สำนักหอสมุดกลาง_พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตรวจข้อสอบด้วยแสงอินฟราเรดแบบทะลุผ่าน

ANSWER SHEET CHECKER USING TRANSMITTED INFRARED

T033361

พรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์

PORNCHAIYOT SRIPUNYAPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2542

ISBN 974-622-456-5

เลขหมู่.................................
เลขทะเบียน 33361
วัน, เดือน, ปี - 2 ส.ค. 2542

เอกสาร...ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่...แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSWER SHEET CHECKER USING TRANSMITTED INFRARED

PORNCHAIYOT SRIPUNYAPONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGMUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-456-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องตรวจข้อสอบด้วยแสงอินฟราเรดแบบทะลุผ่าน
นักศึกษา	นายพรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์
รหัสประจำตัว	35620041
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สุเธียร เกียรติสุนทร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

บทคัดย่อ

จากคุณสมบัติของแสงอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีความร้อนที่สามารถทะลุผ่านวัสดุบางได้เช่นกระดาษเป็นต้น และแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนด้วยถ่านคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบของไส้ดินสอได้ อีกทั้งปริมาณความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ผ่านกระดาษที่มีการฝนดินสอจะแปรผกผันกับความเข้มของการฝนดินสอ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำแสงอินฟราเรดใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งและความเข้มของการฝนดินสอได้ นอกจากนี้แสงอินฟราเรดบางส่วนจะถูกดูดกลืนไปกับเนื้อกระดาษคำตอบ ดังนั้นความหนาของกระดาษคำตอบจะมีผลต่อความเข้มของแสงอินฟราเรด ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวรับแสงอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ จึงต้องนำผลของความหนากระดาษในรูปของแรงดันไฟฟ้ามาใช้กำหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของหัวอ่านเพื่อขยายช่วงการเปลี่ยนแปลงให้เต็มค่าสูงสุดที่อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลทำงานได้และด้วยหลักการให้แสงอินฟราเรดทะลุผ่านกระดาษทำให้หัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบที่สร้างขึ้นสามารถอ่านกระดาษคำตอบทั้งสองหน้าโดยใช้หัวอ่านเพียงชุดเดียว โดยแบบกระดาษคำตอบที่ตรวจได้จะมีตำแหน่งของคำตอบในสองหน้ากระดาษไม่ตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Answer Sheet Checker Using Transmitted Infrared
Student	Mr. Pornchaiyot Sripunyapong
Student ID.	35620041
Degree	Master of Engineering
Year	1999
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Suthian Kiatsunthorn
Thesis Co-adviser	Assoc. Prof. Dr. Yothin Prampraneerach

ABSTRACT

By the characteristic of infrared, it can pass through the thin material such as paper and is absorbed by carbon. So we can used this characteristic for detecting the position of carbon from the pencil which apply on the paper for selecting the answer. Therefore, the carbon's mark by measuring the density of infrared can be carried out the paper thickness to compensate for the data from the detectors. By use the thickness of the paper to generate reference voltage for A/D converter device in the purpose to expand to change small signal in full scale of converter. In this case we can implement only one infrared detector for reading the answer paper on the both side of its. This master thesis presents the detecting method, which uses only one infrared detector for reading the both side of the answer paper. And used the thickness of the answer paper to generate the reference voltage for the A/D converter device of infrared detector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเครื่องตรวจข้อสอบจาก รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ และ รศ.สุเธียร เกียรติสุนทร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์เป็นอย่างมาก และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณ ท่านคุณพ่อ คุณแม่ที่คอยให้กำลังใจอยู่เสมอ และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องห้องทำวิจัยและเครื่องมือทำงานวิจัยนี้ เพราะฉะนั้นคุณค่าและคุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงขอมอบให้แด่ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 2

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของตัวกำเนิดแสงและตัวตรวจจับแสง 3

2.1 ปริมาณการแผ่รังสี 4

2.2 ตัวตรวจจับแสง 5

2.2.1 Photoconductor-Photoresistors 6

2.2.2 Photovoltaic 7

2.2.3 Photodiode 9

2.2.4 Phototransistors 11

2.3 ตัวกำเนิดแสง 12

2.3.1 Gallium Arsenide 13

2.3.2 Gallium Phosphide 13

2.3.3 Gallium Arsenide Phosphide ..... 14.

บทที่ 3 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องตรวจข้อสอบ 15

3.1 พื้นฐานของการแปลงสัญญาณ 15

3.1.1 อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก 16

3.1.1.1 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Binary Weight Ladder 17

3.1.1.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ R-2R Ladder 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Inverted R-2R Ladder...21

3.1.1.4 ค่าผิดพลาดของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก..........................23

3.1.2 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 25

3.1.2.1 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Counter type 27

3.1.2.2 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Successive Approximation 28

3.2 อุปกรณ์ภายนอก 29

3.2.1 อุปกรณ์เคลื่อนที่เป็นสเตปหรือสเตปปิ้งมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ 29

3.2.1.1 วงจรขับแบบขั้วเดียว 31

3.2.1.2 วงจรขับแบบสองขั้ว 33

3.2.2 การกระตุ้นขดลวดให้โรเตอร์เคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ 33

3.2.2.1 การกระตุ้นให้ขดลวดทำงานสเตปละหนึ่งเฟส 33

3.2.2.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติกระตุ้นแบบสองเฟส 33

3.2.2.3 ลำดับการทำงานในโหมดการเคลื่อนที่ครึ่งสเตป 35

3.2.3 มอเตอร์กระแสตรง 35

3.2.3.1 การขับมอเตอร์กระแสตรง 36

บทที่ 4 การออกแบบเครื่องตรวจข้อสอบ 38

4.1 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ 38

4.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Z84C11) 40

4.1.2 วงจรตัวตรวจจับตำแหน่งของกระดาษคำตอบและตรวจจับตำแหน่งแถบอ้างอิง 42

4.1.3 วงจรหัวอ่านและวงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษคำตอบ 44

4.1.4 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงสำหรับดึงกระดาษผ่านหัวอ่าน 48

4.1.5 วงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์สำหรับป้อนกระดาษเข้าครั้งละ 1 แผ่น 49

4.2 โปรแกรมควบคุมเครื่องตรวจข้อสอบ 50

4.3 การออกแบบเชิงกลของเครื่องตรวจข้อสอบ 58

บทที่ 5 ผลการทดสอบเครื่องตรวจข้อสอบ 59

5.1 ผลการทดสอบการทำงานของหัวอ่าน..59

5.2 ผลการทดสอบโปรแกรมควบคุม 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อ 71
6.1 สรุปผลการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ 71
6.2 แนวทางการพัฒนาต่อ 71

บรรณานุกรม 73
ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชิ้นงานวิจัย 74
ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ 78
ภาคผนวก ค. บทความวิจัยในวิศวกรรมสารลาดกระบัง 95
ภาคผนวก ง. วงจรใช้งานจริง 102
ประวัติผู้เขียน 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การแบ่งความยาวคลื่นของแสง 3
2.2 ช่วงความยาวคลื่นการตอบสนองของ Photoresistors ที่สร้างจากสารชนิดต่างๆ 7
2.3 ตัวอย่าง Photodiode ที่มีจำหน่าย 10
2.4 การเลือกใช้ตัวจับแสงชนิดต่างๆ 12
2.5 สารกึ่งตัวนำสำหรับสร้าง LED ในย่านความยาวคลื่นต่างๆ 12
3.1 ค่าความละเอียดของ DAC 23
3.2 แสดงลำดับการขับแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส 33
3.3 แสดงลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส 33
3.4 แสดงลำดับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป 34
5.1 ผลของการอ่านข้อมูลจากหัวอ่านทั้งหมดที่ระดับเกรย์ต่างๆ 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด 4

2.2 แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อ P-N 5

2.3 ช่วงการตอบสนองของ Photoresistors ชนิด Cadmium Sulphide 6

2.4 แบบจำลองรอย P-N

(ก) ขณะเกิดสมดุลย์....................8

(ข) เมื่อมีแสดงตกกระทบ 8

2.5 วงจรสมมูลของ Phototvoltaic ที่มีการตอบความต้านทานภายนอก 8

2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ Photovoltaic 9

2.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ Photo Diode 10

2.8 วงจรสมมูลของ Phototransistors 11

2.9 ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_{CE} กับ I_C ของทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิคอนที่ความเข้มต่างๆ 11

2.10 การตอบสนองต่อแสงสีต่างๆของตามนุษย์ 13

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสงที่ได้กับอัตราส่วนของการผสม 14

3.1 ระบบของการแปลงสัญญาณ

(ก) ระบบการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล 15

(ข) ระบบการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก 15

3.2 การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกขนาด 3 บิต 16

3.3 ผังการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก 17

3.4 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Binary weight ladder 18

3.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ R-2R Ladder 20

3.6 เมื่อ D_n มีค่าเป็น “1” เท่านั้น 20

3.7 (ก) วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Inverted R-2R Ladder 22

(ข) วงจรเสมือน 22

3.8 พื้นฐานการแปลงสัญญาณ

(ก) หลักการพื้นฐานอย่างง่าย 26

(ข) ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของวงจรเปรียบเทียบ 26

3.9 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

(ก) โครงสร้างพื้นฐานของการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 26

(ข) การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 3 บิตในทางอุดมคติ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.10 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Counter type
(ก) ผังการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 27
(ข) ลำดับการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 27
3.11 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล แบบ Successive Approximation
(ก) ผังการทำงาน 28
(ข) Timing ของวิธีการแบบ Successive Approximation 28
3.12 แสดงโครงสร้างของไฮบริดจ์สเต็ปปิ้งมอเตอร์ 30
3.13 วงจรแม่เหล็กของสเตปปิ้งมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ 31
3.14 วงจรขับแบบขั้วเดียว 32
3.15 วงจรขับสำหรับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบฟิลล่าร์และใช้การขับแบบโมโนโพลาร์ 32
3.16 วงจรขับแบบสองขั้ว 33
3.17 วงจรขับแบบเชิงเส้นอย่างง่าย 37
3.18 วงจรขับพัลส์วิดท์มอดอย่างง่าย 37
4.1 กระดาษคำตอบที่ใช้กับเครื่องตรวจข้อสอบ....................38
4.2 ผังของวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ 39
4.3 โครงสร้างของพอร์ตภายใน Z84C11 41
4.4 โครงสร้างภายในของ CTC ใน Z84C11 42
4.5 วงจรตรวจจับตำแหน่งของกระดาษคำตอบ 43
4.6 วงจรตรวจจับแถบอ้างอิงของกระดาษคำตอบ 43
4.7 วงจรตรวจจับความหนาของกระดาษคำตอบ 44
4.8 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกแบบ R-Ladder 45
4.9 วงจรส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดเป็นแรงดันไฟฟ้า 46
4.10 วงจรเลือกอ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 47
4.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 48
4.12 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงสำหรับขับกระดาษให้เคลื่อนที่ผ่านหัวอ่าน 49
4.13 วงจรขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์สำหรับดึงกระดาษให้ตรวจครั้งละ 1 แผ่น 49
4.14 การทำงานทั้งหมดของโปรแกรมควบคุม 51
4.15 การทำงานเมื่อมีการกดคีย์ SELECT 52
4.16 การทำงานของโปรแกรมเมื่อมีการกดคีย์ DONE 53
4.17 การทำงานของโปรแกรมอ่านกระดาษคำตอบเฉลย 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 การทำงานของโปรแกรมย่อยตอบรับการอินเตอร์รัพท์ 56
4.19 การทำงานของโปรแกรมตรวจข้อสอบ 57
5.1 ระดับเกรย์ที่ใช้ในการทดสอบหัวอ่าน 59
5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่กระดาษเปล่า 60
5.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 10% 60
5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 30% 61
5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 50% 62
5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 70% 62
5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับการใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 90% 63
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของระดับเกรย์กับข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยจากหัวอ่าน 1 จุด 63
5.9 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้เมื่อใช้กระดาษคำตอบเปล่า 64
5.10 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 10% 66
5.11 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 30% 66
5.12 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 50% 67
5.13 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 70% 67
5.14 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านในแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 90% 68
5.15 การแสดงผลของเมนูเลือกแบบกระดาษทำงาน 68
5.16 เมื่อเข้าสู่เมนูย่อยของการเลือกแบบกระดาษ 69
5.17 เมนูหลักของการอ่านกระดาษคำตอบเฉลย 69
5.18 การแสดงผลขณะอ่านคำตอบเฉลย 69
5.19 การแสดงผลของเมนูหลักการตรวจข้อสอบ 69
5.20 การแสดงผลขณะตรวจข้อสอบ 70
5.21 การแสดงผลของคะแนนที่ตรวจได้ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านเอกสารและการประมวลผล ในงานด้านการศึกษานั้นมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการเรียนการสอนและการประเมินผลการศึกษามากขึ้น โดยเฉพาะการประเมินผลการศึกษานั้นได้มีการนำเครื่องตรวจข้อสอบแบบอัตโนมัติที่ตรวจคำตอบในแบบกระดาษคำตอบชนิดเลือกคำตอบด้วยการฝนดินสอมาใช้งาน เครื่องตรวจข้อสอบดังกล่าวจะเป็นเครื่องตรวจข้อสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาแพง ทำให้มีใช้เฉพาะสถานศึกษาขนาดใหญ่เท่านั้น หากสามารถที่จะสร้างเครื่องตรวจข้อสอบนี้ขึ้นเองภายในประเทศได้จะทำให้ราคาของเครื่องตรวจข้อสอบถูกลงและทำให้สถานศึกษาขนาดเล็กสามารถมีเครื่องตรวจข้อสอบไว้ใช้งานได้ จากการศึกษาการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบที่มีจำหน่ายภายในประเทศสามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะขึ้นกับหลักการทำงานของหัวอ่านได้แก่หัวอ่านชนิดใช้หลักการสะท้อนของแสงอินฟราเรดและหัวอ่านชนิดทะลุผ่านของแสงอินฟราเรด โดยที่มีข้อแตกต่างกันตรงที่หัวอ่านชนิดใช้หลักการสะท้อนของแสงอินฟราเรดจะต้องมีหัวอ่านสองชุดในการอ่านกระดาษคำตอบทั้งสองหน้า ส่วนชนิดที่ใช้หลักการทะลุผ่านของแสงอินฟราเรดจะใช้หัวอ่านเพียงชุดเดียวในการอ่านกระดาษคำตอบทั้งสองหน้าแต่มีข้อจำกัดที่ตำแหน่งของข้อในกระดาษคำตอบทั้งสองหน้าจะต้องไม่ตรงกัน

1.1 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

จากการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าในการพัฒนาเครื่องตรวจข้อสอบขึ้นใช้เองนั้นจะต้องคำนึงถึงราคาของเครื่องตรวจข้อสอบที่จะพัฒนาขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบการทำงานของหัวอ่านทั้งสองแบบจะเห็นว่าในการสร้างหัวอ่านแบบสะท้อนของแสงอินฟราเรดนั้นจะต้องสร้างที่ยึดสำหรับตัวส่งและตัวรับแสงอินฟราเรดให้ทำมุมที่เหมาะสมซึ่งจะทำได้ยากกว่าการสร้างหัวอ่านแบบทะลุผ่านของแสงอินฟราเรด

การใช้หลักการแสงอินฟราเรดทะลุผ่านกระดาษคำตอบนั้นจะต้องวางตัวส่งและตัวรับแสงอินฟราเรดให้อยู่ในลักษณะตรงข้ามกันโดยที่กระดาษคำตอบจะเลื่อนผ่านระหว่างตัวส่งและตัวรับแสงอินฟราเรดนั้น แสงอินฟราเรดบางส่วนจะถูกดูดกลืนไปกับกระดาษคำตอบซึ่งจะทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ตัวรับแสงอินฟราเรดอยู่ในช่วงแคบๆ ดังนั้นความหนาของกระดาษคำตอบจะมีผลต่อการทำงานของหัวอ่านมาก จึงต้องนำค่าความหนากระดาษในรูปของแรงดันไฟฟ้าสำหรับกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้แก่อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อขยายช่วงของสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดให้เต็มตามความสามารถของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลเพราะขณะที่แสงอินฟราเรดผ่านกระดาษคำตอบเปล่านั้นตัวรับแสงอินฟราเรดจะให้สัญญาณที่มีขนาดสูงที่สุด หากกำหนดให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลเต็มสเกลตามสัญญาณดังกล่าวจะทำให้ค่าของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลที่อ่านได้สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มการฝนดินสอได้ง่ายขึ้น สำหรับเครื่องตรวจข้อสอบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นเครื่องตรวจข้อสอบด้วยแสงอินฟราเรดแบบทะลุผ่านโดยที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเครื่องตรวจข้อสอบเองไม่จำเป็นต้องต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์

สำหรับงานวิจัยเครื่องตรวจข้อสอบด้วยแสงอินฟราเรดแบบทะลุผ่านนั้น เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องตรวจข้อสอบที่ใช้สำหรับกระดาษคำตอบที่ฝนด้วยดินสอแบบที่มีตำแหน่งของข้อในสองหน้าของกระดาษคำตอบไม่ตรงกันเท่านั้น โดยจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเครื่องเองไม่จำเป็นต้องต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์ให้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องตรวจข้อสอบจากต่างประเทศ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถพัฒนาเครื่องตรวจข้อสอบขึ้นใช้เองภายในประเทศ
2. สามารถประยุกต์ใช้งานในลักษณะอื่นนอกเหนือจากการตรวจข้อสอบได้ เช่น การลงทะเบียน, การทำแบบสอบถาม เป็นต้น
3. ลดการนำเข้าเครื่องตรวจข้อสอบจากต่างประเทศได้ ลดการสูญเสียเงินตราไปต่างประเทศ
4. ทำให้สถาบันการศึกษาขนาดเล็ก สามารถซื้อเครื่องตรวจข้อสอบในราคาถูกเพื่อการศึกษาได้

สำหรับเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของตัวรับและตัวส่งแสงอินฟราเรด

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นส่วนอื่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบเครื่องตรวจข้อสอบ

บทที่ 5 ผลการทดสอบเครื่องตรวจข้อสอบ

บทที่ 6 สรุปและแนวทางการพัฒนาต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

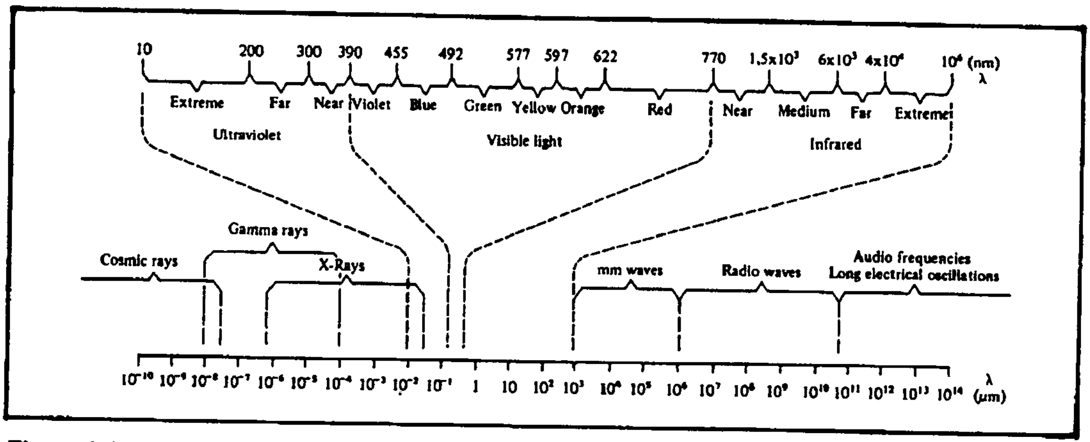
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานของตัวกำเนิดแสงและตัวตรวจจับแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 10 นาโนเมตรถึง 1 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด แสงสามารถย่านความยาวคลื่นได้ 3 ย่านได้แก่ ย่านอุลตร้าไวโอเลต, ย่านที่มองเห็นและย่านอินฟราเรด โดยที่ย่านอุลตร้าไวโอเลตจะเริ่มที่ความยาวคลื่น 100 นาโนเมตร ทั้งย่านอุลตร้าไวโอเลตและย่านอินฟราเรดจะแบ่งเป็นกลุ่มย่อยเป็น 3 กลุ่มได้แก่ A, B, และ C ตามลำดับ ส่วนแสงที่มองเห็นได้นั้นจะแบ่งเป็นสีตามความสามารถการมองเห็นของตามนุษย์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งย่านความยาวคลื่นของแสง

Wavelength range	Designation of Radiation
100 nm – 280 nm	UV – C
280 nm – 315 nm	UV – B
315 nm – 380 nm	UV – A
380 nm – 440 nm	Light – violet
440 nm – 495 nm	Light – blue
495 nm – 558 nm	Light – green
580 nm – 640 nm	Light – yellow
640 nm – 750 nm	Light – red
750 nm – 1 400 nm	IR – A
1·4 μm – 3 μm	IR – B
3 μm – 1 000 μm	IR – C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด

2.1 ปริมาณการแผ่รังสี (Quantum Nature of Radiation)

การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งแสงจะพิจารณาในลักษณะของคลื่นแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะการแผ่รังสีของแสงจะอยู่ในรูปของพลังงานแสงหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโฟตอน (Photon) ซึ่งจะมีพลังงานที่แน่นอนขึ้นกับความถี่ของแสงนั้น ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความถี่ของแสงสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$W_{Ph} = h.\nu \qquad (1)$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของแพลงค์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34} watt . sec^2

ν คือความถี่ของแสงมีหน่วยเป็น Hz.

และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของและความยาวคลื่นและความถี่มีดังนี้

$$C_o = \lambda.\nu \qquad (2)$$

เมื่อ C_o คือ ความเร็วของแสงในสูญญากาศมีค่าเท่ากับ 3.0×10^8 เมตร/วินาที

λ คือความยาวคลื่นของแสง

ν คือความถี่ของแสง

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1) ด้วยสมการที่ (2) จะได้ความยาวคลื่นของแสงในรูปของพลังงานของแสงได้ดังนี้

$$\lambda = C_o . h / W_{Ph} \qquad (3)$$

โดยปกติหน่วยพลังงานของแสงจะมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของพลังงานจลของอิเล็กตรอนที่ได้รับให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าขนาดหนึ่งโวลต์ได้และมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} Watt . Sec (W.s) ในหน่วย SI เมื่อแทนค่าคงที่ในสมการที่ (3) เพื่อให้ได้เป็นหน่วยของอิเล็กตรอนโวลต์จะได้ดังนี้

$$\lambda = (3.0 \times 10^8 \times 6.62 \times 10^{-34})/W_{Ph} \times 1.602 \times 10^{-19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้เป็น

$$\lambda = 1.24/W_{Ph} \quad (4)$$

เมื่อ λ มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร

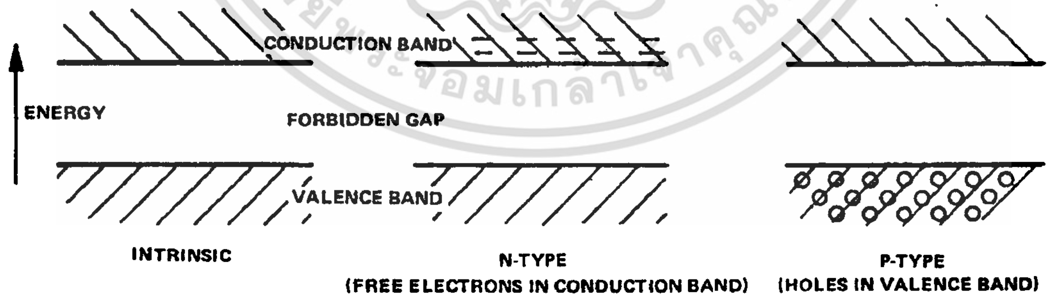
C_o มีหน่วยวัดเป็นเมตร/วินาที

W_{Ph} มีหน่วยวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์

จากสมการที่ (4)จะเห็นว่าพลังงานของแสงมากแสงนั้นจะมีความยาวคลื่นสั้นในทางตรงข้ามควายาวคลื่นของแสงยาวจะมีพลังงานต่ำ

2.2 ตัวตรวจจับแสง (Sensors)

หน้าที่ของตัวตรวจจับแสงจะเปลี่ยนพลังงานของแสงที่ตกกระทบให้เป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับตัวตรวจจับแสงชนิดสารกึ่งตัวนำจะทำงานในลักษณะดูดกลืนพลังงานแสงภายในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ ถ้าแสงนั้นมีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นที่ตัวตรวจจับแสงทำงานแสงจะผ่านตัวตรวจจับแสงโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นที่ตัวตรวจจับแสงนั้นและถ้าแสงมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่ตัวตรวจจับแสงทำงานแสงนั้นจะถูกกลืนที่ผิวของตัวตรวจจับแสงซึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ดังนั้นแสงที่จะทำให้ตัวตรวจจับแสงทำงานได้จะต้องมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับตัวตรวจจับแสงนั้น ๆ โดยสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีว่าด้วยแถบพลังงาน (Energy band gap theory) ที่รอยต่อ P-N จะมีแถบพลังงานขึ้น 3 แถบ (ซึ่งเกิดจากสารเจือที่เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำนั้น) ได้แก่ แถบความนำ (Conduction Band), แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)และแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อรอยต่อ P-N อยู่ในสภาวะสมดุลย์จะไม่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ซึ่งมีพลังงานสูงสามารถเคลื่อนที่ผ่านแถบช่องว่างพลังงานไปได้ทำให้ไม่มีประจุหรือกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น



รูปที่ 2.2 แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อ P-N

เมื่อมีแสงที่มีพลังงานหรือมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมตกกระทบรอยต่อ P-N ของตัวตรวจจับแสงจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านแถบช่องว่างพลังงานได้ทำให้เกิดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวตรวจจับแสงโดยจะขึ้นกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบ สำหรับตัวตรวจจับแสงชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิดได้แก่

- **ชนิด** Photoconductor-Photoresistors
- **ชนิด** Photovoltaic
- **ชนิด** Photodiode
- **ชนิด** Phototransistors

โดยมีรายละเอียดของแต่ละชนิดดังนี้

2.2.1 Photoconductor-Photoresistors

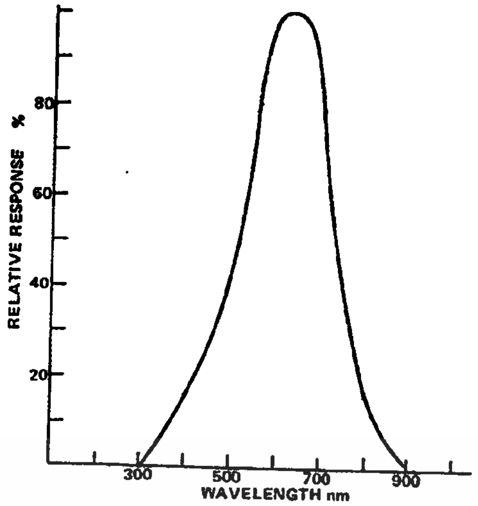
ตัวตรวจจับแสงชนิดนี้จะเปลี่ยนความสามารถการนำไฟฟ้าตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบโดยที่แสงที่ตกกระทบนั้นจะต้องมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับตัวตรวจจับแสงนั้นซึ่งพลังงานของแสงจะทำให้เกิดการจับคู่ของโฮลและอิเล็กตรอนขึ้นเป็นผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสงเพิ่มขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อมีเงื่อนไขดังนี้

1. แสงที่มีผลต่อตัวตรวจจับแสงเมื่อแสงนั้นตกกระทบบริเวณที่ตัวตรวจจับแสงทำงานเท่านั้น แสงที่สะท้อนจะไม่มีผลใด ๆ ต่อตัวตรวจจับแสงนั้น
2. แสงที่ตกกระทบจะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการจับคู่โฮลและอิเล็กตรอนในการเคลื่อนที่และช่วงเวลาชีวิต (Lifetime) เพียงพอที่จะนำกระแสไฟฟ้าได้
3. มีขั้วต่อที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลภายในตัวตรวจจับแสงได้

อย่างไรก็ตามการใช้งานของ Photoconductor-Photoresistors จะต้องคำนึงการทำงานช่วงของความยาวคลื่นของแสงที่จะตรวจจับ รูปที่ 2.3 แสดงช่วงการตอบสนองของ Photoresistor ชนิด Cadmium Sulphide สำหรับตารางที่ 2.2 สรุปช่วงความยาวคลื่นการตอบสนองของ Photoconductor-Photoresistors ที่สร้างจากสารชนิดต่าง ๆ สิ่งสำคัญในการเลือกใช้ Photoconductor-Photoresistors มีดังนี้

1. ความไวของการทำงาน (Sensitivity) คือความสามารถการความต้านทานต่อความเข้มของแสงโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทาน 500 กิโลโอห์มที่ไม่มีแสงแสงจะลดดงเป็น 50 โอห์มที่ปริมาณแสงในห้อง
2. ช่วงของการตอบสนอง เนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลต่อการทำงานโดยที่ความยาวคลื่นของแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง
3. ค่าคงที่ของเวลาทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ช่วงการตอบสนองของ Photoresistor ชนิด Cadmium Sulphide

ตารางที่ 2.2 ช่วงความยาวคลื่นการตอบสนองของ Photoresistors ที่สร้างจากสารชนิดต่าง ๆ

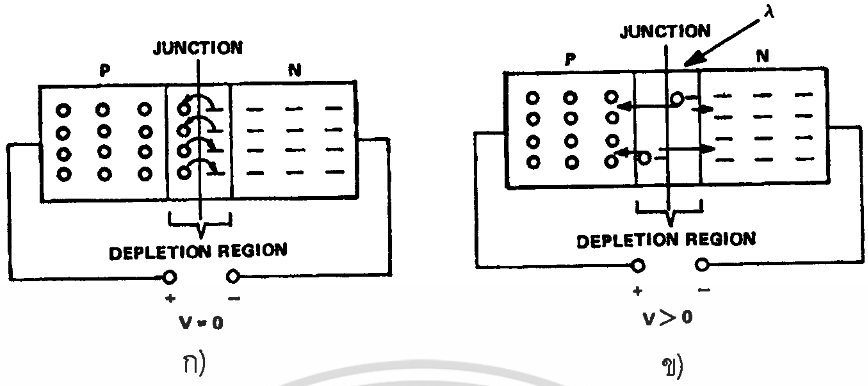
Material		Energy Gap eV	Useful Response range nm.	
Cadmium Sulphide, Cds		2.45	400 - 800	515 - 550
Cadmium Selenide, CdSe		1.74	680 - 750	675 - 735
Lead Sulphide,	PbS	0.40	500 - 3000	2000
Lead Telluride,	PbTe	0.31	600 - 4500	2200
Lead Selenide,	PbSe	0.25	700 - 5800	4000
Silicon,	Si	1.12	450 - 1100	850
Germanium,	Ge	0.66	550 - 1800	1540
Indium Antimonide,	InSb	0.16	600 - 7000	5500
Indium Arsenide,	InAs	0.33	1000 - 4000	3500

2.2.2 Photovoltaic

ตัวตรวจจับแสงชนิด Photovoltaic จะมีโครงสร้างภายในเป็นแบบรอยต่อ P-N ที่จะเปลี่ยนพลังงานแสงที่ได้รับเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะต่างจากชนิด Photoconductor ที่จะเปลี่ยนการนำไฟฟ้าตามความเข้มของแสง เมื่อสารกึ่งตัวนำสองชนิดได้แก่ P และ N นำมาต่อกันทำให้เกิดรอยต่อ P-N ซึ่งที่รอยต่อนี้จะเกิดสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจะอิเล็กตรอนในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด P และ โฮลในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อรอยต่อ P-N อยู่ในสภาวะสมดุลย์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.4 ก) เมื่อมีพลังงานแสงตกกระทบที่รอยต่อ P-N จะทำให้การจับคู่อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการแยกตัวออกโดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางสารกึ่งตัวนำชนิด N และโฮลจะไปทางสารกึ่งตัวนำชนิด P ทำให้เกิดแรงดัน emf ที่หน้าสัมผัสของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ข) นอกจากพลังงานของแสงจะกระทำที่รอยต่อแล้วยังเกิดขึ้นในเนื้อสารทั้งชนิด P และ N ด้วย อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนไปที่รอยต่อเช่นกัน ซึ่งแรงดัน emf ที่เกิดขึ้นเปรียบ

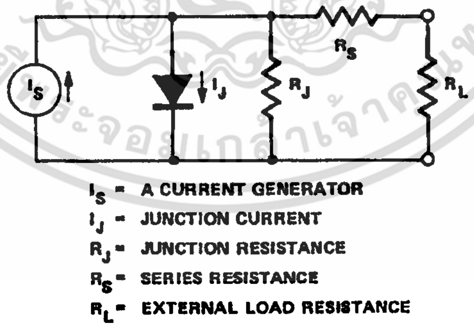


รูปที่ 2.4 แบบจำลองรอยต่อ P-N

ก) ขณะเกิดสมดุล

ข) เมื่อมีแสงตกกระทบ

เสมือนรอยต่อ P-N ถูกไบอัสตรงขณะที่ยังไม่มีการต่อกับอุปกรณ์ภายนอกซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิด (Open Circuit Voltage) อย่างไรก็ตามถ้ามีการต่อความต้านทานภายนอกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล กระแสไฟฟ้านี้จะแบ่งไหลอันเนื่องจากความต้านทานภายนอกกับความต้านทานภายในดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์ Photovoltaic โดยมีความต้านทาน R_L เป็นโหลด



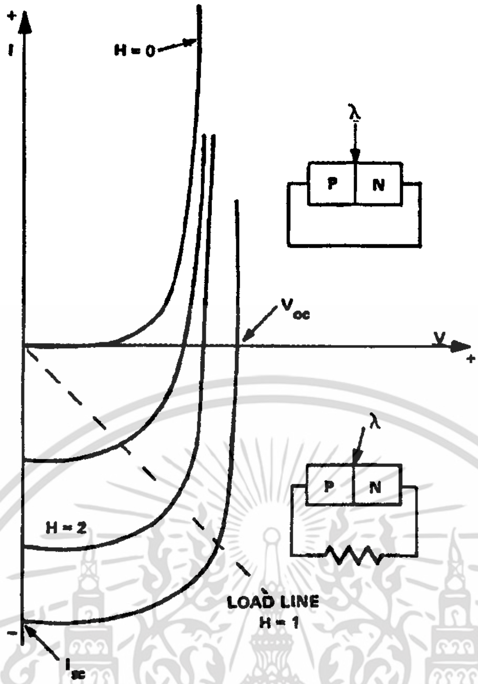
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ Photovoltaic ที่มีการต่อความต้านทานภายนอก

ในรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ Photovoltaic สำหรับอุปกรณ์ Photovoltaic ชนิดที่ทำด้วย Si จะมีแรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดที่ 0.4-0.5 โวลต์ และกระแสประมาณ 30 มิลลิแอมป์ต่อพื้นที่หนึ่งตารางเซ็นติเมตรที่แสงแดดปกติ สิ่งสำคัญในการเลือกใช้งานได้แก่

1. ความไวเมื่อเทียบกับความเข้มของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ช่วงของการตอบสนองปกติจะเป็นซิลิกอน
3. ค่าคงที่ของเวลา



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ Photovoltaic

2.2.3 Photodiode

ตัวตรวจจับแสงชนิด Photodiode จะเป็นแบบรอยต่อ P-N เช่นเดียวกับ Photovoltaic จะต่างกันที่ตัวตรวจจับ Photodiode จะออกแบบให้ทำงานในลักษณะการไบอัสกลับ การไบอัสกลับจะทำให้แรงดันที่รอยต่อ P-N มากขึ้นเป็นผลให้การจับคู่ของอิเล็กตรอนกับโฮลมากขึ้นบริเวณรอยต่อ ดังนั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบจาก ลักษณะดังกล่าว Photodiode จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นดังนี้

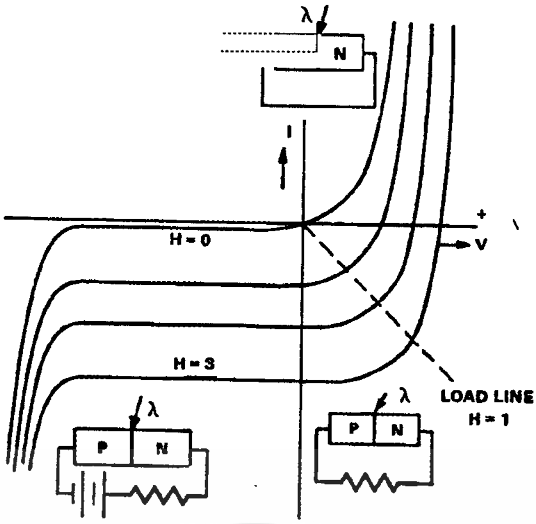
$$I_{tot} = I_L + I_D$$

เมื่อ I_L คือกระแสไฟฟ้าของโหลดที่เกิดขึ้นขณะรับแสง

I_D คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะไม่มีแสง

ปกติอุปกรณ์ชนิดนี้จะทำด้วยซิลิกอนซึ่งจะให้กระแสไฟฟ้า I_D ที่ 1 นาโนแอมป์ขณะที่เมื่อมีแสงจะให้กระแสไฟฟ้า 10 ไมโครแอมป์สำหรับพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

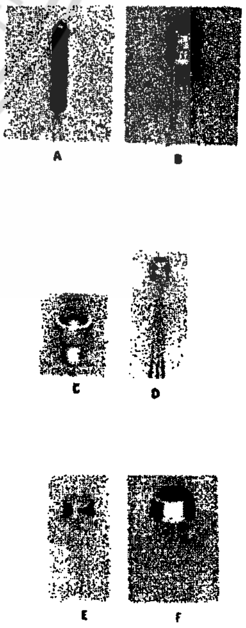


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ Photodiode

กระแสไฟฟ้าของ Photodiode ชนิดซิลิกอนที่ทำงานทั้งในกรณีไบอัสตรงและไบอัสกลับซึ่งจะเห็นว่าขณะที่ไม่มีแสง (H = 0) เส้นกราฟจะผ่านจุดศูนย์ซึ่งแสดงว่ารอยต่อ P-N นี้สามารถทำงานได้ทั้งเป็นตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้าและตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับวงจรที่มาต่อร่วม เนื่องจากการไบอัสกลับให้ Photodiode ทำให้แถบที่รอยต่อ P-N กว้างขึ้นทำให้ค่าประจุของ Photodiode ที่รอยต่อมีค่าน้อยเป็นผลให้ Photodiode สามารถทำงานด้วยความเร็วสูงได้ ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของ Photodiode

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่าง Photodiode ที่มีจำหน่าย

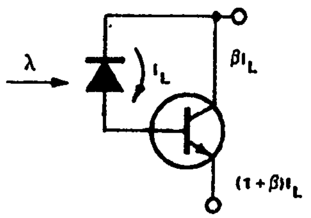
Type	Pkg	Light Current Min μA	Max	@ ± V	Dark Current Max μA	@ ± V	Power Diss mW	Features
1N2175	A	100	–	±10	0.5	±50	50	
H11	A	40	–	±10	0.5	±50	50	
H35	A	60	–	±10	0.5	±50	50	Hermetically sealed
H38	A	100	–	±10	10.0	±50	50	glass package.
H60	A	100	200	±10	0.5	±50	50	Can be used with ac
H61	A	200	300	±10	0.5	±50	50	bias
H62	A	300	400	±10	0.5	±50	50	
TIL77	B	1.5	–	+ 3	.005	3	100	spectrally matches human eye
		BV_R @ 10μA Min	Max	Avalanche Gain Min	Type	Typ. C_T pF	Typ η	
TIXL55	C	140	200	100	200	1.2	20% @ 0.63μ	Si APD, Active area 0.01 in diam, microwave package
TIXL56	D	140	200	100	200	1.2	20% @ 0.63μ	Si APD, Active area 0.01 in diam, TO-18 window can
TIXL57	D	30	60	20	50	4.5	60% @ 1.06μ	Ge APD, Active area 0.01 in diam, TO-18 window can
TIXL59	E	140	200	50	100	12.0	30% @ 0.9μ	Si APD, Active area 0.030 in diam, TO-5 window can
TIXL68	D	85	150	15	40	3	25% @ 1.54μ	Ge APD, Active area 0.01 in diam, TO-18 window can
TIXL69	E	140	200	50	100	30	40% @ 0.9μ	Si APD, Active area 0.06 in diam, TO-5 window can
		BV_R @ 100μA		Responsivity			Risetime ns	
TIXL80	F	250		0.5 A/W @ 0.9μ 5			25	active area diameter 0.1 in. TO-5 can



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 Phototransistors

ตัวตรวจจับแสงชนิด Phototransistors จะทำงานเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ทั่วไปแต่จะใช้ Photodiode ระหว่างขาเบสกับคอลเล็คเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของ Phototransistors

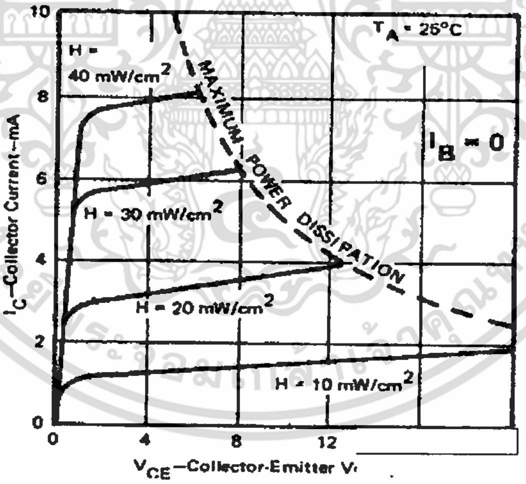


รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของ Phototransistors

ชนิด NPN เมื่อมีแสงตกกระทบ Photodiode จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์และถูกขยายด้วยค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ (h_{FE}) จะได้ดังนี้

$$I_C = IE = (1 + h_{FE}) I_L$$

เนื่องจากทราซิสเตอร์มีอัตราขยายดังนั้นกระแสไฟฟ้าขณะที่ไม่มีแสงจะถูกขยายแช่นกัน รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{CE} กับ กระแส I_C ของทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิคอนที่ความเข้มแสงต่าง ๆ



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{CE} กับ I_C ของทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิคอนที่ความเข้มต่าง ๆ

ในการเลือกใช้งานตัวตรวจจับแสงแต่ละชนิดนั้นขึ้นกับลักษณะการใช้งาน ตารางที่ 2.4 แสดงแนวทางสำหรับเลือกใช้ตัวตรวจจับแสงแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การเลือกใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดต่าง ๆ

Device Type	Advantages/Uses	Limitations
Photo-resistors	Response in visible spectrum. Large light to dark ratio. Large sensitive areas available. Zero offset voltage.	Memory or hysteresis effect. Limited temperature range. Slow response — milliseconds.
Photo-voltaic	Voltage generator — no external bias required. Large areas available. Efficient conversion of solar energy. Very linear with respect to radiation in short circuit mode.	Slow speed of response. Low level outputs.
Photo-diodes	High speed operation — 10^{-6} to 10^{-9} seconds. Good linearity with light levels and temperature. Low noise. Wide range of spectral responses visible to infrared.	Low level outputs.
Photo-transistors	Integral current gain, can drive TTL. Small sizes available for close spacing, wide variety of packages.	Limited frequency response, 500kHz. Non-linear with respect to light levels.
Photo-thyristors	Highest output current. Light used only to trigger — will remain 'on' after light removed. Can be used to switch high voltage with isolation.	Highly temperature sensitive. Poor dV/dT performance.
Photo-Darlington	High current output at very low light levels.	Long response time. Higher leakage current due to gain multiplication. Non linear with intensity and temperature.
Photo-FET	Sensitivity adjustable by R_G selection. High gain — bandwidth product Good low temperature operation.	Non linear. Poor high temperature characteristics.

