



# เครื่องวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## Revolution and Torque for Inductionmotor



โดย

นาย บวรวิทย์ อินทนูพัฒน์

นาย อภิรมย์ อักษรคิด

นาย มนต์ชัย แซ่ลี้

เลขเรียกหนังสือ..... ๗๗๖๖๓ ๙๕๓๑  
C40591  
เลขทะเบียน.....  
วัน เดือน ปี..... 1๙ ตค ๒๕

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2541

ปีการศึกษา 2541

อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2541  
ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ  
(Revolution and Torque for Inductionmotor)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ วิสชุด ศรีรัตน์ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ สาท คำมุด )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้ร่วมงาน

นาย บวรวิทย์ อินทนุพัฒน์ 39012095

นาย อภิรมย์ อักษรคิด 39012117

นาย มนต์ชัย แซ่หठी 39013394

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ วิสสุต ศรีรัตนะ

อาจารย์ สาท คำมูล

## บทคัดย่อ

เครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้มีประโยชน์คือ เป็นเครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะขับโหลดใดๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้งาน มอเตอร์ให้ถูกต้องไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ ประกอบกับเครื่องมือวัดแรงบิดในประเทศ ไทยหาใช้ได้ยากและมีราคาแพง โดยเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดนี้สร้างขึ้นโดยอาศัยหลัก การคือ การวัดความเร็วรอบ จะประมวลผลสัญญาณที่ไมโครโปรเซสเซอร์รับมาจากตัวเข้ารหัส ซึ่ง ตัวเข้ารหัสนี้จะสร้างสัญญาณที่แปรผันกับความเร็วรอบของมอเตอร์ และการวัดแรงบิดจะวัดโดย การต่อเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับเพลาของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงจะทำ ตัวเสมือนเป็นโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำและที่ความเร็วรอบต่างๆกัน เราจะนำความเร็วรอบ แรง ดัน และกระแสไฟฟ้า ไปคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์โดยเครื่องมือวัดแรงบิดนี้ จะแสดงผล เป็นตัวเลขด้วย แอล อี ดี เจ็ดส่วน

## Abstrack

Advantage of this device creat to measure speed when on load. This method can safe motor to not damage. In Thailand a device to measure torque are expensive and difficult to available. Principal of this device is measured speed to processing signal from encoder by microprocessor. Encoder can creat vary signal from speed. Section of torque has a shaft of induction motor connect to shaft of d.c. motor. Visual load of induction motor is d.c. motor. And then send speed, voltage and current to calculate torque and display by seven segment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2. ทฤษฎี	
2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051	7
2.2 อินทิเกรตเต็ดเซอร์คิต	38
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	45
2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	50
2.5 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	69
บทที่ 3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	
3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	76
3.2 การวัดความเร็วรอบ	76
3.3 การวัดแรงบิด	77
3.4 ภาคแสดงผล	78
บทที่ 4. ผลการทดลอง	
4.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	86
4.2 ผลการวัดความเร็วรอบ	87
4.3 ผลการวัดแรงบิด	88
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	
5.1 สรุป	90
5.2 วิจารณ์	90

ภาคผนวก ก. ไฟล์ซอร์สแสดงการทำงานและ Source code program ของเครื่องวัด

ภาคผนวก ข. ข้อกำหนดของไอซีเบอร์ 7219

ภาคผนวก ค. อินทิเกรตเต็ดเซอร์คิต

ภาคผนวก ง. วงจรรวมของเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

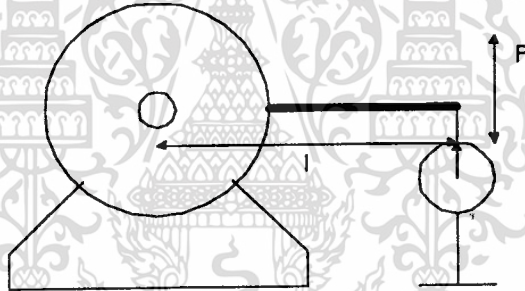
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในสถานศึกษาหลายแห่ง ได้พยายามสร้างโหลดสำหรับมอเตอร์ เพื่อใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติของมอเตอร์ ในด้านแรงบิดและกำลังซึ่งบอกเป็นค่าทางกล แต่โหลดของมอเตอร์ที่ได้ทำการสร้างนั้นยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ ซึ่งยังขาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าแรงบิด ตัวอย่างโหลดมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเช่น Eddy Current Break โดยเครื่องมือวัดค่าแรงบิดมอเตอร์ในประเทศไทยหาซื้อได้ยาก และมีราคาแพง จึงต้องมีการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ที่พอจะหาได้ในประเทศมาประยุกต์ใช้ในการวัดแรงบิดแทนดังตัวอย่างลักษณะของเครื่องมือวัดแรงบิด(Torque Meter) ของมอเตอร์ที่ได้ศึกษาแนวตัวอย่างมามีดังนี้

##### 1. แบบวัดแรงโดยตรง



รูปที่ 1.1 เครื่องมือวัดแรงบิดแบบวัดแรงโดยตรง

จากรูปที่ 1.1 จะได้  $T = F \times l$

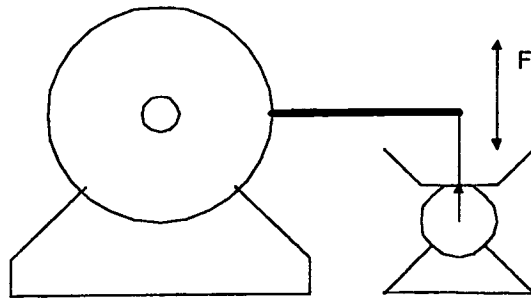
เมื่อ

$$T = \text{แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)}$$

$$F = \text{แรง กด-ดึง เครื่องวัด (N)}$$

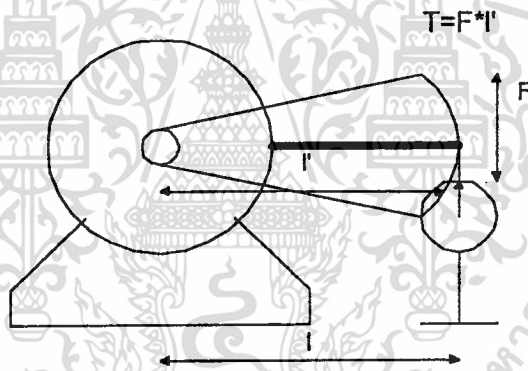
$$l = \text{ระยะจากจุดศูนย์กลางโหลดของมอเตอร์ถึงเครื่องมือวัด (m)}$$

จากหลักการดังกล่าว เราได้มีการเปลี่ยนสเกลของเครื่องซึ่งให้เป็นสเกลของแรงบิดเพื่อให้สามารถอ่านค่าออกมาได้เลย ซึ่งเครื่องมือวัดแรงบิดแบบนี้ ทางผู้ผลิตต่างประเทศเขาจะสร้างเพื่อขายรวมกับโหลดของมอเตอร์แต่ละตัวไป เราไม่สามารถที่จะหาซื้อเครื่องมือวัดแบบตัวเดียวๆ ได้ หรือเราอาจตั้งทางบริษัทผู้ผลิตต่างประเทศเขาสร้างให้เป็นพิเศษได้ แต่ราคาของเครื่องมือวัดแรงบิดของมอเตอร์อันนั้นก็มีความสูงมาก เนื่องจากเครื่องมือวัดแรงบิดของมอเตอร์ ราคาแพงและหาซื้อได้ยาก ทางไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้สถานศึกษา



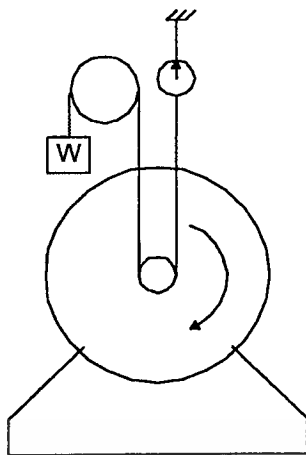
รูปที่ 1.2 เครื่องชั่งที่ประยุกต์ใช้ในการวัด Torque มอเตอร์  
หลายแห่งก็คิดหาอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดเมืองไทยมาใช้แทน เช่น เครื่องชั่งน้ำหนักก็ใช้ได้  
กับทิศทางการหมุนของโหลดมอเตอร์ ได้ในทิศทางเดียวดังรูปที่ 1.2

