช่องสัญญาณที่ 1         | 149   | 161   | 152   | 166   | 164   | 167   | 166   | 165   | 159   | 160   | 163   |
| ช่องสัญญาณที่ 2         | 150   | 162   | 162   | 158   | 154   | 170   | 174   | 159   | 158   | 169   | 174   |
| ช่องสัญญาณที่ 3         | 157   | 153   | 167   | 152   | 152   | 160   | 169   | 167   | 168   | 179   | 175   |
| ช่องสัญญาณที่ 4         | 158   | 146   | 157   | 153   | 159   | 152   | 156   | 173   | 171   | 173   | 163   |
| ช่องสัญญาณที่ 5         | 151   | 153   | 149   | 160   | 163   | 156   | 154   | 170   | 163   | 163   | 154   |
| .                       | .   | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     |
| .                       | .   | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     |
| .                       | .   | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     | .     |
| ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ | 158.0   | 159.9 | 160.0 | 162.4 | 164.3 | 165.2 | 167.3 | 169.1 | 170.3 | 171.8 | 172.9 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน     | 6.881   | 7.260 | 7.680 | 7.983 | 7.642 | 7.658 | 7.715 | 7.882 | 8.018 | 8.144 | 7.850 |

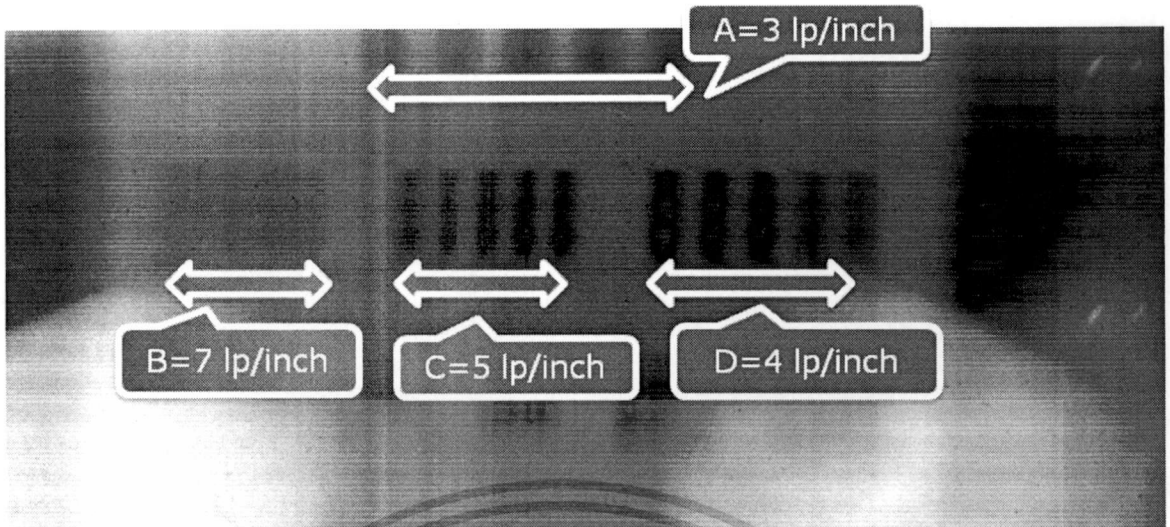
ตารางที่ 5.2 แสดงผลของความเข้มสัญญาณแต่ละช่องตามการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



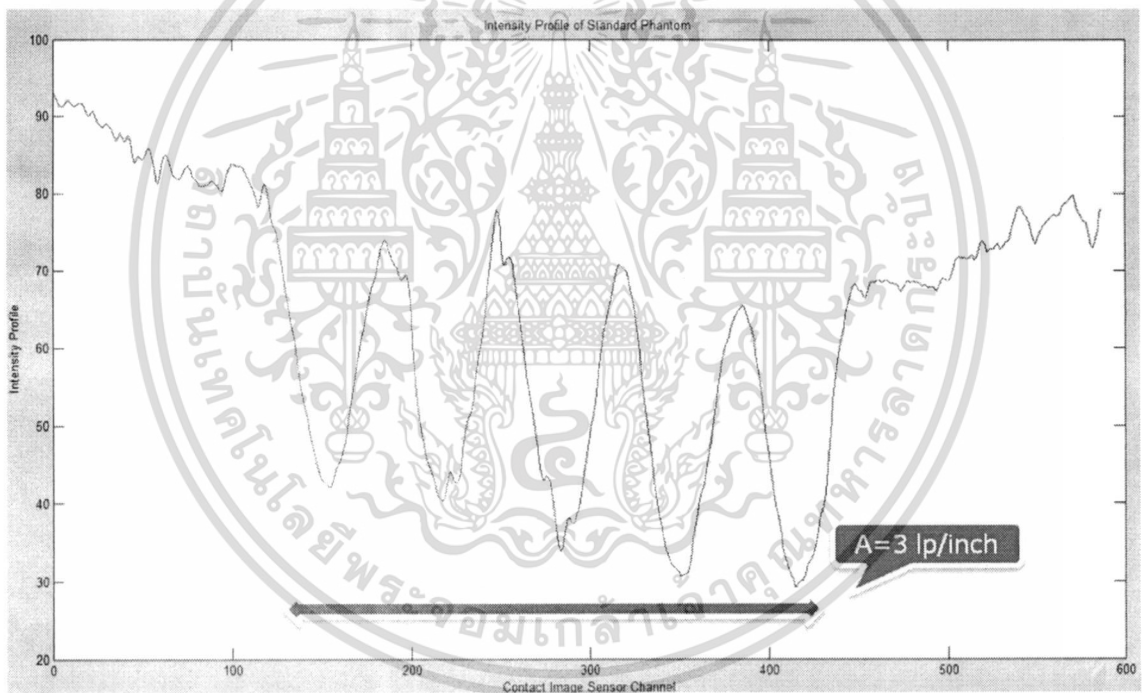
รูปที่ 5.14 แสดงค่าเฉลี่ยของการทดลองความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