2.3 ตัวกำเนิดแสง (Light Emitters)

ตัวกำเนิดแสงชนิดสารกึ่งตัวนำจะมีโครงสร้างแบบรอยต่อ P-N ซึ่งเรียกว่า LED (Light Emitting Diode) โดยจะทำงานเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสตรงให้กับ LED แสงที่ได้จาก LED เกิดจากการทำงานแบบ Injection-Recombination โดยที่อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนเข้าสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ตามลำดับแล้วจึงจับคู่อิเล็กตรอนและโฮลอีกจากนั้นจะคายพลังงานส่วนที่เหลือออกมาในรูปของแสงซึ่งจะมีความยาวคลื่นตามสมการที่ (3) แสงที่ได้จาก LED จะขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างซึ่งจะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไป ตารางที่ 2.5 แสดงการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ และช่วงความยาวคลื่นที่ได้ออกมา

ตารางที่ 2.5 สารกึ่งตัวนำสำหรับสร้าง LED ในย่านความยาวคลื่นต่าง ๆ

Material	Approximate Bandgap eV	Typical Emission Wavelength nm	λ_p
GaP, N doped	2.18	530 – 595	565
GaP, Zn doped	2.24	530 – 575	553
SiC	1.97	430 – 700	590
$GaAs_{.6}P_{.4}$	1.92	630 – 660	645
GaP, ZnO doped	1.76	615 – 730	700
GaAlAs, red	1.78	660 – 720	690
GaAs, Zn doped	1.37	890 – 920	905
GaAs: Si	1.33	890 – 980	930

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ได้แก่ Gallium Arsenide, Gallium Phosphide และ Gallium Arsenide Phosphide มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

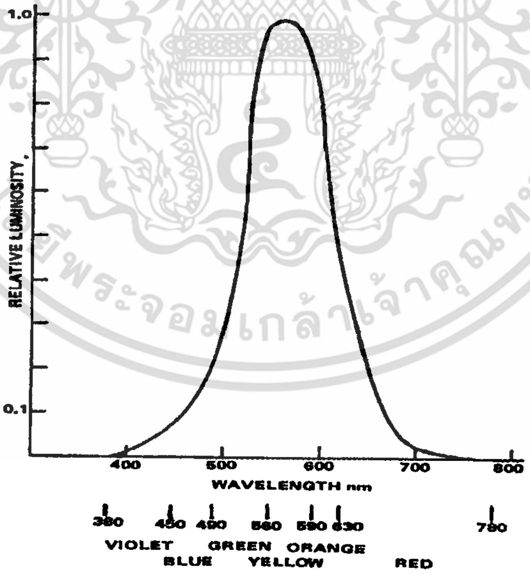
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 Gallium Arsenide

Gallium Arsenide จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ Direct Gap ที่มีแรงดันประมาณ 1.37 eV และจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดขนาด 0.9 ไมโครเมตร ในการกำเนิดแสงจะกำเนิดใกล้ส่วนของแถบสารกึ่งตัวนำชนิด P แต่ที่แถบสารกึ่งตัวนำนี้จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานแสงมาก ขณะที่แถบสารกึ่งตัวนำชนิด N จะให้พลังงานแสงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และจะดูดซับพลังงานแสงมากบริเวณใกล้รอยต่อ ถ้าพลังงานแสงมีค่าน้อยกว่าพลังงานแถบช่องว่าง (Band Gap Energy) แล้วการดูดซับจะมีน้อยจึงทำให้แสงสามารถออกมาได้

2.3.2 Gallium Phosphide

Gallium Phosphide จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ Indirect Gap โดยมีพลังงานที่แถบช่องว่าง (Band Gap Energy) ประมาณ 2.24 eV และจะให้แสงสีเขียวที่ความยาวคลื่น 0.55 ไมโครเมตรมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Gallium Arsenide โดยการเพิ่มไนโตรเจนที่มีพลังงานของแถบช่องว่างน้อยกว่า 2.18 eV นอกจากนี้ยังสามารถที่จะให้ Gallium Phosphide กำเนิดแสงสีแสงได้โดยการเจือสาร Zinc Oxide ทำงานพลังงานของแถบช่องว่างอยู่ที่ 1.8 eV ซึ่งจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.69 ไมโครเมตร และมีประสิทธิภาพสูงกว่าในกรณีที่ให้แสงสีเขียว .การที่แสงสีเขียวมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจากการตอบสนองของตามนุษย์ต่อแสงสีเขียวต่ำกว่าแสงสีแดงดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการตอบสนองต่อแสงสีต่าง ๆ ของตามนุษย์



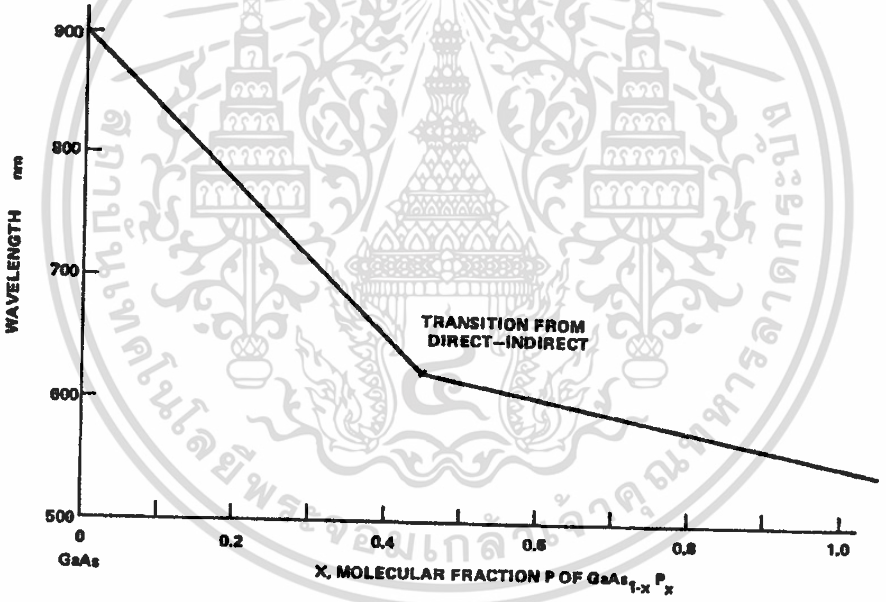
รูปที่ 2.10 การตอบสนองต่อแสงสีต่าง ๆ ของตามนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแตกต่างของตัวกำเนิดแสงแบบ Gallium Phosphide ที่มีต่อตัวกำเนิดแบบ Gallium Arsenide คือเนื้อสารของ Gallium Phosphide แสงสีแสงสามารถทะลุผ่านได้มากกว่าแสงสีเขียวทำให้แสงสามารถออกจากตัวกำเนิดแสงได้มากโดยไม่ถูกดูดซับที่เนื้อสารกึ่งตัวนำ

2.3.3 Gallium Arsenide Phosphide

ตัวกำเนิดแสงแบบ Gallium Arsenide Phosphide เป็นตัวอย่างของการรวมชนิดของสารกึ่งตัวนำให้เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเป็นการรวมกันของสารกึ่งตัวนำแบบ Gallium Phosphide กับแบบ Gallium Arsenide เข้าด้วยกันทำให้ตัวกำเนิดแสงที่ได้สามารถกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.55 ไมโครเมตรกับ 0.9 ไมโครเมตร ในรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสงที่ได้กับอัตราส่วนของการผสม โดยที่พลังงานของแถบช่องว่างจะเป็นแบบ Direct Gap เมื่อค่า x มีค่าน้อยกว่า 0.45 และค่าที่มากกว่านี้จะเป็นแบบ Indirect Gap และประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถลดจนความยาวคลื่นต่ำกว่า 0.6 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสงที่ได้กับอัตราส่วนของการผสม

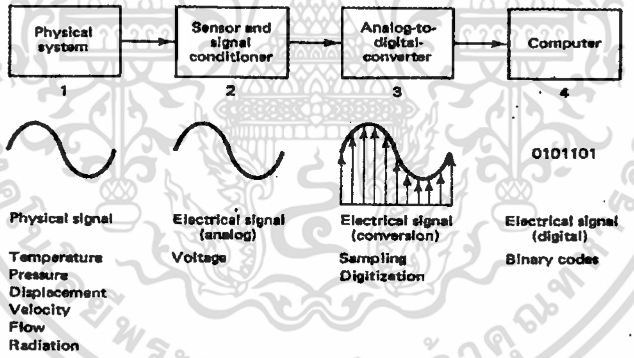
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องตรวจข้อสอบ

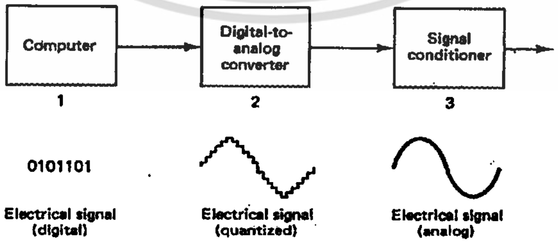
การทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งอุปกรณ์ดิจิตอลเช่นไมโครคอนโทรเลอร์ (Microcontroller) และอุปกรณ์แอนาลอกได้แก่ส่วนวงจรตัวตรวจจับ, วงจรขับมอเตอร์เป็นต้น ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหลักการทำงานต่างกันออกไปซึ่งจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานดังต่อไปนี้

3.1 พื้นฐานของการแปลงสัญญาณ

รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าที่พบเห็นและคุ้นเคยในชีวิตประจำวันจะอยู่ในรูปของสัญญาณต่อเนื่อง หรือเรียกว่าสัญญาณแอนาลอก จากเทคนิคการประมวลผลสัญญาณด้วยดิจิตอลได้รับการพัฒนาจนมีประสิทธิภาพมากขึ้นทำให้การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลได้รวดเร็วและมีความละเอียดเพียงพอที่จะนำสัญญาณแอนาลอกมาประมวลผลในรูปแบบดิจิตอลได้ โดยสามารถแบ่งการทำงานได้สองลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่ในรูปที่ 3.1 ก) จะเป็นขบวนการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลส่วนในรูปที่ 3.1 ข) จะเป็นขบวนการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก ซึ่งมีหลักการพื้นฐานของการแปลงสัญญาณดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ระบบของการแปลงสัญญาณ

(ก) ระบบการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

(ข) ระบบการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก

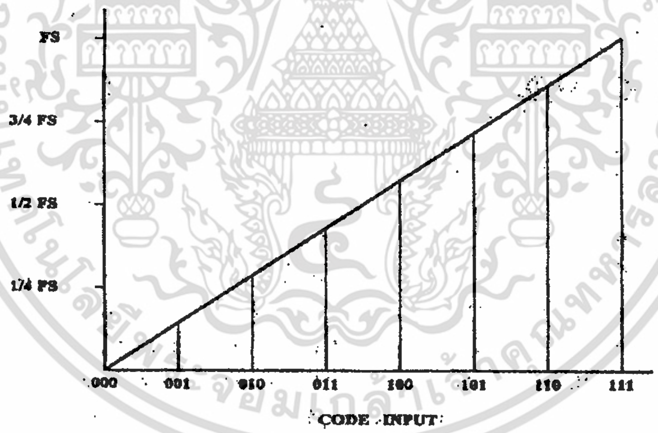
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก (Digital-to-Analog)

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ทำให้ระบบคอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมโยงกับอุปกรณ์ทางแอนาลอกลอกอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การตรวจจับความเข้มของตัววัดปริมาณแสงของหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบ, ระบบวิเคราะห์สัญญาณ เป็นต้น

หลักการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอก คือมีวงจรที่ทำหน้ารับสัญญาณดิจิตอลซึ่งเป็นค่าระดับลอจิก 0 และลอจิก 1 สัญญาณที่ได้จากวงจรจะเป็นสัญญาณอนาลอกจะมีระดับแรงดันหรือกระแสตามสัญญาณดิจิตอลที่ต้องการแปลง แต่ส่วนมากมักจะนิยมให้เป็นระดับแรงดัน และระดับแรงดันสูงสุดจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้อ้างอิง และค่าแรงดันเหล่านี้ควรจะมีค่าคงที่ เนื่องจากค่าแรงดันอ้างอิงนี้เป็นค่าที่ป้อนให้จะสัมพันธ์กับสัญญาณดิจิตอลของวงจร วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกมีการทำงานอยู่ 2 แบบ คือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกแบบ Binary weight และวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกแบบ R-2R Ladder ทั้งสองแบบจะให้ค่ากระแสออกมาทั้งคู่

จากรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกขนาด 3 บิต จะเห็นว่ารหัสดิจิตอลอินพุท 1 word จะแปลงเป็นสัญญาณแรงดันอนาลอกได้ 1 ค่า ซึ่งมีการจัดลักษณะของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นผังการทำงาน หัวใจสำคัญของ

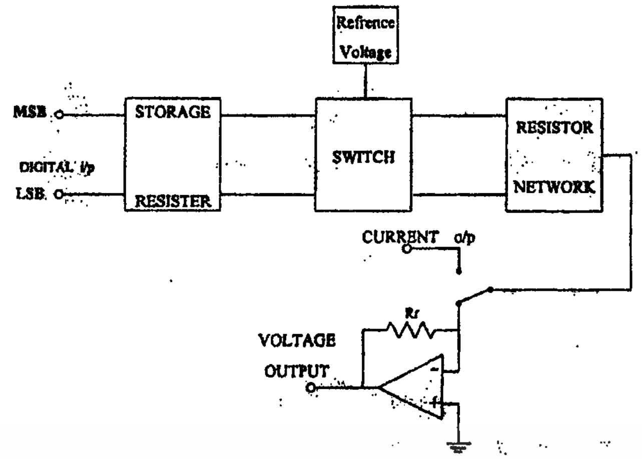


รูปที่ 3.2 การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกขนาด 3 บิต

วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกคือชุดสวิตช์ที่ควบคุมด้วยลอจิก ซึ่งมีจำนวน n ชุด และจะเท่ากับจำนวนบิตทางด้านอินพุทของวงจร สวิตช์เหล่านี้จะตัดต่อแรงดันอ้างอิงขนาดหนึ่งเท่ากับวงจรชุดความต้านทานค่าต่างๆ ที่ Weight ตามรหัสเลขฐานสอง ส่วนเอาท์พุทของบัพเฟอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสที่ถูก weight โดยวงจรชุดความต้านทานให้เป็นแรงดันแอนาลอกที่สัมพันธ์กัน ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.3 ผังการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก

3.1.1.1 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก แบบ Binary weight ladder การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Binary weight ladder มีหลักการดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากวงจรจะเห็นว่ามีชุดตัวความต้านทาน (R) และ ชุดสวิตช์ซึ่งจะเป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ ทำหน้าที่ต่อชุดตัวความต้านทานเข้ากับแรงดันอ้างอิงหรือต่อกราวด์ ตามสัญญาณดิจิตอลได้แก่ 1 และเป็น 0 ตามลำดับ โดยหลักการนี้ค่าความต้านทานที่ต่อเป็นลำดับจะมีค่าเป็น 2 เท่าขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนบิตของค่าดิจิตอลที่ใช้งาน เมื่อส่งค่าดิจิตอลสู่วงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิสท์จะทำหน้าที่เชื่อมต่อวงจรด้วยสัญญาณกราวด์หรือแรงดันอ้างอิงทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวต้านทานตามอัตราส่วนของชุดความต้านทานนั้น กระแสที่ได้ทั้งหมดนี้จะถูกนำมารวมกันแล้วขยายออกเป็นค่ากระแสรวม ค่ากระแสที่ได้จะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (3.1) ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสที่ไหลในแต่ละบิต ($i_0, i_1, i_2 ..., i_n$) ค่าของตัวต้านทานที่ใช้จะมีค่าเป็น $2^n R$ เมื่อ $n+1$ เป็นค่าของจำนวนของรหัสทางดิจิตอลที่ใช้ควบคุมสวิตช์

$$I_o = V_{ref} \sum_{i=1}^{n} \frac{a_1}{2^{(i-1)}R} \qquad (3.1)$$

เมื่อ I_o คือ ค่ากระแสรวม

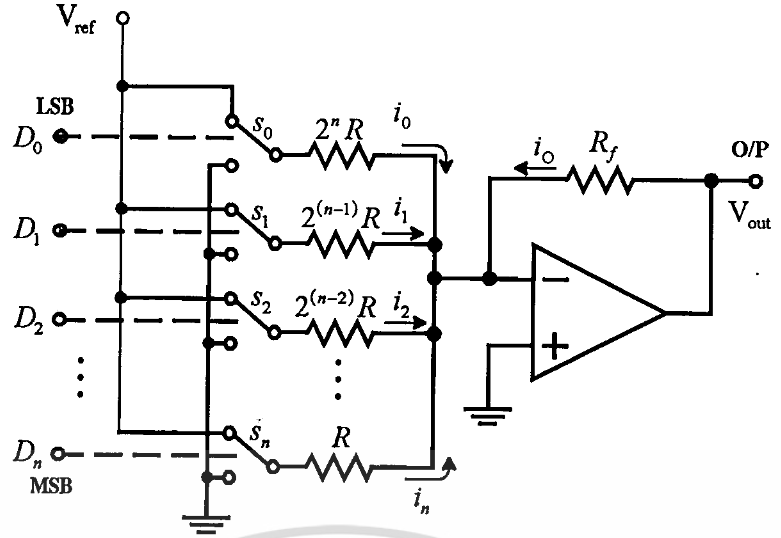
a_1 คือ ค่าทางดิจิตอลที่บิตนั้นๆ (1 หรือ 0)

R คือ ค่าความต้านทานตัวแรกที่ใช้ในวงจร

โดย

$$i_n = \frac{V_{ref}}{R} S_n \qquad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก แบบ Binary weight ladder

$$i_o = \frac{V_{ref}}{2^n R} S_o \tag{3.3}$$

$$i_1 = \frac{V_{ref}}{2^{(n-1)} R} S_1 \tag{3.4}$$

ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าที่เอาท์พุทกับการทำงานของสวิตซ์ ดังแสดงในสมการที่ (3.5) ซึ่งเป็นสมการของ Node current ที่ขา อินเวอร์ติ้งแอมป์ (inverting Amp.) เมื่อผลรวมที่ node จะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i_0 + i_1 + i_2 + i_3 = 0 \tag{3.5}$$

แทนค่ากระแสแต่ละค่าด้วยสมการ (3.2) จะได้สมการที่ (3.6)

$$\frac{V_{ref}}{R} S_n + \frac{V_{ref}}{2R} S_{(n-1)} + \ldots + \frac{V_{ref}}{2^{(n-1)} R} S_1 + \frac{V_{ref}}{2^n R} S_0 + \frac{V_{out}}{R_f} = 0 \tag{3.6}$$

จะได้แรงดันที่เกิดจากกระแสที่เอาท์พุทของออปแอมป์ดังแสดงในสมการที่ (3.7)

$$V_{out} = -V_{ref} \frac{R_f}{R} \left(S + \frac{1}{2} S_{(n-1)} \ldots + \frac{1}{2^{(n-2)}} S_2 + \frac{1}{2^{(n-1)}} S_1 + \frac{1}{2^n} S_0 \right) \tag{3.7}$$

โดยที่ ถ้า S = 1 หมายถึงสวิตซ์ที่ n ปิดหรือมีลอจิกหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า S = 0 หมายถึงสวิตซ์ที่ n เปิดหรือมีลอจิกศูนย์

จากความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทกับการทำงานของสวิตซ์ จะเห็นได้ว่าระดับของแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทจะขึ้นอยู่กับการปิด-เปิดของสวิตซ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าจะขึ้นอยู่กับของรหัสดิจิตอลทางด้านอินพุท

จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบนี้จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้น คือเมื่อจำนวนบิตยิ่งสูงค่าความต้านทานที่ใช้ในตัวสุดท้ายจะมีค่าสูงมากซึ่งเมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงทำให้เกิดกระแสขึ้นตามกฎของโอห์มกระแสมีค่าน้อยมาก เมื่อนำไปต่อกับออปแอมป์ที่หน้าที่ขยายสัญญาณนั้น เมื่อค่ากระแสมีค่าน้อยมากการตอบสนองของออปแอมป์จึงต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงทำให้ราคาแพง และถ้าใช้ออปแอมป์ทั่วไปกระแสที่ได้นี้อาจจะมีค่าระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนของออปแอมป์ ทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดได้

ในทำนองเดียวกันการใช้ค่าความต้านทานค่าสุดท้ายมีค่าไม่สูงมากนักจะทำให้ค่าความต้านทานตัวแรกมีค่าต่ำมากทำให้กระแสไหลมากเกินไปจึงไม่สามารถใช้กับออปแอมป์ได้

3.1.1.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ R-2R Ladder การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ R-2R Ladder มีแนวความคิดคล้ายกับ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Binary weight ladder แต่จะเป็นการแก้ปัญหาให้วงจรมีประสิทธิภาพดีมากขึ้น โดยสามารถแก้ไขได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นว่าค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรนั้นจะมีค่าเพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ R และ 2R ซึ่งสมมุติว่าที่โหลด (R_L) มีค่ามากกว่า 2R มากๆ จนคิดว่าไม่มีผลต่อวงจร ladder ทางด้านเอาท์พุท และจะได้ค่าศักดาเป็นไปตามสมการที่ (3.8) จากรูปที่ 3.4 สมมุติให้รหัสดิจิตอลที่ควบคุมสวิตซ์มีค่าเป็น “1” คือสวิตซ์จะเลื่อนไปเชื่อมต่อกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) เช่นให้ D_n มีค่าเป็น “1” บิตที่เหลือมีค่าเป็น “0” ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.5

$$E_0 = V_{ref} \sum_{i=1}^{n} \frac{a_1}{2^1} \tag{3.8}$$

เมื่อ E_0 คือ ค่าศักดาที่ออกมา

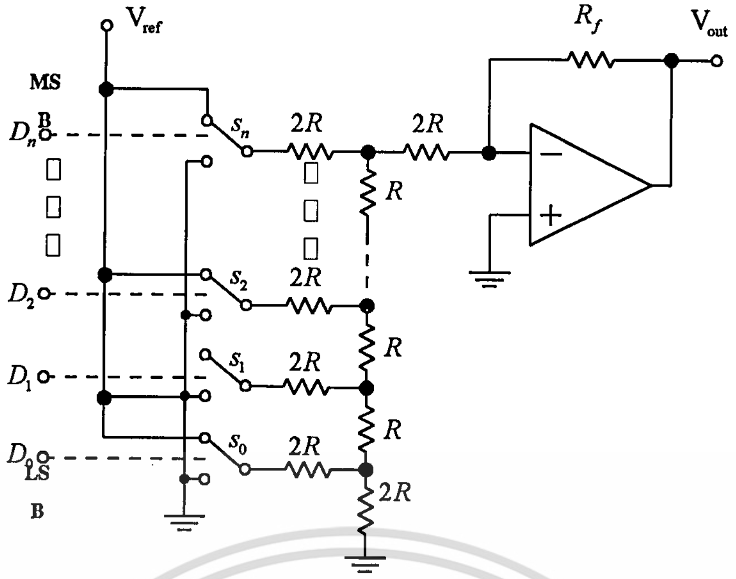
V_{ref} คือ ค่าศักดาของแรงดันอ้างอิง

a_1 คือ เป็นค่าทางดิจิตอลที่บิต i ใด (1 หรือ 0)

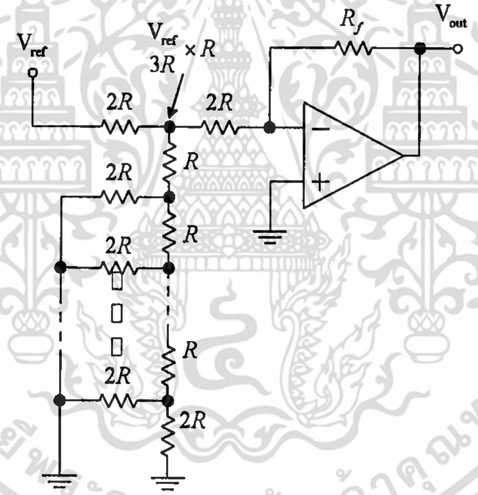
จากรูปที่ 3.6 จะได้ค่าศักดาไฟฟ้าที่เอาท์พุท (V_{out}) ตามสมการที่ (3.9) และ (3.10)

$$0 = \frac{\frac{V_{ref}}{3R} \times R}{2R} + \frac{V_{out}}{R_f} \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ R-2R Ladder



รูปที่ 3.6 ให้ D_n มีค่าเป็น "1" เท่านั้น

หรือ

$$V_{out} = -\frac{1}{3 \times 2R}\frac{R_f}{R}V_{ref} \tag{3.10}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อสวิตช์ที่เหลือมีค่าเป็น "1" สามารถหาแรงดันเอาท์พุทได้ดังสมการที่ (3.11) ถึง (3.13) และสมการที่ (3.14) เป็นผลรวมของแรงดันเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $D_{(n-1)}$ เป็น "1" $$V_{out} = -\frac{1}{3x4}\frac{R}{R_f}V_{ref} \quad (3.11)$$

เมื่อ $D_{(n-2)}$ เป็น "1" $$V_{out} = -\frac{1}{3x8}\frac{R}{R_f}V_{ref} \quad (3.12)$$

เมื่อ D_0 เป็น "1" $$V_{out} = -\frac{1}{3x2x(2^n)}\frac{R}{R_f}V_{ref} \quad (3.13)$$

ผลรวมที่เอาท์พุท

$$V_{out} = -\frac{1}{6}\frac{R}{R_f}V_{ref}\left(S_n + \frac{1}{2^{s_{(n-1)}}} + \frac{1}{4^{s_{(n-2)}}} + \ldots + \frac{1}{2^{(n-1)}}S_1 + \frac{1}{2^n}S_0\right) \quad (3.14)$$

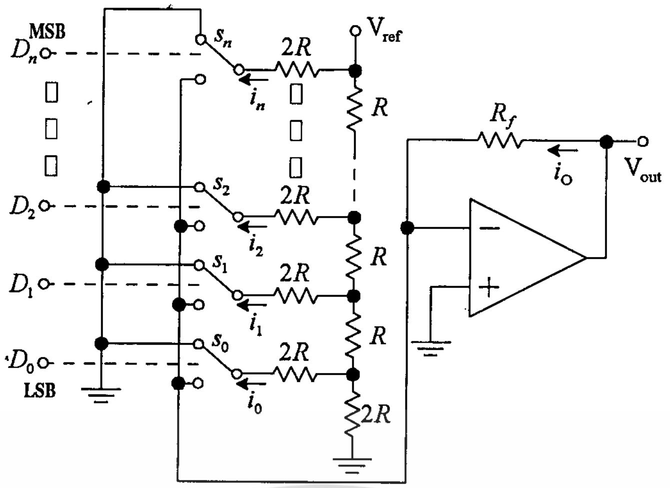
หรือสามารถเขียนเป็นสมการผลรวมแรงดันเอาท์พุทได้ดังสมการที่ 3.15

$$V_{out}(fs) = \frac{V_{ref}(2^n - 1)}{2^n} \quad (3.15)$$

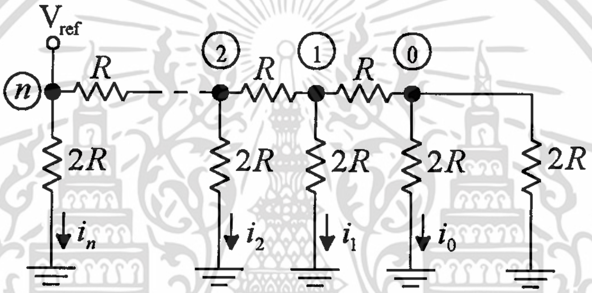
เมื่อ V_{out} (fs) เป็นค่าของศักดาสูงสุดหรือแรงดันสูงสุดที่ยอมให้ออกมาได้
V_{ref} เป็นค่าของระดับศักดาหรือแรงดันอ้างอิง
n เป็นจำนวนบิตที่ใช้งาน

3.1.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Inverted R-2R Ladder ลักษณะการจัดวางวงจรคล้ายกับแบบ R-2R Ladder เพียงแต่สวิตช์จะทำหน้าที่เชื่อมต่อตัวความต้านทานกับกราวด์ (ground) ของแรงดันอ้างอิงและกราวด์เสมือน (virtual ground) ของ Summing Amplifier แทนที่จะเป็นแรงดันอ้างอิง วิธีการนี้นิยมใช้ในการทำวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก เพราะแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะมีค่าต่ำซึ่งสามารถสร้างวงจรได้ง่าย ดังแสดงตัวอย่างวงจรการทำงานในรูปที่ 3.7 จากรูปที่ 3.7 (ข) ซึ่งเป็นวงจรเสมือนและสามารถหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่างๆเป็นดังนี้ ศักดาไฟฟ้าที่จุด n จะมีค่าเท่ากับ V_{ref} และจะได้กระแส i_n จากสมการที่ (3.16) และศักดาไฟฟ้าที่ n-1 จะได้ $V_{ref}/2$ และจะได้กระแส $i_{(n-1)}$ ได้ในสมการที่ (3.17) และศักดาไฟฟ้าที่จุดที่ 1 มีค่าเป็น $V_{ref}/2^{(n-1)}$ และค่ากระแสที่จุดนี้ (i_1) เป็นไปตามสมการที่ (3.18) และสมการที่ (3.19) เป็นการหาค่ากระแสที่ตำแหน่ง 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแบบ Inverted R-2R Ladder
(ค) วงจรเสมือน

ที่จุด n ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ V_{ref} และกระแสจะได้ $i_n = \frac{V_{ref}}{2R}$ (3.16)

ที่จุด n-1 ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ $V_{ref}/2$ และกระแสจะได้ $i_{(n-1)} = \frac{V_{ref}}{2 \times 2R}$ (3.17)

ที่จุด 1 ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ $\frac{V_{ref}}{2^{(n-1)}}$ และกระแสจะได้ $i_1 = \frac{V_{ref}}{2 \times 2^{(n-1)}R}$ (3.18)

ที่จุด 0 ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ $\frac{V_{ref}}{2^n}$ และกระแสจะได้ $i_0 = \frac{V_{ref}}{2 \times 2^n R}$ (3.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์เขียนเป็นสมการได้เป็นสมการที่ (3.20) และจากสมการที่ (3.20) เมื่อแทนกระแสเป็นแรงดันหรือศักดาเพื่อหาศักดาเอาท์พุท ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็นสมการที่ (3.21) ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้คำนวณหาค่าแรงดันเอาท์พุท

$$i_0 S_0 + i_1 S_0 + \ldots\ldots i_n S_n + i_0 = 0 \tag{3.20}$$

$$V_{out} = -V_{ref}\frac{R_f}{2R}\left(S_n + \frac{1}{2} S_{(n-1)} \ldots\ldots \frac{1}{2^{(n-1)}} S_2 + \frac{1}{2^{(n-1)}} S_1 + \frac{1}{2^n} S_0\right) \tag{3.21}$$

3.1.1.4 ค่าผิดพลาดของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก (DAC Error) จากลักษณะของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกที่มีค่าความละเอียดที่ n บิต (หรือ n+1 บิต สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแต่ละชนิด ค่าแอนาลอกที่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกจะสามารถให้ได้จะมีระดับที่เล็กที่สุดเป็นหรือเรียกว่าความละเอียดของ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก (resolution) โดยที่ค่าความละเอียดนี้จะแสดงได้หลายวิธีเช่น ค่า percent ของ Full scale (คิดจาก ค่าหน่วย Fraction คูณด้วย 100), ค่า ppm (part per million) หรือในหน่วยของ log-manitude ดังสมการที่ (3.22) และแสดงค่าความละเอียดของแอนาลอกที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกในตารางที่ 3.1

$$dB = 20\log(2^{-n}) \tag{3.22}$$

ค่าความผิดพลาดที่เอาท์พุทของ DAC มีรายละเอียดดังนี้

4. gain error เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าอัตราขยายในเชิงอุดมคติกับค่าเอาท์พุทที่ได้มีระดับต่ำกว่า full scale สำหรับค่าศักดาไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดให้แก่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก

ตารางที่ 3.1 ค่าความละเอียดของ DAC

จำนวนบิตข้อมูล	Fraction $(1/2^n)$	$(1/2^n)$*100	ppm	dB
6	0.1562	1.56	15620	-36.1
8	0.003906	0.39	3906	-48.2
12	0.0002441	0.024	244	-73.3
16	0.0000153	0.0015	15	-96.3
18	0.0000038	0.00038	4	-108.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. offset error เป็นค่าเอาท์พุทที่เกิดในสภาวะที่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกได้ค เลขฐานสองที่เป็น digital input มีค่าเป็น 0 มักจะแสดงเป็นหน่วย Fraction กับ LSB
3. nonlinearity error (หรือมักจะเรียกว่า linearity) เป็นค่าของเอาท์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกที่ผิดพลาดไป โดยไม่มีลักษณะที่เป็นเส้นตรง

โดยทั่วไปการบอกค่าความแตกต่างระหว่างค่าเอาท์พุทจริงของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกกับค่าเอาท์พุทในเชิงอุดมคติจะแสดงในหน่วยของ %FS การชดเชยความผิดพลาดสามารถกระทำได้โดย

1. การชดเชยค่า gain error ทำได้จากการป้อนค่า digital ให้ DAC มีค่าสูงสุดแล้วทำการปรับค่าอุปกรณ์ที่ DAC จนกว่าจะได้เอาท์พุทที่ full scale
2. การชดเชยค่า offset error จะทำได้โดยให้ค่าดิจิตอลที่เป็น 0 แก่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกแล้วทำการปรับค่าของตัวอุปกรณ์ที่ออปแอมป์หรือที่ค่าแรงดันอ้างอิง
3. การชดเชย nonlinearity error ไม่สามารถทำการแก้ไขใดๆได้ เพราะเป็นผลจากส่วนประกอบภายในของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก

ความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกที่วัดนั้นจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) แต่ในทางปฏิบัติอุปกรณ์จะมีย่านของอุณหภูมิที่ใช้งาน อุณหภูมิของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับค่าปัจจัยหลายอย่างเช่น สภาพแวดล้อม หรือ power dissipation เป็นต้น ตัวอย่างการบอกค่าอุณหภูมิใช้ งานจะบอกในลักษณะ

Military range:	-55°C to +125°C
Industial range:	-25°C to +85°C
Commericial range:	0°C to 70°C

parameter ต่าง ๆ ของอุปกรณ์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของตัวอุปกรณ์คือค่า "drift" ที่บอกแสดงในหน่วย parst per miilon (ppm) ต่อองศา หรือ ppm/°C ค่าผิดพลาดที่แปรเปลี่ยนไปจะคิดจาก

ความความผิดพลาดที่อุณหภูมิ T = ค่าความผิดพลาดที่อุณหภูมิห้อง (25°C) + (drift)*T*10^{-4}

ตัวอย่าง วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก 12 บิตมีข้อมูลที่เป็น Linearity = 0.012% ที่ 25 °C Drift = 5 ppm/°C Reference Drift = 1 ppm/°C (มักจะเป็น DAC ที่กำหนดค่าศักดาไฟฟ้าอ้างอิงในตัว IC) จะหาค่าความผิดพลาดที่อุณหภูมิ 100°C ได้จาก

ค่าความเป็น Linearity ที่ 100°C = 0.012 +(5 ppm/°C+1 ppm/°C)(100)(10^{-4})

= 0.072 % หรือ 0.072 %FS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการเลือกใช้งานวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก มักจะทำการพิจารณาถึง

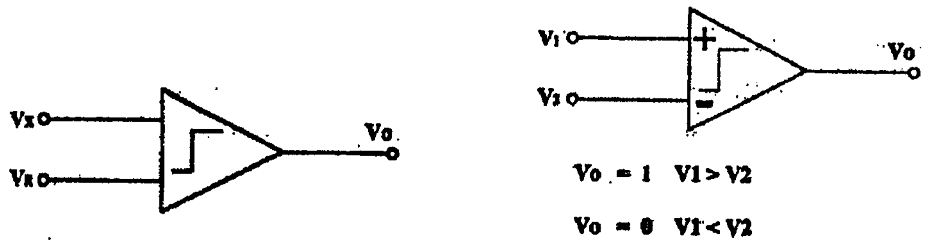
1. ค่า resolution หรือค่าความละเอียดที่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกจะสามารถให้ได้ จำนวนบิตที่มากขึ้นจะทำให้ได้ค่าเอาท์พุทจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก ที่ละเอียดขึ้นแต่ราคาก็จะสูงตามจำนวนบิตไปด้วย
2. ความเป็น linearity ของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก
3. Settling time เป็นค่าเวลาที่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกจะสามารถเปลี่ยนแปลงระดับศักดาไฟฟ้า LSB ที่ค่า digital input เปลี่ยนแปลงไปค่าใหม่
4. ค่าศักย์ดาไฟฟ้าอ้างอิงมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกบางชนิดกำหนดค่าศักย์ดาอ้างอิงจากภายในของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกซึ่งจะต้องพิจารณาค่า drift ที่เกิดขึ้นเพราะสามารถทำให้ค่าเอาท์พุทมีการเบี่ยงเบนไปได้
5. ชนิดของเอาท์พุทที่ทำให้เกิดปัญหา loading effect ซึ่งทำให้ค่าเอ้าท์พุทของงวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกเบี่ยงเบนไปได้
6. การ latched เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกจะใช้ข้อมูลทาง digital เป็นค่ากำหนดระดับของเอาท์พุทวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกบางชนิดจะมีวงจรสำหรับ latched ข้อมูลไว้เพื่อความสะดวกในการออกแบบวงจรหรือนำไปประยุกต์ใช้งาน

3.1.2 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter , ADC)

ในการแปลงสัญญาณจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการแปลงหรือเรียกว่า วงจรแปลงสัญญาณซึ่งก็เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กลับทางกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกนั่นเองคือจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาลอกให้กลับไปเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งข้อมูลไปติดต่อกับระบบควบคุมที่เป็นดิจิตอล เทคนิคในการแปลงสัญญาณนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่จะนำมาพิจารณาสำหรับแต่ละเทคนิค เช่น ราคา ความเร็ว และความเที่ยงตรงเป็นต้น

สำหรับทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในแปลงสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นวิธีการแปลงสัญญาณแอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิตอลอย่างง่ายๆ คือ การสร้างแรงดันอ้างอิงที่เปลี่ยนค่าได้จนกระทั่งได้ค่าแรงดันอินพุทที่มีค่าผิดพลาดไม่เกิน Quantization error ของคอนเวอร์เตอร์ ในแนวความคิดแล้วลอจิกของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลคือพยายามเลือกกลุ่มของสัมประสิทธิ์ไบนารี a_i เพื่อให้ผลต่างระหว่างแรงดันอินพุท Vx และค่าที่ Quantize ได้ครั้งสุดท้ายน้อยกว่า 0.5 LSB ดังสมการที่ (3.23) และสามารถแสดงหลักการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลในรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

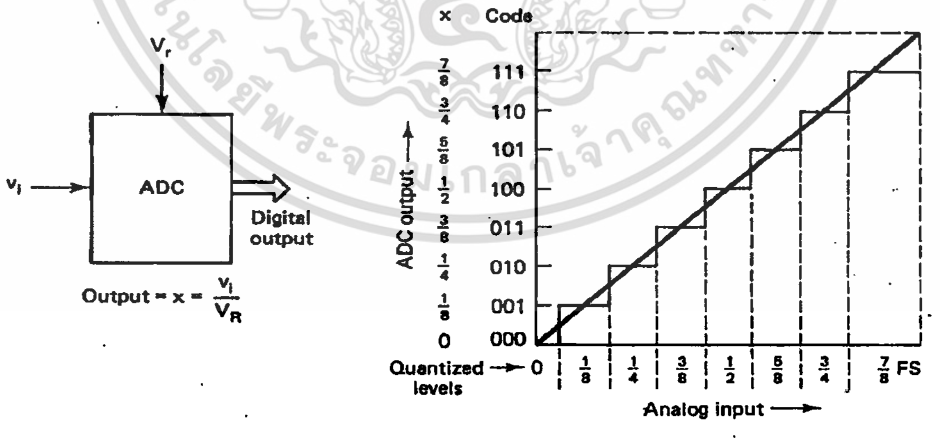
รูปที่ 3.8 พื้นฐานการแปลงสัญญาณ

(ก) หลักการพื้นฐานอย่างง่าย

(ข) ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของวงจรเปรียบเทียบ

$$\left|\left(V_x - V_{FSR}\sum_{i=1}^{n} a_i 2^i\right)\right| < 0.5LSB \qquad (3.23)$$

จากรูปที่ 3.9 (ก) สัญญาณเอาท์พุททีได้คือจำนวนอัตราส่วนของ V_i เมื่อเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_r) ในการแปลงสัญญาณเป็นรหัสเลขฐานสองที่สอดคล้องกับแรงดันอ้างอิงนั้นๆต่อเนื่องกันไป ซึ่งในทางอุดมคติแล้วการแปลงสัญญาณต่อเนื่องจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) เสมอ ดังแสดงการแปลงสัญญาณในรูปที่ 3.9 (ข) และสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็นสมการที่ (3.24)



(ก) (ข)

รูปที่ 3.9 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

(ก) โครงสร้างพื้นฐานของการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

(ข) การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 3 บิตในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = LSB = \frac{FS}{2^n} \qquad (3.24)$$

เมื่อ

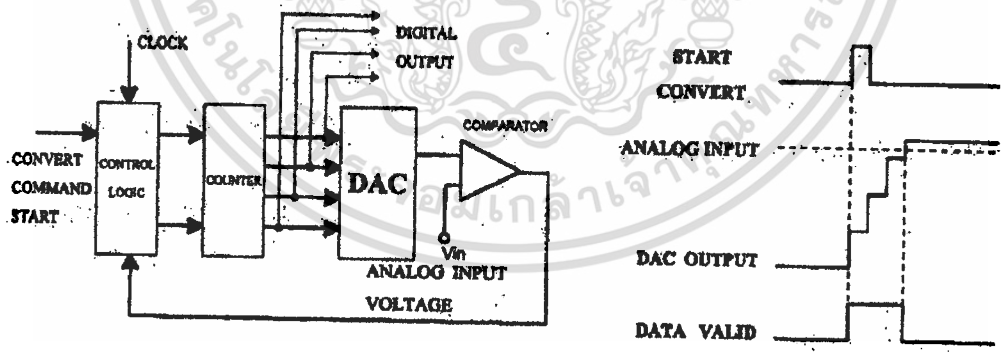
Q คือ ความละเอียดของการแปลงสัญญาณ

LSB คือ ค่าความห่างระหว่างสัญญาณแอนาลอกต่อ 1 ระดับแรงดันสัญญาณ

FS คือ ระดับอินพุทแอนาลอกเต็มสเกล (Full-scale analog input) ที่วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลรับได้

สามารถแบ่งลักษณะหรือชนิดของการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลได้ตามลักษณะต่างๆได้ดังนี้

3.1.2.1 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ Counter type การจัดวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลในลักษณะนี้เป็นแบบที่ใช้งานง่ายที่สุด ซึ่งแสดงการทำงานในรูปที่ 3.10 จาก Block diagram ในรูปที่ 3.10 (ก) จะเห็นว่าส่วนประกอบที่สำคัญ คือส่วนควบคุม ลอจิก (logic control) ซึ่งจะควบคุมการทำงานในการแปลงสัญญาณ นั่นคือเป็นการกำหนดให้ส่วนนับจำนวนพัลส์ (pulse counter) เพื่อกำหนดสัญญาณดิจิตอลให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก ซึ่งจะทำหน้าที่รับค่าดิจิตอลจากวงจรนับมาสร้างเป็นสัญญาณอนาลอกมาเปรียบเทียบกับสัญญาณแอนาลอกที่ต้องการแปลงสัญญาณนั้น สำหรับวงจรเปรียบเทียบจะเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณ เมื่อสัญญาณมีค่าเท่ากันที่เอาท์พุทของวงจรเปรียบเทียบจะมีค่าเป็น "0" เพื่อหยุดการนับจำนวนพัลส์ซึ่งก็คือค่าดิจิตอลที่ได้คือค่าที่เหมาะสมของสัญญาณแอนาลอกที่ต้องการแปลง