## 2. แบบลดความผิดพลาดเนื่องจากมุมของแกนที่ใช้กดเครื่องวัด



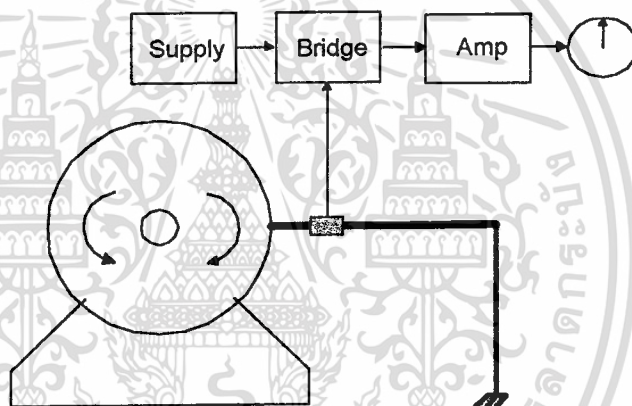
### รูปที่ 1.3 แสดงการเกิดมุมของ Torque Meter แบบวัดแรงโดยตรง

จากรูปที่ 1.3 เนื่องจากเราใช้เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์บนฐานของ Eddy Current Brake ไว้ให้คงที่ เมื่อเราป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ ก็จะทำให้มุมของแกนที่ใช้กดเกิดขึ้น ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น ดังรูปที่ 1.3 เมื่อเราแตกแกนให้อยู่ที่มุม  $\theta=0$  จะทำให้  $l$  มีค่าลดลงเป็น  $l'$  ซึ่งทำให้แรงบิดของมอเตอร์ที่วัดได้มีค่าผิดพลาดไป เพื่อแก้ปัญหานี้ได้มีการสร้างเครื่องมือวัดแรงบิดของมอเตอร์ขึ้นมาตามรูปที่ 1.4 โดยเขาใช้วัดแรงบิดของมอเตอร์โดยตรงโดยไม่ต้องต่อกับ Eddy Current Brake แต่มีข้อเสียเวลาตรวจสอบมอเตอร์นั้นต้องให้มอเตอร์หมุนในทิศทางเดียว



รูปที่ 1.4 เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์แบบใช้น้ำหนักถ่วง

### 3. แบบใช้ Strain Gage

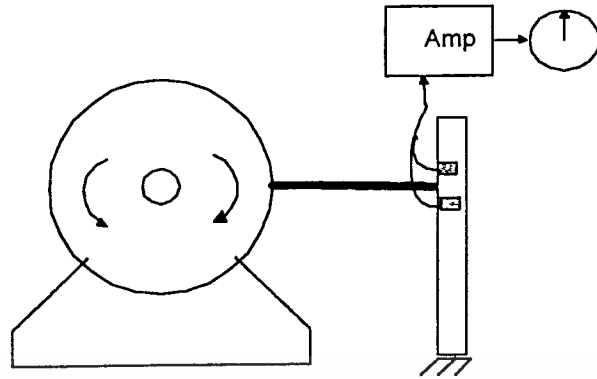


รูปที่ 1.5 เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์แบบใช้ Strain gage

เพื่อลดความผิดพลาดของเครื่องวัดแรงบิดแบบวัดแรงโดยตรง ทางบริษัทผู้ผลิตต่างประเทศได้ใช้ Strain gage ซึ่งใช้วัดค่า Strain ของเหล็กนำไปติดกับเหล็กสปริงดังรูปที่ 1.5 เมื่อ Eddy Current Break เคลื่อนที่ไปก็จะทำให้เหล็กสปริงอันนั้นงอและผิวเหล็กจะยืดออกทำให้ความต้านทานของ Strain gage เปลี่ยนไป เมื่อเราต่อ Strain gage ไว้ในวงจร Wheatstone Bridge เมื่อความต้านทานของ Strain gage เปลี่ยนไปก็จะทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล จะทำให้มีสัญญาณมาที่ชุดขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อเพิ่มระดับสัญญาณให้สูงขึ้น แล้วส่งสัญญาณเข้า Analogue meter ที่เปลี่ยนสเกลให้เป็นแรงบิดแล้ว

### 4. แบบ Piezoelectric Cell

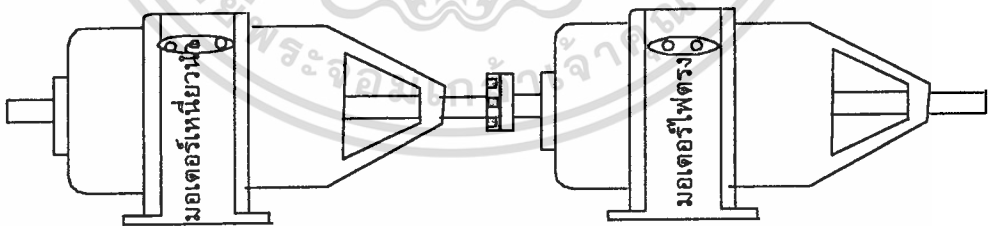
มีลักษณะคล้ายกับ Strain gage แต่แบบ Piezoelectric Cell นี้เมื่อถูกแรงกดที่แตกต่างกันออกมา แล้วนำสัญญาณอันนั้นมาต่อผ่านเข้าวงจรขยายสัญญาณ เพื่อเพิ่มระดับของสัญญาณแล้วส่งเข้า Analog Meter ต่อไป  
 หมายเหตุ: เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์แบบ Piezoelectric Cell

### 5. แบบการเชื่อมต่อเพลาเข้ากับ ดิซิมอเตอร์

การต่อเชื่อมเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับดิซิมอเตอร์ จะทำให้ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเท่ากับแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาของดิซิมอเตอร์ โดยดิซิมอเตอร์เปรียบเสมือนเป็นโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเราจะป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับดิซิมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์หมุนสวนทางกับการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วรอบที่ค่าใดค่าหนึ่งแล้วเราทำการวัดค่าความเร็วรอบนั้นและกำลังที่ป้อนให้กับดิซิมอเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นและแสดงผลดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงการเชื่อมต่อเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับดิซิมอเตอร์

ในโครงงานนี้จะเลือกการวัดแรงบิดโดยการเชื่อมต่อเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับดิซิมอเตอร์ โดยเหตุผลในการเชื่อมต่อเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับดิซิมอเตอร์ เพราะค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ดิซิมอเตอร์สามารถหาค่าได้ง่ายกว่าค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะขึ้นกับองค์ประกอบหลายๆอย่าง ทำให้ยากต่อการนำมาคำนวณหาค่าแรงบิด

และในโครงการนี้จะวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย โดยการวัดความเร็วรอบจะรับสัญญาณมาจาก ตัวเข้ารหัส(Incremental Encoder) ซึ่งจะติดอยู่กับตัวคีมอเตอร์ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่แปรผันกับความเร็วนรอบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อประยุกต์ใช้งาน MCS-51
2. เพื่อศึกษาการเกิด Torque ของมอเตอร์
3. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดความเร็วรอบในการหมุนของเพลาของมอเตอร์ได้
4. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์
5. เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์
6. เพื่อนำเอามอเตอร์ไฟฟ้าไปใช้กับโหลดให้เหมาะสมมากที่สุด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Induction Motor)
2. สร้างโดยการต่อเชื่อมเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับเพลาของคีมอเตอร์
3. การแสดงค่าความเร็วรอบและแรงบิดจะแสดงผลเป็นดิจิตอล (7-Segment)