### 5.2.3 ผลการทดสอบความละเอียดของภาพจากตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

จากผลการทดสอบความละเอียดของภาพตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ หลังจากการผ่านทฤษฎีของ Lambert Beer แล้วจะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในการทดลองได้ทำการแยกความละเอียดโดยแบ่งเป็น 4 ช่วงอันได้แก่ช่วง A ช่วง B ช่วง C และช่วง D ซึ่งแต่ละช่วงมีความละเอียดอยู่ตามรูปที่ 5.15 โดยจากผลการทดลองนั้นหลังจากทำการหาช่วงของ Intensity Profile ในแต่ละช่วง ทำให้ได้ผลการทดลองของช่วง A ดังรูปที่ 5.16 ซึ่งสามารถแยกได้ด้วยตาเปล่า โดยช่วง A นั้นมีความละเอียด 3 lp/inch ดังนั้นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นี้สามารถแยกความละเอียดช่วง A ได้ และต่อมาทำการวัดความละเอียดที่ช่วง B C และ D ตามลำดับ โดยทำการวัด Intensity Profile ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งจากรูปพบว่า ช่วง B ที่มีความละเอียดคือ 7 lp/inch นั้นไม่สามารถแยกรายละเอียดได้ด้วยตาเปล่า แต่สำหรับช่วง C และช่วง D นั้นสามารถแยกรายละเอียดได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งมีความละเอียดอยู่ที่ 5 lp/inch และ 4 lp/inch ตามลำดับ ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์มีความสามารถแยกรายละเอียดได้สูงถึง 5 lp/inch

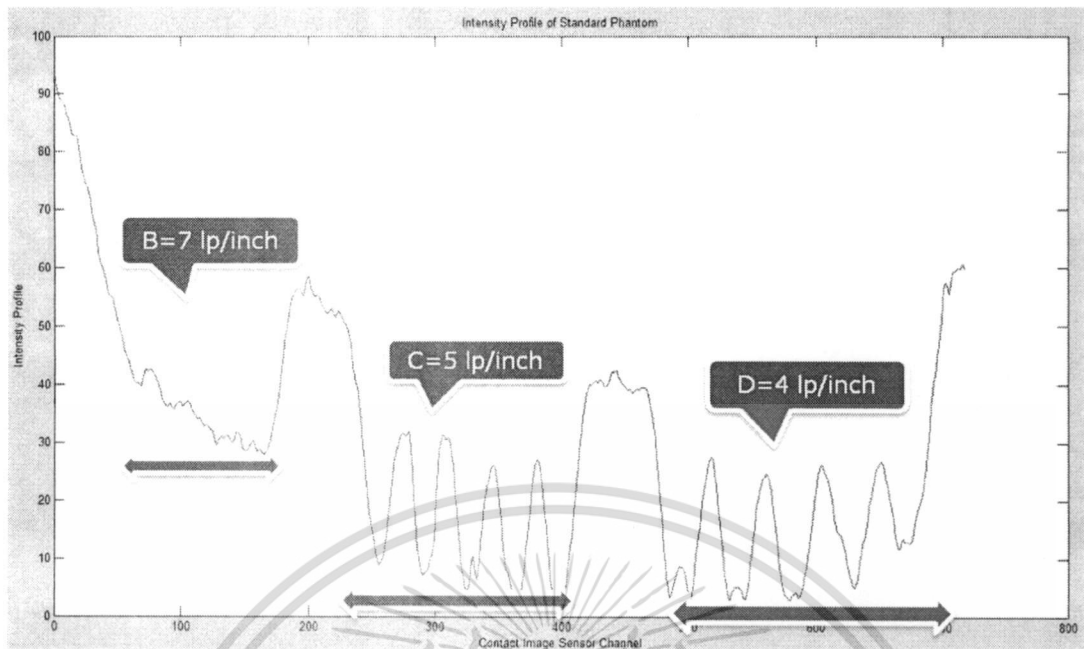


รูปที่ 5.15 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุทดสอบความละเอียด



รูปที่ 5.16 แสดง Intensity Profile ช่วง A ของวัตถุทดสอบความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

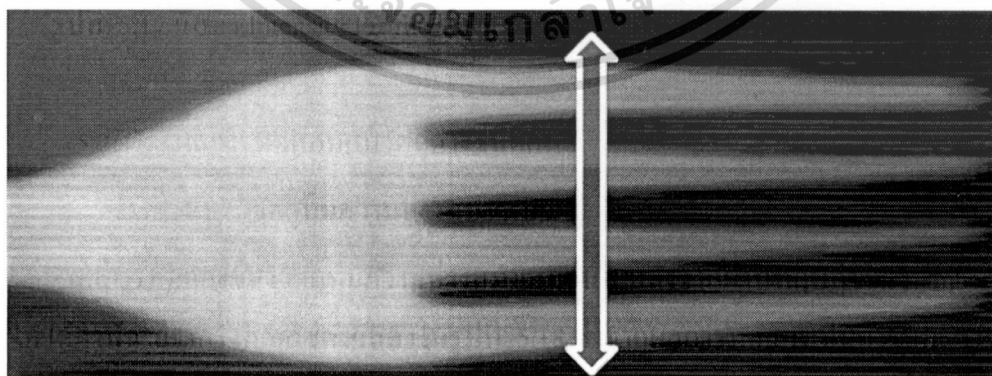


รูปที่ 5.17 แสดง Intensity Profile ช่วง B C และ D ของวัตถุทดสอบความละเอียด

#### 5.2.4 ผลการทดสอบกับวัตถุต่างชนิดกัน

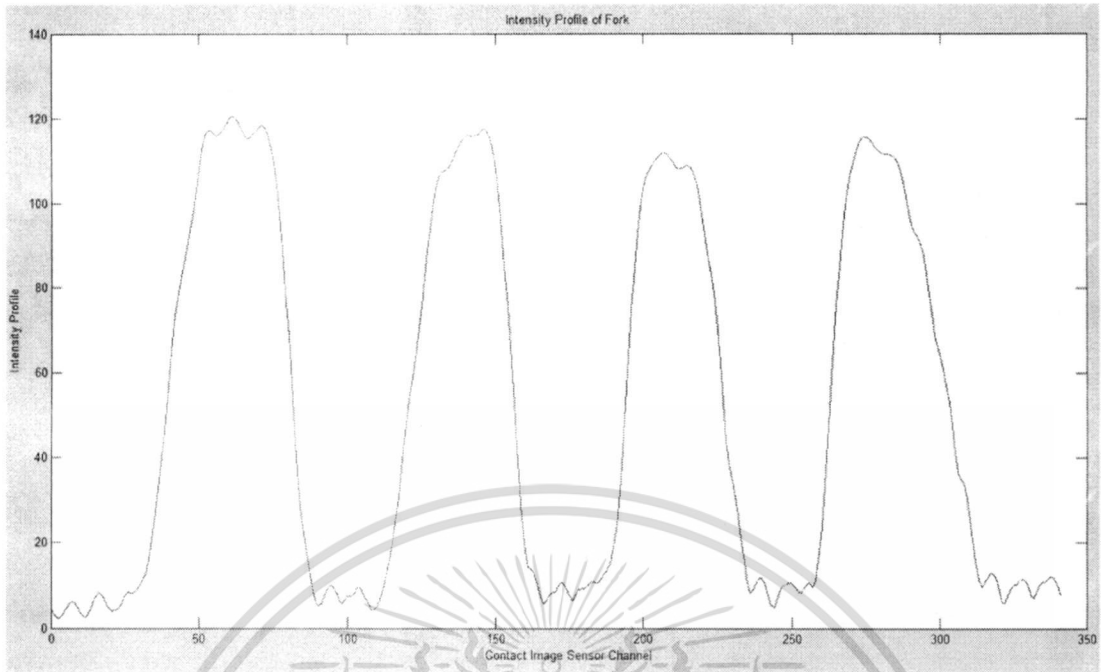
##### 5.2.4.1 วัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ

ผลการทดลองของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ นั้น หลังจากผ่านทฤษฎีของ Lambert Beer จะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งจากผลการทดลองเป็นการทดลองเพื่อการสร้างภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ และเพื่อทำการหา Intensity Profile ของวัตถุที่มีความห่างเสมอกันดังแสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งจากรูปพบว่า สามารถแยกรายละเอียดได้ ดังนั้นตัวตรวจจบบรังสีเอกซ์สามารถใช้บันทึกผลของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอได้



รูปที่ 5.18 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีความห่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดง Intensity Profile ของวัตถุที่มีความห้ำหั่นสม่ำเสมอ

#### 5.2.4.2 แผงวงจรถออิเล็กทรอนิกส์

สำหรับผลการทดลองของแผงวงจรถออิเล็กทรอนิกส์นั้นจะแสดงดังรูปที่ 5.20 ซึ่งการทดลองนั้นเป็นการทดลองเพื่อการทดสอบการนำภาพที่ได้มาสร้างเป็นภาพสองมิติเพื่อสำรวจโครงสร้างภายในของวัตถุ ซึ่งภาพที่ได้นั้นได้ผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer ทำให้ได้ภาพของโครงสร้างภายในของแผงวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นทำให้ได้ข้อสรุปว่าตัวตรวจจบบรังสีเอกซ์นี้สามารถสำรวจภายในของวัตถุและสามารถผ่านกระบวนการสร้างภาพให้เป็นภาพสองมิติได้

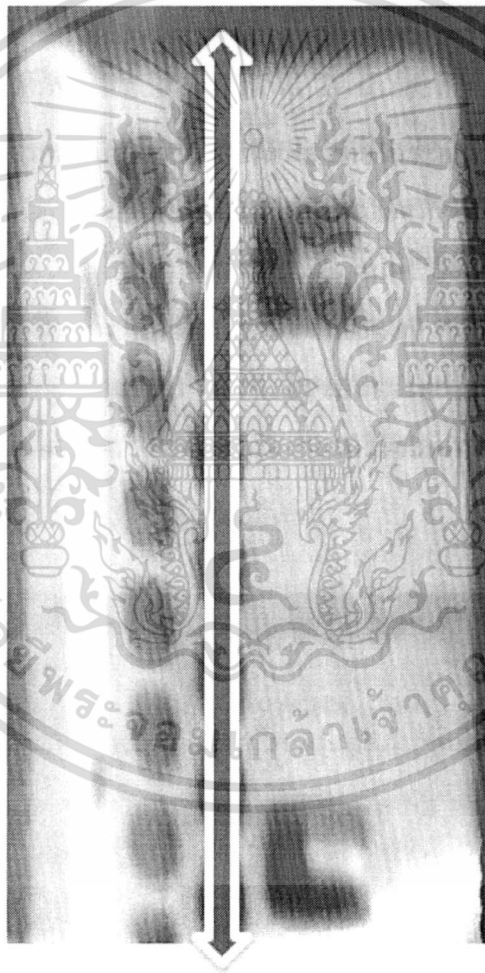


รูปที่ 5.20 แสดงภาพภายในจากรังสีเอกซ์ของแผงวงจรถออิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

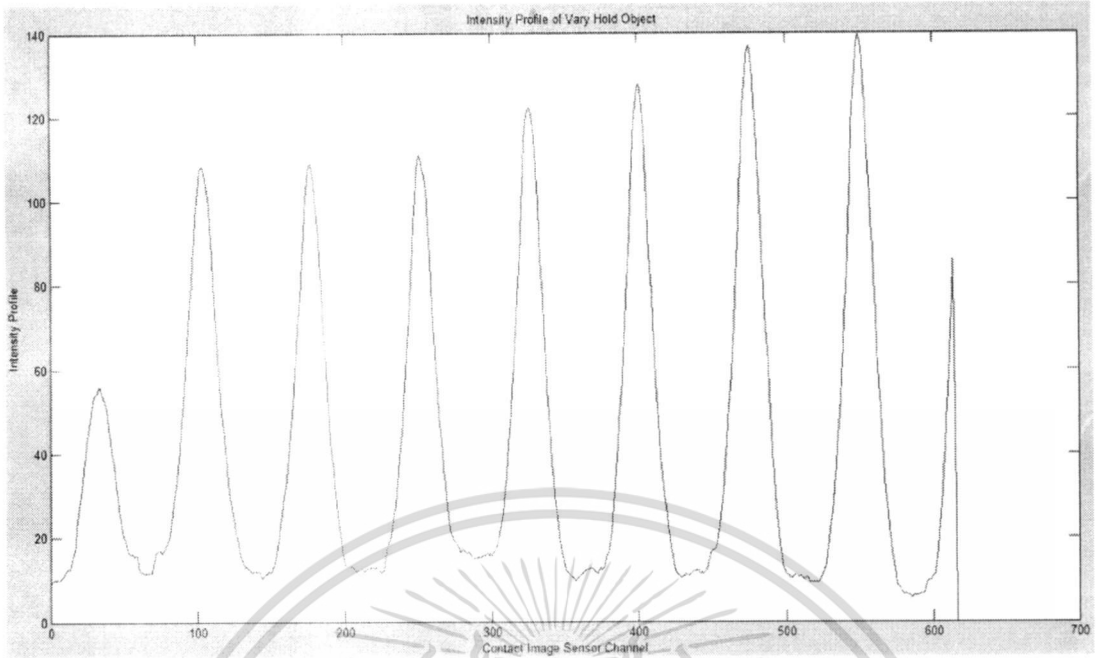
#### 5.2.4.3 วัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน

ผลการทดลองของวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากันนั้น หลังจากการผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer จะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่งการทดลองนี้จะทำการทดสอบเพื่อทำการสร้างภาพสองมิติ และเพื่อทำการตรวจสอบการแยกรายละเอียดของวัตถุ ซึ่งในการทดลองได้ทำการตรวจวัด Intensity Profile ทำให้ได้ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้ได้ข้อสรุปว่าสามารถแยกระยะของช่วงช่องว่างได้ ดังนั้นตัวตรวจจปรังสีเอกซ์สามารถบันทึกภาพวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากันได้ อีกทั้งยังสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุได้ดี