(ก) (ข)

รูปที่ 3.10 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Counter type

(ก) ผังการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

(ข) ลำดับการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

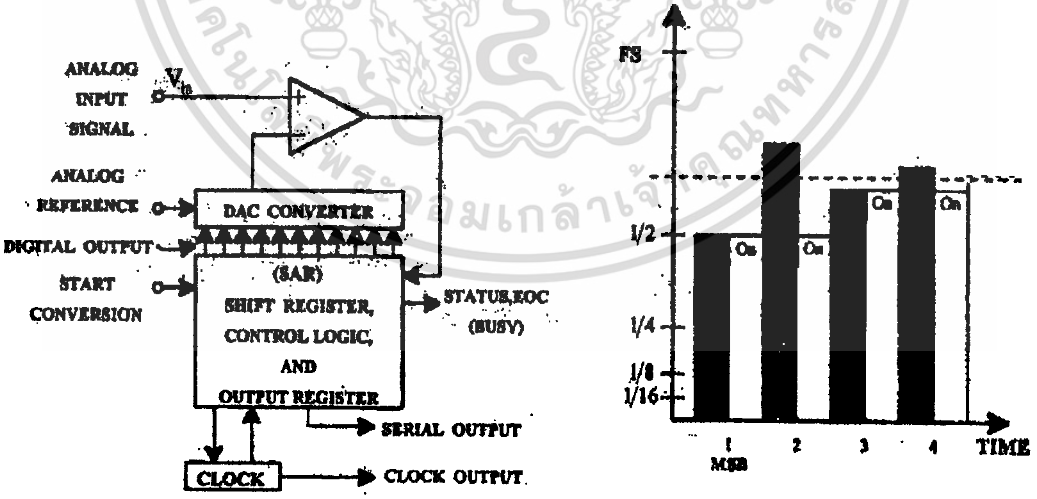
หลักการทำงานของวงจรคือ การเปรียบเทียบขนาดแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกกับสัญญาณแอนาลอกที่เข้ามา การทำงานจะเริ่มโดยมีการส่งสัญญาณ Start ให้กับส่วนควบคุมลอจิกซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นทำการรีเซ็ตวงจรนับให้เป็น "ศูนย์" และเริ่มนับ ดังนั้นที่เอาท์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกจึงเป็นระดับแรงดันที่เป็นแบบขั้นบันไดจนกระทั่งสัญญาณนี้มีค่าแตกต่างกับสัญญาณอินพุทที่เป็นสัญญาณแอนาลอกไม่เกิน 1 LSB ที่เอาท์พุทของวงจรเปรียบเทียบจึงเปลี่ยนสถานะจาก "1" เป็น "0" ทำให้หยุดการแปลงสัญญาณหนึ่งครั้ง และรอการเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง สำหรับข้อเสีย คือทำงานได้ช้าเพราะว่าการแปลงสัญญาณแต่ละครั้งวงจรนับจะถูกรีเซ็ตให้เป็นศูนย์ และการเริ่มต้นครั้งต่อไปจะเริ่มจากศูนย์เช่นกัน ซึ่งในการแปลงที่มีขนาด n บิตแล้วจะใช้จำนวนสัญญาณนาฬิกา เพื่อเปลี่ยนให้ค่าสูงสุดเต็มสเกล ข้อดี คือ สร้างได้ง่ายรวดเร็วราคาถูก แต่ความแม่นยำขึ้นอยู่กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกที่ใช้

3.1.2.2 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Successive Approximation การทำงานของวงจรชนิดนี้เป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่มีความต้องการแปลงสัญญาณที่ความเร็วสูงและปานกลาง การจัดวงจรจะคล้ายกับแบบ Counter type คือ มีการป้อนกลับจากเอาท์พุทของ วงจรเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถแสดงการทำงานของระบบได้ในรูปที่ 3.11 โดยมีผังการทำงานในรูปที่ 3.11 (ก) การเปรียบเทียบสัญญาณอินพุทกับเอาท์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก เพื่อไปควบคุม Successive Approximation Register (SAR) ซึ่งเป็น IC MSI ที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษเพื่อทำหน้าที่นี้โดยเฉพาะ การทำงานของ SAR เป็นดังนี้

จากรูปที่ 3.11 (ข) แสดง Timing Diagram ของการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล จะมีความสำคัญอยู่ที่ SAR ซึ่งจะเป็นตัวประมาณค่าดิจิตอลที่ใช้แทนค่าแอนาลอกของสัญญาณอินพุทมีลำดับการทำงานดังนี้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.11 การแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ Successive Approximation

(ก) ผังการทำงาน

(ข) Timing ของวิธีการแบบ Successive Approximation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมื่อมีสัญญาณ Start วงจรส่วน SAR จะทำการรีเซ็ตค่าของดิจิตอลที่จ่ายให้แก่ส่วนวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกและเริ่มการประมาณค่าสัญญาณแอนาลอกที่ clock ลูกแรกหลังจากได้รับสัญญาณ start ด้วยการแทนบิตที่ป้อนให้แก่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกที่ MSB มีค่าเป็นลอจิก "1" (บิตที่เหลือจะมีค่าเป็น "0") ถ้าค่าที่ได้จากแอนาลอกที่ได้จากค่า ADC มีค่าสูงกว่าค่าแอนาลอกของวงจรเปรียบเทียบจะให้ระดับศักดาไฟฟ้าที่ทำให้การรีเซ็ทค่า MSB ให้มีค่าเป็น "0" และถ้าค่าของแอนาลอกที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกมีค่าต่ำกว่าค่าแอนาลอกที่เป็นอินพุทของ SAR จะคงค่าบิตนั้นไว้ที่ระดับลอจิก "1" (พิจารณาจากรูป)

2. เมื่อ clock ลูกที่ 2 เข้ามายัง SAR จะทำการประมาณค่าบิตที่ MSB-1 ด้วยการแทนที่ระดับลอจิกที่ 1 ให้แกบิต MSB-1 แต่ถ้าเอาท์พุทที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าอินพุท ซึ่งจะเหมือนในระดับแรก ดังนั้นที่ SAR จะคงบิต MSB-1 ไว้ที่ระดับ "1" ค้างไว้ แต่ทำการเปรียบเทียบครั้งต่อไปมีค่าน้อยกว่าจะทำการรีเซ็ตบิต MSB-1 ให้มีค่าเป็นระดับลอจิก "0"

3. การประมาณค่าบิตจะกระทำไปจนกว่าถึงการประมาณค่าบิตที่ LSB โดยมีลำดับการประมาณค่าจากบิตก่อนๆ

ข้อจำกัดประการหนึ่งสำหรับการแปลงสัญญาณ คือ สัญญาณแอนาลอกอินพุทจะต้องคงที่ในช่วงเวลาที่ทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ โดยเปลี่ยนได้ไม่เกิน 0.5 LSB ในช่วงสุดท้ายของการเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเอาท์พุทที่ออกมาขนานกันทุกบิตแต่บางแบบจะให้เอาท์พุทออกมาในลักษณะอนุกรม

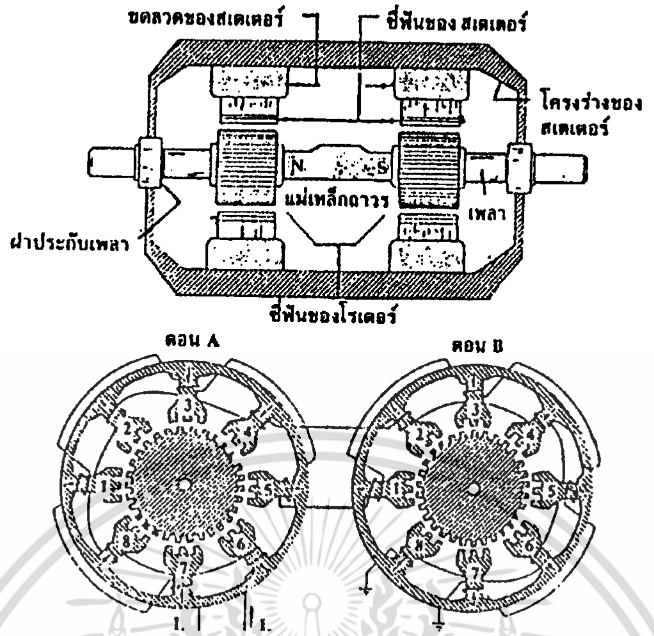
วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบนี้สามารถทำงานได้สองโหมด คือ โหมดที่ทำงานอิสระ (Free run) และโหมดที่รอคำสั่ง Start Conversion จากภายนอก เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณใช้ (n+1) พัลส์ของสัญญาณนาฬิกาที่พัลส์แรกจะใช้การรีเซ็ตรีจิสเตอร์ภายใน คุณภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกและวงจรเปรียบเทียบ

3.2 อุปกรณ์ภายนอก

3.2.1 อุปกรณ์เคลื่อนที่เป็นสเตป หรือสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์

สเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณลักษณะผสมของระหว่างสเตปปิ้งมอเตอร์ ชนิดแม่เหล็กถาวร และ ชนิดรีลัคแต้นซ์แปรค่าได้ มีโครงสร้างในรูปที่ 3.16 แสดงถึงโครงสร้างของสเตปปิ้งมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวร 2 ตอนกับแกนแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 2 ตอน แต่ละตอนประกอบด้วยซี่ฟันของโรเตอร์และโพลของสเตเตอร์ที่มีซี่ฟันเช่นกันและพันด้วยขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

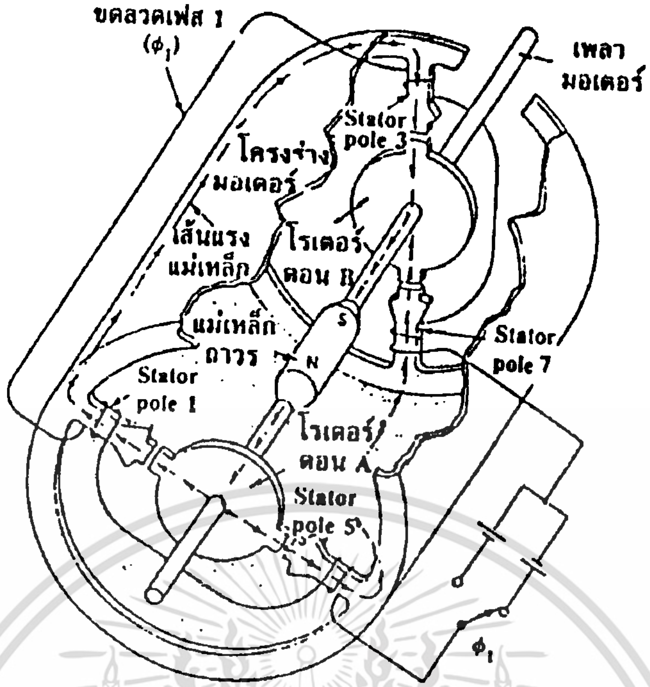


รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างของไฮบริดจ์สเตปปิ้งมอเตอร์

รายละเอียดของลักษณะโครงสร้างของไฮบริดจ์สเตปปิ้งมอเตอร์มีดังนี้

1. จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่เท่ากัน
2. ตอน A และตอน B มีโครงสร้างเหมือนกัน
4. ซี่ฟันของสเตเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะอยู่ในแนวเดียวกันอย่างถูกต้อง
5. ส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน $(1/2)P_r$ (ในรูปที่ 3.12 กำหนดให้ $P_r = (360^\circ/30) = 12^\circ$ ดังนั้น ตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะต่างกัน 6°)
6. สเตเตอร์ของแต่ละตอนมี 8 โพลแบ่งออกเป็น 2 สเตเตอร์
7. เฟสที่ 1 พันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 1, 3, 5 และ 7 ของทั้งตอน A และ B
8. เฟสที่ 2 พันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 2, 4, 6 และ 8 ของทั้งตอน A และ B
9. แกนแม่เหล็กถาวรเหนี่ยวนำโรเตอร์ในตอน A ให้เป็นขั้วเหนือ และในตอน B เป็น ขั้วใต้ ทิศทางเดินของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเฟส อธิบายได้ดังในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรแม่เหล็กของสเตปปิ้งมอเตอร์แบบไฮบริดจ์

จากรูปที่ 3.13 เป็นการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ คือ เมื่อเฟส 1 ได้รับพลังงานจากกระแส I_1 (ϕ_1) ในทิศทางตามลูปลูกศร ซี่ฟันของโรเตอร์ตอน A จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของสเตเตอร์ในโพลที่ 1 และ 5 ส่วนตอน B จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของโพลที่ 3 และ 7 เพื่อให้เพลาของมอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CW เราต้องหยุดการป้อนกระแส I_1 และป้อนกระแส I_2 ให้กับเฟสที่ 2 (ϕ_2) ดังนั้นเราจะต้องป้อนกระแส I_2 ในทิศทางที่ถูกต้อง คือ โพลที่ 4, 8 ในตอน A และโพลที่ 2, 6 ถูกเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดวงจรแม่เหล็กที่สมบูรณ์ในกรณีนี้ I_2 จะเป็นลบ จากรูปที่ 3.13 เป็นการลำดับการสวิตช์ (ให้กระแสไหล) ให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CW จำนวน 4 สเตป ซึ่งแสดงถึง ตำแหน่งของโรเตอร์และทิศทางการเป็นแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลในแต่ละตอนด้วยการกำหนดทิศทางการไหลของกระแสเฟส สำหรับการหมุนในทิศทาง CW จะเป็นไปตามรูป เราสามารถกำหนดลำดับของกระแสดังนี้ คือ 1^+, 2^-, 1^- และ 1^+ แต่ถ้าหากต้องการให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CCW ก็จะต้องเรียงลำดับการจ่ายกระแสตามนี้ 1^+, 2^+, 1^-, 2^- และ 1^+

สัญญาณควบคุมสำหรับสเตปมอเตอร์จะเป็น Low power ตระกูล TTL แต่สเตปปิ้งมอเตอร์ต้องกระตุ้นด้วยแรงดัน 5 V และกระแส 3 A จึงจำเป็นต้องใช้วงจรควบคุมการเชื่อมต่อซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวการเชื่อมต่อ เพราะฉะนั้นวงจรขับจึงเป็นแบบพื้นฐานที่สามารถเชื่อมต่อกับวงจรจัดลำดับได้ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การขับแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive) และการขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive)

3.2.1.1 วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipola Drive Circuit) วงจรขับนี้เป็นการขับที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นวงจรขับสำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้ที่ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเฟสที่ถูกกระตุ้นจะถูกแยกเป็นอิสระกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสัญญาณการกระตุ้นเรียกว่า สัญญาณควบคุมเฟส (Phase Control Signal) จากรูปขดลวดถูกกระตุ้นได้จากการสวิตช์ปิดของทรานซิสเตอร์ในลักษณะอิ่มตัว (Saturated) แหล่งจ่ายไฟดีซีจะตกคร่อมขดลวดและ forcint resistance ซึ่งทำให้เกิดกระแสเต็มพิกัดที่ขดลวดต้องการเป็นไปตามสมการที่ (3.25) และสำหรับการพันแบบไบฟิลาร์ แต่ใช้วงจรขับแบบโมโนโพลาร์ แสดงในรูปที่ 3.15

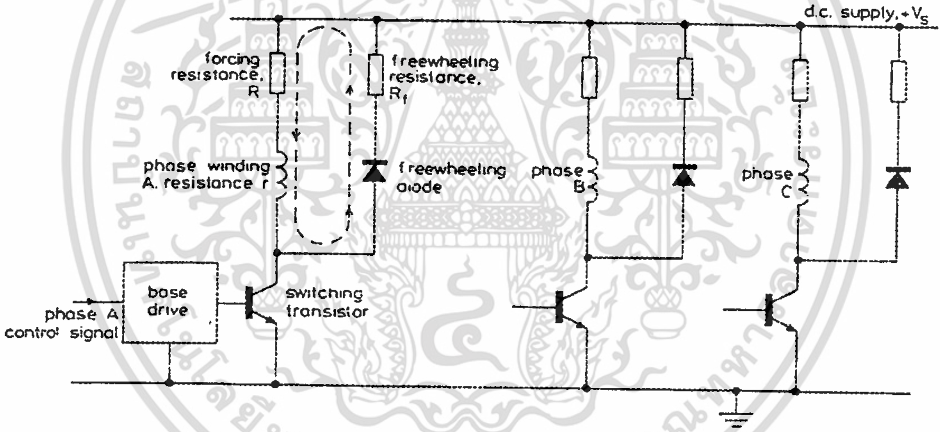
$$V_S = I(r+R) \qquad (3.25)$$

V_S = แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์

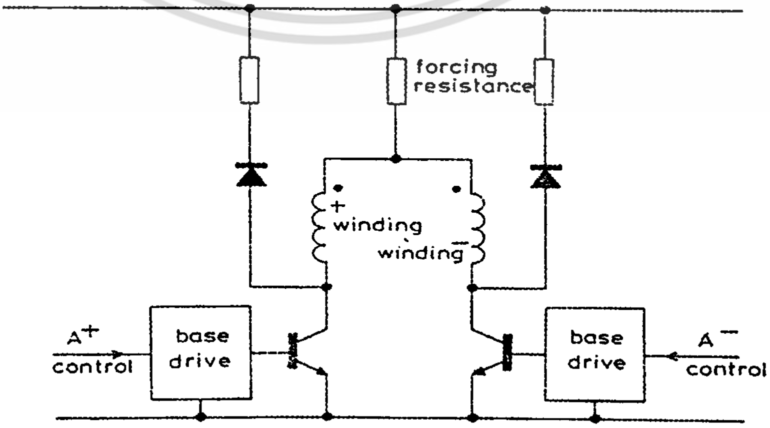
I = กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์

r = ความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟส

R = ความต้านทานของตัวต้านทานที่นำมาต่ออนุกรม



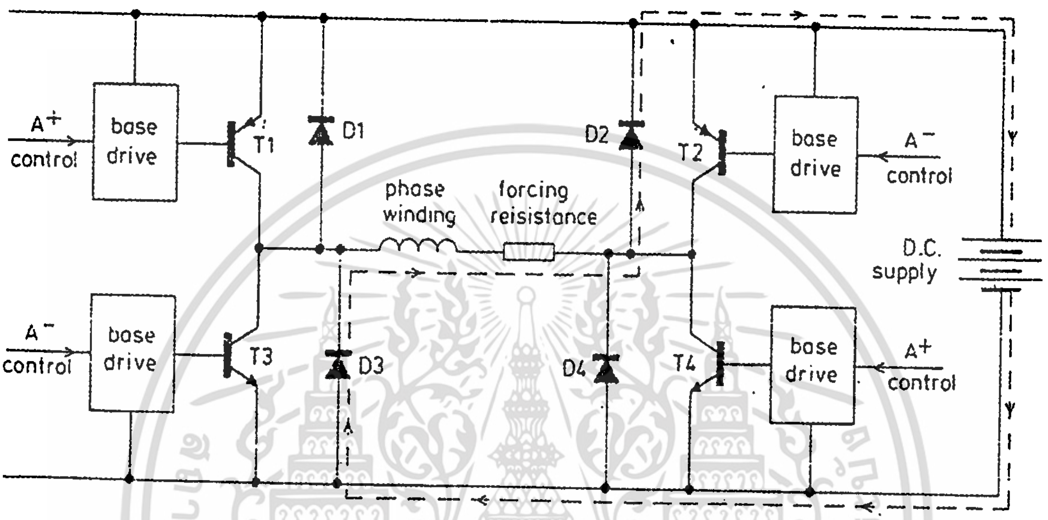
รูปที่ 3.14 วงจรขับแบบขั้วเดียว



รูปที่ 3.15 วงจรขับสำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบฟิลาร์และใช้การขับแบบโมโนโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 วงจรขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive Circuit) การขับในลักษณะของหนึ่งเฟสแต่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสให้เข้าขดลวดของสเตปปิ้งมอเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกได้จากการให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นคู่ แสดงได้ในรูปที่ 3.16 จากรูปต้องป้อนพัลส์แบบบวกให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ชนิด เอนพีเอน (NPN) ที่ต้องการให้ทำงานหรือนำกระแส และป้อนสัญญาณพัลส์แบบลบให้ทรานซิสแตอร์ชนิด พีเอนพี (PNP) ทั้งสองตัวต้องนำกระแสพร้อมกันตามทิศทางการไหลของกระแสที่ใช้เส้นประแสดงทิศทาง



รูปที่ 3.16 วงจรขับแบบสองขั้ว

3.2.2 การกระตุ้นขดลวดให้โรเตอร์เคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ

3.2.2.1 การกระตุ้นให้ขดลวดทำงานสเตปละหนึ่งเฟส (Full step one phase excitation)

ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส (one phase excitation) จากตารางที่ 3.2 เป็นการแสดงลำดับการกระตุ้นในแบบหนึ่งเฟสสำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ที่มี 3 เฟส และ 4 เฟส ในเส้นแรงเงาในตารางแสดงถึงเฟสที่ถูกกระตุ้น เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนลำดับของการกระตุ้นของเฟสต่าง ๆ เป็นดังนี้ คือจากเฟส 1 ไปเฟส 2 และเฟส 3 เป็นลักษณะ CW ถ้าต้องการให้หมุนในทางกลับกันก็ต้องกระตุ้นจากเฟส 3 ไปเฟส 2 และเฟส 1 การทำงานในลักษณะนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่า เป็นการขับแบบทีละเฟสในโหมดหนึ่งสเตปหรือเต็มสเตป

3.2.2.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติกระตุ้นแบบสองเฟส (two phase excitation ode)

การทำงานของมอเตอร์ในลักษณะนี้เรียกว่า การทำงานทีละสองเฟส ซึ่งมีลำดับการกระตุ้นดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างตัวโรเตอร์และสเตเตอร์ในการเกิดตำแหน่งที่สมดุลย์กัน จากตารางที่ 3.3 เป็นลำดับการกระตุ้นที่ใช้สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 3 และ 4 เฟส การทำงานคือ เมื่อเรากระตุ้นเฟสที่ 1 และ 2 ด้วยพัลซ์ที่ 1 ตำแหน่งแกนจะอยู่ในสภาวะสมดุล์และเมื่อพัลซ์ที่ 2 เข้ามาจะไปกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เฟสที่ 3 ทำงานและเฟสที่ 1 หยุด ในขณขณะที่เฟสที่ 2 ยังคงทำงานค้างอยู่ นั่นคือจะมีอยู่ 2 เฟสที่ทำงานพร้อมกัน จะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปครั้งละหนึ่งสเตป ซึ่งการเกิดลักษณะนี้เป็นการกระตุ้นในโหมดหนึ่งสเตป

ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการขับในโหมดการทำงานแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส
(ก) สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 3 เฟส
(ข) สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับจำนวนพัลส์	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on			on			on		
ขดลวดเฟสที่ 2			on			on			on	
ขดลวดเฟสที่ 3				on			on			on

(ก)

ลำดับจำนวนพัลส์	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on				on			
ขดลวดเฟสที่ 2			on				on		
ขดลวดเฟสที่ 3				on				on	
ขดลวดเฟสที่ 4					on				on

(ข)

3.2.2.3 ลำดับการทำงานในโหมดการเคลื่อนที่ครึ่งสเตป (half step excitation)

การกระตุ้นในลักษณะนี้จะเป็นการรวมเอาการขับแบบกระตุ้นให้นำกระแสครั้งละเฟสและสองเฟสมารวมกัน นั่นคือจะทำให้การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปครั้ง ครึ่งสเตปปกติที่โครงสร้างของมอเตอร์นั้นๆ ออกแบบไว้ เช่น ถ้าสมมุติว่าเป็นสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ ที่มีขนาดมุมสเตปละๆ 1.8 องศา เมื่อนำมาขับแบบครึ่งสเตปจะทำให้ได้ความละเอียดของมุมสเตปมากขึ้นหนึ่งเท่าตัวได้ ดังแสดงลำดับการกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องในตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

การกระตุ้นให้ขดลวดของสเตปปิ้งมอเตอร์นำกระแสแตกต่างกันออกไปซึ่งแล้วแต่การนำไปใช้งาน เช่น การคำนึงถึงกระแสที่ขดลวดต้องการ แรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสซึ่งหมายถึงการสร้าง Power supply เพื่อเป็นตัวจ่ายกำลังงานให้กับขดลวดของสเตปปิ้งมอเตอร์ ความละเอียดของมุมสเตปในการเคลื่อนที่แต่ละสเตป และแรงขับให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ผู้ใช้ต้องการ เช่น การสเตปปิ้งมอเตอร์ใช้แรงขับเพื่อดึงกระดาษเข้าหรือออกจาก เครื่องถ่ายเอกสาร หรือเครื่องตรวจข้อสอบเป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การเลือกขนาดมอเตอร์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส

(ก) สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 3 เฟส

(ข) สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับจำนวนพัลส์	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on		on	on		on	on		on
ขดลวดเฟสที่ 2		on	on		on	on		on	on	
ขดลวดเฟสที่ 3			on	on		on	on		on	on

(ก)

ลำดับจำนวนพัลส์	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on			on	on			on	on
ขดลวดเฟสที่ 2		on	on			on	on			on
ขดลวดเฟสที่ 3			on	on			on	on		
ขดลวดเฟสที่ 4				on	on			on	on	

(ข)

ตารางที่ 3.4 แสดงลำดับการกระตุ้นในโหมดครึ่งสเตป

ลำดับจำนวนพัลส์	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on						on	on	on
ขดลวดเฟสที่ 2		on	on	on						on
ขดลวดเฟสที่ 3				on	on	on				
ขดลวดเฟสที่ 4						on	on	on		

3.2.3 มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current motor)

มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current Motor) ที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปมี 2 ประเภทใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ แบบที่ไม่มีแปลงถ่าน (Brushless DC Motor) และแบบที่มีแปลงถ่าน การแยกประเภทของดีซีมอเตอร์ ซึ่งเป็นการแบ่งตามวิธีการสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น และการออกแบบโครงสร้างภายในของอาร์มาเจอร์ สำหรับดีซีมอเตอร์ที่มีการแยกกระตุ้นสนามแม่เหล็กแบ่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

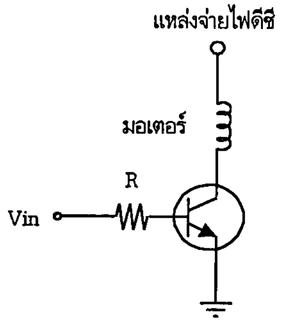
1. มอเตอร์กระแสตรงแบบปรับเส้นแรงแม่เหล็กกระตุ้นได้ สามารถแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบขอลวดแม่เหล็กต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์มาเจอร์ ดีซีมอเตอร์นี้จะใช้งานสภาวะเฉพาะเมื่อต้องการแรงบิดสูง ที่ความเร็วต่ำ และแบบขดลวดแม่เหล็กกระตุ้นแยกกระตุ้น จะใช้งานได้ดีที่แรงบิดต่ำที่ความเร็วสูง
2. มอเตอร์กระแสตรงแบบเส้นแรงแม่เหล็กกระตุ้นคงที่ ส่วนใหญ่ปัจจุบันพบเห็นกันอยู่ทั่วไป ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะให้อัตราส่วนระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงบิดคงที่ และไม่มีกำลังสูญเสียในฟิลส์กระตุ้น มีขนาดเล็กแต่มีประสิทธิภาพสูง
3. มอเตอร์กระแสตรงแบบอาร์มาเจอร์เป็นแกนเหล็ก มีโครงสร้างแบบโมเมนต์ของแรงเฉื่อยสูงที่สุดและมีค่าอินดักแต้นซ์ของโรเตอร์สูงสุดด้วย ดังนั้นมอเตอร์กระแสตรงชนิดนี้จึงมีปริมาณการจุความร้อนได้สูง และทนการเกิดโอเวอร์โหลดได้ในระยะนานๆ โดยไม่เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์
4. มอเตอร์กระแสตรงแบบอาร์มาเจอร์ที่มีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว มอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีสล็อตทำให้ได้อินดักแต้นซ์ของโรเตอร์ต่ำกว่าแกนเหล็ก ข้อเสียคือทำให้ขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้นและราคาแพงกว่าแบบแกนเหล็ก
5. มอเตอร์กระแสตรงแบบอาร์มาเจอร์เป็นขดลวดหมุน ได้รับการออกแบบเพื่อให้มีโมเมนต์ของแรงเฉื่อยน้อยและรูปลักษณ์โครงสร้างภายนอกที่เหมาะสม คือ โครงสร้างภายนอกและโครงสร้างของแม่เหล็ก แบบมีช่องว่างอากาศระหว่างแม่เหล็กมากกว่า มอเตอร์หัวข้อที่ 3 และ 4 การออกแบบจึงทำให้โครงสร้างแม่เหล็กให้ใหญ่ขึ้น เพื่อให้ช่องว่างของอากาศระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากันกับมอเตอร์ แบบดังกล่าว ดังนั้นราคามอเตอร์แบบนี้จึงแพง ข้อเสียคือโรเตอร์มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ หากเกิดโอเวอร์โหลดขึ้นอาจทำให้เสียหายได้ง่าย

3.2.3.1 การขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

การขับดีซีมอเตอร์ สามารถสร้างวงจรขับได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ใช้งานโดยทั่วไปมี 2 ประเภทด้วยกันคือ การขับแบบเชิงเส้น (Linear Amplify Driver) ซึ่งมักจะเรียกว่า Linear Drive และการขับแบบพัลส์วิดท์มอด (Pulse Width Modulation Amplify Driver) ซึ่งมักจะเรียกว่า PWM ทั้งสองแบบมีหลักการทำงานดังนี้

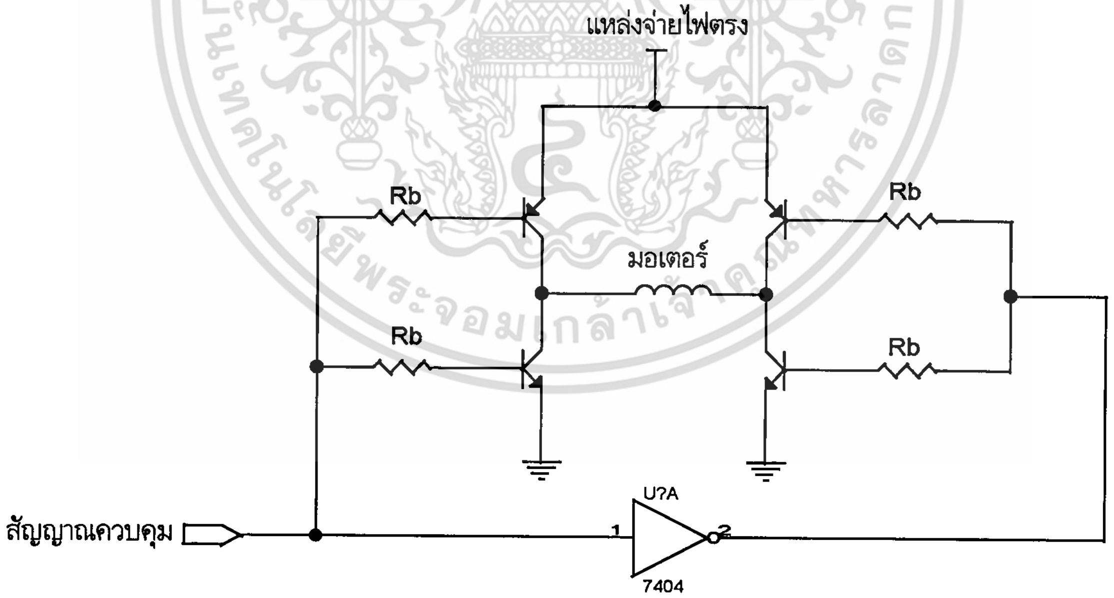
1. การขับแบบเชิงเส้น เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสของมอเตอร์ โดยบังคับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นมักจะเป็นตัวลดแรงดันไฟฟ้ามากกว่า ซึ่งเท่ากับผลต่างของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและแรงดันที่มอเตอร์ใช้งานจริงในขณะที่มีกระแสเหมาะสมไหลผ่าน กำลังสูญเสียในเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์จะมีมาก โดยเฉพาะขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนที่ความเร็วต่ำขณะที่ใช้แรงบิดสูง ขณะนั้นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์ต่ำทำให้กระแสสูง สามารถแสดงวงจรได้ในรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรขับแบบเชิงเส้นอย่างง่าย

2. การขับแบบพัลส์วิดท์มอด (Pulse Width Modulation) ซึ่งการควบคุมดีซีมอเตอร์ วงจรขยายสัญญาณมีหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแส ดังนั้นจากหัวข้อที่ 1 เราทราบถึงข้อเสียของการขับแบบเชิงเส้นแล้วทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่เอาท์พุทของทรานซิสเตอร์มาก การขับแบบพัลส์วิดท์มอดจึงเป็นการลดการสูญเสียนี้ โดยการปรับกระแสให้กับมอเตอร์ด้วยการเปลี่ยนแปลง Duty Cycle ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่มอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมและสามารถควบคุมความเร็วต่ำๆ และให้แรงบิดสูงได้โดยเกิดการสูญเสียน้อย แสดงวงจรได้ในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.18 วงจรขับแบบพัลส์วิดท์มอดอย่างง่าย

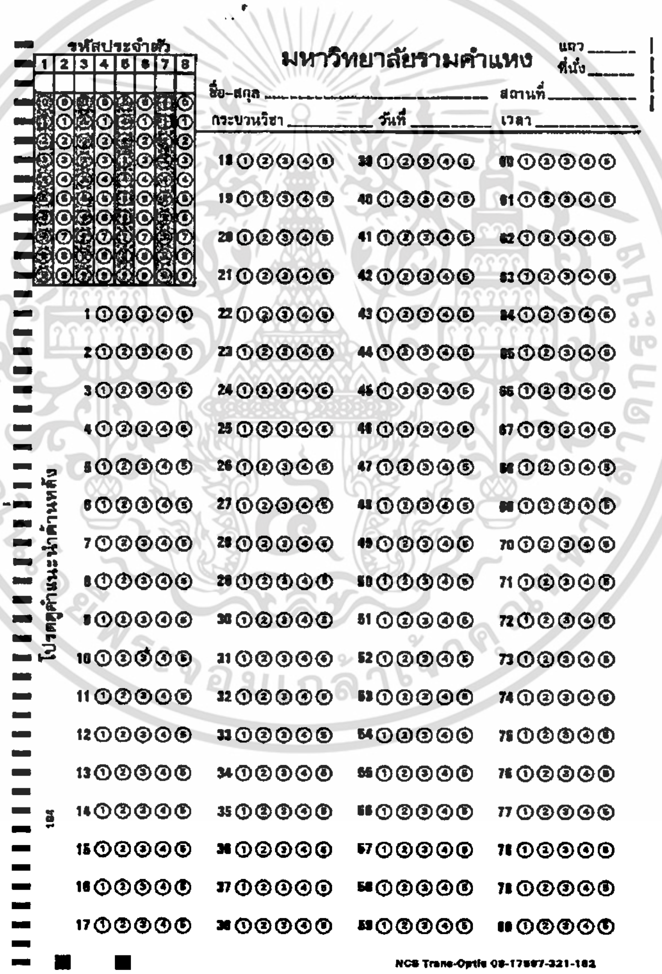
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบเครื่องตรวจข้อสอบ

ในการออกแบบเครื่องตรวจข้อสอบแบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆได้แก่ ส่วนแรกเป็นการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบรวมทั้งโปรแกรมการทำงาน และส่วนที่สองเป็นการออกแบบเชิงกลของเครื่องตรวจข้อสอบซึ่งเป็นส่วนของการลำเลียงกระดาษผ่านหัวอ่านการฝนดินสอด้วยแสงอินฟราเรด

4.1 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ

จากแบบของกระดาษคำตอบที่ใช้กับเครื่องตรวจข้อสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1



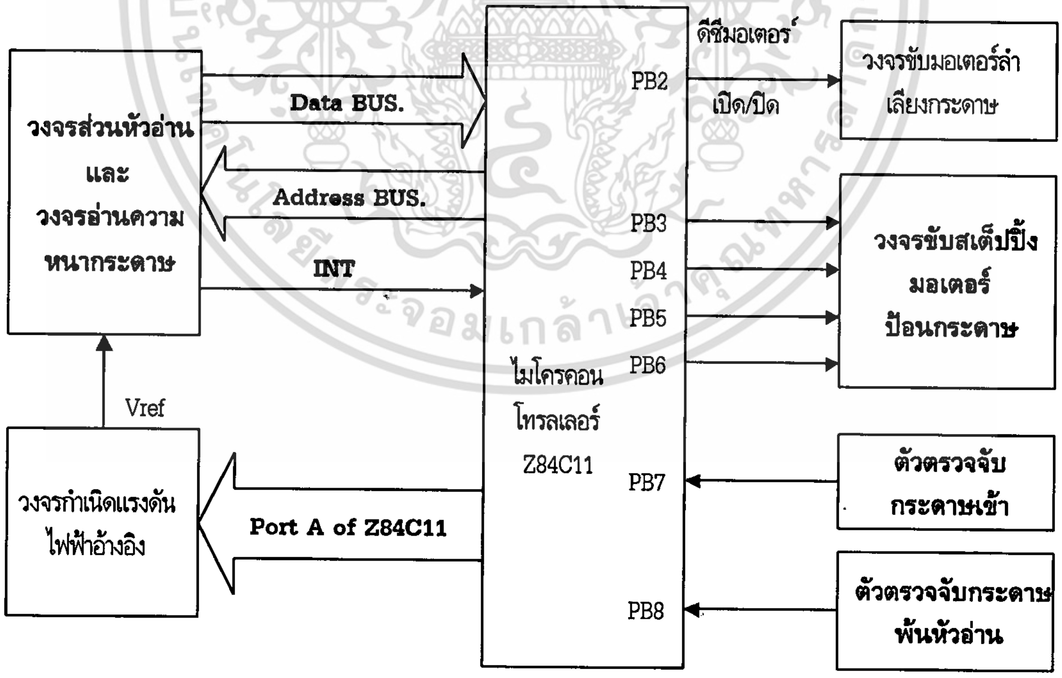
รูปที่ 4.1 กระดาษคำตอบที่ใช้กับเครื่องตรวจข้อสอบ

ส่วนประกอบของกระดาษคำตอบมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แถบดำสำหรับใช้อ้างอิง (Timing Mark) จะอยู่ที่ขอบของกระดาษด้านใดด้านหนึ่งจากรูปที่ 4.1 จะอยู่ด้านซ้ายมือจะใช้สำหรับเป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบในการอ่านคำตอบ
2. แถบบอกแบบของกระดาษคำตอบ มักจะอยู่ในตำแหน่งของแถบดำอ้างอิงแรกเสมอจากรูปที่ 4.1 จะอยู่ที่ตำแหน่งมุมล่างด้านซ้ายมือถัดจากแถบดำอ้างอิงจะใช้สำหรับให้เครื่องตรวจข้อสอบเลือกแบบกระดาษคำตอบที่เหมาะสมในกรณีที่มีฐานข้อมูลของแบบกระดาษคำตอบในเครื่องตรวจข้อสอบมีมากกว่าหนึ่งแบบ
3. ตำแหน่งสำหรับเลือกคำตอบ จะเป็นรูปวงกลมว่างให้ผู้ใช้ฝนดินสอภายในวงกลมนี้ระยะระหว่างวงกลมดังกล่าวจะมีระยะห่างเท่ากับ 166 mils. (1/1000 นิ้ว)

จากแบบของกระดาษคำตอบดังกล่าวจะเห็นว่าการที่จะออกแบบหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบจะต้องมีแนวของหัวอ่านตามแถบดำอ้างอิงซึ่งจะอยู่ในแนวด้านกว้างของกระดาษคำตอบจำนวนของตัวรับแสงอินฟราเรดจะเท่ากับจำนวนวงกลมตามแนวของแถบดำอ้างอิงซึ่งหัวอ่านที่จะออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้จำนวนของตัวรับแสงอินฟราเรดทั้งหมด 29 ตัว ซึ่งจะทำให้เครื่องตรวจข้อสอบตรวจแบบของกระดาษคำตอบที่นิยมใช้กันอยู่ได้ สำหรับวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบที่จะออกแบบนั้นสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผังของวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรทำงานหลักมีดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Z84C11)
2. วงจรของตัวตรวจจับตำแหน่งของกระดาษคำตอบและตรวจจับตำแหน่งแถบดำอ้างอิง
3. วงจรของหัวอ่านและวงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษคำตอบ
4. วงจรขับดีซีมอเตอร์ สำหรับขับกระดาษคำตอบให้เคลื่อนที่ผ่านหัวอ่าน
5. วงจรขับสเตปปิ้งมอเต๋อร์ เพื่อดึงกระดาษคำตอบให้ผ่านหัวผ่านครั้งละ 1 แผ่น

4.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Z84C11)

ในการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องตรวจข้อสอบด้วยแสงอินฟราเรดแบบทะลุผ่านจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ Z84C11 เนื่องจากมีส่วนสำหรับการใช้งานภายในของ Z84C11 เหมาะสมประกอบด้วย

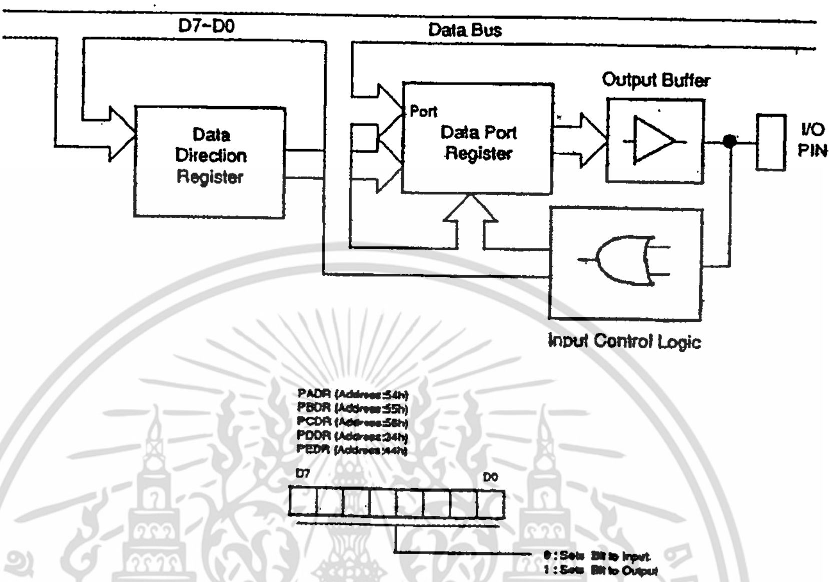
1. Z84C00 เป็นไมโครโพรเซสเซอร์เบอร์ Z80 ที่มีโครงสร้างภายในแบบ CMOS ทำงานที่ความถี่ 10 MHz.
2. Z84C30 เป็น Timer Counter ของ Z80 ที่มีโครงสร้างภายในแบบ CMOS ทำงานที่ความถี่ 10 MHz.
3. มี CGC (Clock Generator Control Circuit) เป็นตัวกำเนิดฐานเวลาให้กับ Z84C11
4. มีวงจร Watch Dog Timer
5. มี Power On Reset ซึ่งทำการรีเซ็ตไมโครโพรเซสเซอร์เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่ำกว่า 2.2 โวลต์
6. มีพอร์ตขนานขนาด 8 บิตจำนวน 5 พอร์ต

จากความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 ทำให้นำมาใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบได้โดยที่จะใช้อุปกรณ์ต่อร่วมน้อยทำให้วงจรมีเสถียรภาพมาก โดยจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์สำเร็จรูปที่มีจำหน่ายรุ่น CP-Z84C11 PLUS มีส่วนประกอบของแผ่นวงจ่รพิมพ์ดังนี้