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและคีมอเตอร์ตลอดจนการเกิดแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสองตามลำดับ
2. ศึกษาการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและเลือกใช้งานวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล
3. ศึกษาการทำงานของตัวเข้ารหัส(Incremental Encoder)
4. ศึกษาการทำงานของ MCS-51 และการเขียนโปรแกรมควบคุม
5. ออกแบบฮาร์ดแวร์ของเครื่องมือวัดทั้งหมดทั้งส่วนความเร็วและแรงบิด
6. นำผลที่ออกแบบมาสร้างทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
7. ทดสอบการทำงานของส่วนของการวัดความเร็วรอบให้มีค่าให้ถูกต้องก่อน
8. ทดสอบการทำงานของส่วนวัดแรงบิด
9. ทดสอบการทำงานของเครื่องวัดร่วมกันทั้งหมด และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นตลอดจนปรับปรุงการทำงานของเครื่องวัดให้มีค่าถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เกิดความเข้าใจในการนำ MCS-51 ไปประยุกต์ใช้งาน
2. ทำให้ได้เครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. สามารถนำโครงการนี้ไปพัฒนาให้ดีขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป
4. รู้จักประยุกต์และนำความรู้มาใช้และเป็นแนวทางที่จะพัฒนาความรู้ไปใช้ในการทำงานในงานอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

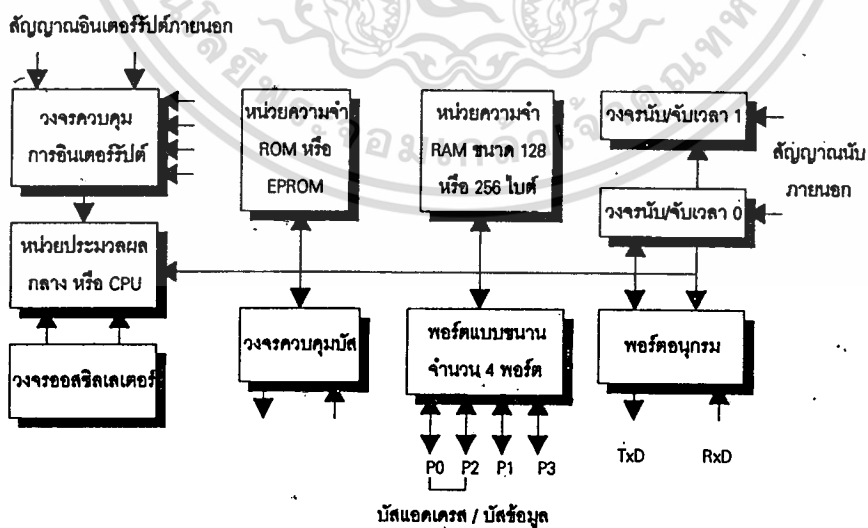
### ทฤษฎี

#### 2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบควบคุมที่มีขนาดเล็ก โดยภายในไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งตัวจะประกอบด้วยหน่วยการทำงานหลักของระบบคอมพิวเตอร์ครบถ้วน เช่น หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU) หน่วยความจำ พอร์ตในการติดต่อหรือควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งหากว่าเป็นการใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไปก็จะต้องใช้ไอซีภายนอกมาประกอบเพื่อทำหน้าที่ เหล่านี้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นระบบคอมพิวเตอร์เพื่องานควบคุมที่สมบูรณ์ โดยบรรจุอยู่ในไอซีเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น ในบางครั้งจึงอาจพบว่าการเรียกไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าเป็น ระบบไมโครคอมพิวเตอร์ชิปเดี่ยว (1 chip microcomputer)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์หลายรุ่น (Version) ซึ่งมีสถาปัตยกรรมพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดหรือจำนวนของหน่วยทำงานภายในที่ต่างกันออกไป เพื่อความเหมาะสมในงานประยุกต์ต่างๆตามความต้องการ โดยมีทั้งลักษณะที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตไอซีเชิงรวมความจุสูงมาก (LSI) แบบ HMOS หรือ CHMOS ซึ่งมีคุณลักษณะที่สูงมากขึ้น และสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ามาก

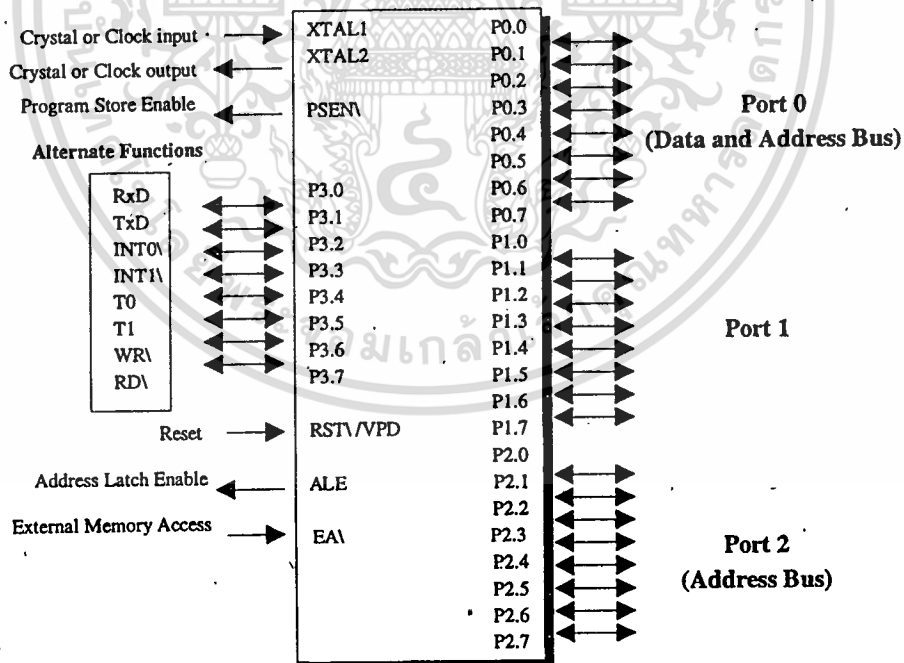
##### 2.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของ 8051



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.1 แผนภาพบล็อกแสดงหน่วยทำงานพื้นฐานของ MCS-51ที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงหน่วยการทำงานพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ต่างๆที่จัดอยู่ในตระกูล MCS-51 ประกอบด้วย

- หน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต
- หน่วยประมวลผลสำหรับข้อมูลแบบบิต (Boolean Processor)
- ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม 64 กิโลไบต์
- ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูล 64 กิโลไบต์
- หน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์ แบบ EPROM (เบอร์ 8751) หรือแบบ ROM (เบอร์ 8051)
- หน่วยความจำแบบ RAM ภายในจำนวน 128 ไบต์
- พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตแบบขนานจำนวน 32 เส้น ซึ่งสามารถแยกทำงานได้อย่างอิสระ
- วงจรนับ/จับเวลาขนาด 16 บิต จำนวนสองวงจร
- วงจรสื่อสารแบบอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex)
- วงจรควบคุมการอินเตอร์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 6 ประเภท พร้อมการกำหนดลำดับความสำคัญได้สองระดับ
- วงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน



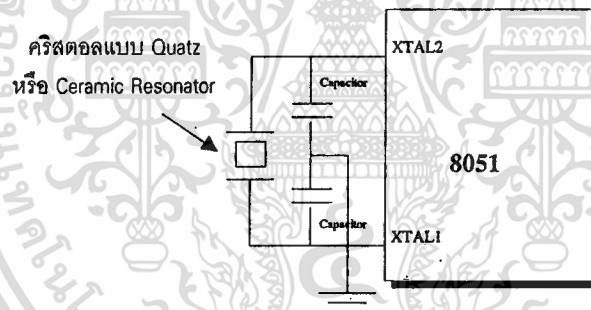
รูปที่ 2.2 การกำหนดหน้าที่ขาสัญญาณของไอซี 8051

โดยมากแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ มักจะมีรูปร่างของไอซีเป็นแบบ DIP ขนาด 40 ขา ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละขาสัญญาณจะมีหน้าที่ที่ระบุชัดเจนตามสัญลักษณ์

ชื่อย่อที่กำกับในแต่ละขา อย่างไรก็ตามจะมีบางขาสัญญาณที่อาจจะมีหน้าที่ได้มากกว่าหนึ่งอย่าง (ซึ่งเขียนกำกับไว้ว่า Alternate Function ในรูปที่ 2.2) ซึ่งจะไม่สามารถใช้งานในเวลาเดียวกันได้ ตัวอย่างเช่น ขาสัญญาณบิต 0 ของพอร์ต 3 (ใช้ตัวย่อเป็น P3.0) อาจจะใช้เป็นขาสัญญาณเอาต์พุต หรืออินพุตตามปกติ หรืออาจทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณอินพุตของข้อมูลสื่อสารแบบอนุกรม (RxD) ให้กับวงจรสื่อสารแบบอนุกรมของ 8051 ได้ ซึ่งการจะกำหนดว่าจะทำงานในลักษณะใดก็ขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อวงจรเข้ากับขาสัญญาณและ โปรแกรมควบคุมของระบบนั้น