รูปที่ 5.21 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน

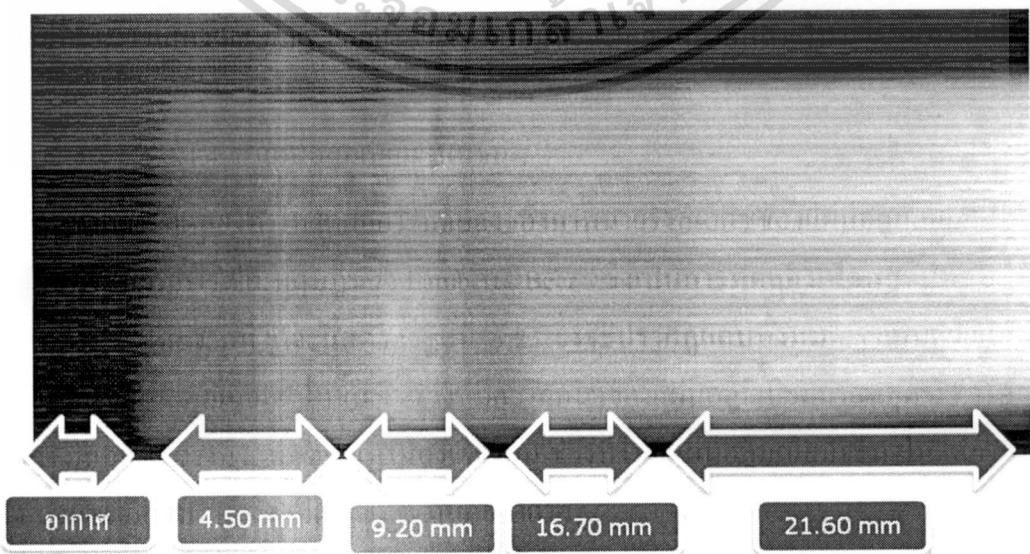
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 แสดง Intensity Profile ของวัตถุที่มีรายละเอียดหลากหลายในระยะที่เท่ากัน

5.2.4.4 แผ่นอลูมิเนียมแบบขุ่น

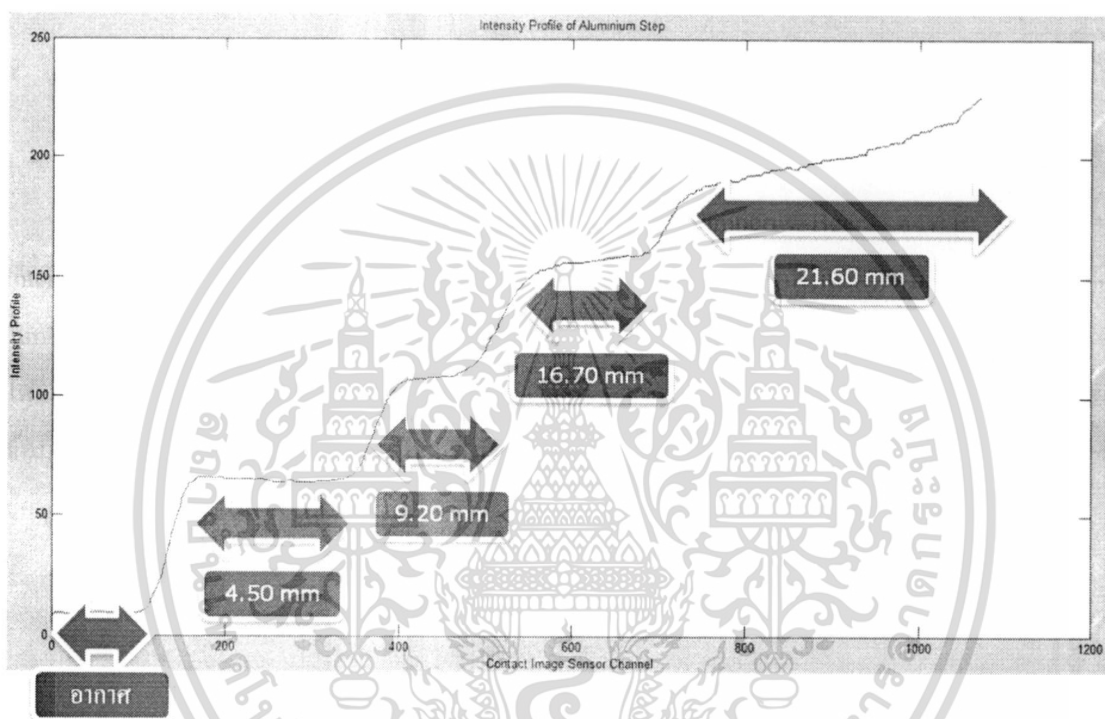
จากการทดลองทำให้ได้ผลการทดลองของภาพฉายรังสีเอกซ์ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขุ่น ซึ่งได้ผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีของ Lambert Beer โดยจากที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 5.23 ซึ่งจะปรากฏแถบทั้งหมด 5 แถบด้วยกันตามความหนาของแผ่นอลูมิเนียมแบบขุ่น ซึ่งช่วงที่มีความหนาของแผ่นอลูมิเนียมมากที่สุดจะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์สว่างมากที่สุด ในทำนองเดียวกัน ช่วงที่ไม่มีแผ่นอลูมิเนียมจะทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างค่าที่สุด ซึ่ง ณ ที่นี้คืออากาศ



รูปที่ 5.23 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเพื่อการวิเคราะห์และพิสูจน์ทฤษฎีของ Lambert Beer จึงทำการวิเคราะห์ Intensity Profile ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขั้นดังรูปที่ 5.24 ซึ่งพบว่าอลูมิเนียมที่มีความหนา 21.60 mm จะมี Intensity Profile สูงที่สุด และช่วงที่ไม่มีอลูมิเนียมจะทำให้ได้ Intensity Profile ต่ำที่สุด โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังตารางที่ 5.3 และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลในตารางดังกล่าวจะทำให้ได้กราฟดังรูปที่ 5.25 ซึ่งตรงตามทฤษฎีของ Lambert Beer ที่ได้ ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นเอ็กโปเนนเชียล