1. หน่วยความจำที่สามารถใช้ได้ถึง 64 กิโลไบต์โดยแบ่งเป็นหน่วยความจำของ EPROM ขนาด 32 กิโลไบต์และหน่วยความจำชนิด RAM จำนวน 32 กิโลไบต์และมีแบตเตอรี่สำหรับสำรองข้อมูลของ RAM ขนาด 3.6 โวลต์
2. มีคอนเน็ตเตอร์สำหรับต่อออกของพอร์ตขนานทั้ง 5 ของ Z84C11 โดยมีตำแหน่งของพอร์ตดังนี้ พอร์ต A ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่ง 50H และ พอร์ต A ควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง 54H
พอร์ต B ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่ง 51H และ พอร์ต B ควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง 55H
พอร์ต C ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่ง 52H และ พอร์ต C ควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง 56H
พอร์ต D ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่ง 30H และ พอร์ต D ควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง 34H
พอร์ต E ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่ง 40H และ พอร์ต E ควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง 44H
ซึ่งพอร์ตของ Z84C11 สามารถโปรแกรมให้เป็นพอร์ตอินพุทหรือพอร์ตเอาท์พุทได้อย่างอิสระบิตต่อบิตโดยกำหนดได้ที่ตำแหน่งควบคุมของแต่ละพอร์ต ถ้าบิตใดในตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ตควบคุมมีค่าลอจิกเป็น "1" พอร์ตข้อมูลในบิตนั้นจะทำหน้าที่เป็นบิตเอาท์พุทซึ่งมีค่าเริ่มต้นของพอร์ตข้อมูลเป็นลอจิก "0" และกำหนดให้พอร์ตควบคุมแต่ละบิตมีค่าลอจิกเป็น "0" จะทำให้พอร์ตข้อมูลในบิตตำแหน่งนั้นจะทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุทในรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของพอร์ตดังกล่าว

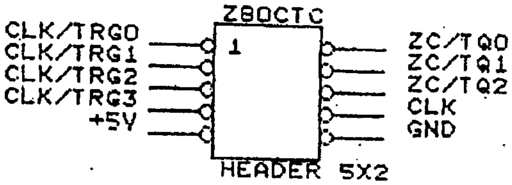


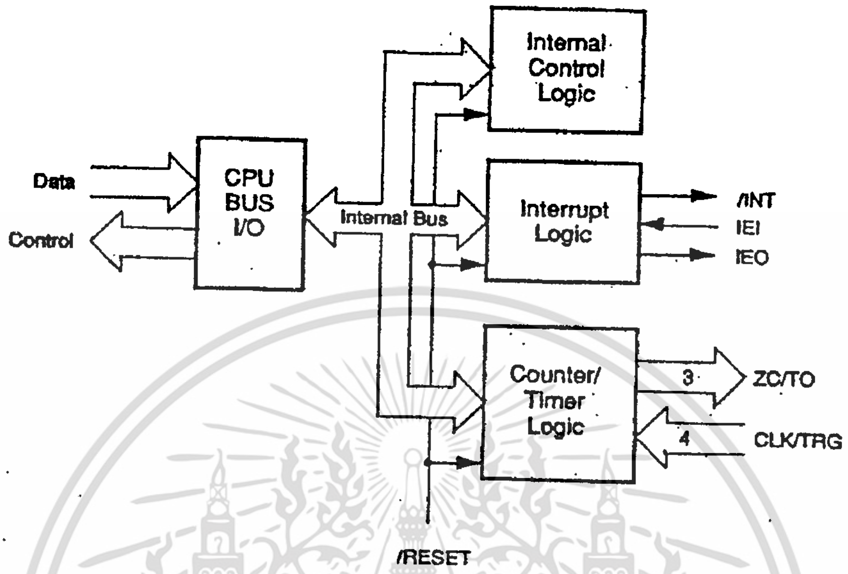
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของพอร์ตภายใน Z84C11

3. มีคอนเนตเตอร์สำหรับต่อขยายสัญญาณบัสของ Z80 โดยมีตำแหน่งเช่นเดียวกับขาของ Z80
4. มีคอนเน็ตเตอร์สำหรับต่อสัญญาณออกของ CTC ของ Z84C11 ที่มีจำนวนสี่ช่องสัญญาณ มีตำแหน่งดังนี้ ช่องสัญญาณ 0 อยู่ที่ตำแหน่ง 10H
   ช่องสัญญาณ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง 11H
   ช่องสัญญาณ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง 12H
   ช่องสัญญาณ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง 13H

   ในรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างภายในของ CTC
5. มีคอนเนตเตอร์สำหรับต่อสัญญาณการส่งข้อมูลแบบ RS-232 โดยจะต่อเข้ากับบิต 6 และบิต 5 ของพอร์ต E สำหรับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ในระบบ RS-232
6. มีคอนเน็ตเตอร์สำหรับต่อกับอุปกรณ์แสดงผลแบบ LCD ทั้งแบบชนิดตัวอักษรและแบบ Graphic โดยมีตำแหน่งการใช้งานดังนี้ การสร้างสัญญาณ WR ให้กับ LCD อยู่ที่ตำแหน่ง 80H, การเขียนข้อมูลให้กับ LCD อยู่ที่ตำแหน่ง 82H, การอ่านสภาวะของ LCD อยู่ที่ตำแหน่ง 84H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



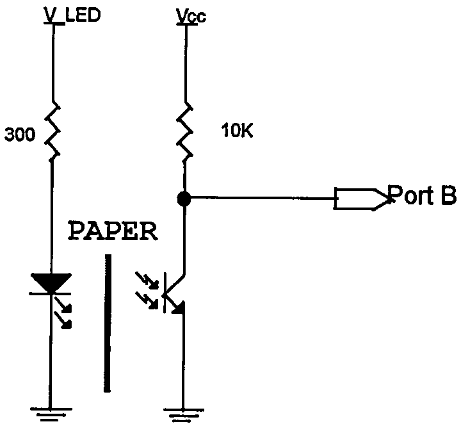


รูปที่ 4.4 โครงสร้างภายในของ CTC ใน Z84C11

4.1.2 วงจรตัวตรวจจับตำแหน่งของกระดาษคำตอบและตรวจจับตำแหน่งแถบอ้างอิง

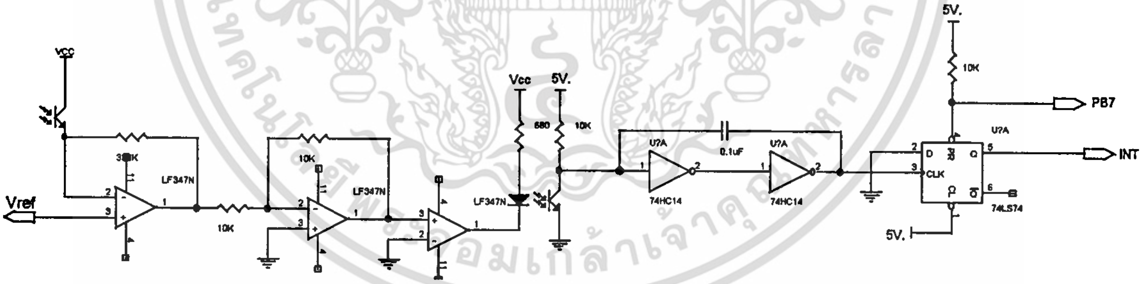
สำหรับการตวจจับตำแหน่งของกระดาษเป็นจุดแรกเพื่อทำการวัดความหนาของกระดาษใช้สำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับหัวอ่าน เมื่อได้ค่าความหนาของกระดาษ สเตปปิ้งมอเตอร์จะดึงกระดาษให้เคลื่อนที่ผ่านหัวอ่านเพื่อเก็บข้อมูล หลังจากนั้นกระดาษจะเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจจับแถบอ้างอิงเพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลที่หัวอ่านวัดได้ ถ้าหากเกิดการผิดพลาด ณ.ตำแหน่งนี้เครื่องตรวจข้อสอบจะฟ้องถึงข้อมูลของกระดาษคำตอบแผ่นนี้ผิดพลาดและหยุดการตรวจชั่วคราวพร้อมกับแสดงหน้าจอให้ผู้ใช้เครื่องตรวจข้อสอบนำกระดาษคำตอบแผ่นนี้ออกจากเครื่อง และทำการตรวจกระดาษแผ่นต่อไปสามารถอธิบายได้ดังนี้ การวางตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งได้แก่ตำแหน่งที่กระดาษคำตอบเริ่มผ่านเข้าลูกยางดึงกระดาษชุดแรกเพื่อที่จะอ่านความหนาของกระดาษคำตอบก่อนที่จะผ่านเข้าสู่หัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบและอีกตำแหน่งได้แก่ตำแหน่งหลังจากผ่านหัวอ่านแล้วใช้สำหรับตรวจสอบความผิดพลาดของหัวอ่านโดยถ้ากระดาษได้ผ่านหัวอ่านแล้วแต่ลำดับการอ่านของหัวอ่านยังไม่สิ้นสุดแสดงว่าได้เกิดความผิดพลาดของหัวอ่านแล้วซึ่งวงจรที่ใช้ตรวจสอบเป็นวงจรตรวจสอบด้วยการตัดผ่านแสงดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรตรวจจับตำแหน่งของกระดาษคำตอบ

จากรูปที่ 4.5 การทำงานของวงจรเป็นดังนี้เมื่อมีกระดาษคำตอบอยู่ระหว่างตัวตรวจจับจะให้สถานะลอจิกเป็น "1" และขณะที่ไม่มีกระดาษคำตอบอยู่จะให้สถานะลอจิกเป็น "0" ทำให้โปรแกรมควบคุมของเครื่องตรวจข้อสอบสามารถทราบสถานะของกระดาษคำตอบได้ สำหรับการตรวจจับแถบดำอ้างอิงของกระดาษคำตอบนั้น ตัวตรวจจับจะเป็นส่วนหนึ่งของหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบโดยสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับตำแหน่งแถบดำอ้างอิงจะทำให้เกิดสัญญาณอินเตอร์รัพท์ให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนของการอ่านข้อมูลจากตำแหน่งที่มีการฝนดินสอ ในรูปที่ 4.6 แสดง วงจรตรวจจับแถบดำอ้างอิงของกระดาษคำตอบ



รูปที่ 4.6 วงจรตรวจจับแถบอ้างอิงของกระดาษคำตอบ

จากวงจรในรูปที่ 4.6 กระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้วย ออปแอมป์ตัวแรกโดยจะใช้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษและแรงดันไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าลบจากนั้นจะผ่านวงจรอินเวอร์ติ้งแอมป์ที่มีกำลังขยายเท่ากับหนึ่งเพื่อกลับแรงดัน สัญญาณที่ได้จะเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบเพื่อที่จะได้เป็นสัญญาณที่ได้จากแถบดำอ้างอิงที่ถูกต้องโดยจะแยกระบบกราวด์ของวงจรแอนนาลอกกับวงจรดิจิตอลออกจากกันด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงเข้าวงจรลดเพื่อลดสัญญาณกระเพื่อมที่อาจเกิดขึ้นได้เข้าสู่วงจร D ฟลิบฟลอบเพื่อกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัพท์แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะหน่วงเวลาด้วยโปรแกรมเพื่อที่จะอ่านข้อมูลของหัวอ่านได้ที่ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งกลางของการฝนดินสอ โดยสามารถคำนวนได้จากความเร็วของการลำเลียงกระดาษคำตอบของเครื่องตรวจข้อสอบซึ่งความเร็วของเครื่องตรวจข้อสอบที่จะสร้างนี้กำหนดไว้ที่ 1000 แผ่นต่อชั่วโมง ดังนั้นเวลาโดยประมาณที่ใช้ไปสำหรับกระดาษคำตอบหนึ่งแผ่นจะเท่ากับ 3.6 วินาที และจากแบบของกระดาษคำตอบที่ใช้มีความยาวเท่ากับ 216 มิลลิเมตรและความกว้างของแถบดำอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

เวลาหน่วงของไมโครคอนโทรลเลอร์ = เวลาของความกว้างของแถบดำอ้างอิงเลื่อนไป / 2

เวลาของความกว้างแถบดำ = (เวลาของกระดาษคำตอบใช้ X ความกว้างของแถบดำอ้างอิง) / ความยาวของกระดาษ

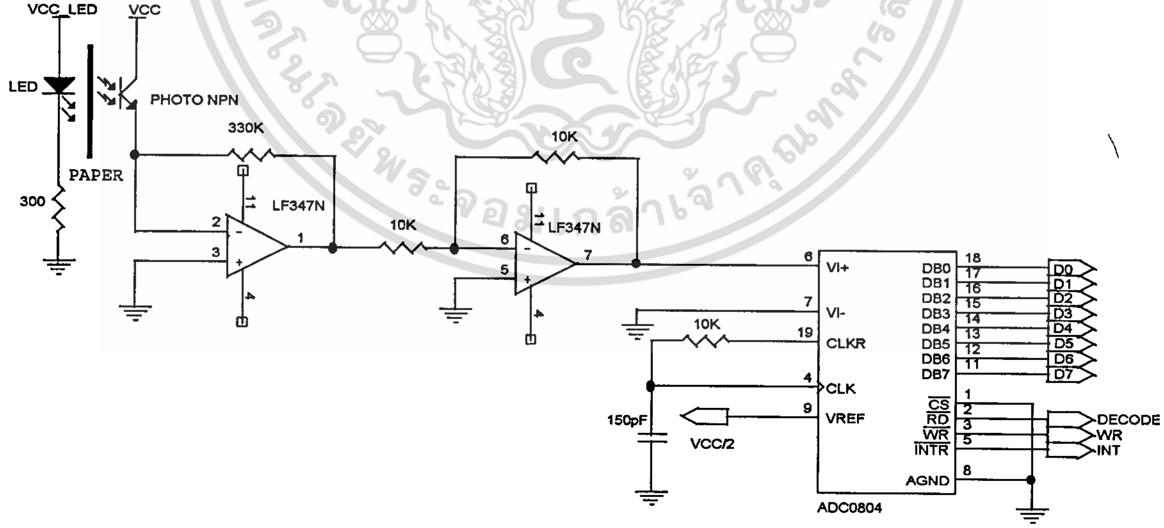
คำตอบ

= (3.6 X 1.5) / 216 = 0.025 วินาที

ดังนั้นเวลาหน่วง = 0.025 / 2 = 12.5 มิลลิวินาที

4.1.3 วงจรหัวอ่านและวงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษคำตอบ

จากหลักการใช้แสงอินฟราเรดส่องทะลุผ่านกระดาษคำตอบจะเห็นว่าความหนาของกระดาษคำตอบจะมีผลต่อค่าที่อ่านได้จากหัวอ่านโดยเฉพาะถ้ากระดาษคำตอบมีความหนามากจะทำให้เกิดความผิดพลาดของหัวอ่านได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำความหนาของกระดาษในรูปของแรงดันไฟฟ้านำมาชดเชยขณะหัวอ่านทำงาน โดยก่อนที่หัวอ่านจะทำงานจึงต้องมีวงจรสำหรับตรวจวัดความหนาของกระดาษในรูปของแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.7

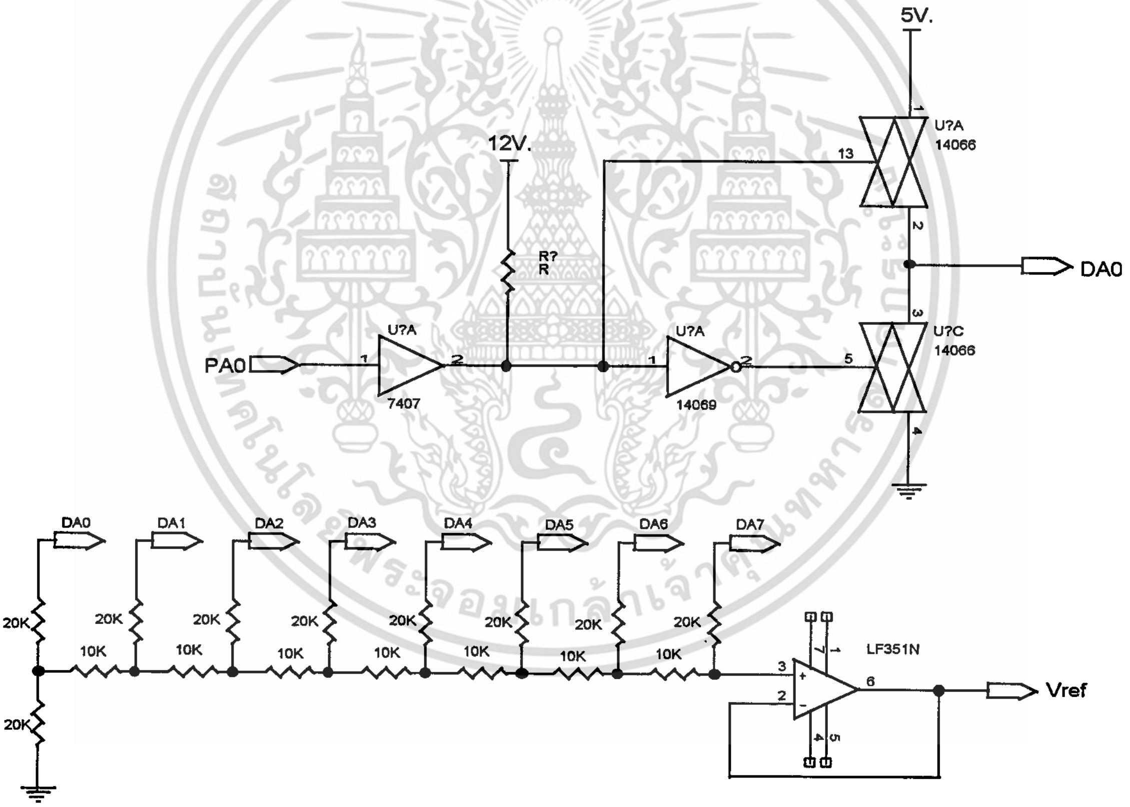


รูปที่ 4.7 วงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษคำตอบ

จากวงจรในรูปที่ 4.7 มีแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดโดยใช้ LED ชนิดให้แสงอินฟราเรดทำงานที่กระแสไฟฟ้าคงที่เพื่อที่จะให้ได้ความเข้มของแสงอินฟราเรดคงที่ เมื่อกระดาษคำตอบที่ไม่มีการฝนดินสอผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอินฟราเรดจะทำให้ปริมาณแสงที่ตัวรับแสงอินฟราเรดลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงอินฟราเรดบางส่วนจะถูกดูดกลืนไปกับกระดาษคำตอบเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลเบอร์ ADC0804 ที่ให้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ Vcc/2 ซึ่งเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดซึ่งหมายความว่าที่กระดาษคำตอบเปล่าจะมีแสงอินฟราเรดผ่านมากที่สุดและจะลดลงตามความเข้มของการฝนดินสอ ดังนั้นจึงสามารถใช้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะกระดาษเปล่าสำหรับกำหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้กับส่วนของวงจรหัวอ่าน จากค่าดิจิตอลที่ได้จึงนำไปผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนนาลอกดังแสดงในรูปที่ 4.8 เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งใช้วงจร R-LADDER ขนาด 8 บิตโดยควบคุมผ่านทางพอร์ต A ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 เข้าสู่วงจรแอนาลอกสวิตช์เพื่อกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเข้าแต่ละจุดของวงจร R-LADDER ในวงจรรูปที่ 4.8 แสดงวงจรในส่วนของแอนาลอกสวิตช์เพียงหนึ่งบิตเท่านั้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ให้กับในส่วนของหัวอ่านนี้มีผลต่อความแม่นยำของหัวอ่านอย่างมากจึงต้องใช้วงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กล่าวมา



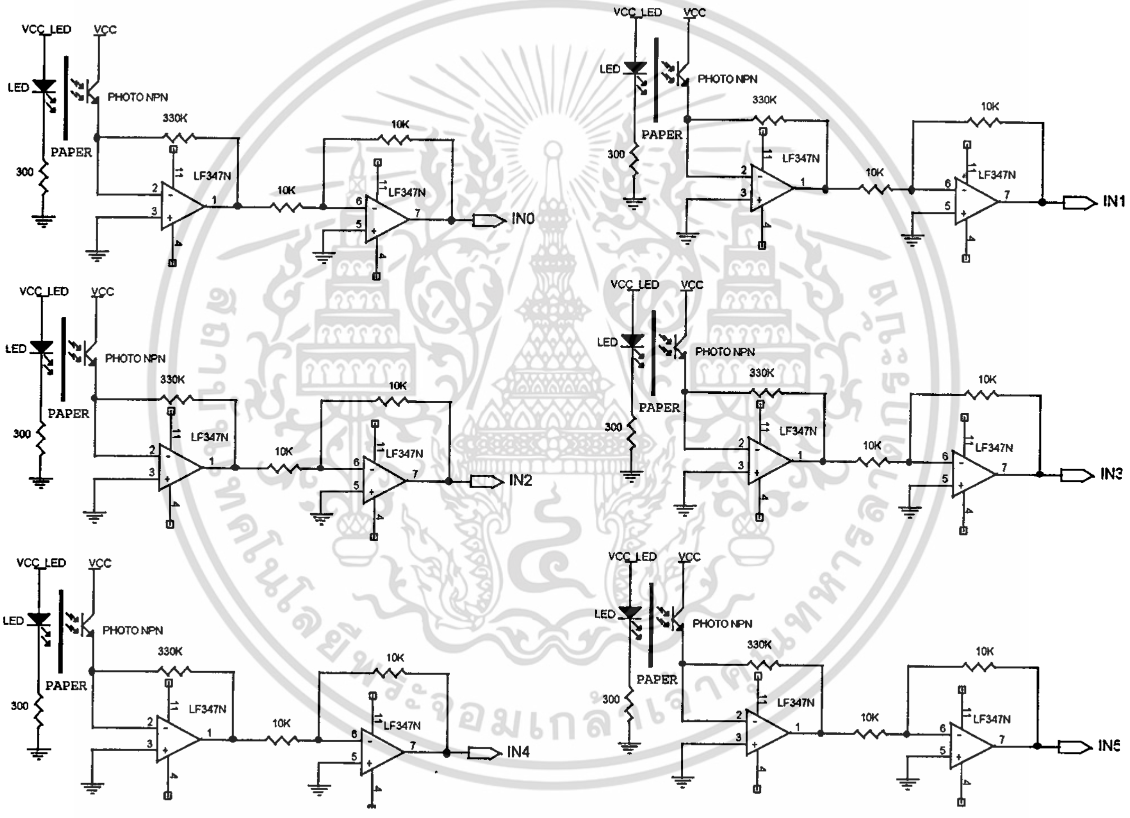
รูปที่ 4.8 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกแบบ R-LADDER

สำหรับวงจรในส่วนของหัวอ่านประกอบวงจรทำงานสามส่วนได้แก่ ส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าจากตัวรับแสงอินฟราเรดให้เป็นแรงดันไฟฟ้า, ส่วนวงจรเลือกอ่านของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลและส่วนแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 4.9, รูปที่ 4.10, รูปที่ 4.11 ตามลำดับ วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดเป็นแรงดันไฟฟ้าจะใช้อุปกรณ์ออปแอมป์เบอร์ LF347N ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

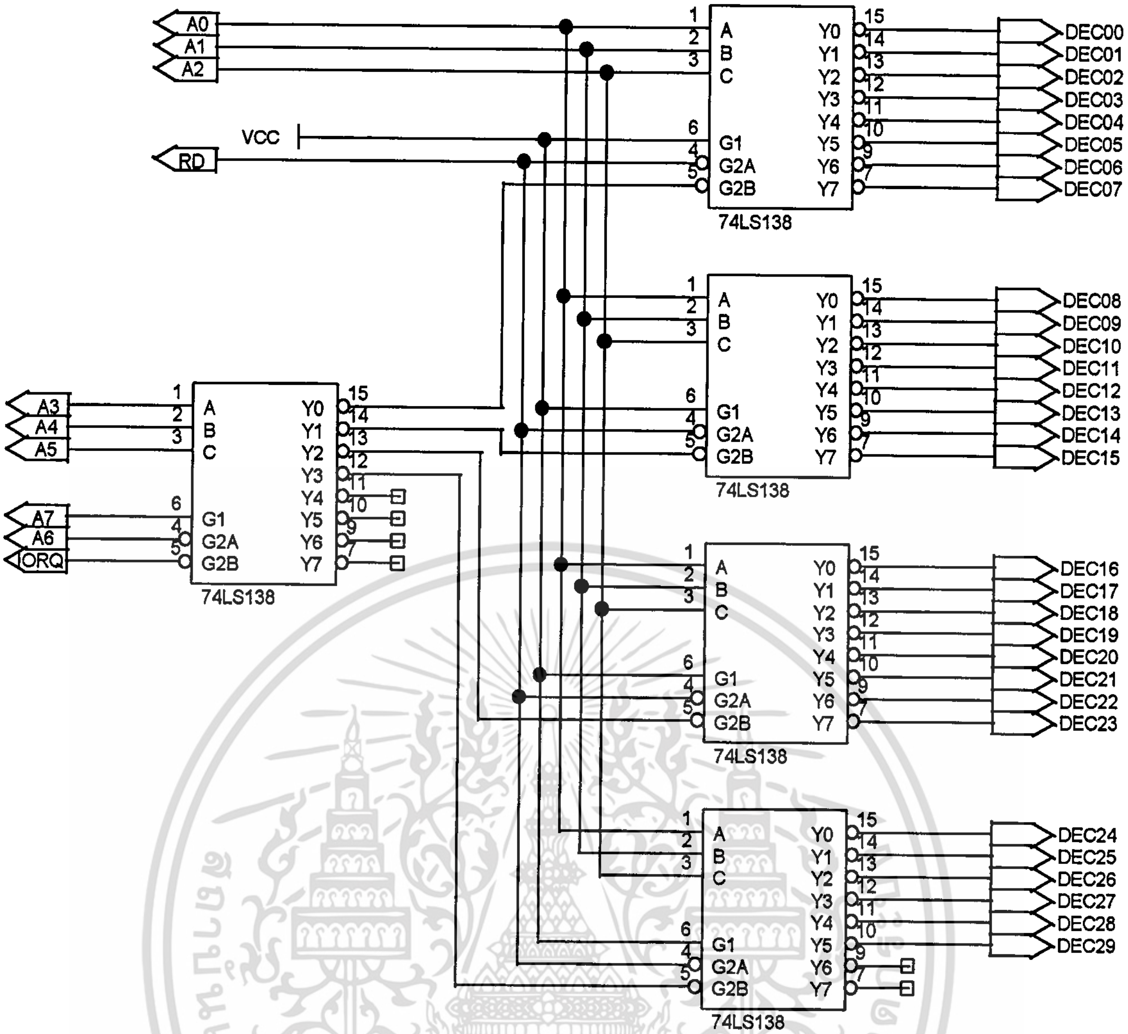
ออปแอมป์ที่มีสัญญาณรบกวนต่ำและเป็น ออปแอมป์ที่มีส่วนอินพุทเป็น FET ทำให้มีค่าความต้านทานขาเข้าสูงซึ่งสามารถทำงานกับสัญญาณขนาดเล็กที่มาจากตัวรับแสงอินฟราเรดได้อีกทั้งในหนึ่งตัวมีออปแอมป์สี่ตัวในรูปที่ 4.9 แสดงวงจรเพียง 6 ชุดเท่านั้นขณะที่วงจรทั้งหมดของหัวอ่านมีทั้งหมด 30 ชุด สำหรับวงจรในรูปที่ 4.10 เป็นวงจรเลือกอ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS138 จำนวน 5 ตัว สำหรับสร้างสัญญาณเลือกอ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

สำหรับวงจรในรูปที่ 4.11 จะเป็นวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลทั่วไปจะต่างกันเพียงในส่วนของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ให้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลจะทำงานพร้อมกันโดยการควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 และจะใช้เวลาในการแปลงสัญญาณประมาณ 100 ไมโครวินาที



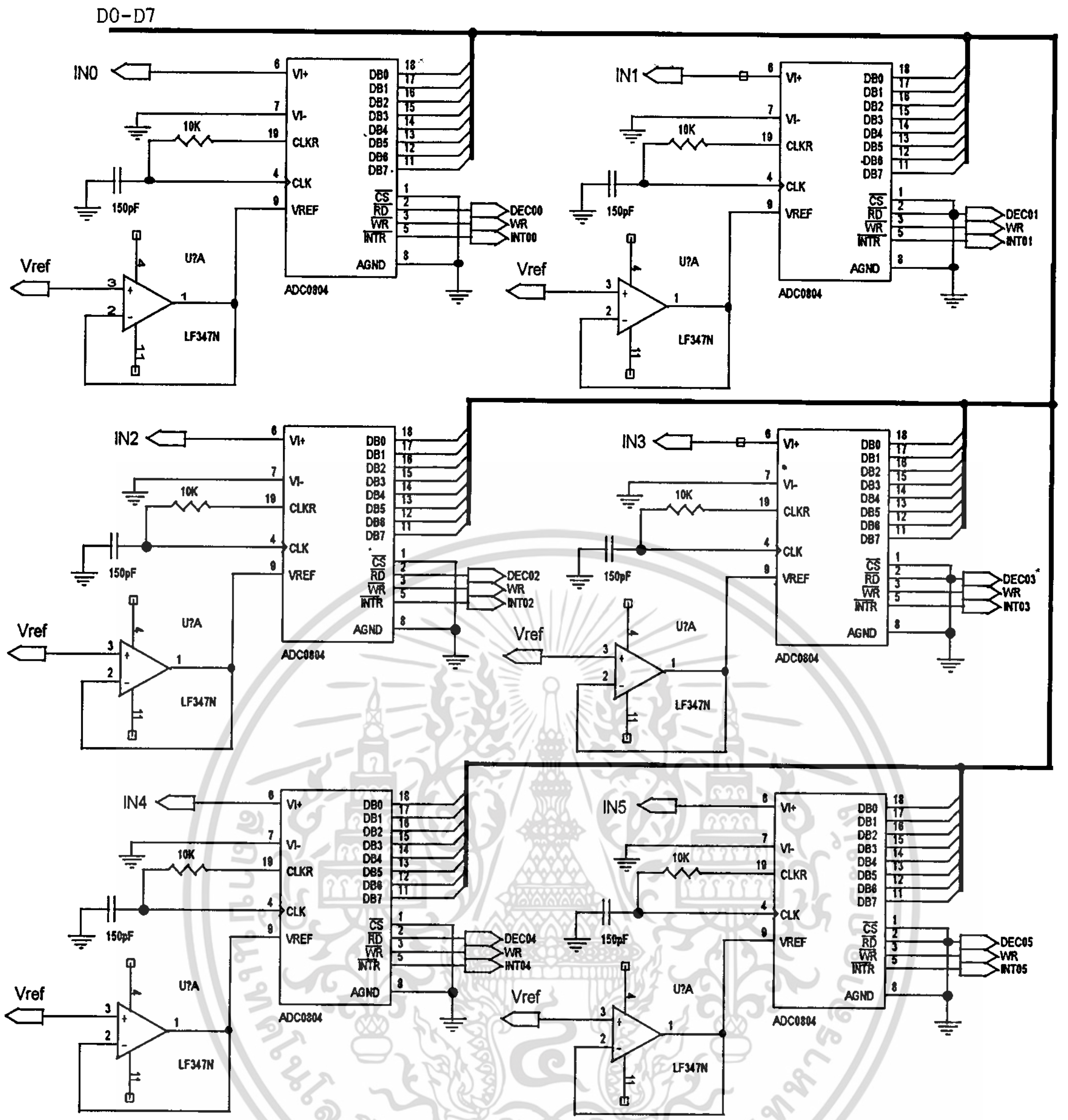
รูปที่ 4.9 วงจรส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดเป็นแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 วงจรเลือกอ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

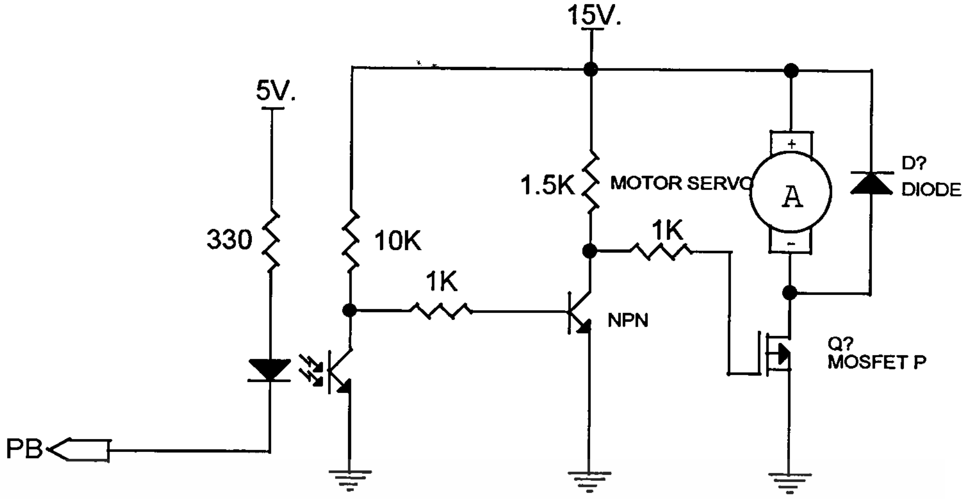


รูปที่ 4.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

4.1.4 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง สำหรับดึงกระดาษผ่านหัวอ่าน

จากรูปที่ 4.12 เป็นวงจรขับดีซีมอเตอร์แบบเปิดปิด (on-off) โดยจะใช้ Opto-Isolator แยก แหล่งจ่ายไฟฟ้าของมอเตอร์ออกจากวงจรควบคุมซึ่งมาจากพอร์ต B ของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเมื่อลอจิกเป็นศูนย์จะทำให้มอเตอร์หมุนและลอจิกหนึ่งมอเตอร์จะหยุดหมุนสำหรับดีซีมอเตอร์ที่ใช้จะใช้กระแสไฟฟ้าเพียงประมาณ 120 mA. เท่านั้น

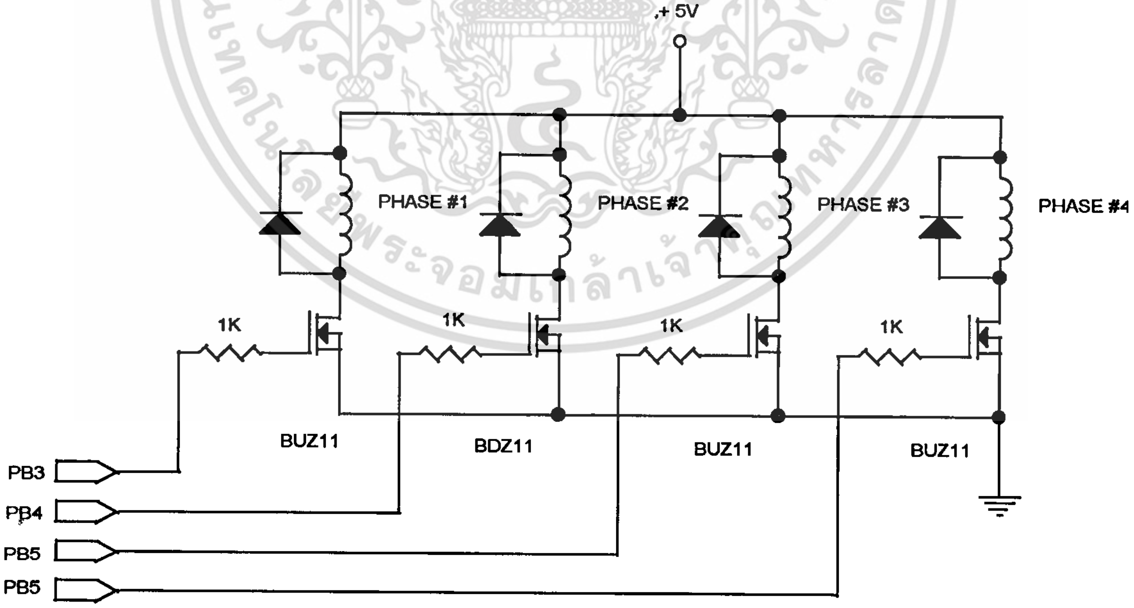
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงสำหรับขับกระดาษให้เคลื่อนที่ผ่านหัวอ่าน

4.1.5 วงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์สำหรับป้อนกระดาษเข้าครั้งละ 1 แผ่น

สำหรับการป้อนกระดาษเข้าจะใช้สเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ชนิดสี่เฟส เนื่องจากให้แรงบิดสูง และมีขนาดเล็กติดตั้งง่าย มีโครงสร้างการพันขดลวดแบบไบโพลาร์ (Bipolar Wiring) คือมีสายต่อร่วมกันระหว่างเฟสที่ 1 กับเฟสที่ 2 และเฟสที่ 3 กับเฟสที่ 4 ดังนั้นจึงสามารถใช้วงจรขับแบบไบโพลาร์ (Bipolar Drive) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นวงจรขับทั้ง 4 เฟส การทำงานเป็นการกระตุ้นแบบ 2 เฟส ในโหมด Full-Step หรือการเคลื่อนที่แบบสเตปปกติ



รูปที่ 4.13 วงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์สำหรับดึงกระดาษให้ตรวจครั้งละ 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โปรแกรมควบคุมเครื่องตรวจข้อสอบ

ในการออกแบบโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบจะมีตัวแปรสำหรับการทำงานหลายตัวเพื่อส่งผ่านการทำงานระหว่างโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการทำงานมีดังนี้

ตัวแปร STATUS เป็นตัวแปรควบคุมการแสดงผลหลักและเลือกการทำงานโดยมีค่าดังนี้

มีค่าเท่ากับ 00H เป็นการเลือกการทำงานในหน้าที่เลือกแบบกระดาษซึ่งมีสองแบบ

มีค่าเท่ากับ 01H เป็นการเลือกการทำงานในหน้าที่อ่านกระดาษคำตอบเฉลย

มีค่าเท่ากับ 02H เป็นการเลือกการทำงานในหน้าที่ตรวจข้อสอบ

ตัวแปร SUBSTA เป็นตัวแปรควบคุมการแสดงผลรองมีค่าดังนี้

มีค่าเท่ากับ 00H ไม่มีการแสดงผลรอง

มีค่าเท่ากับ 01H มีการแสดงผลรอง

ตัวแปร READY เป็นตัวแปรแสดงการผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยหรือยัง

มีค่าเท่ากับ 00H ยังไม่ผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลย

มีค่าเท่ากับ 0FFH ผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยแล้ว

ตัวแปร MEMPA1 เป็นตำแหน่งของหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าตำแหน่งหน่วยความจำเริ่มต้นที่เก็บค่าของ A to D ที่อ่านได้ของกระดาษคำตอบหน้าแรก

ตัวแปร MEMPA2 เป็นตำแหน่งของหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าตำแหน่งหน่วยความจำเริ่มต้นที่เก็บค่าของ A to D ที่อ่านได้ของกระดาษคำตอบหน้าที่สอง

ตัวแปร ANSW เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของหน่วยความจำสำหรับเก็บคำตอบเฉลยที่ผ่านการจัดเรียงข้อแล้ว

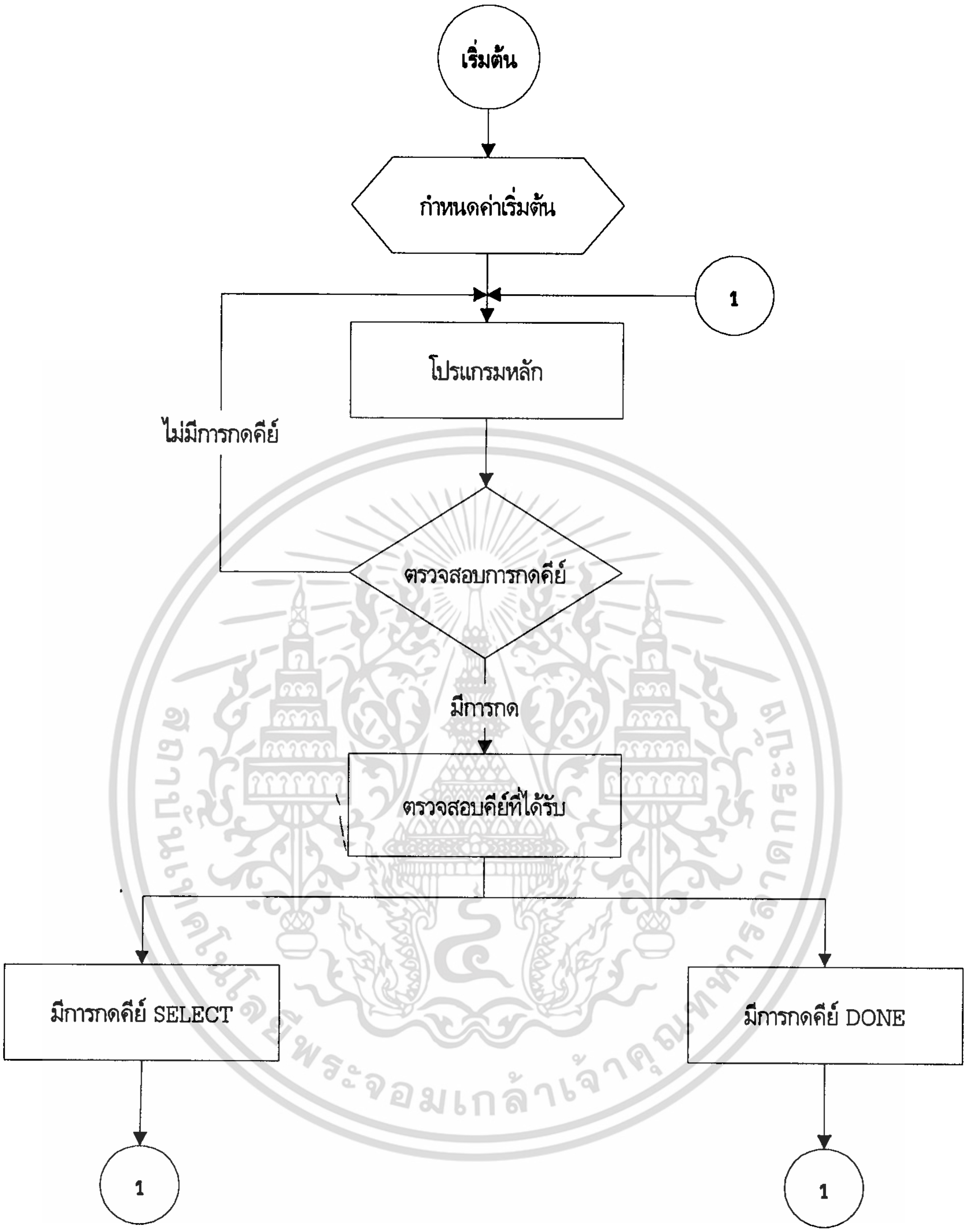
ตัวแปร QUATI เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของหน่วยความจำสำหรับเก็บคำตอบที่ผ่านการจัดเรียงข้อแล้ว

ตัวแปร CODE เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของหน่วยความจำสำหรับเก็บรหัสของผู้สอบที่จัดเรียงแล้ว

ตัวแปรแถบอ้างอิงสำหรับเก็บการนับแถบอ้างอิงของกระดาษคำตอบซึ่งแบบกระดาษที่ใช้จะมีแถบอ้างอิงทั้งหมด 49 แถบ

สำหรับการทำงานของโปรแกรมควบคุมสามารถแสดงเป็นโฟล์วชาร์ทในรูปที่ 4.14 แสดงการทำงานรวมทั้งหมดของโปรแกรมควบคุมโดยเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มทำงานจะกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวปรต่าง ๆ จากนั้นโปรมแกรมหลักจะทำงานโดยจะตรวจสอบการกดคีย์ที่เข้ามาแล้วทำงานโปรแกรมตามคีย์ที่กดเข้ามาโดยแบ่งเป็นสองคีย์ได้แก่คีย์ SELECT จะทำหน้าที่สำหรับเลือกการทำงานทั้งการทำงานหลักและการทำงานรองสำหรับคีย์ DONE จะใช้สำหรับตอบรับการเลือกที่ได้จากคีย์ SELECT แล้ว ภายหลังทำงานเสร็จสิ้นจะกลับมายังส่วนของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