### 2.1.2 ฐานเวลาในการทำงานของซีพียูภายใน 8051

8051 มีวงจรออสซิลเลเตอร์อยู่ภายใน สำหรับการสร้างพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งจะนำไปเป็นฐานเวลา หรือการกำหนดจังหวะการทำงานของหน่วยการทำงานทั้งหมดให้สอดคล้องกัน (Synchronization) โดยปกติแล้วก็จะทำโดยการใช้คริสตอลเชื่อมต่อเข้ากับขาสัญญาณ XTAL1 และ XTAL2 พร้อมกับตัวเก็บประจุดังลักษณะในรูปที่ 2.3 หรืออาจจะเป็นสัญญาณจากภายนอกก็ได้



รูปที่ 2.3 แสดงการใช้คริสตอลภายนอกต่อเข้ากับวงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน 8051

พัลส์ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาจะเรียกว่า Pulse (ใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษร P) และคาบของสัญญาณนาฬิกา นี้ เรียกว่า คาบเวลาออสซิลเลเตอร์ (Oscillator period) คาบเวลาออสซิลเลเตอร์ จำนวนสองคาบ เรียกว่า State ซึ่งจะนำไปใช้เป็นช่วงเวลาพื้นฐานในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น การนำคำสั่ง (Fetch) การถอดความหมาย (Decode) การประมวลผล (Execute) และการเขียนข้อมูล (Write) เป็นต้น ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.4 ช่วงเวลาของ State จำนวนหกครั้ง จะเรียกว่า แมชชีนไซเคิล (Machine cycle) ดังนั้นค่าหนึ่งแมชชีนไซเคิลจะใช้เวลา 12 คาบเวลาออสซิลเลเตอร์ ค่าของแมชชีนไซเคิลนี้จัดว่าเป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุดในการที่คำสั่งหนึ่ง ซึ่งหากว่าเป็นคำสั่งที่ซับซ้อนมากก็จะต้องใช้เวลาสองถึงสามแมชชีนไซเคิล

การคำนวณหาว่าเวลาที่ใช้ในการทำคำสั่งใดจนเสร็จสิ้น จะต้องดูว่าคำสั่งนั้นใช้จำนวนเมฆ  
นไซเคลเป็นเท่าไรในการประมวลผล เวลาที่ใช้จะคำนวณตามสูตร

$$T = (C * 12) / (\text{Crystal Frequency})$$

โดย C เป็นค่าจำนวนเมฆไซเคลของคำสั่ง  
Crystal Frequency เป็นค่าความถี่ของคริสตอลที่ใช้กับ 8051

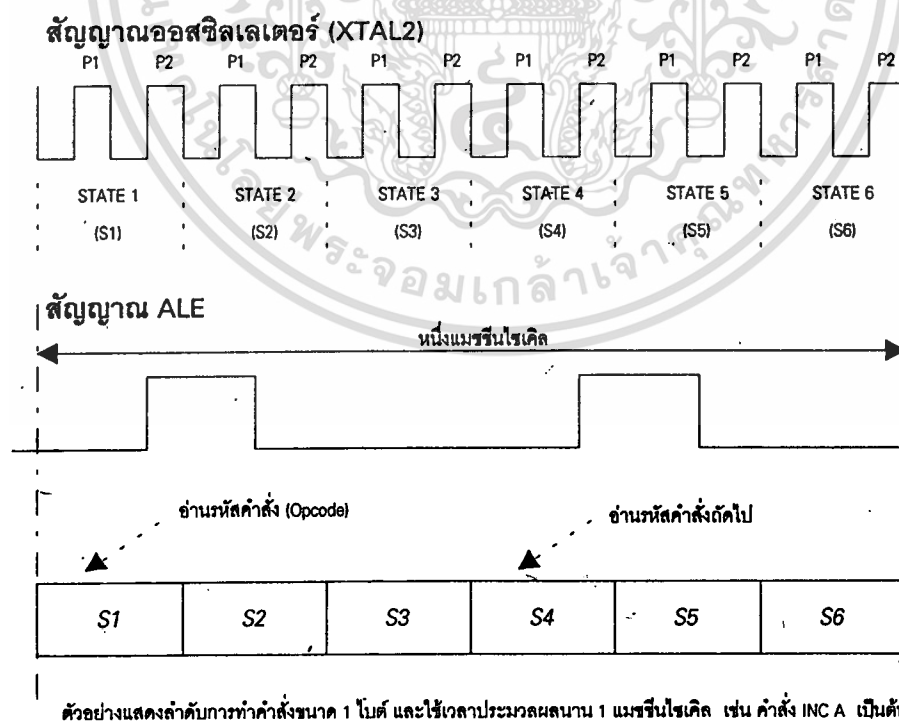
ตัวอย่างเช่น

เวลาในการทำคำสั่ง ADD A,R1 ซึ่งต้องการ 3 เมฆไซเคล

เมื่อใช้คริสตอล 16 เมกะเฮิร์ต จะเป็นเวลานาน 0.75 ไมโครวินาที และ

เมื่อใช้คริสตอล 12 เมกะเฮิร์ต จะเป็นเวลานาน 1 ไมโครวินาที เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งอาจจะพบเห็นการใช้ค่าของคริสตอลเป็น 11.059 MHz ทั้งนี้โดยมีเหตุผล  
เนื่องจาก สามารถนำค่าความถี่ที่ได้นี้ ไปใช้ในการเป็นฐานเวลาสำหรับการสร้างความถี่ในการรับ/ส่ง  
ข้อมูลอนุกรมซึ่งเป็นหน่วยการทำงานหนึ่งภายใน 8051 เอง โดยจะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า  
มาตรฐานคือ 19200, 4800, 9600, 2400, 1200, และ 300 บิต/วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำ  
รูปที่ 2.4 แสดงเวลาแผนภาพพื้นฐานของ 8051 และลำดับของช่วงเวลา STATE ในการทำคำสั่งหนึ่งไบต์

### 2.1.3 หน่วยความจำโปรแกรมของ 8051

ในระบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสำหรับบรรจุคำสั่งหรือโปรแกรมที่ผู้ใช้พัฒนาขึ้นจัดเก็บไว้ภายในหน่วยความจำ ที่เรียกว่า หน่วยความจำโปรแกรม(Program Memory) โดยอาจจะประกอบอยู่ภายในตัวไอซีของ 8051 เองหรือเป็นไอซีหน่วยความจำ EPROM หรือ ROM แยกออกต่างหากได้

หน่วยความจำโปรแกรมของ 8051 เป็นบริเวณหน่วยความจำ สำหรับเก็บข้อมูลและคำสั่งใช้งานต่างๆซึ่งแม้ว่าจะไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ ข้อมูลเหล่านี้ก็ยังคงอยู่ไม่สูญหายโครงสร้างของหน่วยความจำโปรแกรม มีลักษณะเช่นเดียวกับหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ในไอซี หน่วยความจำประเภทต่างๆ เช่น หน่วยความจำแบบ ROM หรือ EPROM

8051 สามารถอ่านข้อมูลหน่วยความจำโปรแกรมนี้สูงสุดได้ไม่เกิน 64 กิโลไบต์ และแยกประเภทของหน่วยความจำโปรแกรมเป็นสองลักษณะ ตามตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรมนั้น คือ หน่วยความจำโปรแกรมภายใน(Internal Program Memory)ซึ่งเป็นหน่วยความจำ ROM หรือ EPROM ที่อยู่ภายในตัวไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เอง และ หน่วยความจำโปรแกรมภายนอก(External Program Memory) ซึ่งเป็นการใช้ไอซีหน่วยความจำมาทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำโปรแกรมของระบบ โดยการจัดพื้นที่หน่วยความจำโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดพื้นที่หน่วยความจำโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) หน่วยความจำโปรแกรมภายใน