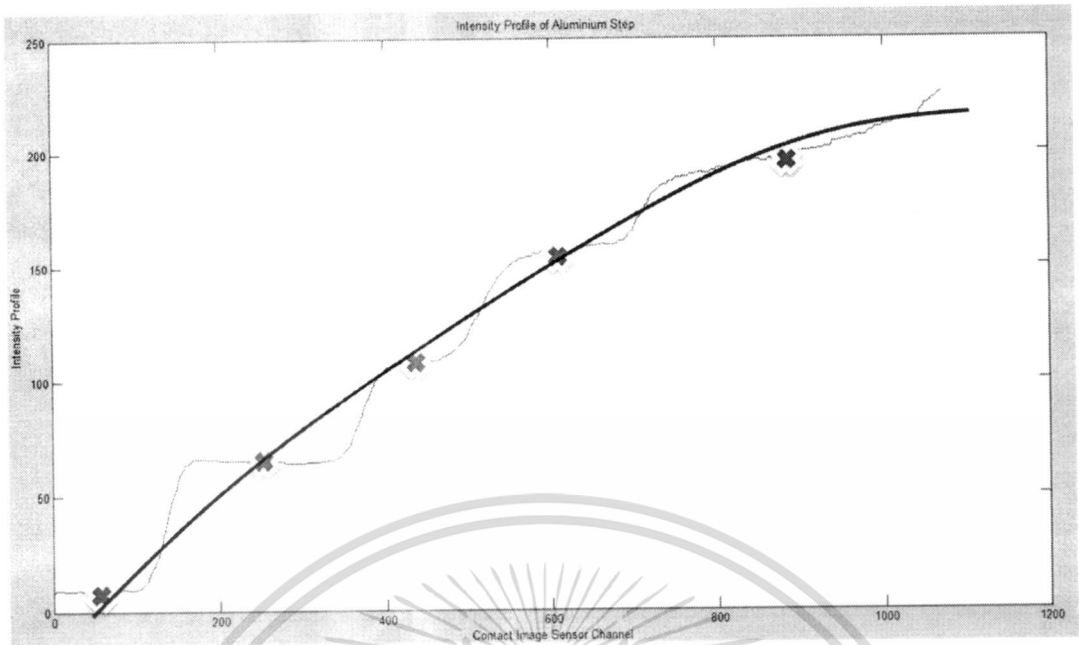


รูปที่ 5.24 แสดง Intensity Profile ของแผ่นอลูมิเนียมแบบขั้น

|                           | ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม |         |         |          |          |
|---------------------------|--------------------------|---------|---------|----------|----------|
|                           | อากาศ                    | 4.50 mm | 9.20 mm | 16.70 mm | 21.60 mm |
| $\mu$ (Intensity Profile) | 9                        | 65      | 108     | 158      | 200      |

ตารางที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของ Intensity Profile กับความหนาของอลูมิเนียม

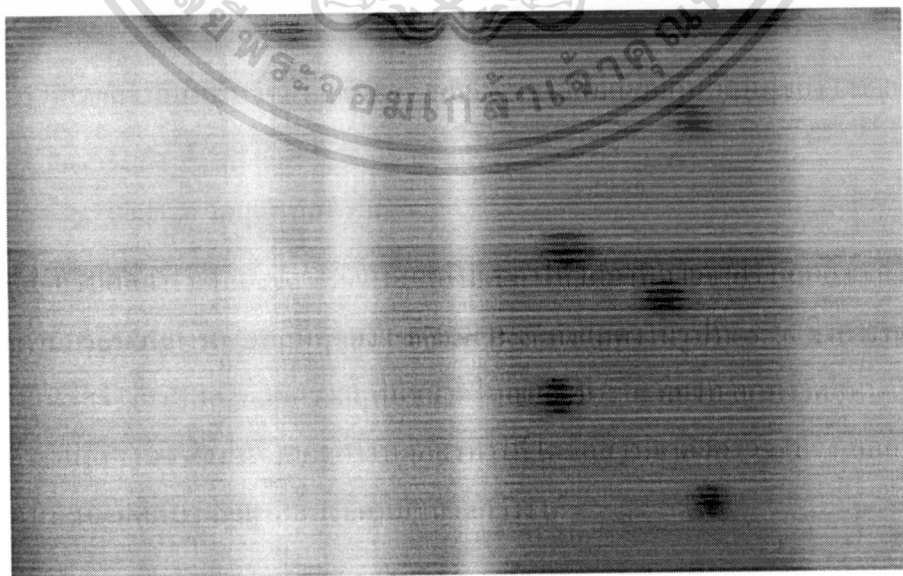
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ของ Intensity Profile ของอลูมิเนียมกับทฤษฎีของ Lambert Beer

#### 5.2.4.5 วัตถุแบบสองมิติ

สำหรับผลการทดลองของวัตถุแบบสองมิติ ทำให้ได้ภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุแบบสองมิติซึ่งผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer ดังแสดงในรูปที่ 5.26 ซึ่งการทดลองเป็นการทดสอบการสร้างภาพสองมิติของวัตถุที่มีขนาดใหญ่และมีระยะที่คงที่ อีกทั้งวัตถุที่นำมาทดลองยังเป็นวัตถุที่เป็นสองมิติ ดังนั้นจากผลการทดลองทำให้ได้ข้อสรุปว่าตัวตรวจจับรังสีเอกซ์สามารถสร้างภาพแบบสองมิติกับวัตถุแบบสองมิติที่มีขนาดกว้างได้

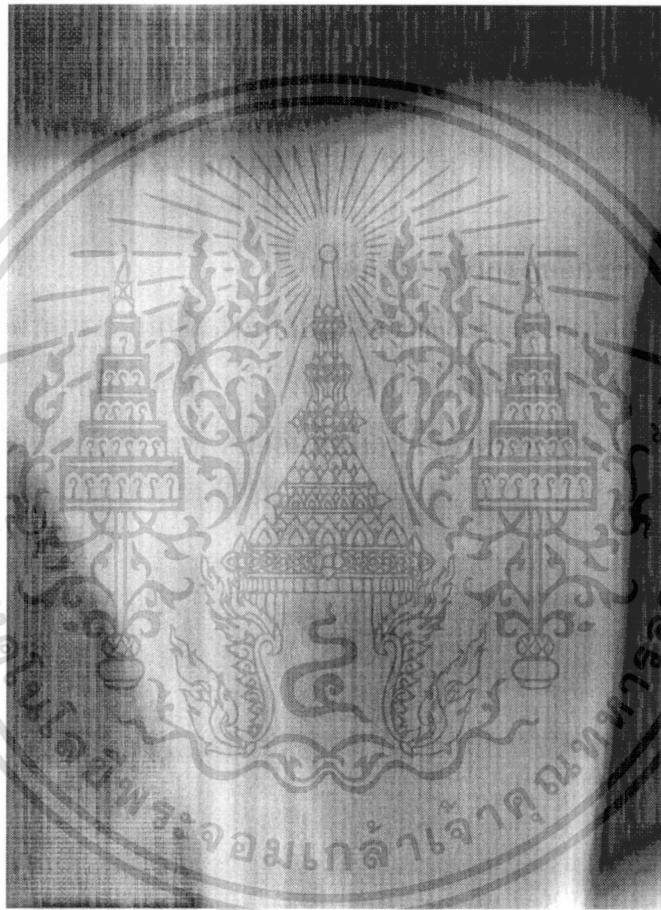


รูปที่ 5.26 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.4.6 กระจกสัตว์สัตว์