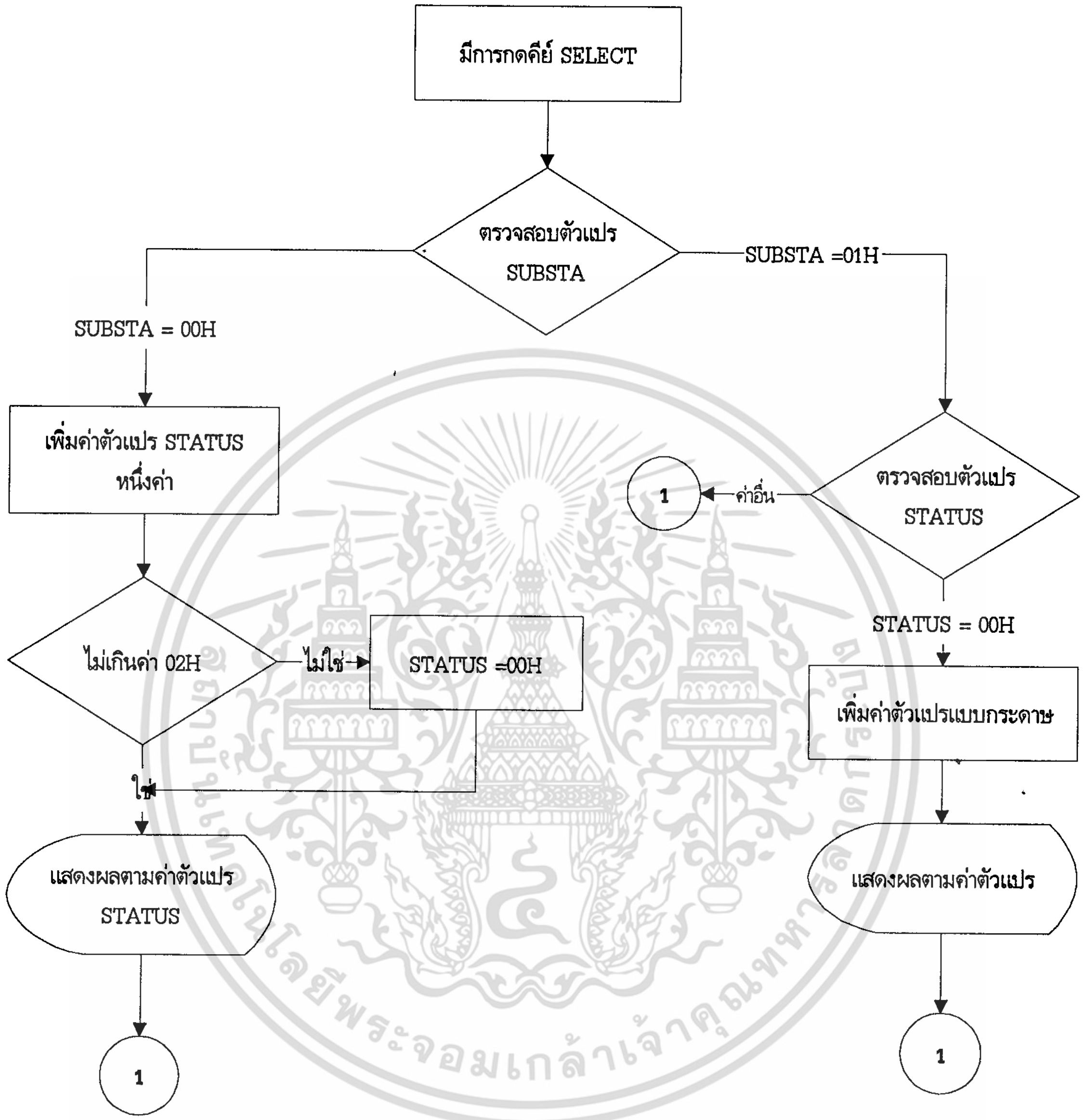


รูปที่ 4.14 การทำงานทั้งหมดของโปรแกรมควบคุม

ในรูปที่ 4.15 แสดงการทำงานของโปรแกรมเมื่อมีการกดคีย์ SELECT ในส่วนนี้จะตรวจสอบตัวแปร SUBSTA เพื่อเลือกการทำงานหลักหรือการทำงานรอง โดยที่ถ้ามีค่าเท่ากับ 00H จะเป็นการทำงานหลักโดยการเพิ่มค่าตัวแปร STATUS ทีละหนึ่งค่าและไม่เกินค่า 02H จากนั้นจะแสดงผลการเลือกที่ได้ออกที่ตัวแสดงผล LCD ตามค่าตัวแปร STATUS นั้นแล้วกลับสู่โปรแกรมหลัก ถ้ามีค่าเท่ากับ 01H จะเข้าสู่การทำงานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีเฉพาะการทำงานหลักของการเลือกแบบกระดาษคำตอบเท่านั้นจากนั้นจะแสดงผลแล้วจึงกลับสู่โปรแกรมหลัก

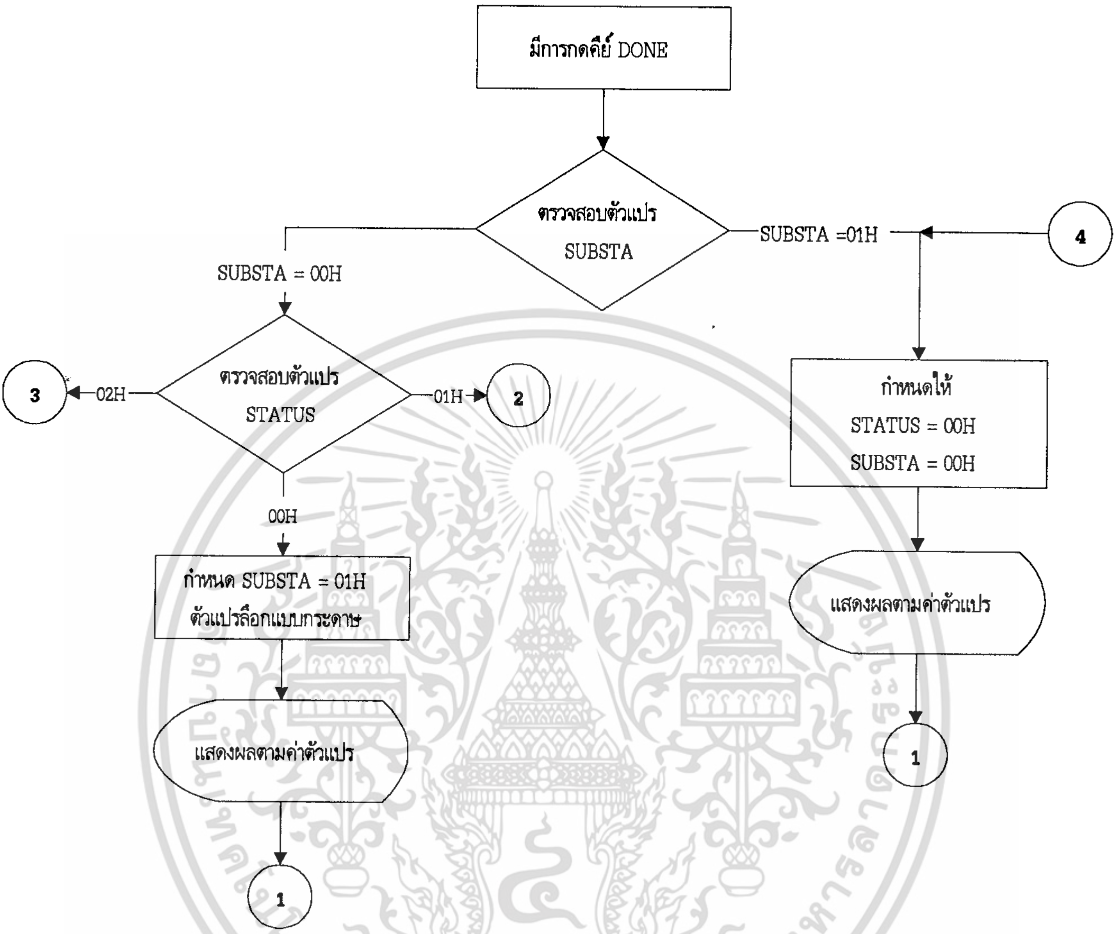


รูปที่ 4.15 การทำงานเมื่อมีการกดคีย์ SELECT

ในรูปที่ 4.16 แสดงการทำงานของโปรแกรมเมื่อมีการกดคีย์ DONE โดยจะทำการตรวจสอบตัวแปร SUBSTA เช่นเดียวกับในกรณีของการกดคีย์ SELECT เมื่อค่าตัวแปร SUBSTA มีค่าเท่ากับ 00H จะเป็นการตอบสนองการทำงานหลักโดยจะตรวจสอบตัวแปร STATUS ซึ่งถ้ามีค่าเท่ากับ 00H จะเข้าสู่การทำงานของโปรแกรมในการเลือกแบบกระดาษและจะกำหนดให้ตัวแปร SUBSTA มีค่าเท่ากับ 01H ถ้าตัวแปร STATUS มีค่าเท่ากับ 01H จะทำงานโปรแกรมในส่วนของการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยตามหมายเลขโปรแกรม 2 ถ้าตัวแปร STATUS มีค่าเท่ากับ 02H จะทำงานโปรแกรมในส่วนของการตรวจข้อสอบตามหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

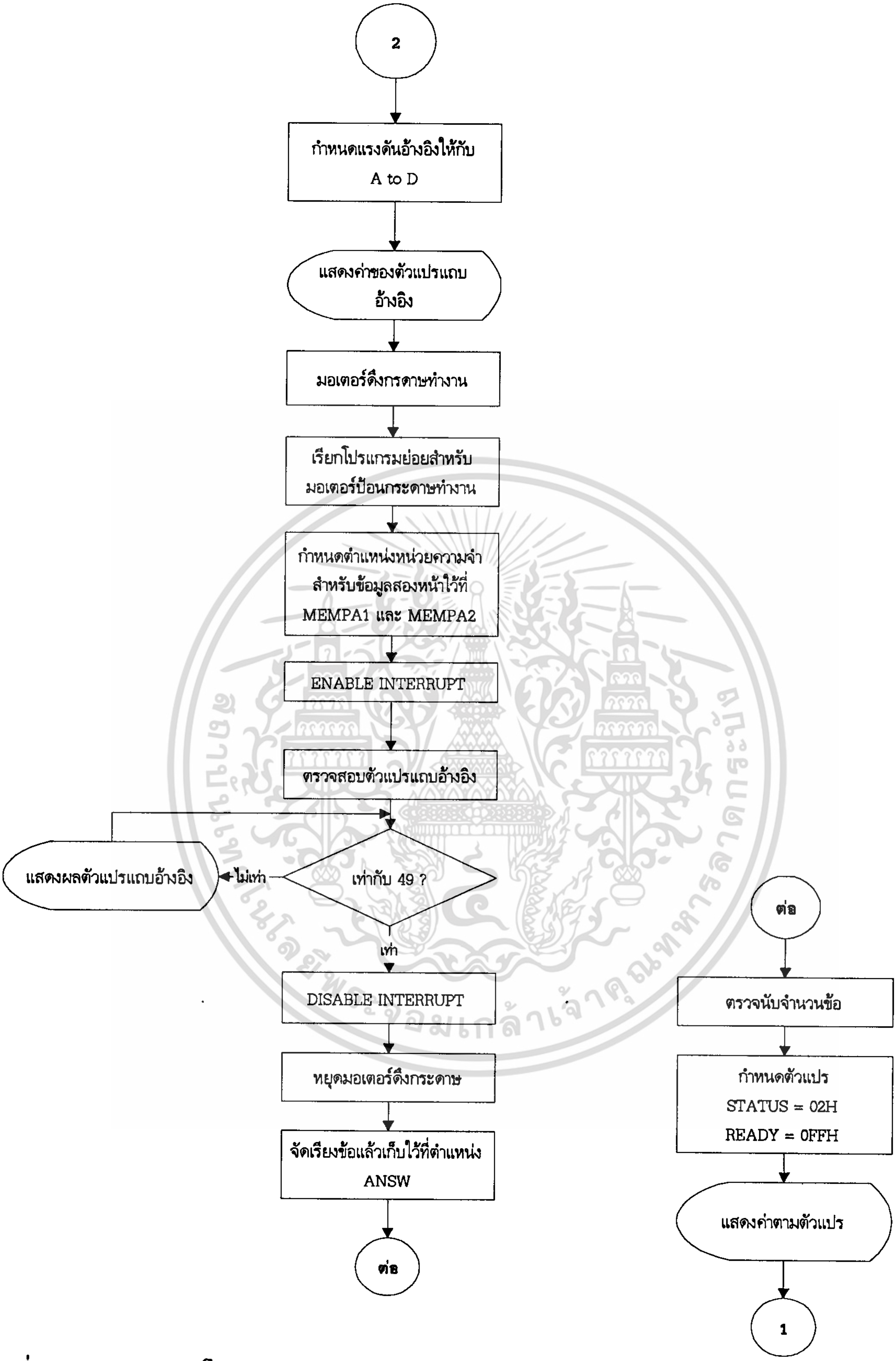
เลขโปรแกรม 3 ถ้าค่าตัวแปร SUBSTA มีค่าเท่ากับ 01H จะเป็นการตอบรับการเลือกแบบการดาษและจะกำหนดให้ตัวแปร STATUS และ SUBSTA มีค่าเท่ากับ 00H แล้วแสดงผลที่ LCD ตามค่าตัวแปรนั้น จากนั้นจะกลับสู่โปรแกรมหลัก



รูปที่ 4.16 การทำงานของโปรแกรมเมื่อมีการกดคีย์ DONE

ในรูปที่ 4.17 แสดงการทำงานของโปรแกรมเมื่อเข้าสู่ในส่วนอ่านกระดาษคำตอบเฉลยจะเริ่มต้นโดยการกำหนดแรงดันอ้างอิงให้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของวงจรหัวอ่านตามแบบกระดาษที่เลือกไว้แล้วกำหนดให้ตัวแปรแถบอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์และแสดงผลออกที่ LCD จากนั้นให้มอเตอร์สำหรับดึงกระดาษผ่านหัวอ่านทำงานแล้วเรียกโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ป้อนกระดาษเข้าทำงานซึ่งในส่วนโปรแกรมนี้จะตรวจสอบตัวตรวจจับกระดาษเข้าในเวลาเดียวกันเมื่อกระดาษได้เข้าแล้วโปรแกรมสำหรับมอเตอร์ป้อนกระดาษเข้าจะหยุดทำงาน จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

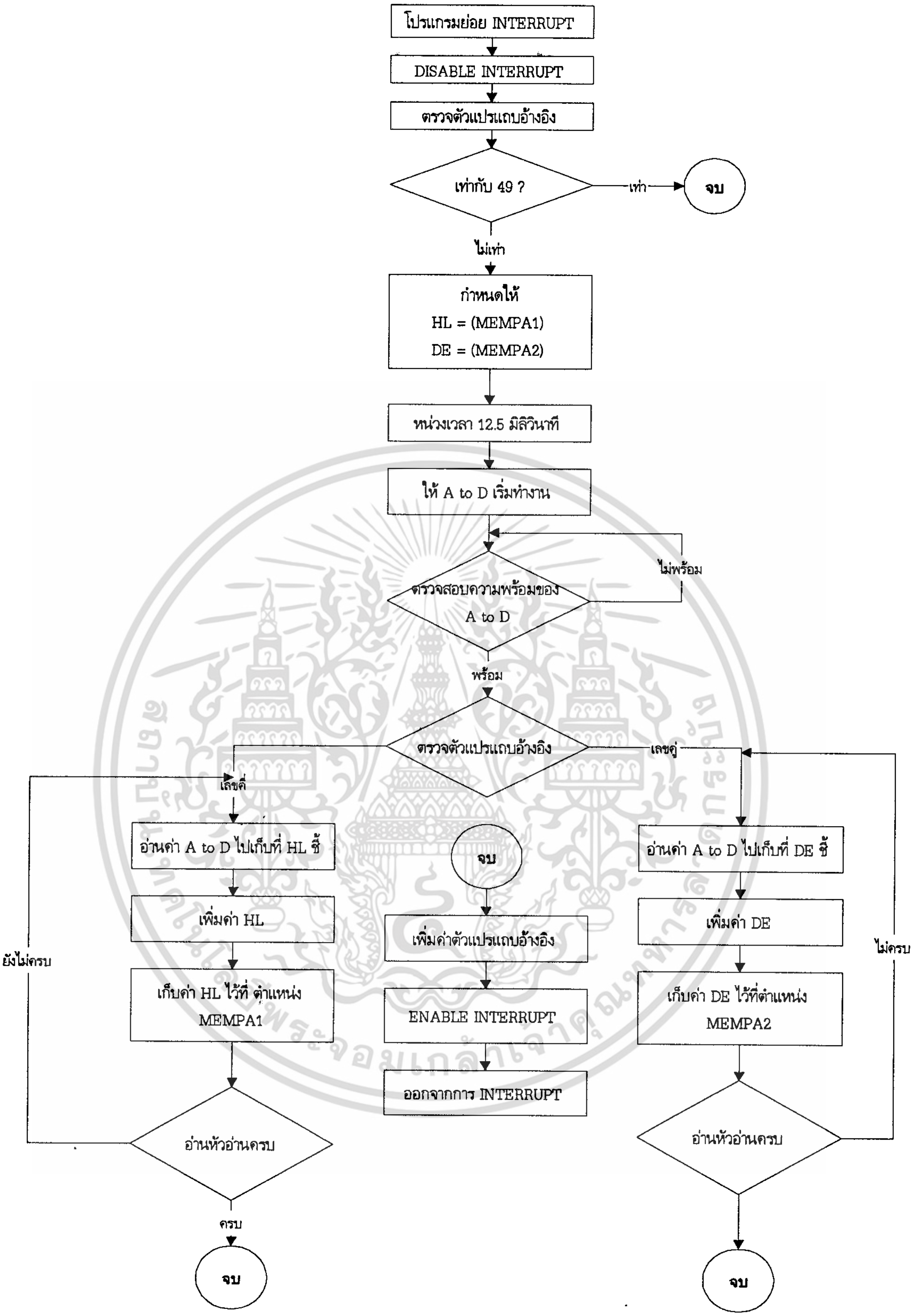


รูปที่ 4.17 การทำงานของโปรแกรมอ่านกระดาษคำตอบเฉลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

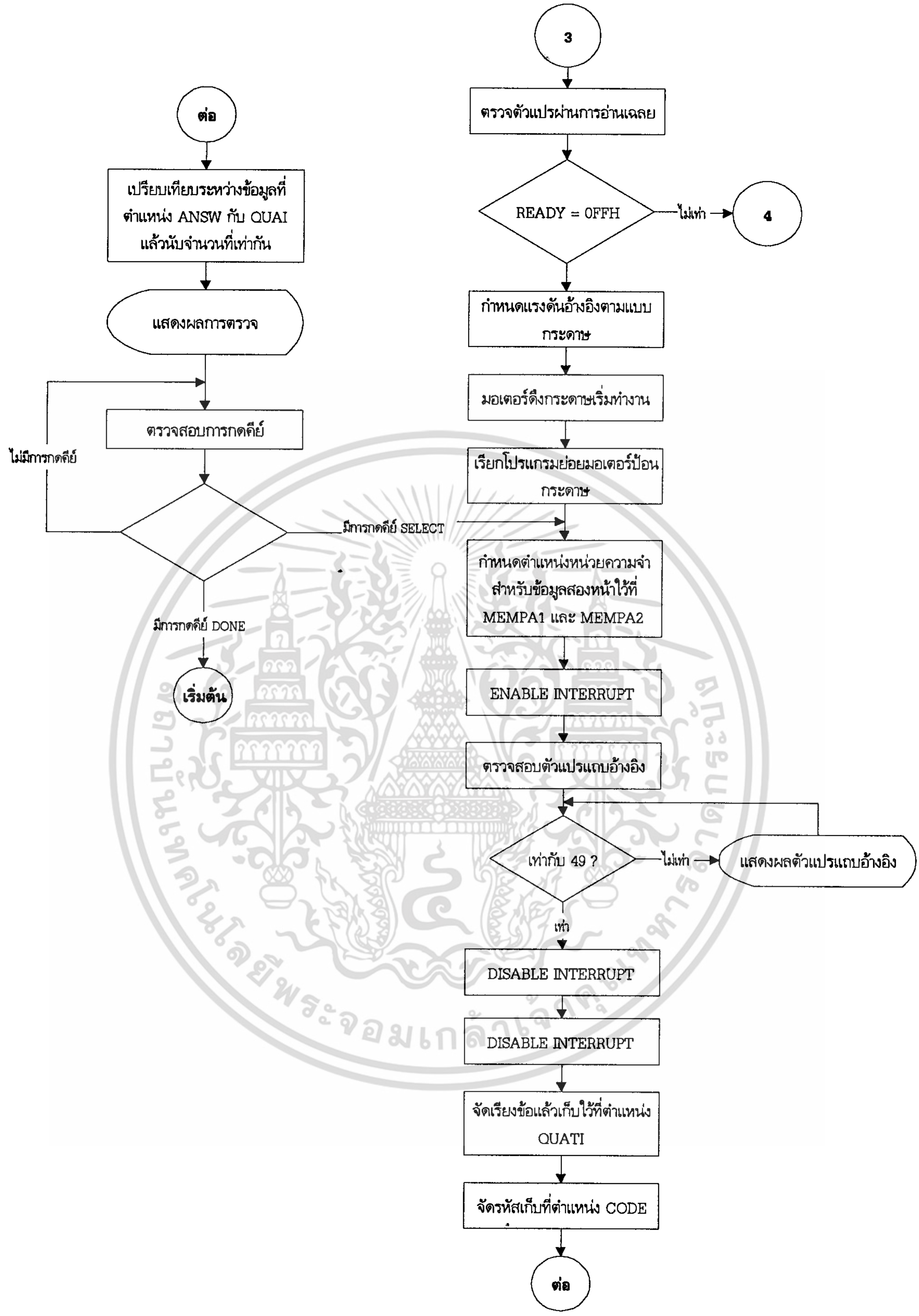
จะนำค่าตำแหน่งหน่วยความจำเริ่มต้นสำหรับเก็บข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลของหัวอ่านหน้าที่หนึ่งและสองของกระดาษคำตอบไว้ที่ MEMPA1 และ MEMPA2 ตามลำดับแล้วจึงให้ไมโครคอนโทรล เลอร์ตอบรับการอินเตอร์รัพท์ได้ (ซึ่งโปรแกรมย่อยที่ตอบรับการอินเตอร์รัพท์จะทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล) จากนั้นจะตรวจสอบตัวแปรแถบอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 49 หรือยังถ้ายังจะแสดงค่าของตัวแปรแถบอ้างอิงนั้นและเมื่อเท่ากับ 49 จะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ตอบสนองการอินเตอร์รัพท์และหยุดมอเตอร์ดึงกระดาษแล้วจัดเรียงข้อมูลที่ได้มาให้ได้ตามลำดับข้อของกระดาษคำตอบและตรวจนับจำนวนข้อที่ใช้ในกระดาษคำตอบนี้ โดยนำข้อมูลที่เรียงเสร็จแล้วไปเก็บตามลำดับโดยเริ่มต้นที่ตำแหน่งหน่วยความจำที่ ANSW แล้วจึงกำหนดตัวแปร STATUS เท่ากับ 02H และตัวแปร READY เท่ากับ 0FFH เป็นการแสดงว่าได้ผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยแล้วแล้วไปยังโปรแกรมหลัก ในรูปที่ 4.18 แสดงการทำงานของส่วนโปรแกรมย่อยสำหรับตอบรับการอินเตอร์รัพท์เมื่อเข้าสู่โปรแกรมจะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ตอบรับการอินเตอร์รัพท์เพื่อป้องกันการอินเตอร์รัพท์ซ้อนแล้วจึงตรวจสอบค่าของตัวแปรแถบอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 49 หรือไม่ ถ้าเท่าจะออกจากการอินเตอร์รัพท์ ถ้าไม่เท่าจะกำหนดให้รีจีสเตอร์ HL และ DE ของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับค่าที่อยู่ในหน่วยความจำตำแหน่ง MEMPA1 และ MEMPA2 ตามลำดับ ซึ่งค่ารีจีสเตอร์ที่ได้นี้จะใช้ในการชี้ตำแหน่งหน่วยความจำที่จะเก็บข้อมูลที่อ่านได้ แล้วหน่วงเวลาประมาณ 12.5 มิลลิวินาทีเพื่อให้ได้ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางของแถบอ้างอิง จากนั้นกระตุ้นให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลทำงานรอจนกว่าการทำงานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลเสร็จสิ้นแล้วจึงเข้าขั้นตอนการอ่านโดยการตรวจสอบตัวแปรแถบอ้างอิงว่าเป็นค่าของเลขคู่หรือเลขคี่นั่นหมายถึงหน้าของกระดาษคำตอบนั่นเองโดยจะแยกเก็บด้วยการใช้รีจีสเตอร์ HL หรือ DE เป็นตัวชี้ตำแหน่งหน่วยความจำนั้นในขณะที่อ่านกระดาษคำตอบค่าของรีจีสเตอร์ HL หรือ DE จะเพิ่มขึ้นหนึ่งค่าเสมอและเก็บค่านั้นไว้ที่ตำแหน่งหน่วยความจำ MEMPA1 และ MEMPA2 ตามลำดับ ก่อนที่จะออกจากการทำงานของโปรแกรมย่อยการตอบรับอินเตอร์รัพท์จะเพิ่มค่าของตัวแปรแถบอ้างอิงขึ้นหนึ่งค่าและให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตอบรับการอินเตอร์รัพท์ได้ ในรูปที่ 4.19 แสดงการทำงานของโปรแกรมสำหรับการตรวจข้อสอบโดยการทำงานจะคล้ายกับการทำงานของโปรแกรมอ่านกระดาษคำตอบเฉลยจะต่างกันตรงที่ก่อนเข้าทำงานจะตรวจตัวแปร READY ก่อนว่าได้ผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยแล้วหรือยัง ถ้ายังจะไปยังส่วนหมายเลข 4 ของการทำงานโปรแกรมการกดคีย์ DONE และการเก็บคำตอบที่อ่านได้จะไว้ที่ตำแหน่งหน่วยความจำเริ่มต้นที่ QUATI แล้วจัดเรียงรหัสของผู้สอบเก็บที่ตำแหน่งหน่วยความจำ CODE จากนั้นจะเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างที่เก็บไว้ในตำแหน่งเริ่มต้นที่ ANSW กับตำแหน่งเริ่มต้นที่ QUATI ตามจำนวนข้อที่ได้เก็บไว้แล้วนับจำนวนข้อที่ตรงกันซึ่งจำนวนข้อที่ทำถูกนั่นเองโดยเก็บผลที่ได้ไว้ที่หน่วยความจำเริ่มต้น POINT นำผลของคะแนนและรหัสที่ได้แสดงผลที่ LCD จากนั้นตรวจสอบการกดคีย์ว่าจะทำการตรวจต่อหรือจะให้หยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การทำงานของโปรแกรมย่อยตอบรับการอินเตอร์รัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การทำงานของโปรแกรมตรวจข้อสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบเชิงกลของเครื่องตรวจข้อสอบ

ในส่วนเชิงกลของเครื่องตรวจข้อสอบได้แก่ส่วนในการดึงกระดาษเข้าตรวจโดยลักษณะการดึงกระดาษเข้าสามารถทำได้สองวิธีได้แก่การดึงกระดาษเข้าในแนวนอนและการดึงกระดาษเข้าในแนวตั้งจากการศึกษาและทดสอบจะพบของดีข้อเสียดังนี้

การดึงกระดาษเข้าในแนวนอนจะมีข้อดีในการสร้างได้ง่ายแต่มีข้อเสียที่การบังคับให้กระดาษเคลื่อนตัวชิดขอบได้

ยากจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายหรือทำให้กระดาษคำตอบยับหรือเสียหายง่าย

สำหรับการดึงกระดาษคำตอบในแนวตั้งจะมีข้อดีในการให้กระดาษคำตอบเลื่อนชิดขอบได้ง่ายเพราะอาศัยแรงโน้มถ่วงของกระดาษเองแต่จะมีข้อเสียที่การสร้างยากกว่า

จากการดึงกระดาษที่กล่าวมานั้นสำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกแบบการดึงกระดาษคำตอบในแนวตั้งเนื่องจากในการสร้างไม่ต้องคำนึงถึงส่วนเชิงกลที่จะต้องคอยบังคับกระดาษมากนักเพียงแต่การสร้างจะต้องให้ลูกยางที่ทำหน้าที่ดึงกระดาษนั้นจะต้องตั้งได้ฉากเท่านั้น และการดึงกระดาษเข้าแนวตั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับแบบกระดาษคำตอบที่กว้างกว่าในอนาคตได้ง่ายกว่าการดึงกระดาษในแนวนอนเนื่องจากการดึงกระดาษเข้าในแนวนอนจะมีโอกาสที่จะผิดพลาดมากขึ้นถ้าความกว้างมากขึ้นเพราะหากเกิดการเอียงเพียงเล็กน้อยปลายด้านตรงข้ามที่ชิดกับขอบจะห่างออกจากแนวที่จะเป็นมาก สำหรับการสร้างเครื่องตรวจข้อสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โครงสร้างเป็นพลาสติกเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและราคาถูกเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตรวจข้อสอบจริงโดยโครงสร้างดังกล่าวได้แสดงไว้ในส่วนภาคผนวก ก.

โดยมีระบบในการขับกระดาษด้วยเฟืองพลาสติกที่ต่อเนื่องจากตัวแรกจนตัวสุดท้าย สำหรับในส่วนของลูกยางที่ทำหน้าที่ดึงกระดาษนั้นประยุกต์จากท่อยางซิลิโคนสวมเข้ากับแกนโลหะเนื่องจากท่อยางซิลิโคนจะมีความหนืดในการดึงกระดาษมากและมีความนิ่มไม่แข็งกระด้างการสึกของยางมีน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดสอบเครื่องตรวจข้อสอบ

5.1 ผลการทดสอบการทำงานของหัวอ่าน

ในการทดสอบส่วนของหัวอ่านจะทำการทดสอบเป็นสองลักษณะได้แก่การทดสอบหัวอ่านเพียงตัวเดียวที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดแสงกับตัวรับแสงที่ประมาณ 1.5 มิลลิเมตร และการทดสอบหัวอ่านทั้ง 29 จุดหัวอ่านที่ติดตั้งกับเครื่องตรวจข้อสอบที่สร้างขึ้นโดยใช้มาตรฐานความเข้มของระดับเกรย์ที่กำหนดจากโปรแกรม VISIO แล้วพิมพ์ออกที่เครื่องพิมพ์เลเซอร์โดยความเข้มที่ใช้ในการทดสอบเริ่มตั้งแต่กระดาษเปล่า (กระดาษมีความหนาที่ 80 แกรม) หรือความเข้มของคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 0%, 10%, 30%, 50%, 70% และ 90% โดยตัวอย่างของระดับเกรย์ที่ได้จากโปรแกรม VISIO แสดงในรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 ระดับเกรย์ที่ใช้ในการทดสอบหัวอ่าน

สำหรับการทดสอบที่หัวอ่านตัวเดียวทดสอบที่ความเข้มแต่ละค่าจำนวน 15 ครั้งเพื่อดูผลการทำงานของวงจรส่วนหัวอ่านโดยได้ผลดังนี้ เมื่อทดสอบการทำงานของหัวอ่านที่กระดาษเปล่าโดยเปรียบเทียบระหว่างที่ให้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดึงแสดงในรูปที่ 5.2 จากกราฟในรูปที่ 5.2 มีรายละเอียดดังนี้

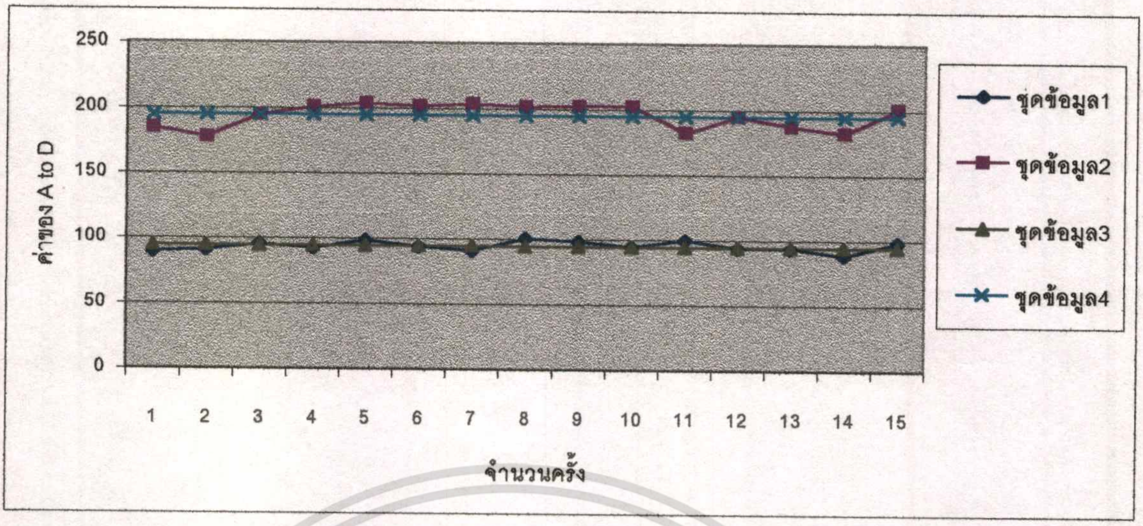
ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 195.133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่กระดาษเปล่า

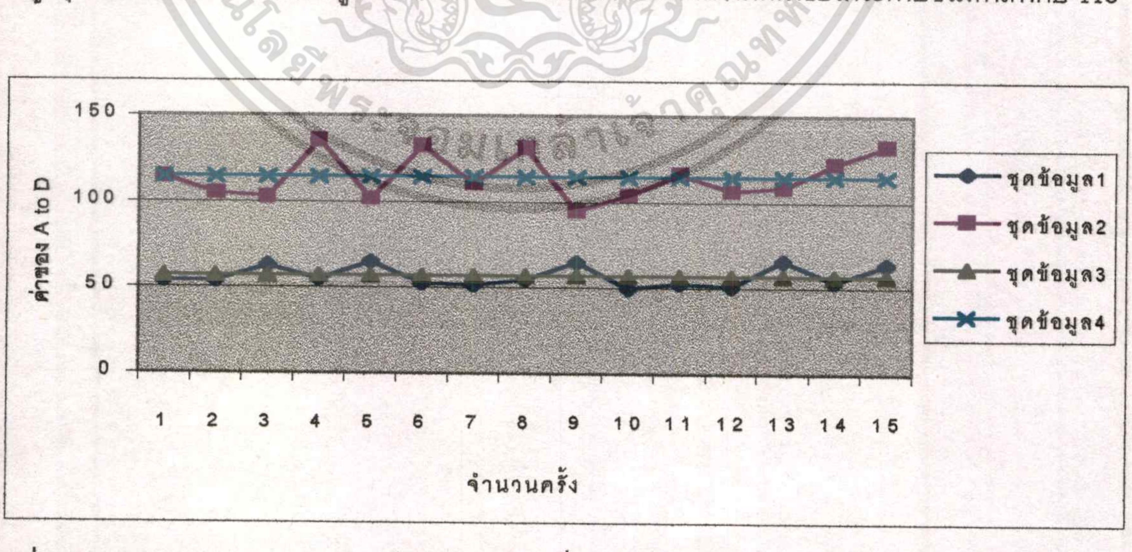
การทดสอบหัวอ่านขณะที่ความเข้มของระดับเกรย์ที่ 10 % สามารถแสดงเป็นกราฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 จากกราฟในรูปที่ 5.3 มีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.933

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงจากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 115



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

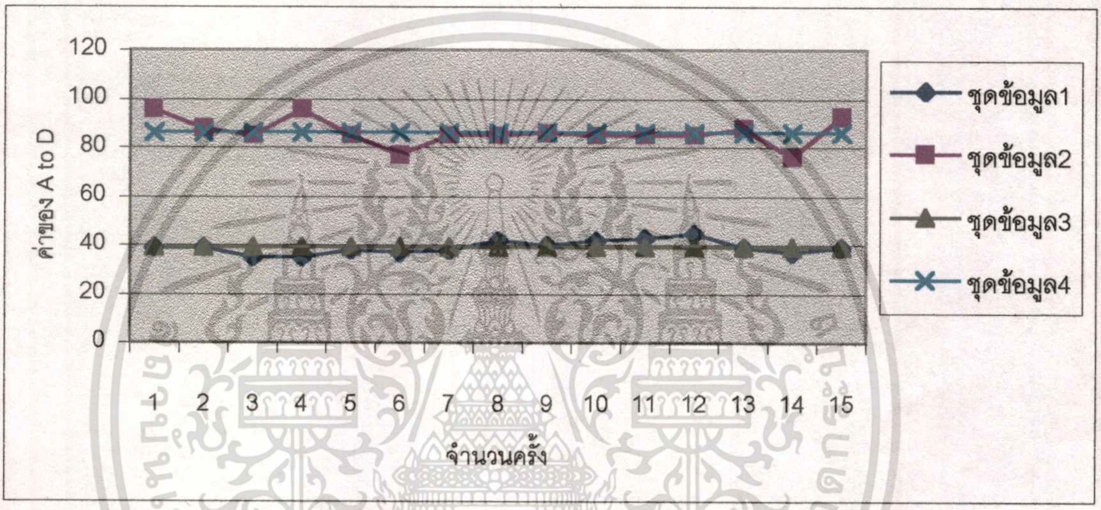
การทดสอบหัวอ่านขณะที่ความเข้มของระดับเกรย์ที่ 30 % สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากกราฟในรูปที่ 5.4 มีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.2

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 86.333



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 30%

การทดสอบหัวอ่านขณะที่ความเข้มของระดับเกรย์ที่ 50 % สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จากกราฟในรูปที่ 5.5 มีรายละเอียดดังนี้

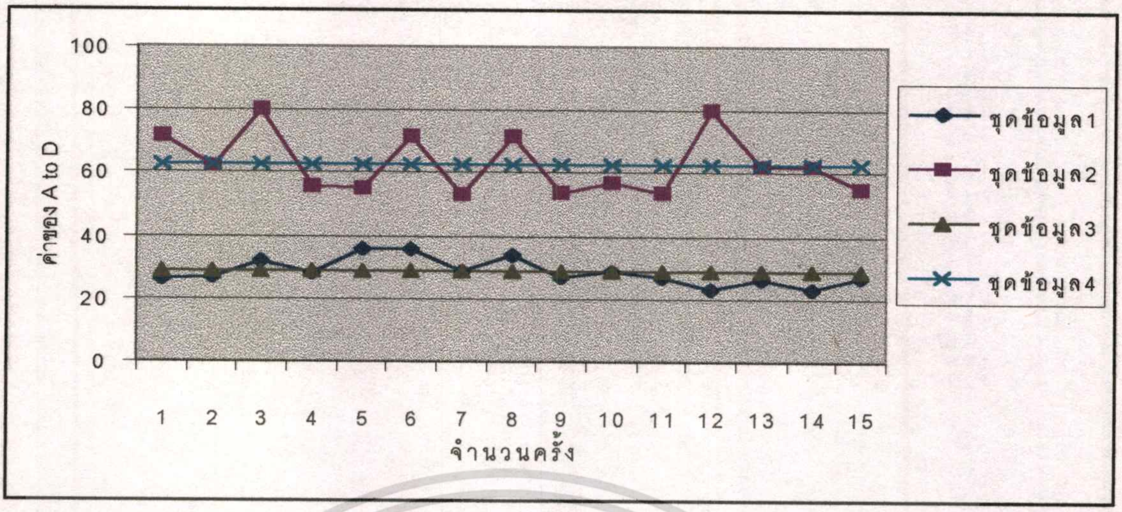
ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

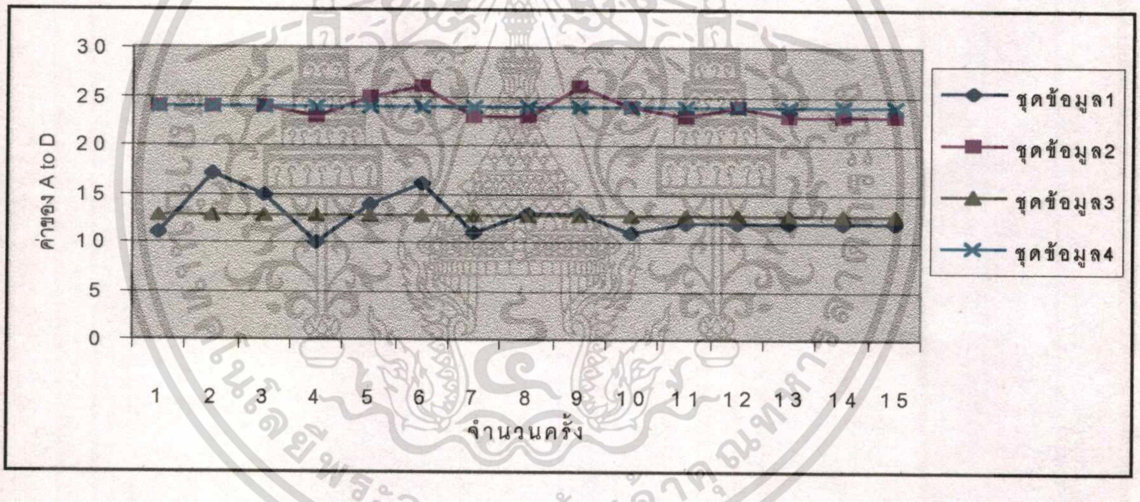
ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.667

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 63.066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 50%



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 70%

การทดสอบหัวอ่านขณะที่ความเข้มของระดับเกรย์ที่ 70 % สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5.6 จากกราฟในรูปที่ 5.6 มีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.733

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.866

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

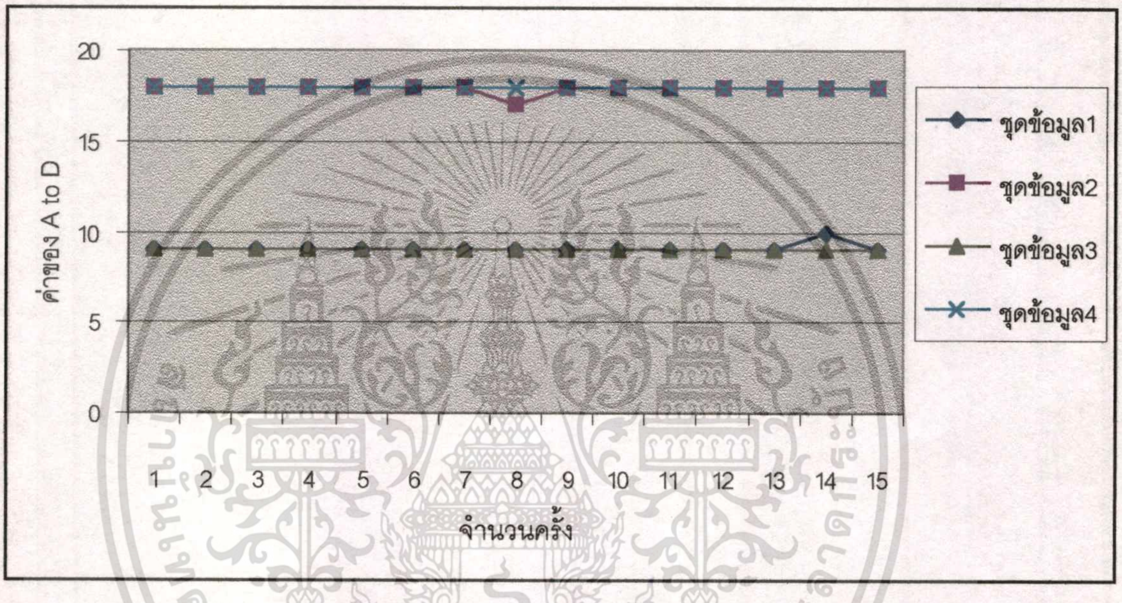
การทดสอบหัวอ่านขณะที่ความเข้มของระดับเกรย์ที่ 90 % สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5.7 จากกราฟในรูปที่ 5.7 มีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ขณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษ

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.066

ข้อมูลชุดที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลจาก A to D ที่แรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.933



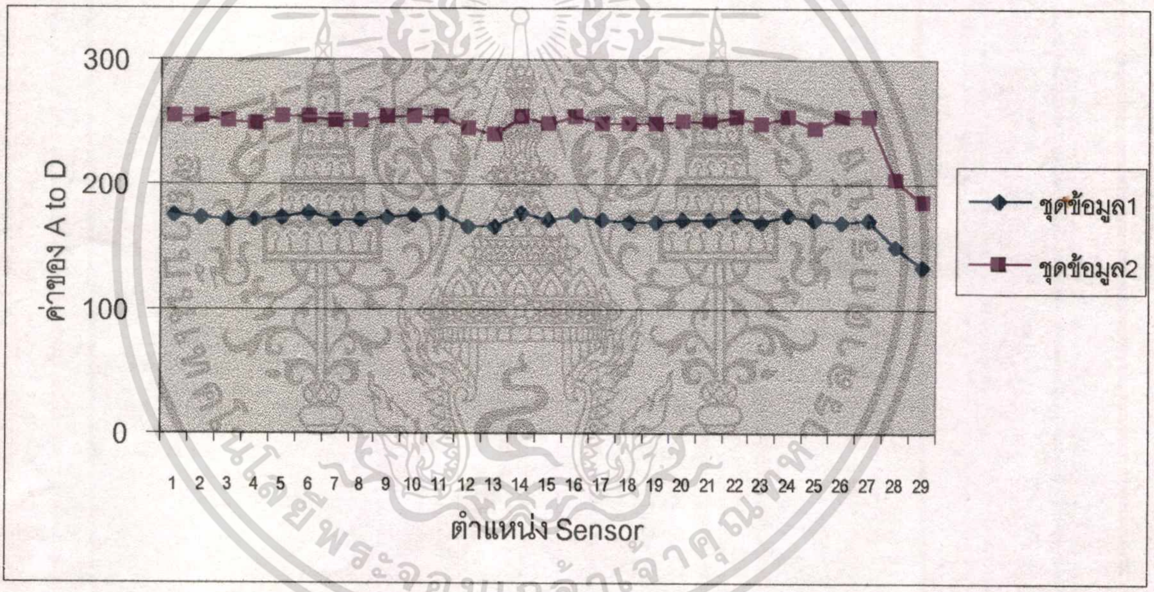
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างใช้แรงดันอ้างอิงที่ Vcc/2 กับใช้ความหนากระดาษเป็นแรงดันอ้างอิงที่ระดับเกรย์ 90%

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของระดับเกรย์กับข้อมูลค่าเฉลี่ยจากหัวอ่านเพียงจุดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้ทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มเกรย์กับค่าของ A to D จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยที่ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลขณะที่ใช้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ Vcc/2 และข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลขณะใช้แรงดันอ้างอิงจากความหนาของกระดาษ

สำหรับการทดสอบหัวอ่านทั้ง 29 จุดจะเป็นการทดสอบขณะที่ติดตั้งที่เครื่องตรวจข้อสอบตามมาตราฐานระดับเกรย์จากโปรแกรม VISIO ที่ได้กล่าวมาแล้วโดยผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.1 เมื่อ Vcc/2 หมายถึงแรงดันอ้างอิงที่ใช้และขยายหมายถึงการกำหนดแรงดันอ้างอิงตามความหนากระดาษเมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดของหัวอ่านกับค่าที่อ่านได้จาก A to D ขณะที่ใช้แรงดันอ้างอิงเป็น Vcc/2 กับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากความหนาของกระดาษคำตอบซึ่งแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.14 โดยที่ข้อมูลชุดที่ 1 และข้อมูลชุดที่ 2 ที่แสดงในกราฟหมายถึงข้อมูลขณะแรงดันอ้างอิงเป็น Vcc/2 กับแรงดันอ้างอิงตามความหนากระดาษคำตอบตามลำดับ



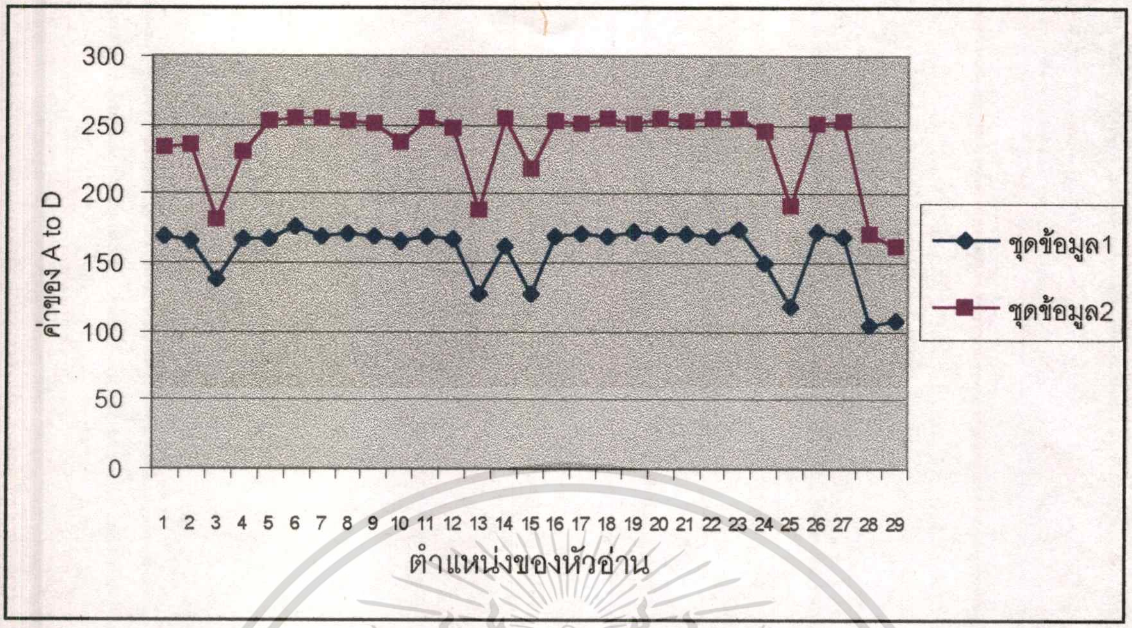
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้เมื่อใช้กระดาษเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

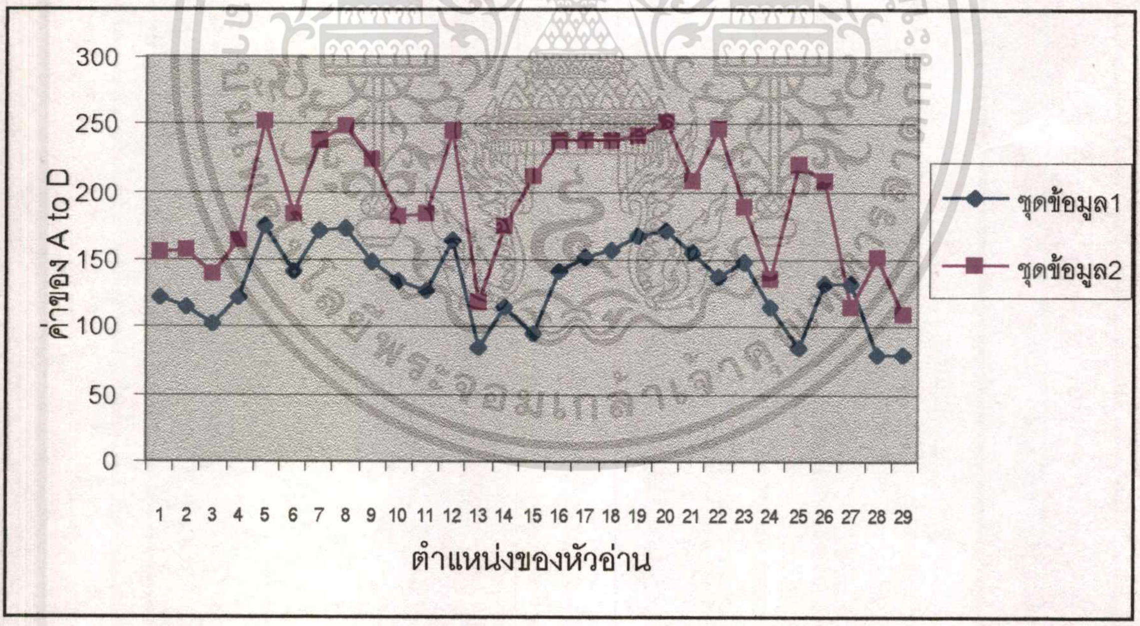
ตารางที่ 5.1 ผลของการอ่านข้อมูลจากหัวอ่านทั้งหมดที่ระดับเกรย์ต่าง ๆ

ตำแหน่งของหัวอ่าน	ระดับเกรย์ที่ใช้ในการทดสอบ											
	0%		10%		30%		50%		70%		90%	
	Vcc/2	ขยาย	Vcc/2	ขยาย	Vcc/2	ขยาย	Vcc/2	ขยาย	Vcc/2	ขยาย	Vcc/2	ขยาย
1	176	255	170	233	122	155	100	107	90	63	22	31
2	174	255	165	236	115	157	93	104	94	72	15	21
3	171	252	137	182	102	140	73	83	75	47	18	32
4	171	249	268	230	122	165	86	100	82	68	18	34
5	173	254	168	253	175	253	137	156	126	104	32	45
6	178	255	176	255	142	183	87	109	82	73	21	21
7	172	251	170	255	172	239	112	135	108	88	25	31
8	172	251	171	253	173	248	113	151	115	96	25	37
9	174	255	170	252	148	225	91	127	93	76	24	43
10	175	255	166	237	135	181	72	98	82	64	25	27
11	177	255	169	254	127	183	77	113	91	68	24	43
12	167	245	168	247	164	245	106	181	124	94	29	42
13	167	240	128	188	85	118	68	90	60	50	18	36
14	178	255	162	254	115	174	72	116	86	66	20	29
15	172	249	128	218	95	212	53	88	67	56	17	32
16	175	255	170	253	142	238	80	128	92	76	15	31
17	171	249	171	251	151	239	86	147	104	89	22	38
18	169	249	170	254	157	239	89	153	106	95	23	39
19	170	250	172	251	168	242	86	167	112	111	23	42
20	171	251	171	254	172	252	105	161	108	112	25	45
21	172	251	171	253	156	209	96	151	105	103	25	39
22	175	255	170	254	137	247	83	109	84	71	17	33
23	169	249	174	255	149	189	105	143	100	112	25	42
24	175	25	150	246	114	136	70	111	76	62	13	36
25	171	246	118	191	84	221	56	83	56	48	13	22
26	170	251	172	252	133	209	92	147	88	92	22	45
27	172	254	170	253	132	114	95	129	76	79	15	27
28	150	205	105	171	79	151	63	86	39	47	18	13
29	134	187	108	162	79	110	59	69	48	50	13	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

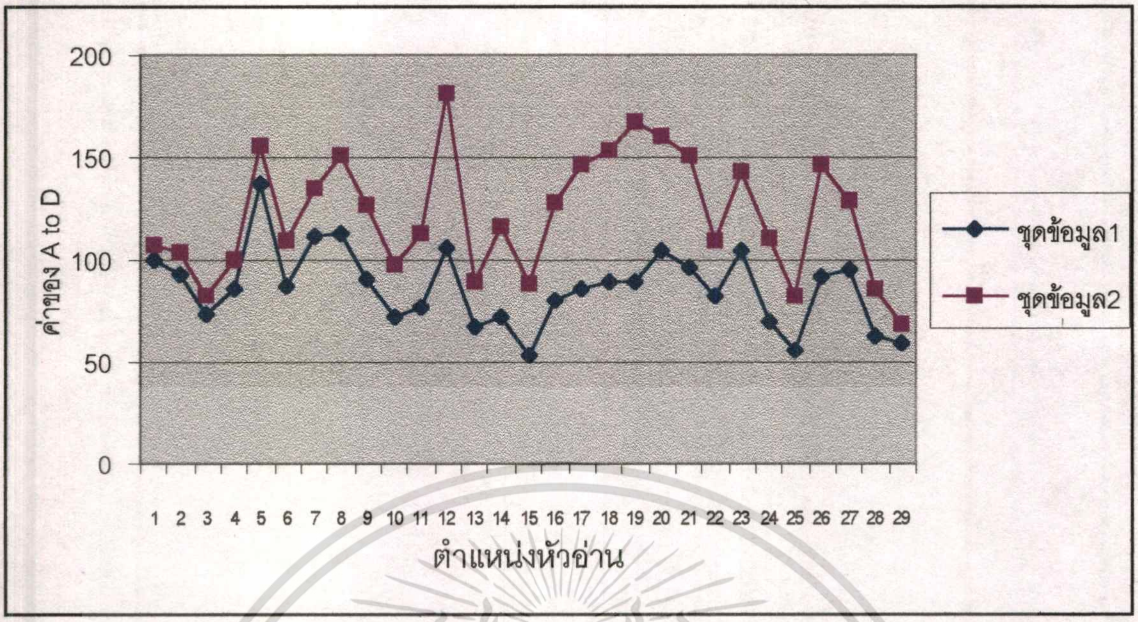


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 10%

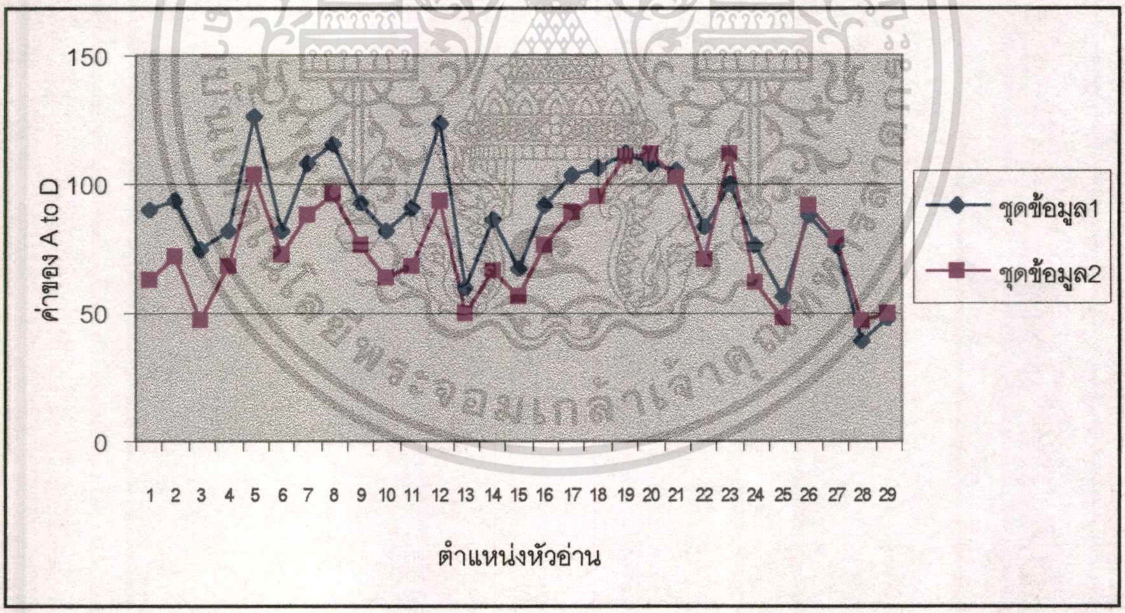


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

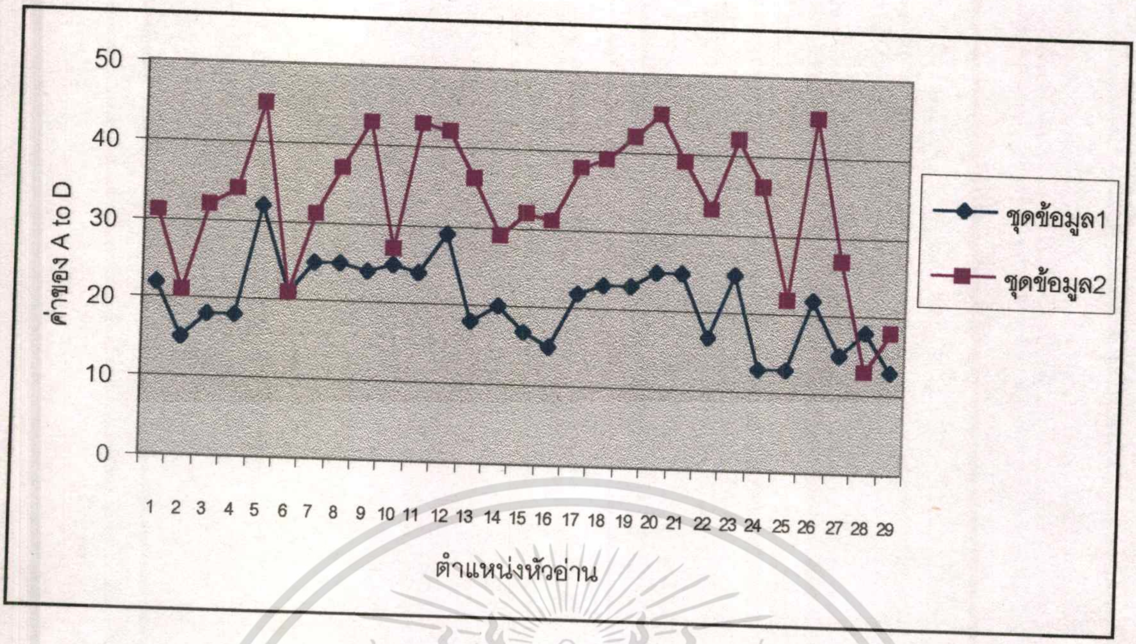


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 50%



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของหัวอ่านแต่ละจุดกับค่า A to D ที่อ่านได้ที่ระดับเกรย์ 90%

5.2 ผลการทดสอบโปรแกรมควบคุม

การทดสอบการทำงานของโปรแกรมสามารถทำได้โดยการจำลองสถานะการทำงานแล้วจึงตรวจสอบจากการแสดงผลที่ LCD ซึ่งการแสดงผลจะเป็นลักษณะเหมือนการแสดงผลแบบเมนูเพียงแต่มีข้อจำกัดที่ LCD ที่แสดงผลได้เพียงสองบรรทัดเท่านั้นโดยสามารถแบ่งการแสดงผลออกเป็นเมนูหลักและเมนูย่อยดังนี้ เมนูหลักที่แสดงบน LCD แบ่งออกเป็นสามเมนูหลักได้แก่

เมนูหลักการเลือกแบบกระดาษคำตอบซึ่งมีสองแบบ โดยจะแสดงผลในรูปที่ 5.15

SELECT FORM

Press <DONE> button

รูปที่ 5.15 การแสดงผลเมื่อเมนูเลือกแบบกระดาษทำงาน

ภายใต้เมนูนี้เมื่อกดคีย์ DONE จะเข้าสู่เมนูย่อยเพื่อเลือกแบบกระดาษซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งจะแสดงแบบกระดาษคำตอบที่ 1 หากต้องการเปลี่ยนให้กดคีย์ SELECT จะเปลี่ยนเป็นแบบที่ 2 หากต้องการเลือกเพียงกดคีย์ DONE เป็นการสิ้นสุดการเลือกแบบกระดาษคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELECT FORM

FORM NUMBER : 1

รูปที่ 5.16 เมื่อเข้าสู่เมนูย่อยของการเลือกแบบกระดาษ

เมนูหลักสำหรับการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยจะปรากฏขึ้นเมื่อกดคีย์ SELECT โดยจะแสดงดังรูปที่ 5.17 ซึ่งเมื่อกดคีย์ DONE จะเข้าสู่การอ่านกระดาษคำตอบเฉลยโดยจะแสดงดังรูปที่ 5.18

READ MODE

Press <DONE> button

รูปที่ 5.17 เมนูหลักของการอ่านกระดาษคำตอบเฉลย

READ MODE

TIME MARK : 00

รูปที่ 5.18 การแสดงผลขณะอ่านกระดาษคำตอบเฉลย

โดยที่ตำแหน่ง TIME MARK จะแสดงตำแหน่งของแถบอ้างอิงที่ได้อ่านข้อมูลแล้ว เมื่อการอ่านสิ้นสุดลงจะเข้าสู่เมนูหลักของการตรวจข้อสอบทันทีโดยแสดงผลดังรูปที่ 5.19 นอกจากนี้ยังสามารถใช้การกดคีย์ SELECT เพื่อ

SCAN MODE

Press <DONE> button

รูปที่ 5.19 การแสดงผลเมื่อเมนูหลักการตรวจข้อสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่การทำงานของการตรวจข้อสอบแต่ถ้าไม่ได้ผ่านการอ่านกระดาษคำตอบเฉลยจะไม่สามารถเข้าทำงานได้เมื่อต้องการให้เริ่มตรวจข้อสอบให้กดคีย์ DONE จะแสดงผลดังรูปที่ 5.20 เมื่ออ่านสิ้นสุดผลการตรวจจะแสดงใน

SCAN MODE
TIME MARK : 00

รูปที่ 5.20 การแสดงผลขณะตรวจข้อสอบ

รูปที่ 5.21 โดยจะแสดงรหัสและคะแนนที่ได้ ขณะนี้เครื่องจะรอการกดคีย์เพื่อตรวจต่อหรือหยุด ถ้าเลือกที่จะ

SCAN MODE
ID : 12345678 Pt:99

รูปที่ 5.21 การแสดงผลของคะแนนที่ตรวจได้

หยุดคำตอบเฉลยที่ใช้จะถูกยกเลิกถือเป็นการสิ้นสุดการตรวจข้อสอบนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและแนวทางพัฒนาต่อ

6.1 สรุปผลการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ

จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบสามารถแยกได้สองส่วนได้แก่ส่วนทางด้านวงจรไฟฟ้ากับส่วนของการขับเคลื่อนกระดาษคำตอบโดยสรุปผลได้ดังนี้ ในส่วนของวงจรไฟฟ้าโดยเฉพาะส่วนของวงจรหัวอ่านที่สร้างขึ้น การจับควบเข้มของการฝนดินสอโดยการใช้ระดับเกรย์ที่ได้จากโปรแกรม VISIO โดยการทดสอบซ้ำ 15 ครั้งจะเห็นว่าการตรวจจับจะได้ค่าที่แน่นอนเมื่อความเข้มของระดับเกรย์มากกว่า 50% ซึ่งเป็นเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอีกทั้งปัญหาของการติดตั้งตัวรับและตัวส่งแสงอินฟราเรดที่ไม่ตรงกันอย่างแท้จริงทำให้หัวอ่านแต่ละจุดมีความแตกต่างกันบ้าง สำหรับโปรแกรมควบคุมการทำงานสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามลำดับที่ได้กำหนดไว้ สำหรับในส่วนของการขับเคลื่อนกระดาษคำตอบนั้นสามารถทำงานได้ในระดับที่คาดการณ์ไว้จะมีปัญหาบ้างอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นพลาสติกเพราะขณะที่กระดาษคำตอบเคลื่อนผ่านพลาสติกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นที่พลาสติกซึ่งทำให้ขณะที่กระดาษคำตอบวิ่งผ่านเกิดการดูดติดกับพลาสติกขึ้นในบางเวลา สำหรับข้อดีข้อเสียของการขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นได้แก่

ข้อดี

1. โครงสร้างที่ใช้พลาสติกสามารถหาซื้อง่าย ราคาถูก ติดตั้งและแก้ไขเพิ่มเติมง่ายและสะดวกเหมาะสำหรับทำเครื่องต้นแบบ
2. แนวการเคลื่อนกระดาษคำตอบทางแนวตั้ง สามารถควบคุมขอบกระดาษคำตอบเคลื่อนที่ในแนวตรงได้ง่ายและมีความแน่นอนกว่าการวางกระดาษตามแนวนอน เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้กระดาษสามารถเคลื่อนชิดขอบได้ดี
3. การขับด้วยเฟือง สามารถสร้างได้ง่ายและควบคุมแรงบิดได้ง่ายกว่าระบบสายพาน

ข้อเสีย

1. โครงสร้างที่ทำจากพลาสติกไม่มีความแข็งแรงทำให้เกิดการผิดพลาดจากตำแหน่งที่ต้องการ
2. ขณะที่กระดาษคำตอบเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างที่เป็นพลาสติกทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการสะดุดของการกระดาษคำตอบได้
3. การลำเรียงกระดาษคำตอบด้วยมอเตอร์กระแสตรง ควบคุมตำแหน่งการหยุดกระดาษยาก

6.2 แนวทางการพัฒนาต่อ

1. การพัฒนาหัวอ่านโดยใช้วงจรและตัวตรวจจับเดิมให้สามารถตรวจกระดาษคำตอบแบบสะท้อนได้
2. การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการตรวจข้อสอบเช่นการตัดเกรดบนเครื่องคอมพิวเตอร์
3. ตัวลำเรียงกระดาษควรใช้เป็นสเตปปิ้งมอเตอร์ เพื่อสามารถควบคุมตำแหน่งที่แน่นอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โครงสร้างของเครื่องตรวจข้อสอบควรทำด้วยโลหะ เช่น อลูมิเนียม หรือสแตนเลส
5. สามารถกำหนดรูปแบบกระดาษคำตอบของผู้ใช้ตามต้องการได้
6. เขียนโปรแกรมเพิ่มเติมสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ เช่น เก็บข้อมูลแบบสอบถามทั่วไป
7. พัฒนาหัวอ่านให้สามารถใช้กับรหัสแถบ หรือสามารถอ่านลายมือเขียนได้โดยตรง
8. ในส่วนของวงจรหัวอ่านควรใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลที่ทำงานแบบมัลติเพล็กหลายอินพุทเพื่อลดจำนวนอุปกรณ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

คณะวิศวกรรรมศาสตร์. "สเตปปิ้งมอเตอร์". **วิศวสารลาดกระบัง**. เดือนเมษายน 2532 , ฉบับที่ 4.

ผ.ศ โยธิน เปรมปราณีรัชต์, 2526. **การวิเคราะห์และออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์.** แผนกตำราและเอกสารการพิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Chappell, A. 1978. **Optoelectronics : Theory and Practice**. New York : McGraw-Hill.

Sporck, C.E. 1984. **Data Conversion/Acquistion Databook**. California : National Semiconductor Corporation.

Sheingold, D,H. 1986. **Analog – Digital Conversion Handbook.** 3th ed. New Jersey : Pentice hall.

Dumortier, D. 1980. **Digital/Analog and Analog/Digital Conversion Handbook.** Motorola Inc.

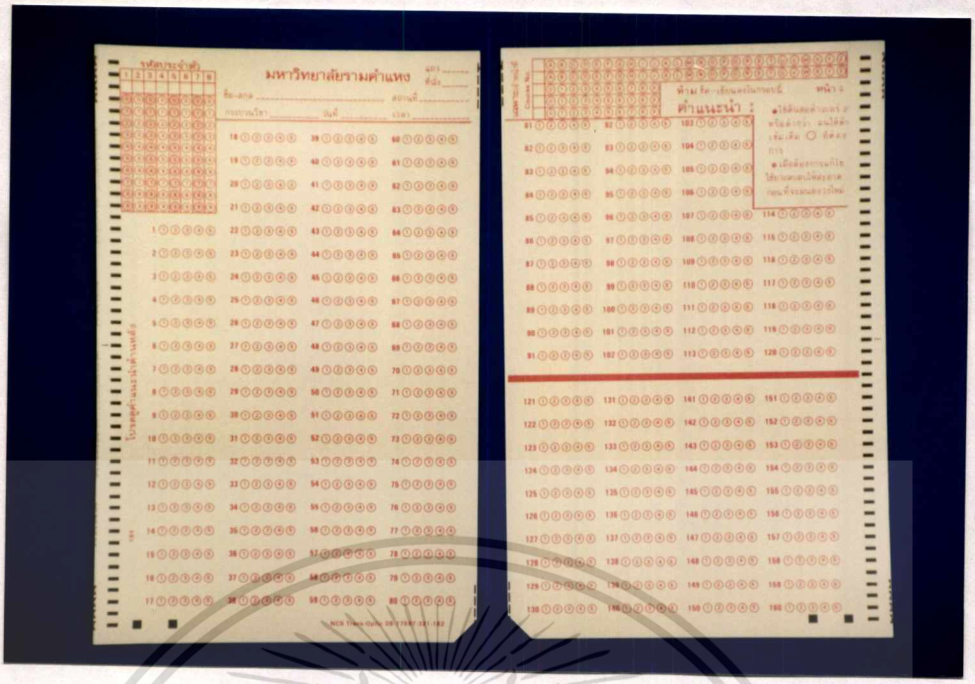
SHARUPICH, L. and TUGOV, N. 1987. **Optoelectronics**. Moscow : MIR Publishers.

Willis J. et. al. 1988. **Interfacing Sensors to the IBM PC.** New Jersey : Pentice hall.

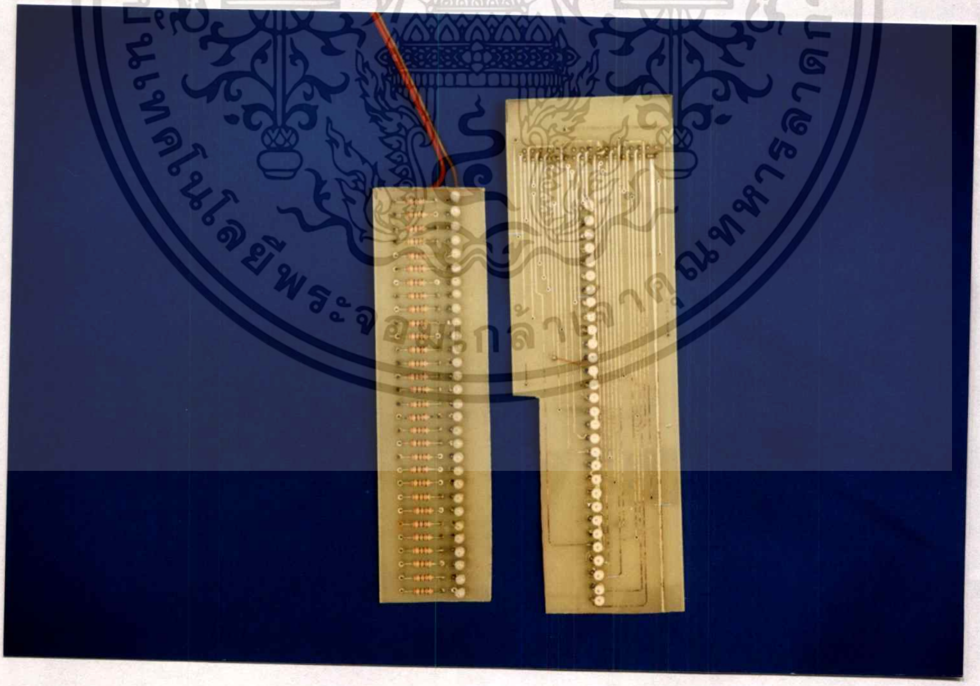
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

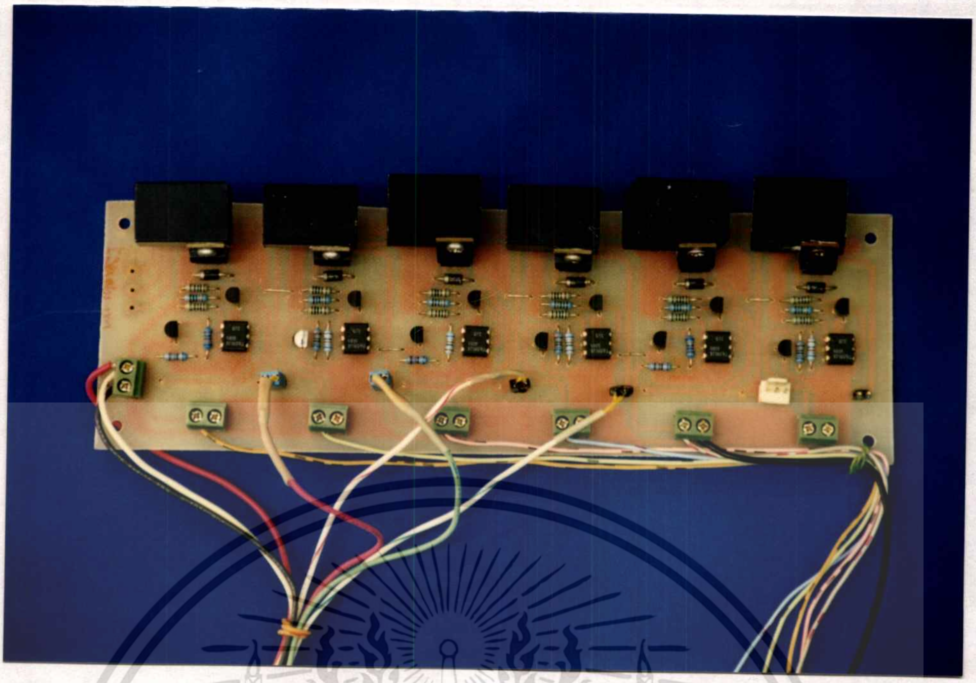


รูปที่ 1ก รูปแบบกระดาษคำตอบที่ใช้ในการทดสอบ

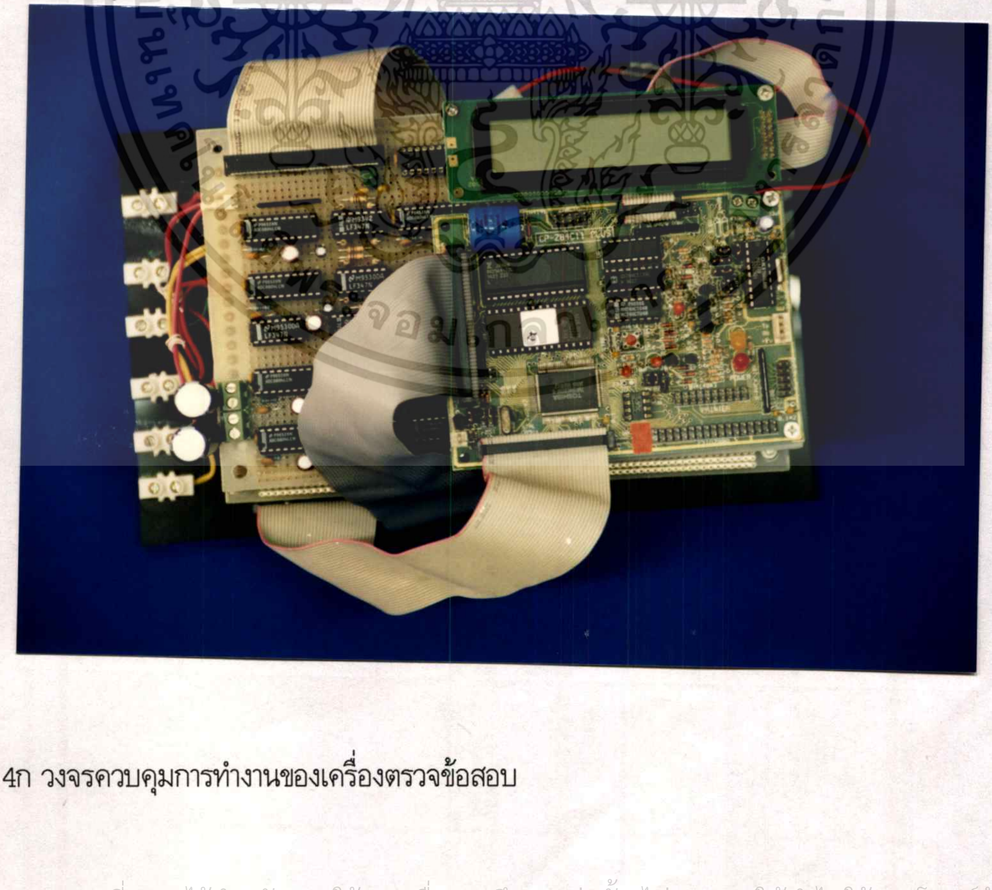


รูปที่ 2ก รูปแสดงตัวตรวจวัดความเข้มของดินสอบนกระดาษคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

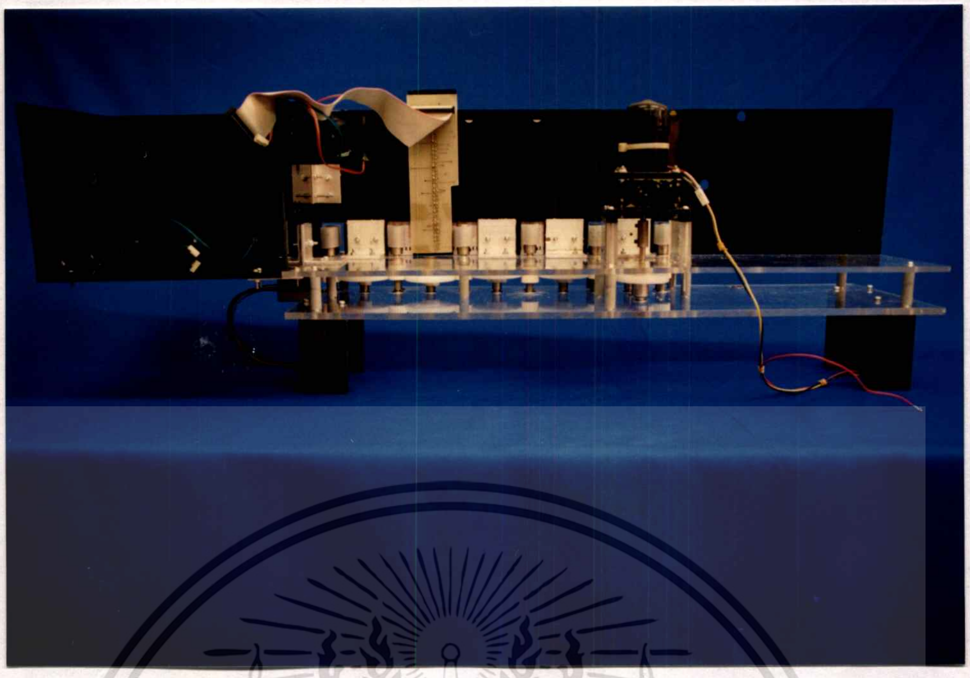


รูปที่ 3ก วงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์และวงจรขับดีซีมอเตอร์

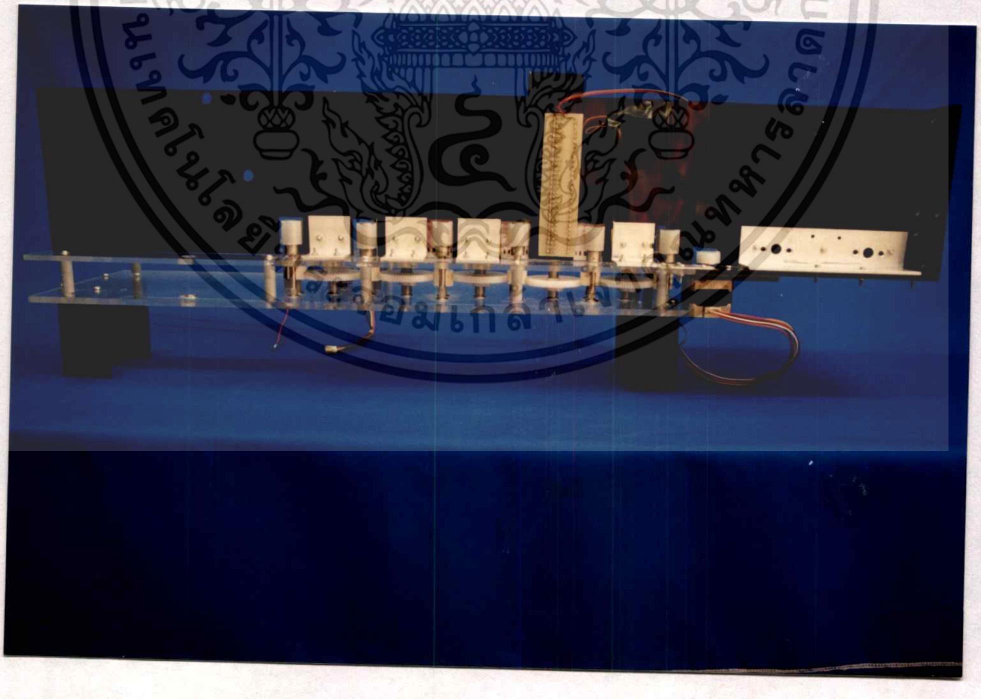


รูปที่ 4ก วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจข้อสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5ก ตัวเครื่องตรวจข้อสอบด้านหน้า