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ต่างๆ ที่จัดอยู่ในตระกูล 8051 นี้มีขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมภายในแตกต่างกันออกไป เพื่อความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะต่างๆ กันดังนี้ 8051 และ 8052 มีหน่วยความจำแบบ ROM ขนาด 4 และ 8 กิโลไบต์ ตามลำดับ ประกอบอยู่ในไอซี และมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในวงจรทางอุตสาหกรรมที่มีจำนวนการผลิตมาก เนื่องจากจะมีผลทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายการผลิตต่อหน่วยลดลงได้มาก

8751 มีหน่วยความจำแบบ EPROM ขนาด 4 กิโลไบต์อยู่ในไอซี ข้อมูลที่จัดเก็บอยู่ในไอซีนี้สามารถใช้แสงอัลตราไวโอเลตลบได้ และนำไปบรรจุโปรแกรมใหม่ได้อีกครั้งหนึ่งคล้ายครีงกับไอซีหน่วยความจำ EPROM ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้เหมาะสมกับงานด้านอุตสาหกรรมที่มีจำนวนการผลิตคราวละไม่มากนัก หรืออาจจะเป็นงานประเภทต้นแบบภายในห้องปฏิบัติการ

8031 และ 8032 ไม่มีหน่วยความจำโปรแกรมอยู่ในตัวไอซีเลย ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องอาศัยหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก ซึ่งการใช้งานในลักษณะนี้จะมีผลทำให้ต้องเสียความสามารถบางประการ เกี่ยวกับพอร์ตอินพุต/เอาพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ไป เนื่องจากต้องนำไปใช้เป็นส่วนควบคุม เกี่ยวกับการจัดการติดต่อหน่วยความจำภายนอกแทน

## 2) หน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

หน่วยความจำโปรแกรมภายนอกเป็นการใช้หน่วยความจำ EPROM (หรือ ROM) เชื่อมต่อเข้ากับระบบของ 8051 โดยอาจจะมีสาเหตุได้หลายประการ เช่น เป็นการทดลองทำระบบต้นแบบจำนวนน้อย หรืออาจลดต้นทุนการผลิต เพราะราคาของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบไม่มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในราคาจะต่ำกว่าแบบที่มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในมาก เป็นต้น ในบางครั้งอาจจะมีสาเหตุจากความจำเป็นอื่นๆ ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เช่น การที่หน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดความจุที่ไม่เพียงพอกับโปรแกรม หรืออาจจะเป็นว่าการที่ใช้ไอซีหน่วยความจำจะทำให้สามารถจัดหาเครื่องมือ(Tools) ช่วยการพัฒนาาระบบที่ใช้งานกันโดยแพร่หลายและราคาถูกได้ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการพัฒนาระบบลงได้มากเป็นต้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ต่างๆ ของตระกูล 8051 นี้ สามารถขยายให้ใช้งานหน่วยความจำภายนอกได้ทั้งสิ้น โดยในกรณีที่มิหน่วยความจำโปรแกรมภายในอยู่แล้ว การอ้างตำแหน่งแอดเดรสที่มีทั้งในหน่วยความจำโปรแกรมภายในและภายนอกนั้น จะต้องทำการพิจารณาระดับลอจิกของสัญญาณของสัญญาณ EA

### 2.1.4 ลักษณะสมบัติของไอซีหน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในข้อมูลต่างๆ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารได้ การอ้างตำแหน่งแอดเดรสที่มีทั้งในหน่วยความจำโปรแกรมภายในและภายนอกนั้น จะต้องทำการพิจารณาระดับลอจิกของสัญญาณของสัญญาณ EA

ลักษณะสมบัติ (Characteristics) ที่สำคัญบางประการของไอซีประเภทนี้ก่อนโดยจะใช้ EPROM เบอร์ 2716 เป็นพื้นฐานของการอธิบาย เนื่องจากสามารถหามาใช้งานและทำการทดลองได้โดยง่าย ราคาถูกและสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงข้อมูล นอกจากนี้หลักการทำงานหลักการทำงานก็สามารถนำไปใช้งานกับ EPROM เบอร์อื่นๆ ที่มีความจุข้อมูลมากขึ้นได้

การนำข้อมูลที่จัดอยู่ภายใน EPROM ออกมาใช้งานนั้น จะเรียกว่าเป็น การอ่าน(READ) จากหน่วยความจำกระบวนการเพื่อที่จะทำให้ข้อมูลออกมานั้นจะกระทำอยู่ภายในช่วงเวลาหนึ่ง ที่เรียกว่า รอบเวลาการอ่าน (Read Cycle) คำว่ารอบเวลา ในที่นี้มีความหมายถึง ช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ต้องการในการทำหน้าที่เพื่ออ่านข้อมูลออกมาจากหน่วยความจำ

### 2.1.5 สัญญาณติดต่อกับหน่วยความจำ EPROM

การเชื่อมต่อหน่วยความจำ EPROM ประกอบด้วย สัญญาณที่เกี่ยวข้องสี่กลุ่มด้วยกันคือ ขา สัญญาณสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับไอซี (Power) บัสแอดเดรส บัสข้อมูล และบัสสัญญาณควบคุมการส่งออกข้อมูล ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ภายใน EPROM จะประกอบด้วยบริเวณที่สามารถเก็บข้อมูลได้จำนวนมากซึ่งจะมีตำแหน่งในการอ้างอิงที่ระบุเฉพาะลงไปแน่นอน หรือกล่าวในอีกลักษณะหนึ่งว่ามีแอดเดรส (Address) ที่แน่นอนสำหรับเก็บข้อมูลในแต่ละส่วน โดยปกติสามารถพิจารณาขนาดความจุของหน่วยความจำได้จากลักษณะที่มักมีการอ้างอิงกัน เช่น 1024 x 8 หรือ 2048 x 8 เป็นต้น โดยค่าของตัวเลขจุดแรกจะระบุถึงจำนวนพื้นที่ที่เก็บข้อมูลที่มีแอดเดรสระบุแน่นอนภายในไอซีนั่น ซึ่งในบางครั้งก็อาจจะระบุเป็นหน่วยของกิโลไบต์ (KB) แทน และค่าของตัวเลขจุดที่สองนั้นเป็นการระบุถึงจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่งออกมาจากไอซีหน่วยความจำในแต่ละตำแหน่งนั้น

สำหรับการพิจารณาจำนวนเส้นของสัญญาณแอดเดรสที่ใช้กับ EPROM ตัวหนึ่งๆ นั้นยกตัวอย่างเช่น EPROM ที่มีขนาด 4096 X 8 เราจะนำตัวเลขค่าแรกซึ่งบอกถึงจำนวนพื้นที่ที่จัดเก็บอยู่ภายใน (ซึ่งก็คือ ความจุในการเก็บข้อมูล) มาแปลงให้อยู่ในรูปของเลขยกกำลังสอง ดังนี้

$$2^x = 4096$$

$$x = \text{Log}(4096)/\text{Log}(2)$$

$$x = 12$$

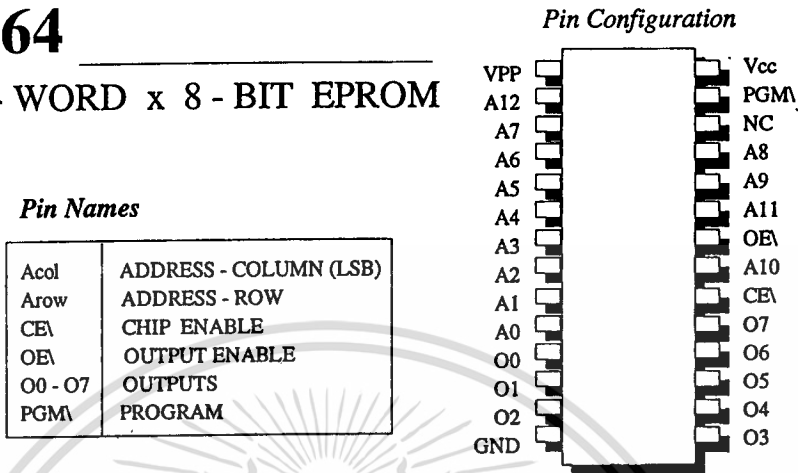
เมื่อค่าตัวเลข 4096 มีค่าเท่ากับ  $2^{12}$  ดังนั้นจำนวนของเส้นสัญญาณแอดเดรสที่ใช้กับ EPROM จึงมีทั้งหมด 12 เส้น เป็นต้น