ผลการทดลองกับกระจกสัตว์จะทำให้ได้ภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของกระจกสัตว์ดังแสดงในรูปที่ 5.27 ซึ่งได้ผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer โดยการทดลองจะเป็นการทดลองเพื่อทดสอบกับวัตถุที่มีลักษณะ โครงสร้างคล้าย โครงสร้างกระจกของมนุษย์เพื่อทำการทดลองสร้างภาพสองมิติแล้วแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งตัวตรวจจ็ับรังสีเอกซ์สามารถสร้างภาพแบบสองมิติของกระจกสัตว์ได้

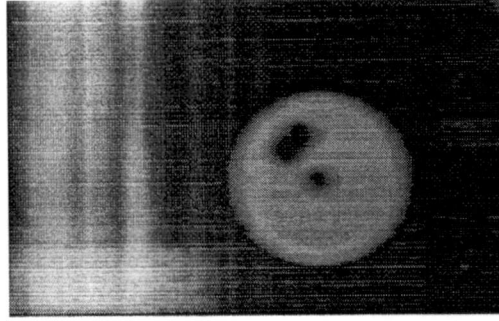


รูปที่ 5.27 แสดงภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ของกระจกสัตว์

#### 5.2.4.7 วัตถุภายในแผ่นดิสเก็ต

การทดลองเพื่อค้นหาวัดภายในแผ่นดิสเก็ตทำให้ได้ภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ซึ่งผ่านกระบวนการตามทฤษฎีของ Lambert Beer ทำให้ได้ภาพถ่ายภายในของแผ่นดิสเก็ต ซึ่งการทดลองเป็นการทดสอบการค้นหาวัดที่อยู่ในวัตถุอีกชนิดหนึ่ง และทำการสร้างภาพสองมิติของวัตถุชนิดนั้น ซึ่งตัวตรวจจ็ับรังสีเอกซ์สามารถทำการสร้างภาพแบบสองมิติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 แสดงภาพฉายจากรังสีเอกซ์ของวัตถุภายในแผ่นคิสเก็ต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถวิเคราะห์ความละเอียดของซีไอเอสได้ ซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปว่าความละเอียดของซีไอเอสคือ 5 line pair per inch ซึ่งเหมาะกับการทดลองในช่วงแรงดัน 80 ถึง 97 กิโลโวลต์ ช่วงกระแสที่ 8 ถึง 10 มิลลิแอมป์ และช่วงระยะเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ที่ 2 ถึง 5 วินาที ซึ่งทั้งนี้ ระยะเวลาในการฉายรังสีเอกซ์นั้นเป็นปัจจัยหลักของการทดลองครั้งนี้ด้วย เพราะการฉายรังสีเอกซ์เป็นระยะเวลานาน จะเป็นปัจจัยเสี่ยงทำให้หลอดรังสีเอกซ์เกิดความเสียหายได้ จึงจะต้องจำกัดระยะเวลาในการฉายรังสีเอกซ์อยู่ที่ช่วง 0.5 ถึง 5 วินาทีต่อการฉายรังสีแต่ละครั้ง ประกอบการต้องทิ้งช่วงระยะเวลาในการฉาย เพื่อเป็นการระบายความร้อนให้กับหลอดฉายรังสีเอกซ์ด้วย และสำหรับการทดลองนั้นจำเป็นต้องทำการทดลองในห้องที่มีดื่บ เพราะแสงสว่างจะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งจะทำให้ภาพจากรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นความไม่ชัดเจน ซึ่งจากการทดลองที่แรงดันในช่วง 80 ถึง 97 กิโลโวลต์ กับช่วงกระแสที่ 8 ถึง 10 มิลลิแอมป์ จะทำให้ได้ภาพที่มีความชัดเจน และสามารถระบุลักษณะของวัตถุที่มีขนาดเล็ก และขนาดกลางได้ และได้ค่าความละเอียดสูงถึง 5 line pair per inch อีกด้วย ซึ่งมีความละเอียดเทียบเท่ากับของซีซีดี[2] แต่ทั้งนี้แม้ว่าความละเอียดที่ได้จะมีค่าที่เท่ากัน แต่ซีไอเอสก็ยังสามารถบันทึกภาพจากวัตถุได้ใหญ่กว่าแบบซีซีดี ทำให้สามารถระบุเอกลักษณ์ของวัตถุได้

จากการทดลองทำให้ได้ข้อสรุปอีกประการหนึ่ง นั่นคือ ระบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมนี้สามารถทำการแปลงรังสีเอกซ์ที่เปล่งแสงจากแผ่นเรืองแสงเพื่อแปลงข้อมูลจากอนุภาคเป็นข้อมูลทางดิจิทัลได้ และอีกทั้งยังสามารถแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ยังเกิดข้อบกพร่องบางประการในเรื่องของสัญญาณรบกวนภาพที่เกิดจากการที่รังสีเอกซ์มากระทบกับระบบทั้งหมด เพราะรังสีเอกซ์นั้นมีอำนาจทะลุทะลวงที่สูงมาก ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหานี้ในเบื้องต้นนั้น ผู้วิจัยได้ทำการป้องกันรังสีเอกซ์ด้วยการกั้นขอบเขตของระบบทั้งหมดโดยใช้กระดาษตะกั่ว ซึ่งก็ป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่ง แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่สามารถป้องกันได้ทั้งหมด และสัญญาณรบกวนอันจะเกิดจากภาคส่งสัญญาณควบคุมซีไอเอสกับสัญญาณควบคุม AD9814 ซึ่งสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จะเกิดจากภาคจ่ายไฟ