รูปที่ 6ก ตัวเครื่องตรวจข้อสอบด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
0000                                CPU     "Z80.TBL"
0000                                HOF     "INT8"
;
; I/O CONTROL REGISTER ADDRESS
;
0050 =          PORTA:      EQU     50H
0051 =          PORTB:      EQU     51H
0052 =          PORTC:      EQU     52H
0030 =          PORTD:      EQU     30H
0040 =          PORTE:      EQU     40H
        ;
0054 =          ACON:       EQU     54H
0055 =          BCON:       EQU     55H
0056 =          CCON:       EQU     56H
0034 =          DCON:       EQU     34H
0044 =          ECON:       EQU     44H
0080 =          ATOD:       EQU     80H
00FF =          OFFADC:     EQU     0FFH
0000 =          INPUT:      EQU     00H
00FF =          OUTPUT:     EQU     0FFH
001F =          INOUT:      EQU     1FH
00FD =          HEADAD:     EQU     0FDH
00FE =          PAADC:      EQU     0FEH
0055 =          PAPER1:     EQU     55H
;
; I/O LCD PORT
;
0060 =          PDCON:      EQU     60H
0062 =          PDATA:      EQU     62H
0064 =          PFLAG:      EQU     64H
9F93 =          RST38:      EQU     9F93H
0000 =          ONELINE:    EQU     00H         ;FIRST LINE OF LCD DISPLAY
0040 =          TWOLINE:    EQU     40H         ;SECOND LINE OF LCD DISPLAY
A000 =          PAGE1:      EQU     0A000H      ;BUFFER FOR DATA FROM FIRST PAGE
A300 =          PAGE2:      EQU     0A300H      ;BUFFER FOR DATA FROM SECOND
                                                ; PAGE
A600 =          ANSW:       EQU     0A600H      ;BUFFER FOR ANSWER SHEET
A700 =          QUATI:      EQU     0A700H      ;BUFFER FOR CORRECT SHEET
A800 =          CODE:       EQU     0A800H      ;BUFFER FOR STUDENT CODE
A900 =          CODBUF:     EQU     0A900H
A80A =          POINT:      EQU     CODE+10     ;BUFFER FOR POINT
FF00 =          STATUS:     EQU     0FF00H
FF01 =          FORM:       EQU     STATUS+1
FF02 =          SUBSTA:     EQU     FORM+1
FF03 =          TMARK:      EQU     SUBSTA+1
FF04 =          MEMBUF:     EQU     TMARK+1
FF06 =          BUMODE:     EQU     MEMBUF+2
FF07 =          MEMPA1:     EQU     BUMODE+1
FF09 =          MEMPA2:     EQU     MEMPA1+2
FF0B =          READY:      EQU     MEMPA2+2
FF0C =          PERROR:     EQU     READY+1
FF0D =          DUM:        EQU     PERROR+1
;
8000                                ORG             8000H
8000 ED56               START:      IM              1
8002 F3                             DI
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
8003 3100F0              LD      SP,0F000H
8006 AF                  XOR     A
8007 3200FF              LD      (STATUS),A
800A 3201FF              LD      (FORM),A
800D 3202FF              LD      (SUBSTA),A
8010 3206FF              LD      (BUMODE),A
8013 320BFF              LD      (READY),A
8016 3EFF                LD      A,OUTPUT
8018 D354                OUT     (ACON),A
801A D355                OUT     (BCON),A
801C 3E00                LD      A,INPUT
801E D356                OUT     (CCON),A
8020 3E1F                LD      A,INOUT
8022 D334                OUT     (DCON),A
8024 AF                  XOR     A
8025 D330                OUT     (PORTD),A
8027 3EFF                LD      A,OFFADC
8029 D351                OUT     (PORTB),A
802B CDAA86              CALL    INITLCD
802E 3E00                LD      A,ONELINE
8030 CD9086              CALL    GOTO
8033 21F986              LD      HL,TABLE
8036 CD9F86              CALL    SHOW
8039 06FF                LD      B,0FFH
803B CDD186     STR:     CALL    DELAY1
803E 10FB                DJNZ    STR
8040 3E00                LD      A,ONELINE
8042 CD9086              CALL    GOTO
8045 217187              LD      HL,SFORM
8048 CD9F86              CALL    SHOW
804B 3E40                LD      A,TWOLINE
804D CD9086              CALL    GOTO
8050 213587              LD      HL,PRESS
8053 CD9F86              CALL    SHOW
8056 21EF82              LD      HL,INTR
8059 22939F              LD      (RST38),HL
805C CDD886     MAIN:    CALL    KEYPAD
805F AF                  XOR     A
8060 B9                  CP      C
8061 28F9                JR      Z,MAIN
8063 79                  LD      A,C
8064 FE01                CP      01H
8066 2807                JR      Z,SELECT
8068 FE02                CP      02H
806A CA1F81              JP      Z,DONE
806D 18ED                JR      MAIN
806F 3A02FF     SELECT:  LD      A,(SUBSTA)
8072 FE01                CP      01H
8074 CAA280              JP      Z,SUBSEL
8077 3A00FF              LD      A,(STATUS)
807A 3C                  INC     A
807B 3200FF              LD      (STATUS),A
807E FE04                CP      04H
8080 2001                JR      NZ,SEL
8082 AF                  XOR     A
8083 3200FF     SEL:     LD      (STATUS),A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
8086 FE00                  CP      00H
8088 CA0981                JP      Z,SELFORM
808B FE01                  CP      01H
808D CA1481                JP      Z,ANSWER
8090 FE02                  CP      02H
8092 286A                  JR      Z,SCAN
8094 3E00       FUNC:      LD      A,ONELINE
8096 CD9086                CALL    GOTO
8099 212187                LD      HL,SET
809C CD9F86     SEL1:      CALL    SHOW
809F C35C80                JP      MAIN
80A2 3A00FF     SUBSEL:    LD      A,(STATUS)
80A5 FE00                  CP      00H
80A7 2807                  JR      Z,SUBFORM
80A9 FE03                  CP      03H
80AB 2824                  JR      Z,SUBSET
80AD C35C80                JP      MAIN
80B0 3A01FF     SUBFORM:   LD      A,(FORM)
80B3 3C                    INC     A
80B4 3201FF                LD      (FORM),A
80B7 FE02                  CP      02H
80B9 2004                  JR      NZ,SUBF1
80BB AF                    XOR     A
80BC 3201FF                LD      (FORM),A
80BF 3E4D       SUBF1:     LD      A,4DH
80C1 CD9086                CALL    GOTO
80C4 3A01FF                LD      A,(FORM)
80C7 F630                  OR      30H
80C9 D362                  OUT     (PDATA),A
80CB CD9886                CALL    CHECK
80CE C35C80                JP      MAIN
80D1 3A06FF     SUBSET:    LD      A,(BUMODE)
80D4 3C                    INC     A
80D5 3206FF                LD      (BUMODE),A
80D8 FE02                  CP      02H
80DA 2004                  JR      NZ,SUBS1
80DC AF                    XOR     A
80DD 3206FF                LD      (BUMODE),A
80E0 3E46       SUBS1:     LD      A,46H
80E2 CD9086                CALL    GOTO
80E5 3A06FF                LD      A,(BUMODE)
80E8 FE01                  CP      01H
80EA 280B                  JR      Z,SUBS2
80EC 21C187                LD      HL,STAND
80EF 060D                  LD      B,13
80F1 CDA186     SUBS11:    CALL    TEST11
80F4 C35C80                JP      MAIN
80F7 21CE87     SUBS2:     LD      HL,COMPU
80FA 060D                  LD      B,13
80FC 18F3                  JR      SUBS11
80FE 3E00       SCAN:      LD      A,ONELINE
8100 CD9086                CALL    GOTO
8103 214987                LD      HL,BEGIN
8106 C39C80                JP      SEL1
8109 3E00       SELFORM:   LD      A,ONELINE
810B CD9086                CALL    GOTO
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
810E 217187              LD      HL,SFORM
8111 C39C80              JP      SEL1
8114 3E00     ANSWER:    LD      A,ONELINE
8116 CD9086              CALL    GOTO
8119 210D87              LD      HL,GET
811C C39C80              JP      SEL1
811F 3A02FF   DONE:      LD      A,(SUBSTA)
8122 FE01                CP      01H
8124 CA5E83              JP      Z,SUBDO
8127 3A00FF              LD      A,(STATUS)
812A FE00                CP      00H
812C CA6B81              JP      Z,FORMSEL
812F FE01                CP      01H
8131 CA8D81              JP      Z,GETPOI
8134 FE02                CP      02H
8136 CA2C82              JP      Z,BSCAN
8139 3E01     FUNSET:    LD      A,01H
813B 3202FF              LD      (SUBSTA),A
813E 3E40                LD      A,TWOLINE
8140 CD9086              CALL    GOTO
8143 21AD87              LD      HL,SEMODE
8146 CD9F86              CALL    SHOW
8149 3E46                LD      A,46H
814B CD9086              CALL    GOTO
814E 3A06FF              LD      A,(BUMODE)
8151 FE00                CP      00H
8153 200B                JR      NZ,COMODE
8155 21C187   SELF:      LD      HL,STAND
8158 060D                LD      B,13
815A CDA186              CALL    TEST11
815D C35C80              JP      MAIN
8160 060D     COMODE:    LD      B,13
8162 21CE87              LD      HL,COMPU
8165 CDA186              CALL    TEST11
8168 C35C80              JP      MAIN
816B 3E01     FORMSEL:   LD      A,01H
816D 3202FF              LD      (SUBSTA),A
8170 3E40                LD      A,TWOLINE
8172 CD9086              CALL    GOTO
8175 21DB87              LD      HL,SEFORM
8178 CD9F86              CALL    SHOW
817B 3E4D                LD      A,4DH
817D CD9086              CALL    GOTO
8180 3A01FF              LD      A,(FORM)
8183 F630                OR      30H
8185 D362                OUT     (PDATA),A
8187 CD9886              CALL    CHECK
818A C35C80              JP      MAIN
818D 3E55     GETPOI:    LD      A,PAPER1
818F D350                OUT     (PORTA),A
8191 AF                  XOR     A
8192 3203FF              LD      (TMARK),A
8195 3E40                LD      A,TWOLINE
8197 CD9086              CALL    GOTO
819A 218587              LD      HL,WHREAD
819D CD9F86              CALL    SHOW
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
81A0 2100A0              LD      HL,PAGE1
81A3 2207FF              LD      (MEMPA1),HL
81A6 2100A3              LD      HL,PAGE2
81A9 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
81AC DB30                IN      A,(PORTD)
81AE CBE7                SET     4,A
81B0 D330                OUT     (PORTD),A
81B2 CD6186              CALL    MOTOR
81B5 DB51                IN      A,(PORTB)
81B7 CBFF                SET     7,A
81B9 D351                OUT     (PORTB),A
81BB FB                  EI
81BC 3E4C       GETPO1:  LD      A,4CH
81BE CD9086              CALL    GOTO
81C1 3A03FF              LD      A,(TMARK)
81C4 FE49                CP      49H
81C6 CAE881              JP      Z,ENDR
81C9 0F                  RRCA
81CA 0F                  RRCA
81CB 0F                  RRCA
81CC 0F                  RRCA
81CD E60F                AND     0FH
81CF F630                OR      30H
81D1 D362                OUT     (PDATA),A
81D3 CD9886              CALL    CHECK
81D6 3A03FF              LD      A,(TMARK)
81D9 E60F                AND     0FH
81DB F630                OR      0H
81DD D362                OUT     (PDATA),A
81DF CD9886              CALL    CHECK
81E2 C3BC81              JP      GETPO1
81E5 0C         COUN:    INC     C
81E6 1816                JR      COUN1
81E8 F3         ENDR:    DI
81E9 DB51                IN      A,(PORTB)
81EB CBBF                RES     7,A
81ED D351                OUT     (PORTB),A
81EF CD8583              CALL    REFORM
81F2 2100A6              LD      HL,ANSW
81F5 06A0                LD      B,160
81F7 0E00                LD      C,00H
81F9 7E         COUNT:   LD      A,(HL)
81FA FE00                CP      00H
81FC 20E7                JR      NZ,COUN
81FE 23         COUN1:   INC     HL
81FF 10F8                DJNZ    COUNT
8201 79                  LD      A,C
8202 320DFF              LD      (DUM),A
8205 AF                  XOR     A
8206 3203FF              LD      (TMARK),A
8209 3E02                LD      A,02H
820B 3200FF              LD      (STATUS),A
820E 3EFF                LD      A,0FFH
8210 320BFF              LD      (READY),A
8213 3E00                LD      A,ONELINE
8215 CD9086              CALL    GOTO
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
8218 214987                 LD      HL,BEGIN
821B CD9F86                 CALL    SHOW
821E 3E40                   LD      A,TWOLINE
8220 CD9086                 CALL    GOTO
8223 213587                 LD      HL,PRESS
8226 CD9F86                 CALL    SHOW
8229 C35C80                 JP      MAIN
822C 3A0BFF     BSCAN:      LD      A,(READY)
822F FE00                   CP      00H
8231 CA5E83                 JP      Z,SUBDO
8234 3E55                   LD      A,PAPER1
8236 D350                   OUT     (PORTA),A
8238 DB30                   IN      A,(PORTD)
823A CBE7                   SET     4,A
823C D330                   OUT     (PORTD),A
823E AF         BSCA21:     XOR     A
823F 3203FF                 LD      (TMARK),A
8242 3E40                   LD      A,TWOLINE
8244 CD9086                 CALL    GOTO
8247 218587                 LD      HL,WHREAD
824A CD9F86                 CALL    SHOW
824D 2100A0                 LD      HL,PAGE1
8250 2207FF                 LD      (MEMPA1),HL
8253 2100A3                 LD      HL,PAGE2
8256 2209FF                 LD      (MEMPA2),HL
8259 CD6186                 CALL    MOTOR
825C DB51                   IN      A,(PORTB)
825E CBFF                   SET     7,A
8260 D351                   OUT     (PORTB),A
8262 FB                     EI
8263 3E4C       BSCAN1:     LD      A,4CH
8265 CD9086                 CALL    GOTO
8268 3A03FF                 LD      A,(TMARK)
826B FE49                   CP      49H
826D CA8C82                 JP      Z,ENDS
8270 0F                     RRCA
8271 0F                     RRCA
8272 0F                     RRCA
8273 0F                     RRCA
8274 E60F                   AND     0FH
8276 F630                   OR      30H
8278 D362                   OUT     (PDATA),A
827A CD9886                 CALL    CHECK
827D 3A03FF                 LD      A,(TMARK)
8280 E60F                   AND     0FH
8282 F630                   OR      30H
8284 D362                   OUT     (PDATA),A
8286 CD9886                 CALL    CHECK
8289 C36382                 JP      BSCAN1
828C F3         ENDS:       DI
828D DB51                   IN      A,(PORTB)
828F CBBF                   RES     7,A
8291 D351                   OUT     (PORTB),A
8293 CD8583                 CALL    REFORM
8296 CDDF84                 CALL    GETID
8299 CD0486                 CALL    ERROR
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
829C 3A0CFF                 LD      A,(PERROR)
829F FEFF                   CP      0FFH
82A1 283E                   JR      Z,ENDSS
82A3 CDE585                 CALL    GETPT
82A6 3E40         ENDS1:    LD      A,TWOLINE
82A8 CD9086                 CALL    GOTO
82AB 219987                 LD      HL,STDID
82AE CD9F86                 CALL    SHOW
82B1 3E43                   LD      A,43H
82B3 CD9086                 CALL    GOTO
82B6 060A                   LD      B,10
82B8 2100A8                 LD      HL,CODE
82BB CDA186                 CALL    TEST11
82BE 3E51                   LD      A,51H
82C0 CD9086                 CALL    GOTO
82C3 210AA8                 LD      HL,POINT
82C6 0603                   LD      B,3
82C8 CDA186                 CALL    TEST11
82CB 3A06FF                 LD      A,(BUMODE)
82CE FE01                   CP      01H
82D0 CA8D86                 JP      Z,SERIAL
82D3 DB30         P:        IN      A,(PORTD)
82D5 CB77                   BIT     6,A
82D7 CA0080                 JP      Z,START
82DA CB7F                   BIT     7,A
82DC 20F5                   JR      NZ,P
82DE C33E82                 JP      BSCA21
82E1 210AA8       ENDSS:    LD      HL,POINT
82E4 3E3F                   LD      A,3FH
82E6 0603                   LD      B,03H
82E8 77           ENDSS1:   LD      (HL),A
82E9 23                     INC     HL
82EA 10FC                   DJNZ    ENDSS1
82EC C3A682                 JP      ENDS1
82EF F3           INTR:     DI
82F0 08                     EX      AF,AF'
82F1 D9                     EXX
82F2 DB51                   IN      A,(PORTB)
82F4 CBBF                   RES     7,A
82F6 D351                   OUT     (PORTB),A
82F8 3A03FF                 LD      A,(TMARK)
82FB FE49                   CP      49H
82FD CA4483                 JP      Z,BACK1
8300 2A07FF                 LD      HL,(MEMPA1)
8303 ED5B09FF               LD      DE,(MEMPA2)
8307 3EFD                   LD      A,HEADAD
8309 DB51                   IN      A,(PORTB)
830B CB8F                   RES     1,A
830D D351                   OUT     (PORTB),A
830F 00                     NOP
8310 00                     NOP
8311 00                     NOP
8312 DB51                   IN      A,(PORTB)
8314 CBCF                   SET     1,A
8316 D351                   OUT     (PORTB),A
8318 DB52         OD:       IN      A,(PORTC)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
831A CB47                BIT    0,A
831C 20FA                JR     NZ,OD
831E 3A03FF              LD     A,(TMARK)
8321 CB47                BIT    0,A
8323 CA4F83              JP     Z,EVEN
8326 EB          ODD:    EX     DE,HL
8327 061D                LD     B,29
8329 0E80                LD     C,ATOD
832B ED78        AGAIN:  IN     A,(C)
832D 2F                  CPL
832E 77                  LD     (HL),A
832F 23                  INC    HL
8330 0C                  INC    C
8331 10F8                DJNZ   AGAIN
8333 EB                  EX     DE,HL
8334 2207FF      BACK:   LD     (MEMPA1),HL
8337 ED5309FF            LD     (MEMPA2),DE
833B 3A03FF              LD     A,(TMARK)
833E C601                ADD    A,01
8340 27                  DAA
8341 3203FF              LD     (TMARK),A
8344 DB51        BACK1:  IN     A,(PORTB)
8346 CBFF                SET    7,A
8348 D351                OUT    (PORTB),A
834A 08                  EX     AF,AF'
834B D9                  EXX
834C FB                  EI
834D ED4D                RETI
834F 061D        EVEN:   LD     B,29
8351 0E80                LD     C,ATOD
8353 ED78        GAIN:   IN     A,(C)
8355 2F                  CPL
8356 77                  LD     (HL),A
8357 23                  INC    HL
8358 0C                  INC    C
8359 10F8                DJNZ   GAIN
835B C33483              JP     BACK
835E AF          SUBDO:  XOR    A
835F 3202FF              LD     (SUBSTA),A
8362 3200FF              LD     (STATUS),A
8365 3E01                LD     A,01H
8367 D360                OUT    (PDCON),A
8369 CD9886              CALL   CHECK
836C 3E00                LD     A,ONELINE
836E CD9086              CALL   GOTO
8371 217187              LD     HL,SFORM
8374 CD9F86              CALL   SHOW
8377 3E40                LD     A,TWOLINE
8379 CD9086              CALL   GOTO
837C 213587              LD     HL,PRESS
837F CD9F86              CALL   SHOW
8382 C35C80              JP     MAIN
8385 0603        REFORM: LD     B,03H
8387 0ED5                LD     C,0D5H
8389 2100A0              LD     HL,PAGE1
838C CDC684              CALL   CHANG
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
838F 0603            LD     B,03H
8391 0EB8            LD     C,0B8H
8393 2100A3          LD     HL,PAGE2
8396 CDC684          CALL   CHANG
8399 DD2100A6        LD     IX,ANSW
839D 3A00FF          LD     A,(STATUS)
83A0 FE01            CP     01H
83A2 2804            JR     Z,REFO1
83A4 DD2100A7        LD     IX,QUATI
83A8 2100A0  REFO1:  LD     HL,PAGE1
83AB 0607            LD     B,07H
83AD CDD884          CALL   CALADD
83B0 110300          LD     DE,0003H
83B3 19              ADD    HL,DE
83B4 2207FF          LD     (MEMPA1),HL
83B7 0611            LD     B,17
83B9 CD7F84          CALL   REFO2
83BC 2100A0          LD     HL,PAGE1
83BF 0603            LD     B,03H
83C1 CDD884          CALL   CALADD
83C4 2204FF          LD     (MEMBUF),HL
83C7 110A00          LD     DE,000AH
83CA 19              ADD    HL,DE
83CB 2207FF          LD     (MEMPA1),HL
83CE 0615            LD     B,21
83D0 CD7F84          CALL   REFO2
83D3 2A04FF          LD     HL,(MEMBUF)
83D6 111100          LD     DE,0011H
83D9 19              ADD    HL,DE
83DA 2207FF          LD     (MEMPA1),HL
83DD 0615            LD     B,21
83DF CD7F84          CALL   REFO2
83E2 2A04FF          LD     HL,(MEMBUF)
83E5 111800          LD     DE,0018H
83E8 19              ADD    HL,DE
83E9 2207FF          LD     (MEMPA1),HL
83EC 0615            LD     B,21
83EE CD7F84          CALL   REFO2
83F1 2100A3          LD     HL,PAGE2
83F4 0602            LD     B,02H
83F6 CDD884          CALL   CALADD
83F9 2204FF          LD     (MEMBUF),HL
83FC 111700          LD     DE,0017H
83FF 19              ADD    HL,DE
8400 2209FF          LD     (MEMPA2),HL
8403 060B            LD     B,11
8405 CD9D84          CALL   REFO5
8408 2A04FF          LD     HL,(MEMBUF)
840B 111000          LD     DE,0010H
840E 19              ADD    HL,DE
840F 2209FF          LD     (MEMPA2),HL
8412 060B            LD     B,11
8414 CD9D84          CALL   REFO5
8417 2A04FF          LD     HL,(MEMBUF)
841A 110900          LD     DE,0009H
841D 19              ADD    HL,DE
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
841E 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
8421 060B                LD      B,11
8423 CD9D84              CALL    REFO5
8426 2100A3              LD      HL,PAGE2
8429 0606                LD      B,06H
842B CDD884              CALL    CALADD
842E 110200              LD      DE,0002H
8431 19                  ADD     HL,DE
8432 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
8435 0607                LD      B,07H
8437 CD9D84              CALL    REFO5
843A 2100A3              LD      HL,PAGE2
843D 060E                LD      B,14
843F CDD884              CALL    CALADD
8442 2204FF              LD      (MEMBUF),HL
8445 111700              LD      DE,0017H
8448 19                  ADD     HL,DE
8449 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
844C 060A                LD      B,10
844E CD9D84              CALL    REFO5
8451 2A04FF              LD      HL,(MEMBUF)
8454 111000              LD      DE,0010H
8457 19                  ADD     HL,DE
8458 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
845B 060A                LD      B,10
845D CD9D84              CALL    REFO5
8460 2A04FF              LD      HL,(MEMBUF)
8463 110900              LD      DE,0009H
8466 19                  ADD     HL,DE
8467 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
846A 060A                LD      B,10
846C CD9D84              CALL    REFO5
846F 2A04FF              LD      HL,(MEMBUF)
8472 110200              LD      DE,0002H
8475 19                  ADD     HL,DE
8476 2209FF              LD      (MEMPA2),HL
8479 060A                LD      B,10
847B CD9D84              CALL    REFO5
847E C9                  RET
847F 0E05       REFO2:   LD      C,05H
8481 AF                  XOR     A
8482 56         REFO3:   LD      D,(HL)
8483 CB1A                RR      D
8485 CB17                RL      A
8487 23                  INC     HL
8488 0D                  DEC     C
8489 20F7                JR      NZ,REFO3
848B DD7700              LD      (IX+0),A
848E DD23                INC     IX
8490 2A07FF              LD      HL,(MEMPA1)
8493 111D00              LD      DE,001DH
8496 19                  ADD     HL,DE
8497 2207FF              LD      (MEMPA1),HL
849A 10E3                DJNZ    REFO2
849C C9                  RET
849D 0E05       REFO5:   LD      C,05H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
849F AF                         XOR     A
84A0 56         REFO6:          LD      D,(HL)
84A1 CB1A                       RR      D
84A3 CB17                       RL      A
84A5 23                         INC     HL
84A6 0D                         DEC     C
84A7 20F7                       JR      NZ,REFO6
84A9 0E05                       LD      C,05H
84AB 57                         LD      D,A
84AC AF                         XOR     A
84AD CB1A       REFO7:          RR      D
84AF CB17                       RL      A
84B1 0D                         DEC     C
84B2 20F9                       JR      NZ,REFO7
84B4 DD7700                     LD      (IX+0),A
84B7 DD23                       INC     IX
84B9 2A09FF                     LD      HL,(MEMPA2)
84BC 111D00                     LD      DE,001DH
84BF 19                         ADD     HL,DE
84C0 2209FF                     LD      (MEMPA2),HL
84C3 10D8                       DJNZ    REFO5
84C5 C9                         RET
84C6 1600       CHANG:          LD      D,00H
84C8 7E                         LD      A,(HL)
84C9 FE1F                       CP      1FH
84CB DAD084                     JP      C,REF2
84CE 1601                       LD      D,01H
84D0 72         REF2:           LD      (HL),D
84D1 23                         INC     HL
84D2 0D                         DEC     C
84D3 20F1                       JR      NZ,CHANG
84D5 10EF                       DJNZ    CHANG
84D7 C9                         RET
84D8 111D00     CALADD:         LD      DE,001DH
84DB 19                         ADD     HL,DE
84DC 10FA                       DJNZ    CALADD
84DE C9                         RET

84DF 2100A3     GETID:          LD      HL,PAGE2
84E2 111D00                     LD      DE,001DH
84E5 19                         ADD     HL,DE
84E6 2209FF                     LD      (MEMPA2),HL
84E9 2100A0                     LD      HL,PAGE1
84EC 19                         ADD     HL,DE
84ED 19                         ADD     HL,DE
84EE 2207FF                     LD      (MEMPA1),HL
84F1 2A09FF                     LD      HL,(MEMPA2) ;1
84F4 1100A9                     LD      DE,CODBUF
84F7 010800                     LD      BC,0008H
84FA EDB0                       LDIR
84FC 2A09FF                     LD      HL,(MEMPA2)
84FF 011D00                     LD      BC,001DH
8502 09                         ADD     HL,BC
8503 2209FF                     LD      (MEMPA2),HL
8506 2A07FF                     LD      HL,(MEMPA1)   ;2
8509 010800                     LD      BC,0008H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
850C EDB0       LDIR
850E 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)
8511 011D00     LD      BC,001DH
8514 09         ADD     HL,BC
8515 2207FF     LD      (MEMPA1),HL
8518 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)   ;3
851B 010800     LD      BC,0008H
851E EDB0       LDIR
8520 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)
8523 011D00     LD      BC,001DH
8526 09         ADD     HL,BC
8527 2209FF     LD      (MEMPA2),HL
852A 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)   ;4
852D 010800     LD      BC,0008H
8530 EDB0       LDIR
8532 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)
8535 011D00     LD      BC,001DH
8538 09         ADD     HL,BC
8539 2207FF     LD      (MEMPA1),HL
853C 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)   ;5
853F 010800     LD      BC,0008H
8542 EDB0       LDIR
8544 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)
8547 011D00     LD      BC,001DH
854A 09         ADD     HL,BC
854B 2209FF     LD      (MEMPA2),HL
854E 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)   ;6
8551 010800     LD      BC,0008H
8554 EDB0       LDIR
8556 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)
8559 011D00     LD      BC,001DH
855C 09         ADD     HL,BC
855D 2207FF     LD      (MEMPA1),HL
8560 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)   ;7
8563 010800     LD      BC,0008H
8566 EDB0       LDIR
8568 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)
856B 011D00     LD      BC,001DH
856E 09         ADD     HL,BC
856F 2209FF     LD      (MEMPA2),HL
8572 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)   ;8
8575 010800     LD      BC,0008H
8578 EDB0       LDIR
857A 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)
857D 011D00     LD      BC,001DH
8580 09         ADD     HL,BC
8581 2207FF     LD      (MEMPA1),HL
8584 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)   ;9
8587 010800     LD      BC,0008H
858A EDB0       LDIR
858C 2A09FF     LD      HL,(MEMPA2)
858F 011D00     LD      BC,001DH
8592 09         ADD     HL,BC
8593 2209FF     LD      (MEMPA2),HL
8596 2A07FF     LD      HL,(MEMPA1)   ;10
8599 010800     LD      BC,0008H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
859C EDB0                 LDIR
859E 2A07FF               LD      HL,(MEMPA1)
85A1 011D00               LD      BC,001DH
85A4 09                   ADD     HL,BC
85A5 2207FF               LD      (MEMPA1),HL
85A8 060A                 LD      B,10
85AA 3E20                 LD      A,20H
85AC 2100A8               LD      HL,CODE
85AF 77         LOP:      LD      (HL),A
85B0 23                   INC     HL
85B1 10FC                 DJNZ    LOP
85B3 2100A9               LD      HL,CODBUF
85B6 0610                 LD      B,10H
85B8 1600                 LD      D,00H
85BA 0E08       LOOP1:    LD      C,08
85BC DD2100A8             LD      IX,CODE
85C0 7E         LOOP2:    LD      A,(HL)
85C1 FE01                 CP      01H
85C3 280A                 JR      Z,KEEPID
85C5 DD23       LOOP3:    INC     IX
85C7 23                   INC     HL
85C8 0D                   DEC     C
85C9 20F5                 JR      NZ,LOOP2
85CB 14                   INC     D
85CC 10EC                 DJNZ    LOOP1
85CE C9                   RET
85CF DD7E00     KEEPID:   LD      A,(IX+0)
85D2 FE20                 CP      20H
85D4 2008                 JR      NZ,UNKEEP
85D6 3E30                 LD      A,30H
85D8 B2                   OR      D
85D9 DD7700               LD      (IX+0),A
85DC 18E7                 JR      LOOP3
85DE 3E3F       UNKEEP:   LD      A,3FH
85E0 DD7700               LD      (IX+0),A
85E3 18E0                 JR      LOOP3

85E5 3E30       GETPT:    LD      A,30H
85E7 320AA8               LD      (POINT),A
85EA 320BA8               LD      (POINT+1),A
85ED 320CA8               LD      (POINT+2),A
85F0 2100A6               LD      HL,ANSW
85F3 1100A7               LD      DE,QUATI
85F6 3A0DFF               LD      A,(DUM)
85F9 47                   LD      B,A
85FA 1A         GETP1:    LD      A,(DE)
85FB BE                   CP      (HL)
85FC CA2B86               JP      Z,GETCOU
85FF 23         GETP2:    INC     HL
8600 13                   INC     DE
8601 10F7                 DJNZ    GETP1
8603 C9                   RET
8604 3E30       ERROR:    LD      A,30H
8606 320CFF               LD      (PERROR),A
8609 2100A7               LD      HL,QUATI
860C 06A0                 LD      B,160
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
860E 7E        ERR0:    LD     A,(HL)
860F 0E08               LD     C,08H
8611 1600               LD     D,00H
8613 1F        ERR1:    RRA
8614 3001               JR     NC,ERR2
8616 14                 INC    D
8617 0D        ERR2:    DEC    C
8618 20F9               JR     NZ,ERR1
861A 7A                 LD     A,D
861B B7                 OR     A
861C 2809               JR     Z,ERR3
861E FE01               CP     01H
8620 2805               JR     Z,ERR3
8622 3EFF               LD     A,0FFH
8624 320CFF             LD     (PERROR),A
8627 23        ERR3:    INC    HL
8628 10E4               DJNZ   ERR0
862A C9                 RET
862B 3A0CA8    GETCOU:  LD     A,(POINT+2)
862E 3C                 INC    A
862F 320CA8             LD     (POINT+2),A
8632 FE3A               CP     3AH
8634 C2FF85             JP     NZ,GETP2
8637 E6F0               AND    0F0H
8639 320CA8             LD     (POINT+2),A
863C 3A0BA8             LD     A,(POINT+1)
863F 3C                 INC    A
8640 320BA8             LD     (POINT+1),A
8643 FE3A               CP     3AH
8645 C2FF85             JP     NZ,GETP2
8648 E6F0               AND    0F0H
864A 320BA8             LD     (POINT+1),A
864D 3A0AA8             LD     A,(POINT)
8650 3C                 INC    A
8651 320AA8             LD     (POINT),A
8654 FE3A               CP     3AH
8656 C2FF85             JP     NZ,GETP2
8659 E6F0               AND    0F0H
865B 320AA8             LD     (POINT),A
865E C3FF85             JP     GETP2
8661 0604      MOTOR:   LD     B,04H
8663 21EF87             LD     HL,STEP1
8666 DB30      MOTOR1:  IN     A,(PORTD)
8668 E6F0               AND    0F0H
866A B6                 OR     (HL)
866B D330               OUT    (PORTD),A
866D CD8186             CALL   MDELAY
8670 23                 INC    HL
8671 10F3               DJNZ   MOTOR1
8673 DB52               IN     A,(PORTC)
8675 CB57               BIT    2,A
8677 C26186             JP     NZ,MOTOR
867A DB30               IN     A,(PORTD)
867C E6F0               AND    0F0H
867E D330               OUT    (PORTD),A
8680 C9                 RET
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
8681 C5            MDELAY:     PUSH     BC
8682 0628                      LD       B,28H
8684 0E80          MDEL0:      LD       C,80H
8686 0D            MDEL:       DEC      C
8687 20FD                      JR       NZ,MDEL
8689 10F9                      DJNZ     MDEL0
868B C1                        POP      BC
868C C9                        RET
868D C30080        SERIAL:     JP       START
8690 CBFF          GOTO:       SET      7,A
8692 D360                      OUT      (PDCON),A
8694 CD9886                    CALL     CHECK
8697 C9                        RET
          ;
8698 DB64          CHECK:      IN       A,(PFLAG)
869A CB7F                      BIT      7,A
869C 20FA                      JR       NZ,CHECK
869E C9                        RET

869F 0614          SHOW:       LD       B,20
86A1 7E            TEST11:     LD       A,(HL)
86A2 57                        LD       D,A
86A3 CDCA86                    CALL     WRBYTE
86A6 23                        INC      HL
86A7 10F8                      DJNZ     TEST11
86A9 C9                        RET
          ;
          ;************************
          ;
          ;     INITIAL LCD     *
          ;************************
          ;
          ;
86AA 3E38          INITLCD:    LD       A,00111000B   ;function set  38H
                                                      ;DL=1 8 bit,N=1 1/16
                                                      ;duty,F=0 5x7
86AC D360                      OUT      (PDCON),A
86AE CDD186                    CALL     DELAY1
86B1 CDD186                    CALL     DELAY1        ;DELAY > 4.1 ms
86B4 3E0C                      LD       A,00001100B   ;display on/off control
                                                      ;D=1 off,C=1 cursor
                                                      ;on,B=1 blink
86B6 D360                      OUT      (PDCON),A
86B8 CDD186                    CALL     DELAY1
86BB 3E06                      LD       A,00000110B   ;entry mode set
                                                      ;I/D=1 increment,S=0
                                                      ;right
86BD D360                      OUT      (PDCON),A
86BF CDD186                    CALL     DELAY1
86C2 3E01                      LD       A,00000001B   ;clear all display
86C4 D360                      OUT      (PDCON),A
86C6 CDD186                    CALL     DELAY1
86C9 C9                        RET
          ;
          ;***** WRITE BYTE SUB ****
          ;
86CA 7A            WRBYTE:     LD       A,D
86CB D362                      OUT      (PDATA),A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
86CD CD9886                          CALL      CHECK
86D0 C9                              RET
          ;
          ;***** READY SUB *****
          ;
86D1 C5                DELAY1:       PUSH      BC
86D2 0680                            LD        B,80H
86D4 10FE              DELAY12:      DJNZ      DELAY12
86D6 C1                              POP       BC
86D7 C9                              RET
86D8 0610              KEYPAD:       LD        B,10H
86DA DB30              KEY1:         IN        A,(PORTD)
86DC E6C0                            AND       0C0H
86DE FEC0                            CP        0C0H
86E0 20F6                            JR        NZ,KEYPAD
86E2 10F6                            DJNZ      KEY1
86E4 0E00              KEY11:        LD        C,00H
86E6 DB30                            IN        A,(PORTD)
86E8 E6C0                            AND       0C0H
86EA FEC0                            CP        0C0H
86EC 28F6                            JR        Z,KEY11
86EE 07                              RLCA
86EF 3802                            JR        C,KEY2
86F1 0E01                            LD        C,01H
86F3 07                KEY2:         RLCA
86F4 3802                            JR        C,KEY3
86F6 0E02                            LD        C,02H
86F8 C9                KEY3:         RET
          ;
86F9 2043415242TABLE:                DFB            " CARBON CHECKER 1.0 "
870D 2020202020GET:                  DFB            "    READ  MODE    "
8721 2020202046SET:                  DFB            "   FUNCTION SET   "
8735 2050726573PRESS:                DFB            " Press <DONE> button"
8749 2020202020BEGIN:                DFB            "    SCAN  MODE    "
875D 20204C6F61LOAD:                 DFB            "  Load paper Again  "
8771 2020202053SFORM:                DFB            "   SELECT FORM    "
8785 54494D4520WHREAD:               DFB            "TIME MARK :        "
8799 49443A2020STDID:                DFB            "ID:         Pt:   "
87AD 4D4F44453ASEMODE:               DFB            "MODE:             "
87C1 5354414E44STAND:                DFB            "STAND-ALONE  "
87CE 4C494E4B20COMPU:                DFB            "LINK COMPUTER"
87DB 464F524D20SEFORM:               DFB            "FORM NUMBER:       "
87EF 03060C09  STEP1:                DFB            03H,06H,0CH,09H
0000                                 END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจข้อสอบแบบฝนด้วยดินสอ

Carbon Detectors for Carbon's Mark Checker

พรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์ สุเธียร เกียติสุนทร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โยธิน เปรมปราณีรัชต์

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

พิมพ์พิชญ์สร ศรีปัญญาพงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจข้อสอบแบบฝนด้วยดินสอโดยการส่องแสงอินฟราเรดทะลุผ่านกระดาษคำตอบโดยที่แสงอินฟราเรดนี้จะถูกดูดกลืนด้วยคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบของไส้ดินสอและความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านกระดาษคำตอบจะแปรผกผันกับความเข้มของการฝนดินสอ ดังนั้นจึงสามารถใช้การตรวจวัดปริมาณความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านเพื่อตรวจสอบตำแหน่งและความเข้มของการฝนดินสอได้โดยที่จะนำเอาค่าความหนาของกระดาษคำตอบนั้นเป็นค่าชดเชยผลที่อ่านได้ซึ่งจะทำให้ช่วงความเข้มของการฝนดินสอที่อ่านได้ง่ายต่อการตัดสินใจของโปรแกรมควบคุมการทำงานเป็นผลให้เกิดความถูกต้องของการตรวจข้อสอบได้อย่างแม่นยำ จากการพัฒนาหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจข้อสอบนี้จะนำไปสู่การสร้างเครื่องตรวจข้อสอบขึ้นใช้เองภายในประเทศได้ซึ่งจะทำให้มีราคาถูกลงโดยที่มีประสิทธิภาพการทำงานเท่าเทียมกับเครื่องตรวจข้อสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Abstract

This paper presents a development of carbon detectors for carbon's mark checker. These detectors are based on the principle of infrared absorption by carbon. The amount of infrared passing through the answer sheet is inversely proportional to the darkness of carbon. Therefore, the carbon's mark by measuring the density of infrared can be carried out the paper thickness to compensate for the data from the detectors, it increases the accuracy of the carbon's mark checker and using the carbon's mark checker is cheaper than from importing.

1. บทนำ

จากคุณสมบัติของแสงอินฟราเรดที่สามารถทะลุผ่านวัสดุบางอย่างเช่นกระดาษได้ซึ่งปริมาณความเข้มของแสงอินฟราเรดบางส่วนอาจถูกดูดกลืนมากน้อยขึ้นกับความหนาของกระดาษที่แสงอินฟราเรดผ่านแต่จะถูกดูดอินฟราเรดที่ผ่านคาร์บอนจะแปรผกผันกับความเข้มของคาร์บอนหรือความเข้มของการฝนดินสอนั่นเอง จึงทำให้สามารถใช้แสงอินฟราเรดสำหรับการสร้างหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบแบบฝนด้วยดินสอได้ จากการที่แสงอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านการดาษคำตอบได้ทำให้หัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษคำตอบที่มีตำแหน่งของการเลือกคำตอบทั้งสองหน้าไม่ตรงกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้ความเร็วของการอ่านของหัวอ่านเร็วขึ้นและราคาในส่วนของหัวอ่านนี้จะต่ำอีกทั้งทำให้การใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวของกับหัวอ่านลดลงเมื่อเทียบกับการใช้หลักการสะท้อนของแสงอินฟราเรด เป็นผลให้ราคาโดยรวมของเครื่องตรวจข้อสอบลดลง

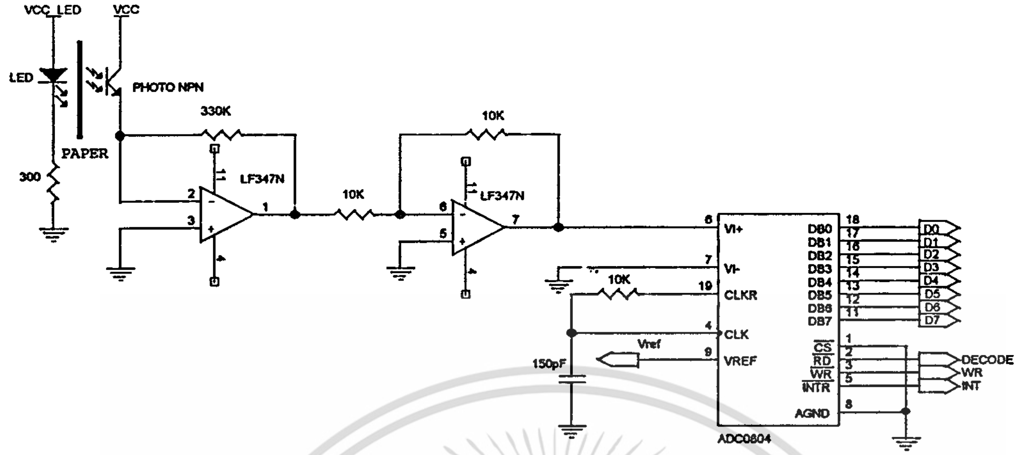
2. หลักการเบื้องต้น

จากการใช้แสงอินฟราเรดสำหรับหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบในลักษณะของการให้แสงอินฟราเรดทะลุผ่านกระดาษคำตอบนั้นจะมีส่วนประกอบสองส่วนได้แก่แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดและตัวรับแสงอินฟราเรด โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้แก่ LED ชนิดที่ให้แสงอินฟราเรดและ Photo-Transistor ทำหน้าที่เป็นตัวรับซึ่งจะเปลี่ยนความเข้มของแสงอินฟราเรดเป็นกระแสไฟฟ้าตามความเข้มของแสงอินฟราเรดนั้น โดยที่จะให้แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดทำงานที่กระแสคงที่เพื่อที่จะได้ความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ผ่านแต่ละตำแหน่งของตัวเลือกคำตอบในกระดาษคำตอบมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันโดยวางตำแหน่งตรงข้ามกับตัวรับแสงอินฟราเรดในระยะห่างเท่ากัน สำหรับในส่วนของตัวรับแสงอินฟราเรดนั้นจะมีส่วนของวงจรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อสะดวกในการเปลี่ยนเป็นค่าดิจิตอลเพื่อการทำงานของโปรแกรมควบคุมต่อไป สำหรับหลักการที่ใช้ในการชดเชยความหนาของกระดาษนั้นจะทำได้โดยการอ่านค่าความเข้มของแสงอินฟราเรดผ่านกระดาษที่ไม่มีการฝนดินสอเป็นค่าดิจิตอลจากวงจรแปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีแรงดันอ้างอิงปกติเพื่อหาค่าความเข้มสูงสุดของแสงอินฟราเรดที่ผ่านกระดาษคำตอบแล้วซึ่งจะทำก่อนที่กระดาษคำตอบจะผ่านหัวอ่านที่สร้างขึ้น โดยค่าที่ได้นี้จะนำไปสร้างสัญญาณอ้างอิง(โดยผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนนาลอก) ให้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของหัวอ่านเพื่อให้ช่วงการทำงานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลตามปริมาณความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ผ่านกระดาษคำตอบแล้วซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่อ่านได้จากหัวอ่านมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะให้โปรแกรมควบคุมการทำงานสามารถตัดสินใจได้ถูกต้องและแม่นยำ เพื่อความเข้าใจในหลักการการชดเชยความหนากระดาษที่กล่าวมาจะยกตัวอย่างดังนี้ ถ้าให้แรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของหัวอ่านเป็นค่าปกติ (Vcc/2) แล้วสมมุติให้สามารถอ่านค่าความหนาของกระดาษเปล่าได้เท่ากับ 128 นั่นแสดงว่าช่วงการตัดสินใจของโปรแกรมควบคุมอยู่ที่ 0 ถึง 128 เท่านั้น เพราะขณะที่แสงอินฟราเรดผ่านกระดาษเปล่าจะเป็นค่าสูงสุดที่จะอ่านได้ ทำให้ช่วงการตัดสินใจจะแคบ แต่ถ้ามีการนำเอาค่าความหนาของกระดาษเปล่าที่ได้นำไปสร้างสัญญาณอ้างอิง (128) ผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนนาลอกแล้วจะทำให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของหัวอ่านจะอ่านค่าความหนาของกระดาษเปล่ามีค่าเป็น 255 ตามความสามารถของอุปกรณ์ทำให้ช่วงการตัดสินใจของโปรแกรมความคุมการทำงานมีค่าเท่ากับ 0 ถึง 255 ทำให้หัวอ่านมีความถูกต้องมากขึ้น