สัญญาณที่มาเชื่อมต่อเข้ากับกลุ่มสัญญาณแอดเดรสของ EPROM มักจะเป็นกลุ่มของสัญญาณเอาต์พุตที่มาจากพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ (โดยปกติจะเป็นบัสแอดเดรสของไมโครคอนโทรลเลอร์) เพื่อทำการกำหนดตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการ ข้อมูลภายในบัสแอดเดรสนี้จะถูกนำมาทำการ

ถอดรหัสเพื่อหาตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการภายใน EPROM ต่อไป ส่วนบัสข้อมูลมีหน้าที่สำหรับการเข้าถึงข้อมูลที่เก็บอยู่ในตำแหน่งภายในหน่วยความจำ ซึ่งถูกระบุมาจากบัสแอดเดรส

# 2764

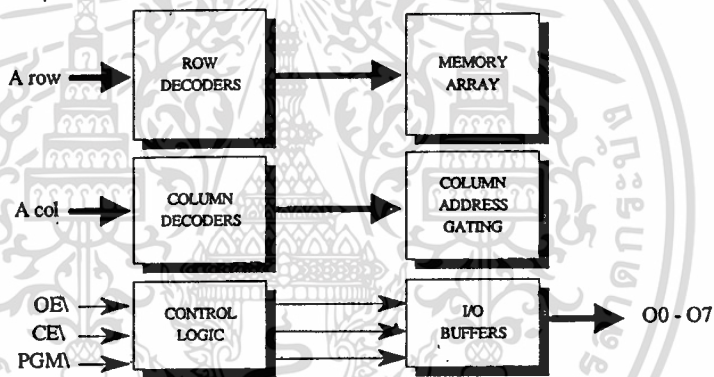
8K - WORD x 8 - BIT EPROM



**Pin Names**

Acol	ADDRESS - COLUMN (LSB)
Arow	ADDRESS - ROW
CE	CHIP ENABLE
OE	OUTPUT ENABLE
O0 - O7	OUTPUTS
PGM	PROGRAM

**Block Diagram**



รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกและขาสัญญาณของหน่วยความจำ EPROM

สำหรับสัญญาณควบคุมการส่งออกข้อมูล ได้แก่

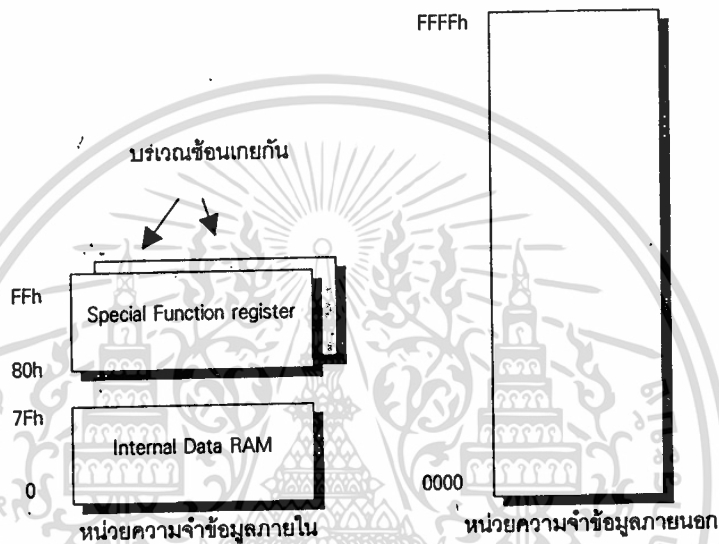
สัญญาณ CS (Chip Select) มีหน้าที่เลือกให้ EPROM ทำงาน โดยเมื่อสัญญาณแอกทีฟ (Active) หรือระดับลอจิกต่ำจะเป็นการยินยอมให้ EPROM ทำงานตามปกติ แต่ถ้าระดับลอจิกสูงจะไม่มีการทำงานใดๆ ภายใน EPROM เกิดขึ้น รวมทั้งการถอดรหัสแอดเดรสหรือการส่งข้อมูลทางบัส

สัญญาณ OE (Output Enable) เมื่อสัญญาณแอกทีฟหรือระดับสัญญาณลอจิกต่ำ จะมีการป้อนข้อมูล ภายในตำแหน่งที่ถูกระบุตามข้อมูลของบัสแอดเดรส และทำการส่งออกมายังบัสข้อมูลของ EPROM สัญญาณควบคุมนี้มักจะต่อเข้ากับขาสัญญาณ RD ของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.1.6 หน่วยความจำข้อมูลของ 8051

หน่วยความจำข้อมูลมีหน้าที่สำหรับเก็บข้อมูล หรือตัวแปรที่เกิดขึ้นในขณะที่กำลังประมวลผลโปรแกรมไว้เป็นการชั่วคราว โดยพื้นฐานแล้วหน่วยความจำข้อมูลจัดเป็นหน่วยความจำ RAM

แบบสแตติก ดังนั้นเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟให้กับระบบ ก็จะมีผลทำให้ข้อมูลที่จัดเก็บไว้ภายใน หน่วยความจำนี้สูญหายไป พื้นที่ของหน่วยความข้อมูลของ 8051 สามารถมีได้สูงสุดไม่เกิน 64 กิโลไบต์ และแยกประเภทออกเป็นสองลักษณะตามตำแหน่งที่ตั้งของหน่วยความจำนั้น ดังแสดงในแผนภาพในรูปที่ 3.1 คือ หน่วยความจำภายใน (Internal Data Memory) ซึ่งเป็น RAM ที่อยู่ภายใน ตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์เอง และหน่วยความจำข้อมูลภายนอก (External Data Memory) ซึ่งเป็นการใช้ไอซีหน่วยความจำ RAM มาเพิ่มเติมเข้าในวงจร ลักษณะเดียวกับการนำไอซี EPROM มาใช้งานเป็นหน่วยความจำโปรแกรมนั่นเอง



รูปที่ 2.7 การจัดพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

### 1) หน่วยความจำข้อมูลภายใน

หน่วยความจำข้อมูลภายในของ 8051 มีจำนวนทั้งหมด 256 ไบต์ โดยจำแนกออกได้เป็นสองลักษณะ คือ พื้นที่เฉพาะสำหรับตัวประมวลผลกลาง (หรือซีพียู) ใช้งานเท่านั้น ซึ่งเรามักจะเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า รีจิสเตอร์ และพื้นที่ใช้งานทั่วไปสำหรับโปรแกรมใช้งานที่ผู้ใช้สร้างขึ้นมา

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงการจัดสรรพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลภายในของ 8051 ซึ่งจำแนกออกเป็นสองส่วนดังนี้