ซึ่งในงานวิจัยนี้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทางด้านอุตสาหกรรมและงานทางด้านการรักษาความปลอดภัยซึ่งใช้ความละเอียดที่ไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อม โดยการใช้เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพหรือซีไอเอสนี้ ถ้าหากปรับปรุงในเรื่องของสัญญาณรบกวน และความละเอียดอีก ก็จะสามารนำมาประยุกต์และพัฒนาเพื่อใช้ในการแพทย์ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. ธเนศ อังศ์วัฒนากุล, "ระบบรับภาพเอ็กซ์เรย์จากโฟโตทราานซิสเตอร์". 2550, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
2. ชูศักดิ์ จันทโค, "ตัวตรวจจับเอกซเรย์แบบทางอ้อมโดยใช้ตัวตรวจจับภาพแบบซีซีดี". 2552, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
3. Xilinx Inc., "*Spartan-3E FPGA Family: Data Sheet*". 2009.
4. Erik Barnes, "*Integrated Solutions for CCD Signal Processing*". Analog Dialogue, 1998. 32(1).
5. Analog Devices, "*AD9814 Complete 14-Bit CCD/CIS Signal Processor*". 1999: p. 1 - 15.
6. Analog Devices, "*AD9826 Complete 16-Bit Imaging Signal Processor*". 2001: p. 1-20.
7. เอกภพ งามละเมียด, "เทคนิคการสร้างหน่วยตรวจจับเอ็กซ์เรย์ชนิดแถวยาวโดยใช้สารเรืองแสงเคลือบบนโฟโตทราานซิสเตอร์". 2548, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
8. Canon Components Inc., "*Contact Image Sensor (FS48D-K02)*". 2008: p. 1 - 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ดัชนี

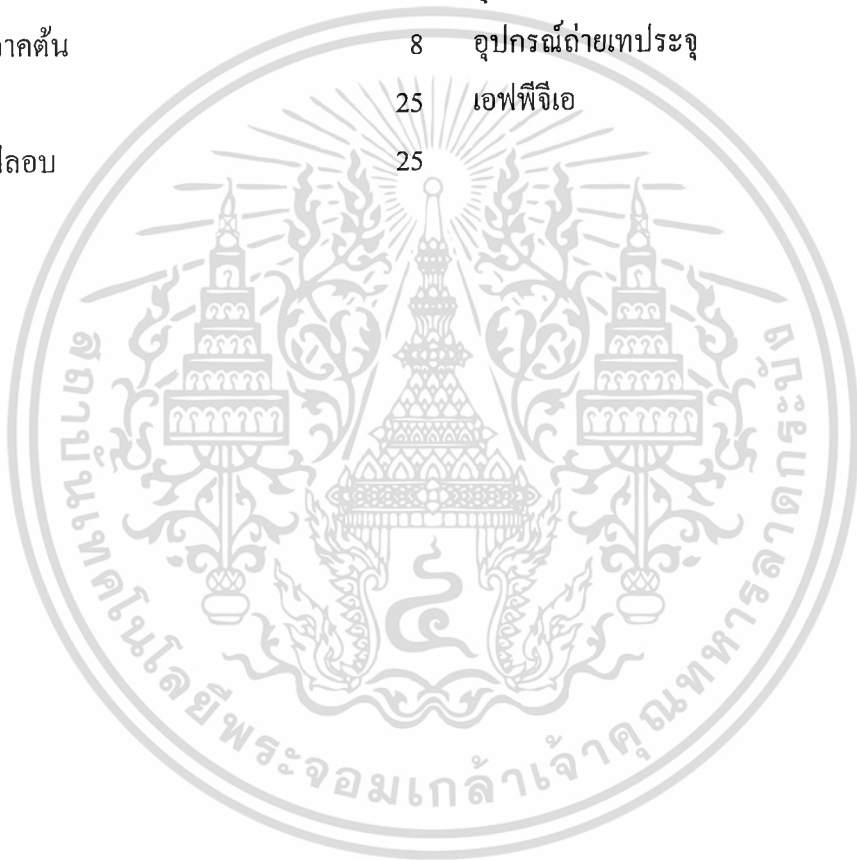
|  |                    |                             |        |
|--|--------------------|-----------------------------|--------|
| <b>A</b>                               |                    | Electron-ion pair           | 6      |
|  |                    | Energy Resolution           | 3, 9   |
| Absorption Efficiency                  | 12                 |                             |        |
| AD9814                                 | 26, 28, 35, 36, 63 | <b>F</b>                    |        |
| ADCCLK                                 | 56                 | Fan Beam                    | 20     |
| Address                                | 39                 | FIFO                        | 29, 37 |
| Analog information                     | 23                 | First In First Out Memory   | 36     |
| <b>B</b>                               |                    | Fork                        | 48     |
|  |                    | FPGA                        | 20     |
| Baud Rate                              | 40                 | FS48D-K02                   | 26, 28 |
| <b>C</b>                               |                    | <b>G</b>                    |        |
| Calcium Tungstate                      | 14                 | Green Film                  | 12, 14 |
| Calcium Tungstate (CaWO <sub>4</sub> ) | 12                 | <b>I</b>                    |        |
| Campbelling Mode                       | 5, 8               | Image Sensor                | 20     |
| CDSCLK1                                | 26                 | Integrated Circuit          | 48, 49 |
| CDSCLK2                                | 26                 | Intensifier screen          | 23     |
| Charge Coupled Device                  | 21                 | Intensifying Screen         | 14     |
| Contact Image Sensor                   | 22                 | Intensity Profile           | 49, 58 |
| Correlated Double Sampling             | 16                 | <b>L</b>                    |        |
| Current Mode                           | 5, 7               | Lambert Beer                | 11, 42 |
| <b>D</b>                               |                    | Light Conversion Efficiency | 12     |
| Data Level                             | 16, 28, 57         | line pair per inch          | 59, 63 |
| Digital Clock Management               | 25, 26, 27         | Logic analyzer              | 56     |
| Digital information                    | 23                 | <b>M</b>                    |        |
| Dot per Inch                           | 22                 | Master Clock                | 29     |
| Dot Per Inch                           | 29                 | MCLK                        | 29     |
| <b>E</b>                               |                    |                             |        |
| Efficiency                             | 3                  |                             |        |