3. การออกแบบวงจร

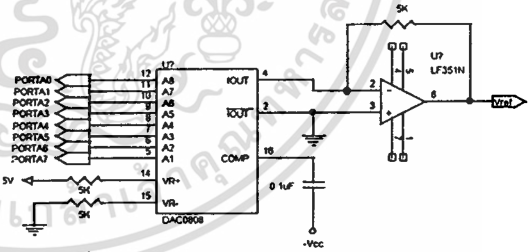
ในการออกแบบวงจรหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบจะต้องคำนึงถึงแบบของกระดาษคำตอบเพื่อที่จะกำหนดจำนวนจุดของหัวอ่านและระยะห่างระหว่างจุดหัวอ่านแต่ละจุด สำหรับบทความนี้จะออกแบบหัวอ่านของเครื่องตรวจข้อสอบตามแบบกระดาษคำตอบที่มีจำนวนจุดเลือกฝนดินสอในแนวนอนของกระดาษคำตอบ 30 จุดและระยะห่างระหว่างจุดที่ 166 mils. ซึ่งมีระยะแคบ ดังนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์ของแสงอินฟราเรดที่วางลงได้ในระยะดังกล่าวได้ โดยจะเลือกอุปกรณ์แสงอินฟราเรดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 4 mm. สำหรับวงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษและวงจรของหัวอ่านจะมีลักษณะของวงจรคล้ายกันซึ่งจะเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงวงจรส่วนแปลงสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดเป็นดิจิตอล

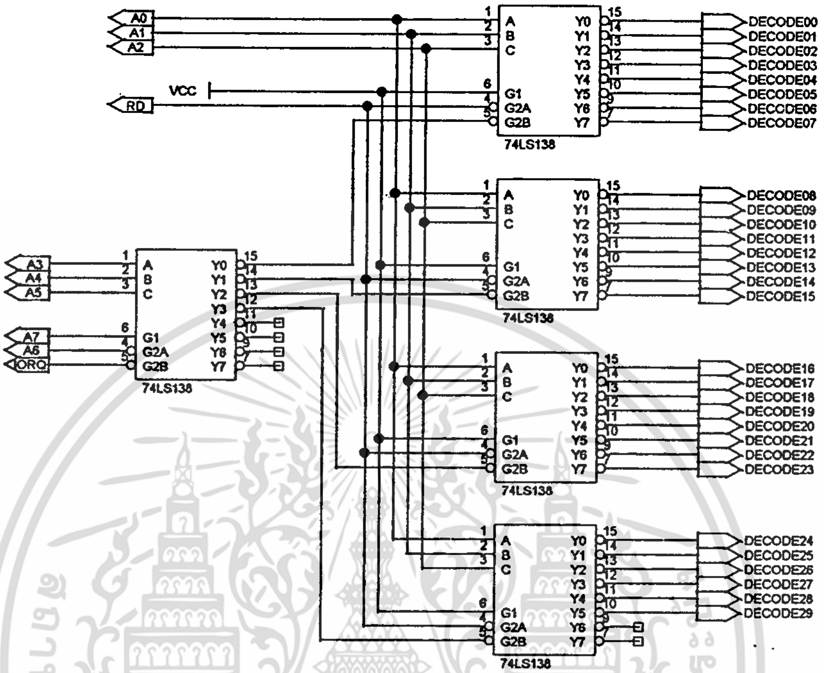
จากวงจรในรูปที่ 1 แสดงส่วนของวงจรที่ใช้สำหรับแปลงสัญญาณที่ได้จากตัวรับอินฟราเรดให้เป็นดิจิตอลโดยมีการทำงานดังนี้ เมื่อ Photo Transistor ได้รับแสงอินฟราเรดจากตัวส่งจะเข้าสู่วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ Op-Amp. เบอร์ LF347N ซึ่งเป็น Op-Amp. ที่มีโครงสร้างเป็น FET และมีสัญญาณรบกวนต่ำซึ่งวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าจะให้เอาท์พุทออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าลบจึงต้องผ่านวงจรอินเวอร์ติ้งแอมป์ที่มีกำลังขยายเป็นหนึ่งก่อนเข้าอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลเบอร์ ADC0804 มีขนาดเอาท์พุท 8 บิตโดยที่อุปกรณ์นี้สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงได้หลายระดับ สำหรับวงจรตรวจวัดความหนากระดาษและวงจรส่วนหัวอ่านจะต่างกันที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ให้กับ ADC0804 โดยที่ในส่วนของวงจรตรวจวัดความหนาของกระดาษจะใช้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ Vcc/2 ตามการใช้งานปกติของ ADC0804 เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจริงที่เกิดขึ้นจากตัวรับแสงอินฟราเรดโดยที่ค่าแรงดันที่ได้จะนำไปเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้กับ ADC0804 ที่ทำหน้าที่ในการอ่านค่าจากหัวอ่าน ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากวงจรส่วนหัวอ่านจะเป็นค่าอ้างอิงที่เทียบกับความหนาของกระดาษไม่ใช่ค่าจริงที่เกิดขึ้นที่ตัวรับแสงอินฟราเรดเพื่อจุดประสงค์ของการเปรียบเทียบค่าในการตัดสินใจของโปรแกรมควบคุมการทำงานสามารถทำได้อย่างแม่นยำในการแยกความแตกต่างของความเข้มการฝนดินสอ ในรูปที่ 2 แสดงวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรส่วนของหัวอ่านซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนนาลอกเบอร์ DAC0808 ที่มีขนาด 8 บิต และ LF351N โดยการควบคุมผ่านพอร์ต A ของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ Z84C11



รูปที่ 2 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงของส่วนหัวอ่าน

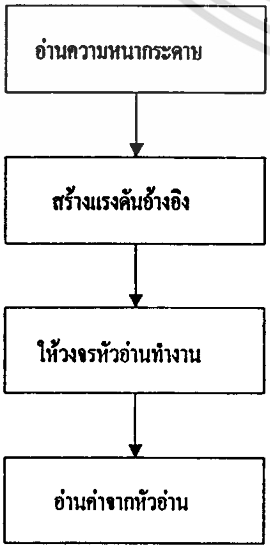
เนื่องจากหัวอ่านที่สร้างขึ้นสามารถอ่านจุดเลือกได้ 30 จุด ดังนั้นจึงมีวงจรสำหรับหัวอ่านที่ได้กล่าวไว้แล้วทั้งหมด 30 ชุดโดยมีวงจรสำหรับเลือกชุดการทำงาน (Decoder circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS138 ซึ่งเป็นอุปกรณ์เลือกการทำงานแบบ 3 เป็น 8 ทั้งหมด 5 ตัวและกำหนดตำแหน่งไว้ที่ 0X80 ถึง 0X9B ของการอ้างตำแหน่งพอร์ทของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ Z84C11 สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ Z84C11 จะเป็นแผ่นวงจรสำเร็จรูปจึงไม่ได้แสดงไว้ในส่วนนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงวงจรเลือกการทำงานของชุดหัวอ่าน

จากการทำงานของวงจรที่กล่าวมาแล้วจะต้องมีโปรแกรมทำงานในการควบคุมและอ่านค่าที่ได้จากตัวรับแสงอินฟราเรดโดยมีลำดับการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลำดับการทำงานของหัวอ่าน

โปรแกรมจะเริ่มทำงานโดยการอ่านค่าความหนาของกระดาษในตำแหน่งที่ไม่มีการฝนดินสอจากตัวรับแสงอินฟราเรดที่วางในตำแหน่งเฉพาะก่อนถึงตำแหน่งที่เป็นของหัวอ่าน จากค่าที่อ่านได้ของความหนากระดาษจะนำมาหารสองเพื่อสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงโดยส่งผ่านที่พอร์ท A ของ Z84C11 จากนั้นให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของวงจรหัวอ่านทำงาน หลังจากที่วงจรส่วนหัวอ่านทำงานแล้วจึงเริ่มอ่านค่าจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลในส่วนของวงจรหัวอ่านซึ่งเป็นค่าอ้างอิงความเข้มของการฝนดินในแต่ละตำแหน่ง

4. ผลการทดลอง

จากวงจรที่กล่าวมาแล้วซึ่งแสดงวงจรใช้งานจริงในรูปที่ 6 นำไปทดลองโดยการใช้ระดับความเข้มของระดับ Gray ที่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์เลเซอร์ซึ่งแบ่งระดับ Gray เป็น 10%, 30%, 50%, 70% และ 90% ตามลำดับ โดย

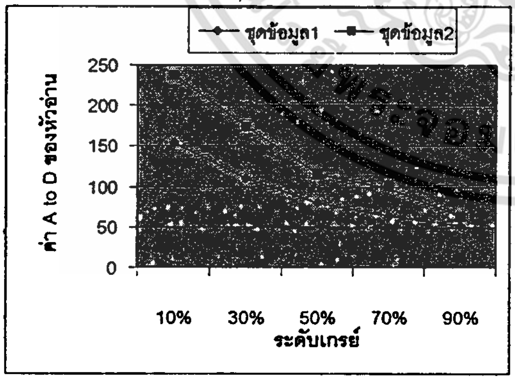
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการทดลองในสองเงื่อนไขได้แก่เงื่อนไขแรกจะให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ให้กับวงจรในส่วนหัวอ่านเป็นลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลแบบปกติและเงื่อนไขที่สองเป็นแบบชดเชยความหนากระดาษที่บทความนี้นำมาใช้ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ระดับ	10%	30%	50%	70%	90%
ปกติ	155	110	79	63	51
ชดเชย	238	174	116	97	64

ตารางที่ 1 ผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 แนวตั้งจะเป็นค่าของระดับ Gray ที่ใช้ทดลองซึ่งแยกเป็นการใช้งานอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลแบบปกติและการชดเชยความหนากระดาษที่ใช้ในบทความนี้และในแนวนอนเป็นค่าของอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลที่อ่านได้เพื่อให้เห็นผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้นจะนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 5 ชุดข้อมูลที่ 1 จะเป็นของการใช้งานอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกแบบปกติส่วนข้อมูลชุดที่ 2 เป็นการใช้แบบชดเชยความหนาของกระดาษในบทความนี้จะเห็นว่าจากวิธีที่ใช้ในบทความนี้จะทำให้ได้ข้อมูลที่มีค่าสูงขึ้นและช่วงของข้อมูลหนึ่งไปยังอีกข้อมูลหนึ่งจะมีช่วงกว้างขึ้นกว่าในกรณีของการใช้งานอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิตอลแบบปกติ สำหรับผลการทดลองนี้ใช้กระดาษที่ความหนา 80 แกรมซึ่งจะบางกว่ากระดาษที่ใช้สำหรับเป็นกระดาษคำตอบ

5. บทสรุป

การสร้างหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจข้อสอบแบบฝนด้วยดินสอ โดยใช้หลักการของแสงอินฟราเรดทะลุผ่านการดายและหลักการชดเชยความหนาของกระดาษด้วยวิธีการปรับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของส่วนวงจรหัวอ่านให้เป็นไปตามความหนาของกระดาษคำตอบนั้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำทำให้ข้อมูลที่อ่านได้ง่ายต่อการตัดสินใจของโปรแกรมควบคุมการทำงานอีกทั้งทำให้ราคาของส่วนหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจข้อสอบถูกลงซึ่งจะนำไปสู่การสร้างเครื่องตรวจข้อสอบแบบฝนด้วยดินสอขึ้นภายในประเทศ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] L.Sharupich, N.Tugov, "Opto-Electronics", 1987, pp.57-90.

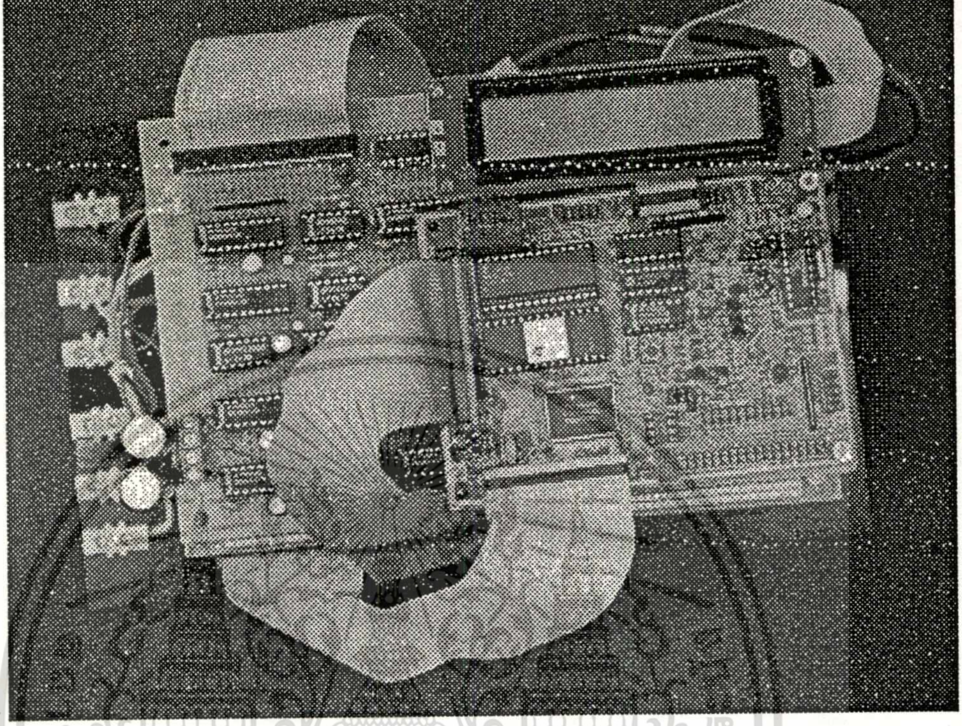
[2] B. Norris, "Digital-Integrated-Circuit, Operational Amplifier, and Optoelectronic Circuit Design", ISBD 0-07063753-9, pp.175-200.

[3] National semiconductor, "Data Conversion /Acquisition Databook", pp.512-543.

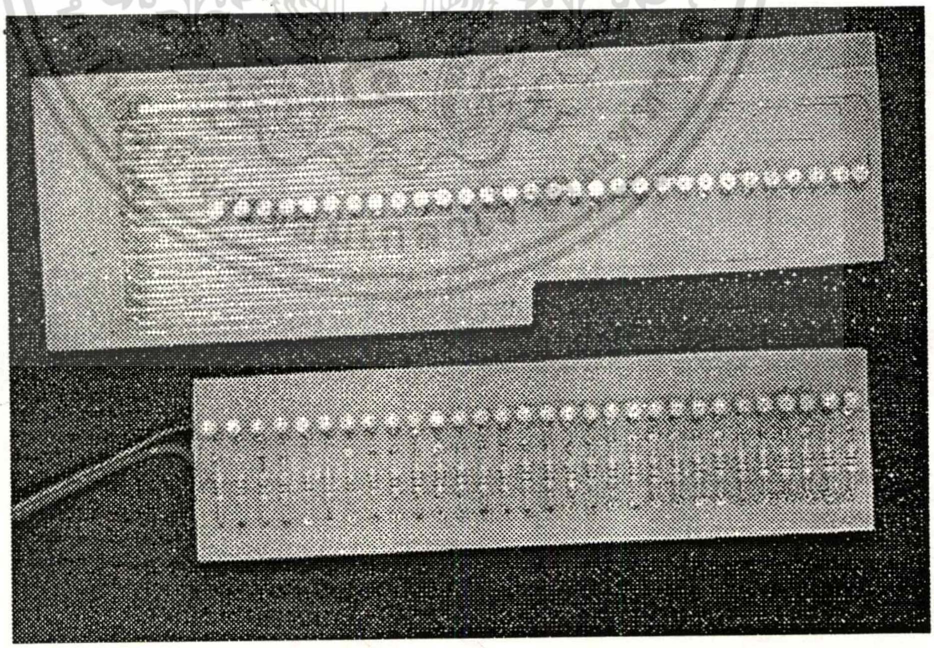
[4] A.R. Luxmoore, "Optical Transducers and Techniques in Engineering Measurement", Applied Science Publishers, London and New York, 1983.

[5] A. Chappell, "Optoelectronics Theory and Practice", McGraw-Hill Book Company, 1978.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



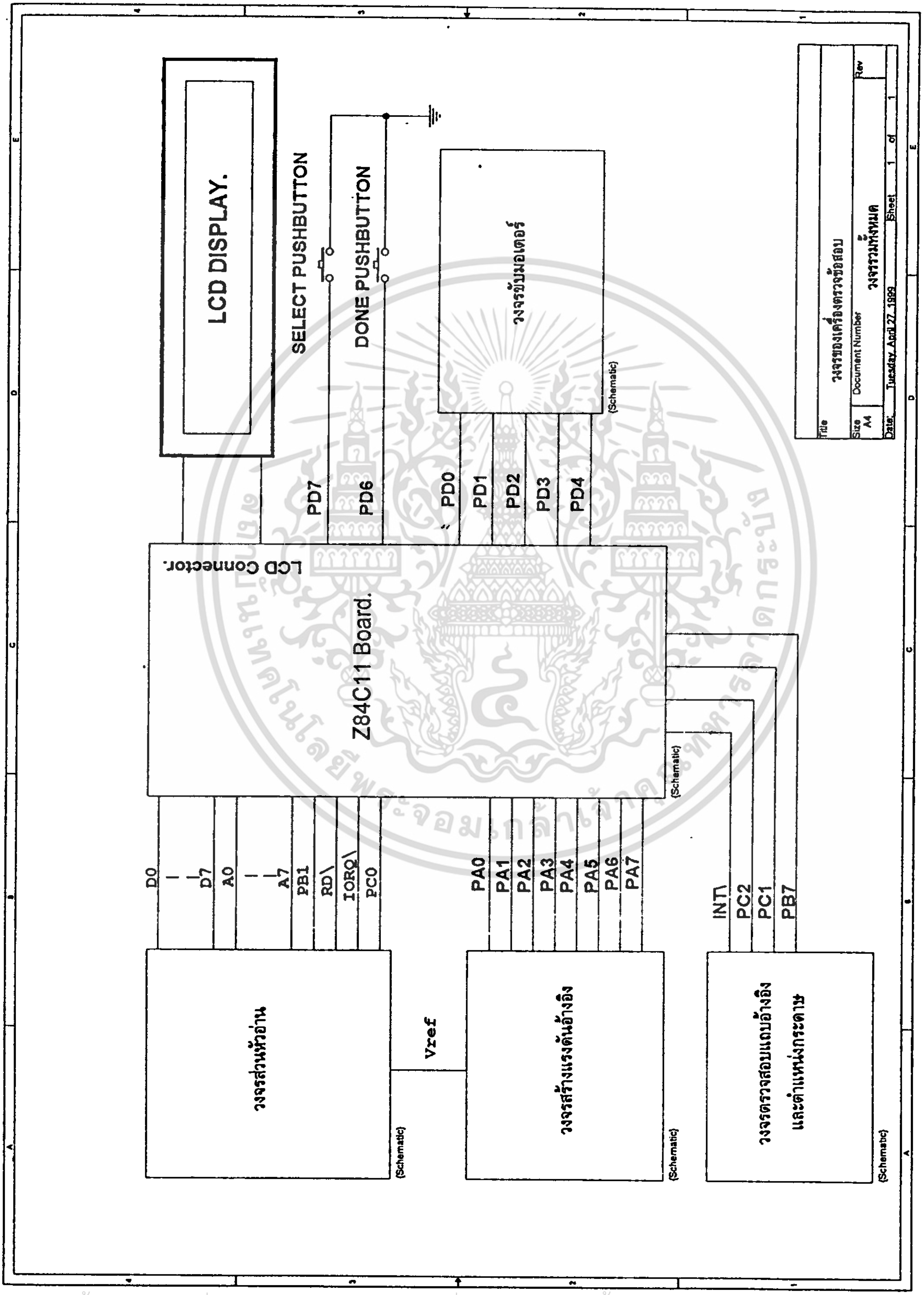
(ข)

รูปที่ 6 แสดงวงจรที่ใช้งานจริง (ก) วงจรควบคุมการทำงาน (ข) ส่วนหัวอ่าน

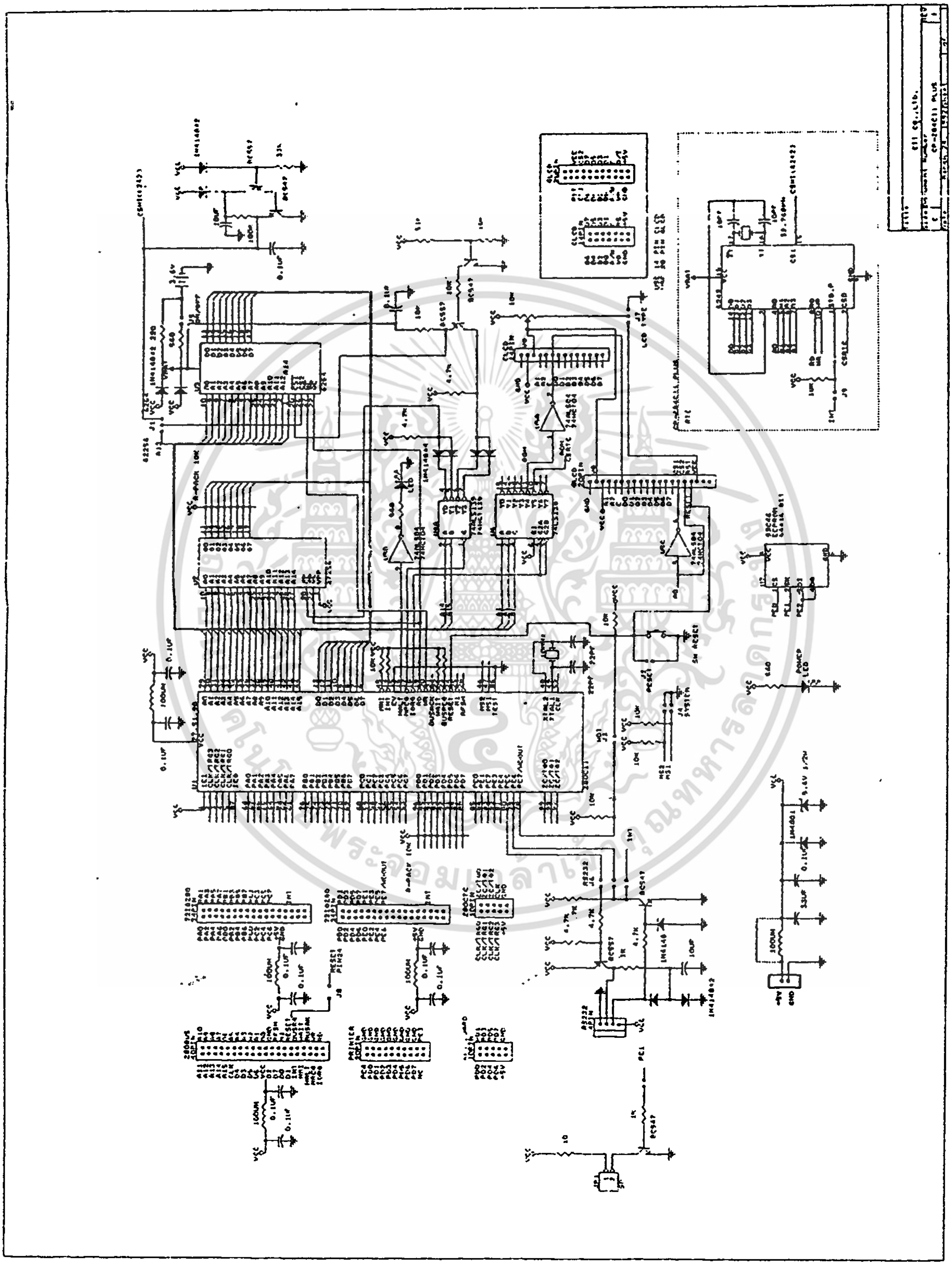
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

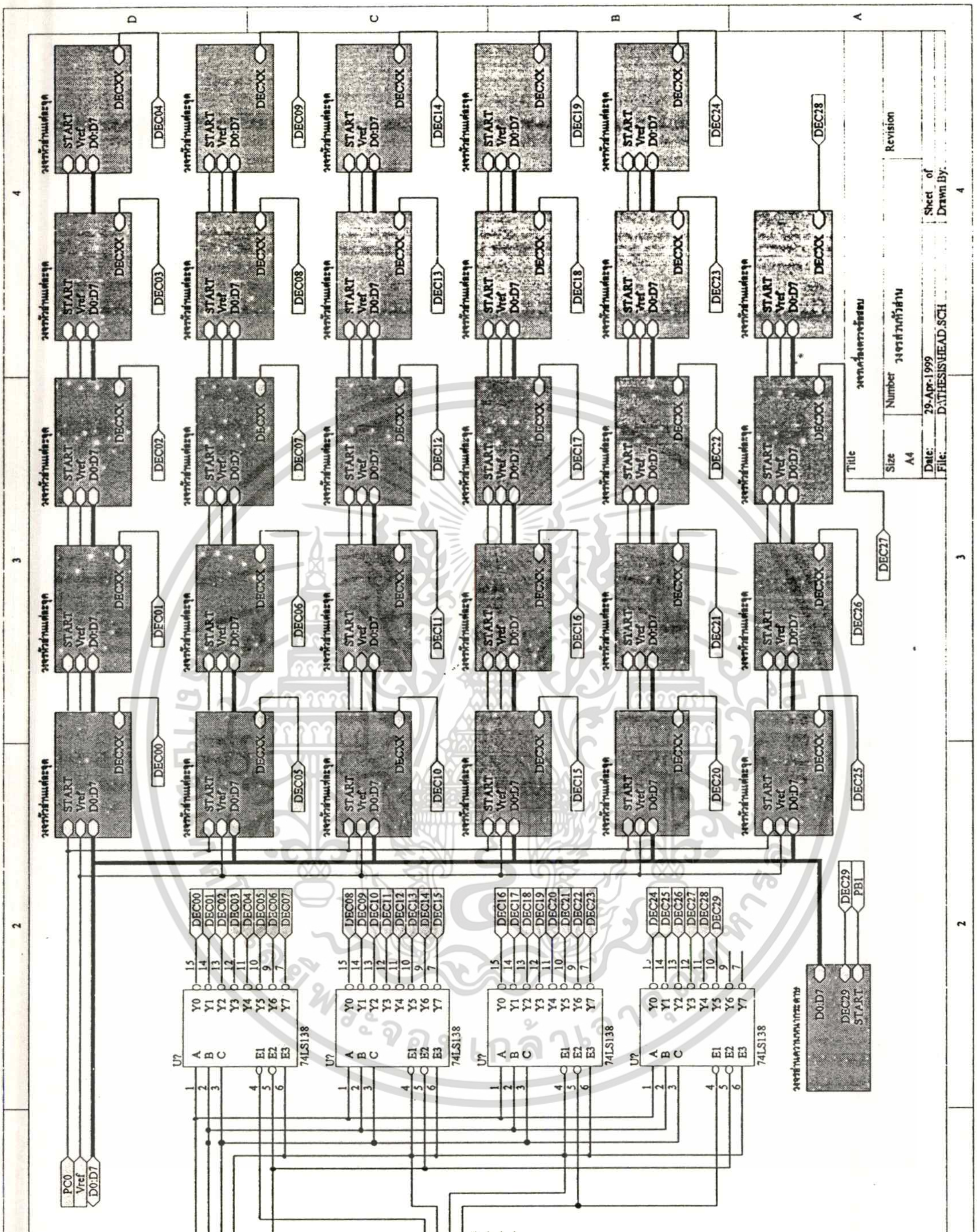
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



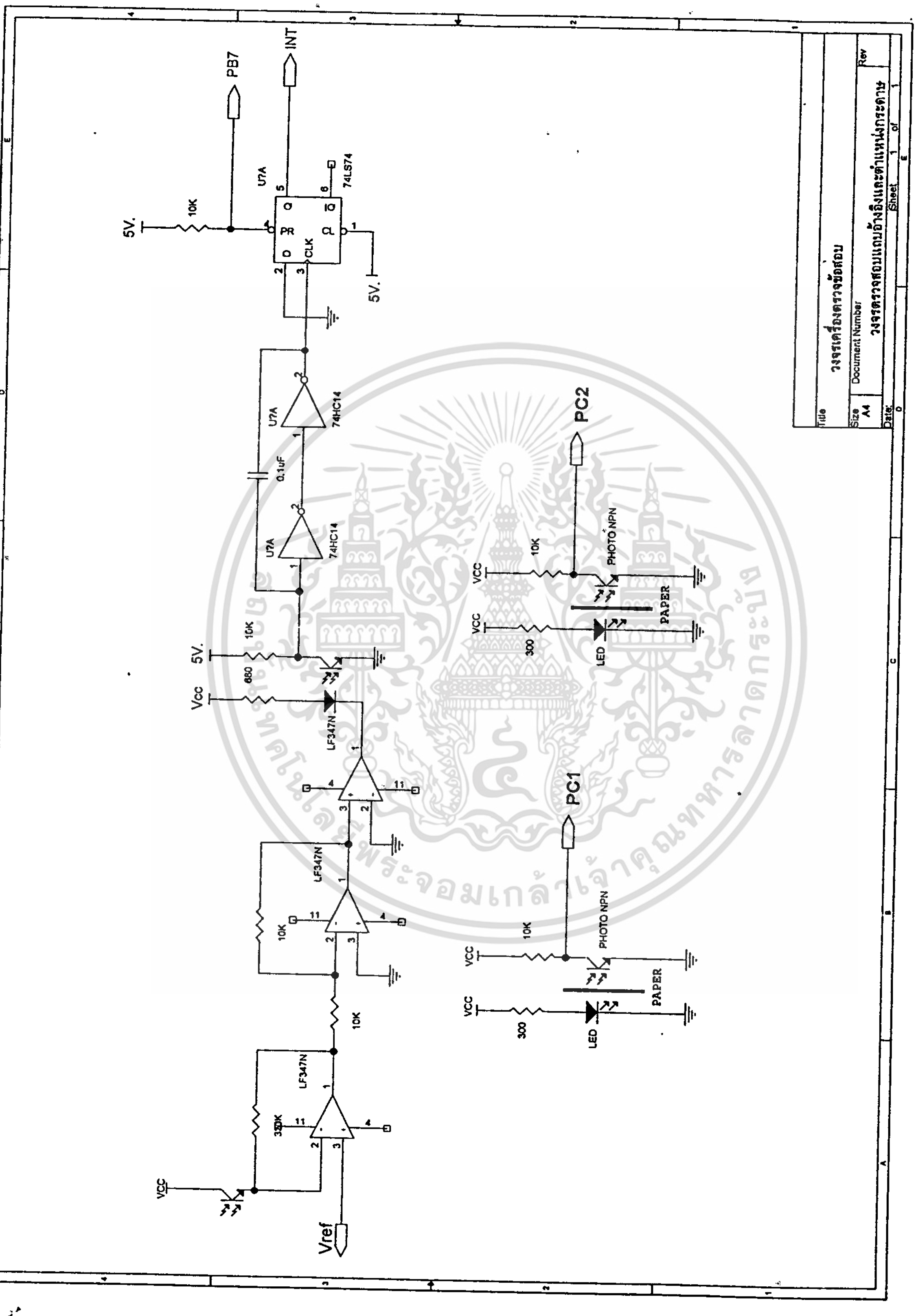
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



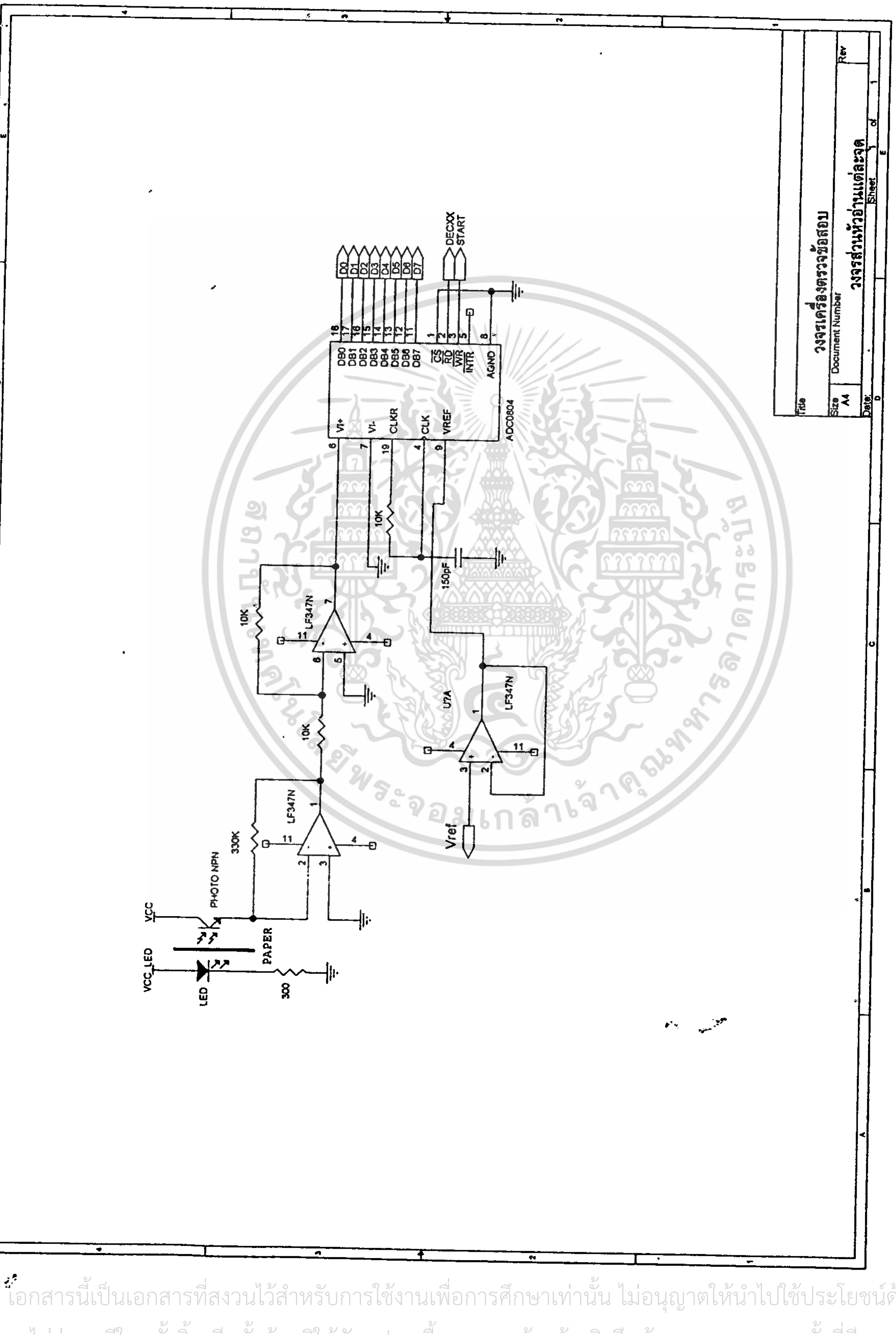
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



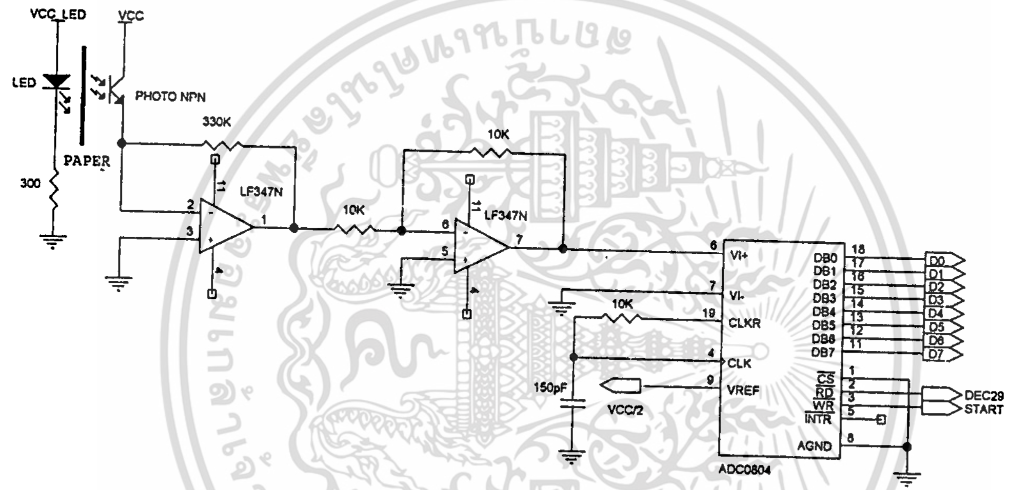
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



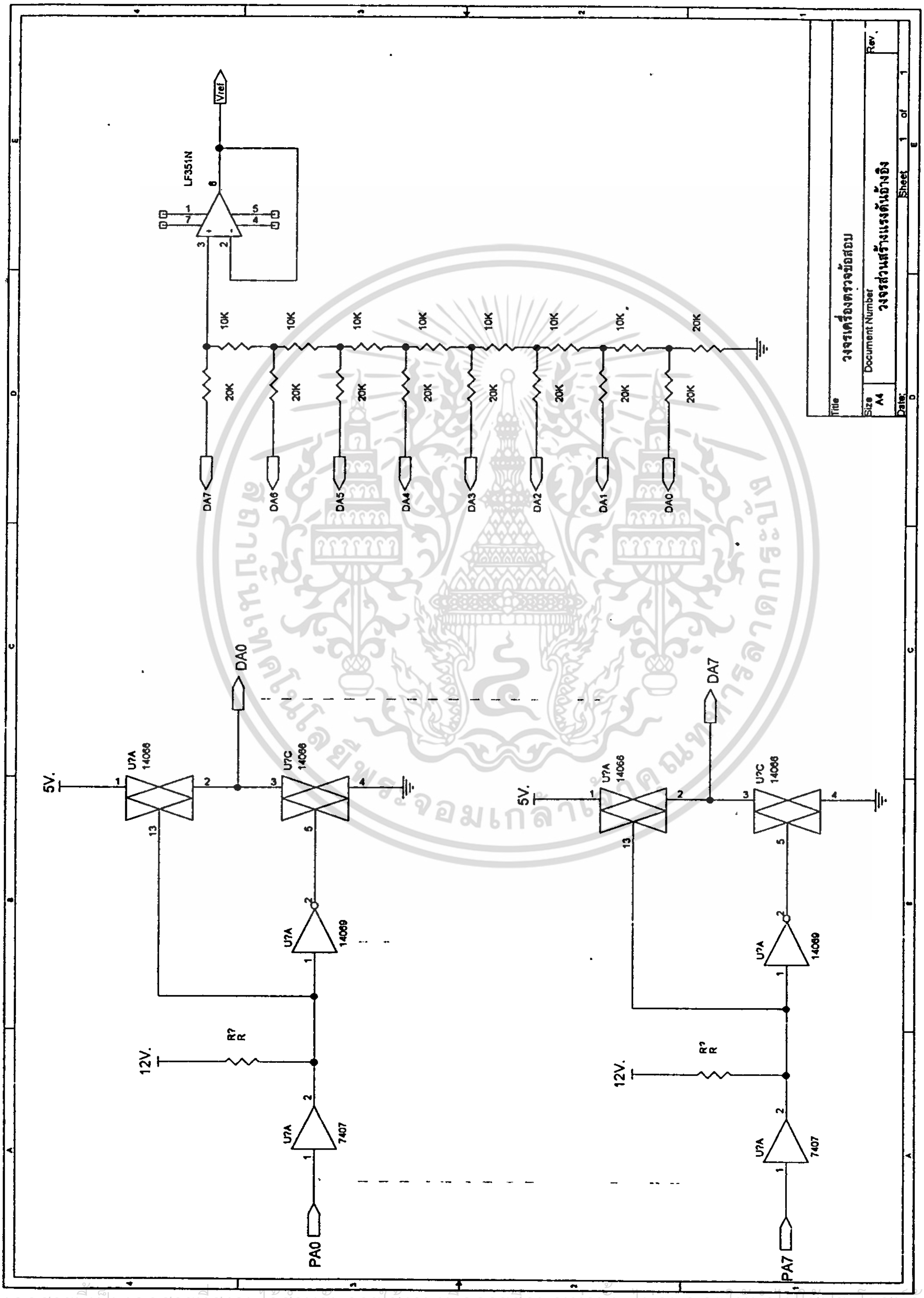
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



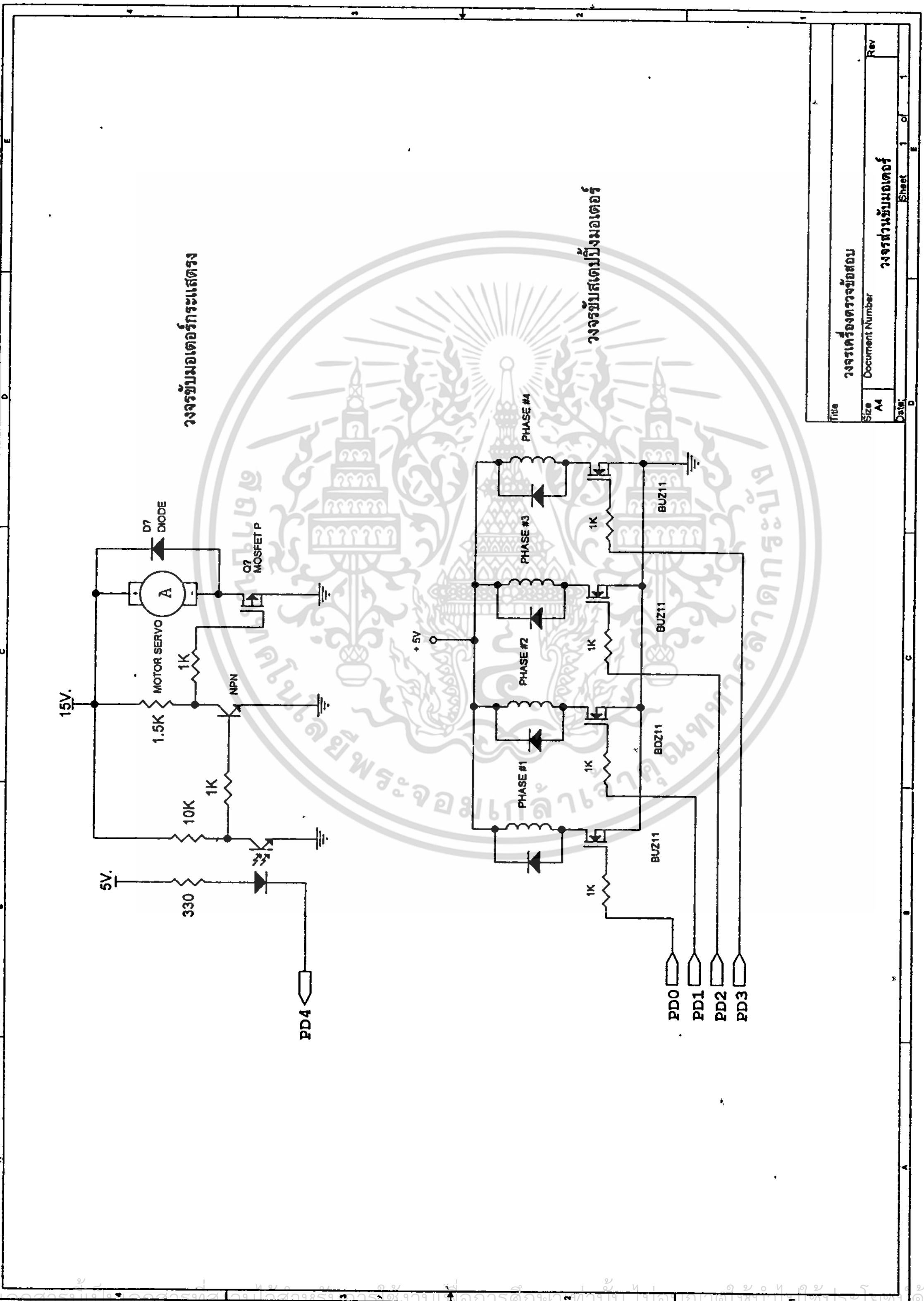
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	วงจรเครื่องตรวจข้อสอบ
Size A4	Document Number วงจรส่วนอ่านความหนากระดาษ
Rev	
Date:	Sheet 1 of 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ประวัติผู้เขียน

นายพรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2502 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2527 เข้ารับราชการในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ระบบงานคอมพิวเตอร์ 3 สังกัดสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 และปัจจุบันดำรงตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย 6 สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า