หน่วยความจำขนาด 128 ไบต์แรก

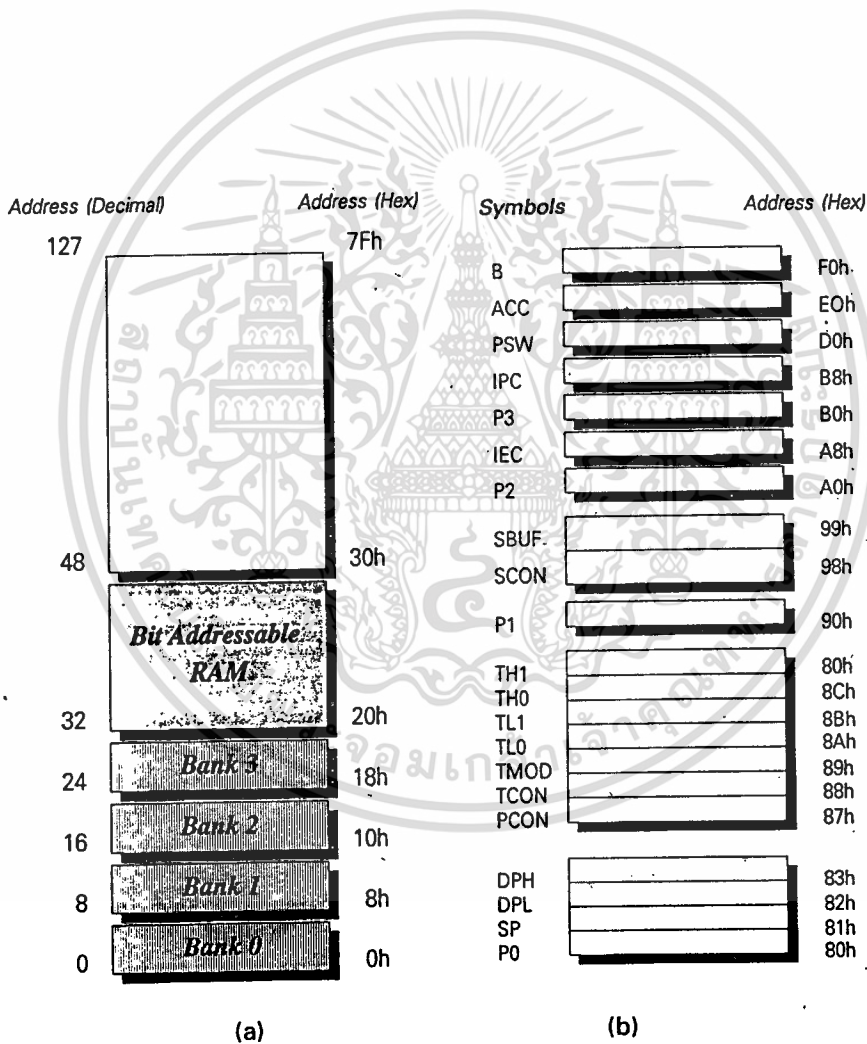
บริเวณนี้จะมีตำแหน่งแอดเดรสอยู่ในช่วง 00H-7FH ซึ่งยังได้มีการจำแนกย่อยไปอีกเป็นสามส่วนตามประเภทของการใช้งาน ดังนี้

บริเวณแอดเดรส 00H-1FH จำนวน 32 ไบต์ จำแนกออกเป็นกลุ่ม(หรือ แบงก์(Bank))

ข้อมูลจำนวน 8 ไบต์ รวมทั้งหมดคือกลุ่ม พื้นที่ข้อมูลในแต่ละกลุ่มจะถูกใช้งานในฐานะของรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป ซึ่งมีชื่อเรียกว่า รีจิสเตอร์ R0-R7 ดังตารางต่อไปนี้

แอดเดรส	รีจิสเตอร์แบงก์	ชื่อรีจิสเตอร์ใช้งาน
00H-07H	0	R0-R7
08H-0FH	1	R0-R7
10H-17H	2	R0-R7
18H-1FH	3	R0-R7

จะเห็นได้ว่าชื่อของรีจิสเตอร์ไม่ว่าจะอยู่ในรีจิสเตอร์แบงก์ใด ก็จะมีชื่อ R0-R7 เหมือนกันทั้งสิ้น (ดูรูปที่ 2.8)

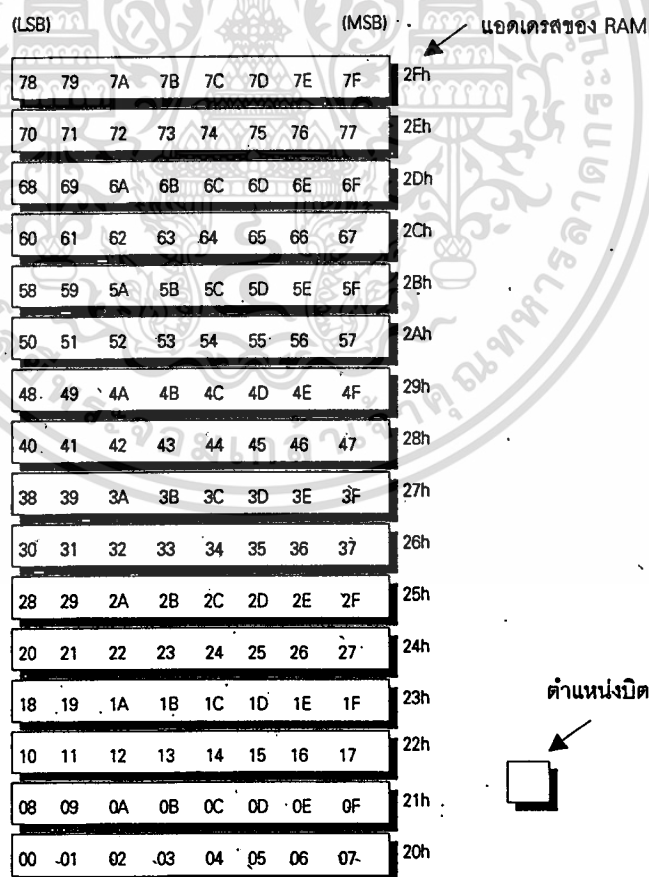


รูปที่ 2.8 การจัดพื้นที่หน่วยข้อมูลภายใน (a) ช่วงตั้งแต่แอดเดรส 00-7FH (b) ช่วงแอดเดรส 80-FFH ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตใช้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการใช้งานผู้ใช้จะต้องให้ความระมัดระวังว่าต้องการรีจิสเตอร์นั้นๆจากแบงก์ใด การสวิตช์เลือกแต่ละกลุ่มของรีจิสเตอร์นี้ก็ทำได้ง่าย เพียงการกำหนดค่าของบิตที่อยู่ภายในรีจิสเตอร์ PSW เท่านั้นตามตารางต่อไปนี้

รีจิสเตอร์	บิต RS0	บิต RS1	ตำแหน่งหน่วยความจำ
แบงก์ 0	0	0	0000H
แบงก์ 1	1	1	0008H
แบงก์ 2	2	0	0010H
แบงก์ 3	3	1	0018H

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปก็มักจะมีการใช้งานรีจิสเตอร์ R0-R7 เฉพาะในแบงก์ 0 เท่านั้น ดังนั้นพื้นที่ของแบงก์อื่นๆ ที่เหลือก็นำมาใช้ในลักษณะหน่วยความจำข้อมูลปกติด้วยการอ้างถึงหมายเลขภายในปกติด้วยการอ้างถึงหมายเลขของแอดเดรสต่างๆ โดยตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงขึ้นใหม่และต้องอ้างถึงแหล่งที่มาของการนำพาใช้

รูปที่ 2.9 หน่วยความจำข้อมูลภายในบริเวณที่อ้างถึงได้แบบบิต

บริเวณแอดเดรส 20H-2FH จำนวน จำนวน 16 ไบต์บริเวณพื้นที่เป็นส่วนสำคัญผู้ใช้ซึ่งจะมีความพิเศษต่างไปจากหน่วยความจำส่วนอื่นๆ เนื่องจากผู้ใช้จะสามารถเข้าถึงหน่วยความจำบริเวณนี้ได้ทั้งในลักษณะของ ไบต์ข้อมูล เช่นปกติ หรืออาจเป็น บิตข้อมูล ได้โดยตรง ดังนั้นหากว่ามองในลักษณะบิตข้อมูลแล้ว ก็จะมีพื้นที่ที่ตีความแปรแบบบิตให้ใช้งานได้มากถึง 128 บิต โดยตำแหน่งแรกของบิตจะเป็นบิตซึ่งเริ่มต้นนับจากบิตน้อยสำคัญต่ำสุด (LSB) ของแอดเดรส 2FH (ดูรูปที่ 3.3)

ความสามารถในการใช้งานพื้นที่ส่วนนี้แบบบิตข้อมูลโดยตรงนี้นับว่าน่าสนใจมาก และถือเป็นการใช้งาน 8051 อย่างเต็มประสิทธิภาพทีเดียว เนื่องจากว่า 8051 ได้รับการออกแบบมาสำหรับงานควบคุมเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว ซึ่งส่วนมากงานลักษณะเช่นนี้หากเป็นการนำเข้าข้อมูลก็มักจะเป็นเพียงการอ่านค่าสถานะลอจิกของเส้นสัญญาณ หรือกรณีการส่งออกข้อมูลก็จะการกำหนดสถานะลอจิกให้กับวงจรภายนอกผ่านทางบิตใดบิตหนึ่งอยู่แล้ว ดังนั้นหากว่ามีการกำหนดบิตหรืออ่านค่าของบิตมาโดยตรง แทนที่จะต้องทำลอจิกขึ้นต้นกับข้อมูลทั้งไบต์เพื่อต้องการทราบผลเพียงหนึ่งบิตเช่นที่กระทำกันในโปรเซสเซอร์โดยทั่วไป ก็จะเพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการเขียนโปรแกรมควบคุมมาก รายละเอียดในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงอีกครั้งหนึ่งเมื่อศึกษาถึงการใช้งานพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตต่อไป