เอกสาร Electrodes สารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                          |                |                              |            |
|--------------------------|----------------|------------------------------|------------|
| <b>N</b>                 |                | <b>ก</b>                     |            |
| ns per cycle             | 27             | การแผ่รังสี                  | 4          |
| <b>O</b>                 |                | <b>ค</b>                     |            |
| oscilloscope             | 55             | ควอนตัม                      | 3          |
| <b>P</b>                 |                | คู่ประจุ                     | 6          |
| Phosphor                 | 11, 14         | เครื่องให้กำเนิดรังสีเอกซ์   | 23         |
| Photo-detector           | 14             | แคมเบลล์โหมด                 | 5          |
| Phototransister          | 20             | <b>ช</b>                     |            |
| Pixel                    | 26             | ชั้นฐาน                      | 15         |
| Poisson Statistics       | 7              | ชั้นป้องกัน                  | 14         |
| Preamplifier             | 8              | ชั้นยึดติด                   | 15         |
| Protective Coating       | 14             | <b>ซ</b>                     |            |
| Pulse Mode               | 5, 8           | ซีซีดี                       | 22         |
| <b>R</b>                 |                | ซีไอเอส                      | 22, 48     |
| Rare Earth               | 12, 14         | เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพ         | 1, 22      |
| Reference Level          | 16, 26, 28, 57 | ไซเคิล                       | 27         |
| Reflective Layer         | 15             | <b>ป</b>                     |            |
| Reset Feedthrough Glitch | 16             | ประสิทธิภาพการดูดกลืน        | 12         |
| Resolution               | 20             | ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นแสง | 12         |
| Response Function        | 9              | <b>ผ</b>                     |            |
| <b>S</b>                 |                | แผ่นเรืองแสง                 | 20, 22, 23 |
| Serial                   | 35, 40         | <b>พ</b>                     |            |
| Single Port Block Memory | 29, 36, 39     | ฟังก์ชันการตอบสนอง           | 9          |
| Spectral Sensitivity     | 21             | โฟโตทรานซิสเตอร์             | 20, 22     |
| Standard phantom         | 48, 58         |                              |            |
| <b>X</b>                 |                | <b>ภ</b>                     |            |
| X-Ray Detector           | 3              | ภาพตัดขวางแบบลำแสงพัลส์      | 20         |
| X-ray generator          | 23             |                              |            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ม                       |    | ส                  |            |
|-------------------------|----|--------------------|------------|
| โมดูลควบคุมการทำงานหลัก | 36 | สารเรืองแสง        | 11, 20     |
| โมดูลพักข้อมูล          | 36 | ห                  |            |
| ไมโครคอนโทรลเลอร์       | 23 | โหมคกระแสด         | 5          |
| ด                       |    | โหมคพัลส์          | 5, 8       |
| เลนส์                   | 22 | อ                  |            |
| ว                       |    | อุปกรณ์ตรวจจับแสง  | 14         |
| วงจรขยายภาคต้น          | 8  | อุปกรณ์ถ่ายเทประจุ | 21         |
| วงจรนับ                 | 25 | เอฟพีจีเอ          | 23, 24, 40 |
| วงจรฟลิปฟลอป            | 25 |                    |            |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| ชื่อ นามสกุล                      | นาย กิตตินันท์ น้อยมณี  |
| วัน เดือน ปีเกิด                  | 11 มิถุนายน พ.ศ. 2529   |
| สถานที่เกิด                       | อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่   |
| ที่อยู่                           | บ้านเลขที่ 3/1 ถนนนันทาราม ซอย 5 ตำบลหายยา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ รหัสไปรษณีย์ 50200 โทร 081-7846230 อีเมลล์ all_of_none@hotmail.com   |
| วุฒิการศึกษา                      | 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  |
| ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับ | <ul style="list-style-type: none"><li>● 2010 Attend the 3<sup>rd</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON 2010) in titled “Design of Signal Control by using FPGA for Indirect X-Ray Detector couple with Contact Image Sensor”, at Kyoto, Japan.</li><li>● 2010 Attend The International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT 2010) in titled “Indirect X-Ray Detector of Embedded System using Linear CCD with FPGA”, at Chiang Mai, Thailand.</li><li>● 2010 Attend the 2<sup>nd</sup> Symposium on Thai Biomedical Engineering (ThaiBME2010) in titled “A FPGA Design and Implementation of DMX Controller via Multi-core Approach”, at Bangkok, Thailand.</li><li>● 2010 Attend Joint International Conference on Information &amp; Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE 2010) in titled “Application of Indirect X-Ray Detector by using Contact Image Sensor couple with Field Programmable Gate Array and Mini-CT”, at Luang Prabang, Lao PDR.</li><li>● 2009 Attend the 2<sup>nd</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON 2009) in titled “Development of X-Ray Image using Phosphorescent coupled with Microcontroller”, at Phuket, Thailand.</li></ul> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมโดยใช้  
เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้  
เอฟพีจีเอ

นักศึกษา

นาย กิตตินันท์ น้อยมณี

รหัสประจำตัว

52611702

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมชีวการแพทย์

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบเพื่อสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อมโดยใช้เซนเซอร์แบบสัมผัสภาพ ซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้เอฟพีจีเอ โดยในวิทยานิพนธ์จะเน้นการสร้างสัญญาณควบคุมและการควบคุมการทำงานทั้งหมดผ่านเอฟพีจีเอ อันประกอบไปด้วยโมดูลควบคุมการทำงานของเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพ โมดูลควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนุภาคเป็นสัญญาณดิจิทัล โมดูลจัดการกับสัญญาณนาฬิกา โมดูลหน่วยความจำแบบเอฟไอเอฟโอ โมดูลหน่วยความจำแบบซิลิกิลพอร์ทบล็อก และโมดูลควบคุมการทำงานทั้งระบบ โดยสัญญาณทุกอย่างจะต้องสอดคล้องกันเพื่อส่งข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์และสร้างภาพสองมิติ โดยเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงจะทำการตรวจจับแสงที่เปล่งออกมาจากแผ่นเรืองแสงที่แปลงรังสีเอกซ์ให้อยู่ในรูปของพลังงานแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยการทดลองจะทำการทดลองการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์กับวัตถุชนิดต่าง ๆ เพื่อทดสอบความละเอียดของเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพและเพื่อการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมและทางการแพทย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Thesis</b>            | A Design of Indirect X-Ray Detector using Contact Image Sensor controlled by FPGA |
| <b>Student</b>           | Mr. Kittinan Noimanee   |
| <b>Student ID.</b>       | 52611702  |
| <b>Degree</b>            | Master of Engineering   |
| <b>Program</b>           | Biomedical Engineering  |
| <b>Year</b>              | 2010  |
| <b>Thesis Advisor</b>    | Assoc. Prof. Dr. Manas Sangworasil  |
| <b>Thesis Co-advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Chuchat Pintavirooj  |

### Abstract

This thesis presents the design of indirect x-ray detector using contact image sensor that is controlled by FPGA, which focus all module consist of control signal of contact image sensor module, control signal of analog to digital converter module, digital clock management module, first in first out memory module, single port block memory module, and main control signal module. All control signals must be synchronized for transmit data to computer and construct x-ray image, by contact image sensor, which detect visible light from intensifying screen (transform x-ray to visible light). In addition, this thesis has an experimentation to test contact image sensor's resolution and receive data from many objects for implementation in the future.