บริเวณแอดเดรส 30H-7FH เป็นบริเวณที่สามารถนำไปใช้งานได้โดยอิสระ โดยสามารถเข้าถึงได้เฉพาะในลักษณะของไบต์ข้อมูลตามปกติเท่านั้น  
หน่วยความจำขนาด 128 ไบต์ถัดไป

พื้นที่ตั้งแต่บริเวณตั้งแต่แอดเดรส 80H-FFH เป็นบริเวณของหน่วยความจำที่มีการใช้งานเฉพาะจาก 8051 เท่านั้น โดยจะนำมาใช้เป็นตำแหน่งของ รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ (Special Function Register หรือ SFR) จำนวน 20 ตำแหน่ง ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 3.4

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8051 จะมีหน่วยความจำข้อมูลภายในสำหรับการใช้งานเพิ่มมากขึ้นกว่าเบอร์อื่นๆ เช่น 8031 หรือ 8751 อีก 128 ไบต์ โดยจะอยู่บริเวณช่วงแอดเดรส 80H ถึง FFH เช่นกัน ซึ่งแม้ว่าจะเป็นพื้นที่ที่มีหมายเลขแอดเดรสเดียวกับส่วนของรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ แต่ในความเป็นจริงแล้วจะเป็นพื้นที่หน่วยความจำอีกบริเวณหนึ่ง ซึ่งมีการซ้อนเกย (Overlap) กันให้อยู่ในบริเวณแอดเดรสส่วนนี้ ซึ่งหากว่าผู้ใช้ต้องการจะเก็บข้อมูลในพื้นที่บริเวณนี้ก็ต้องใช้การเข้าถึงหน่วยความจำแบบโดยอ้อม (Indirect Addressing) เท่านั้น

### รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ

รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ (SFR) เป็นรีจิสเตอร์สำหรับการควบคุมหน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์หรือพอร์ตของ 8051 ทั้งหมด โดยมีตำแหน่งอยู่ในบริเวณแอดเดรส 80H-FFH (อ้างถึงรูปที่

3.4) การใช้งานรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษเหล่านี้สามารถทำได้ทั้งการระบุถึง ชื่อของรีจิสเตอร์หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ตำแหน่งแอดเดรสที่เป็นของรีจิสเตอร์นั้นก็ไม่ได้  
ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางต่อไปนี้แสดงให้เห็นการจัดพื้นที่หน่วยตจจจจ สำหรับรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษเหล่านี้โดยมีข้อสังเกตว่ารีจิสเตอร์ที่อยู่ในตำแหน่งแอดเดรสที่เป็นจำนวนทวิคูณของค่า 8 จะสามารถเข้าถึงในระดับบิตได้ด้วย

ชื่อรีจิสเตอร์	คำจำกัดความ	ความสามารถการเข้าถึงได้แบบบิต
ACC	Accumulator	ได้
B	B register	ได้
PSW	Program Status	ได้
SP	Stack Pointer	ได้
DPTR	Data Pointer (DPH & DPL)	ได้
P0	PORT 0	ได้
P1	PORT 1	ได้
P2	PORT 2	ได้
P3	PORT 3	ได้
IP	Interrupt Priority	ได้
IE	Interrupt Enable	ได้
TMOD	Timer/Counter control	ไม่ได้
TCON	Timer/Counter control	ได้
TH0	Timer/Counter 0	ไม่ได้
TLO	Timer/Counter 0	ไม่ได้
TH1	Timer/Counter 1	ไม่ได้
TL1	Timer/Counter 1	ไม่ได้
SCON	Serial control	ไม่ได้
SBUF	Serial data buffer	ไม่ได้
PCON	Power control	ไม่ได้

รูปที่ 2.10 รีจิสเตอร์ใช้งานพิเศษ (Special Function Register หรือ SFR)

แอกคิวมูลเตอร์ (Accumulator) หรือ ACC เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลที่จะส่งให้กับหน่วยงานภายในซีพียูและเก็บผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานนั้น การทำงานของรีจิสเตอร์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับตัวแอกคิวมูลเตอร์ของโปรเซสเซอร์ทั่วไป การใช้งานภายในโปรแกรมจะเรียกว่า รีจิสเตอร์ A

ปน  
นรชค

**รีจิสเตอร์ B** เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับการทำคำสั่งการคูณและการหารตัวเลข ในกรณีที่ไม  
ใช้ในการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ ก็สามารถนำไปใช้งานเช่นเดียวกับรีจิสเตอร์ทั่วไป

**โปรแกรมเคาน์เตอร์ (Program Counter)** เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการชี้ตำแหน่งแอดเดรสของ  
หน่วยความจำโปรแกรม ซึ่งจะต้องไปทำงานในลำดับต่อไป การใช้งานภายในโปรแกรมจะเรียกว่า รี  
จิสเตอร์ PC

**สแต็กพอยน์เตอร์ (Stack Pointer)** เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่เก็บตำแหน่งของ  
ตัวชี้หรือพอยน์เตอร์ (Pointer) ของบริเวณสแต็ก (Stack) สำหรับเก็บข้อมูลแอดเดรสรีจิส  
เตอร์ต่างๆ รวมทั้งข้อมูลจากโปรแกรมโดยปกติแล้วเมื่อทำการเริ่มต้นระบบใหม่หลังจากการเริ่ม  
จ่ายกระแสไฟฟ้า หรือมีการรีเซต (Reset) เกิดขึ้นค่าภายในสแต็กพอยน์เตอร์จะมีค่า 07H ซึ่งเป็น  
ตำแหน่งแอดเดรสภายในบริเวณพื้นที่ 128 ไบต์แรกของหน่วยความจำข้อมูลภายใน การใช้งานภายใน  
โปรแกรมจะเรียกว่า รีจิสเตอร์ SP

**ตัวชี้ข้อมูล หรือ ดาต้าพอยน์เตอร์ (Data Pointer)** เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ซึ่งเรียกว่า  
รีจิสเตอร์ DPTR และสามารถใช้งานแยกออกเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตสองตัว คือ รีจิสเตอร์ DPH  
และ DPL เพื่อเก็บค่าแอดเดรสของหน่วยความจำที่จะต้องใช้งานภายในโปรแกรม หรืออาจจะเป็น  
แอดเดรสของอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งกำหนดให้ติดต่อกันโดยใช้ตำแหน่งของหน่วยความจำนั้นภายใน  
โปรแกรม

**ชื่อบิต:** PSW      **ตำแหน่ง:** Doh      **ค่าบิตเริ่มต้น:** 0000 0111

CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	-	P
----	----	----	-----	-----	----	---	---

ชื่อบิต	ตำแหน่ง	ความหมาย
CY	PSW.7	Carry Flag
AC	PSW.6	Auxiliary Carry Flag
F0	PSW.5	Flag 0
RS1	PSW.4	บิตสำหรับเลือกรีจิสเตอร์แบงก์ บิต 1
RS0	PSW.3	บิตสำหรับเลือกรีจิสเตอร์แบงก์ บิต 0
OV	PSW.2	Overflow Flag
-	PSW.1	
P	PSW.0	Parity Flag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.11 บิตต่างๆ ภายในรีจิสเตอร์ PSW (Program Status Word)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมสแตตัสเวิร์ด (PSW) รีจิสเตอร์นี้ทำหน้าที่บอกถึงแฟล็กสถานะการทำงานต่างๆ รวมทั้งบิตสำหรับการกำหนดเลือกแบงก์(Bank) ของรีจิสเตอร์ที่ใช้งานด้วย ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 3.5

รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพอร์ต(Port Register) รีจิสเตอร์เหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับการทำงานของพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตโดยตรง ซึ่งแต่ละตัวจะเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต สามารถใช้งานได้ทั้งในลักษณะการอินพุต หรือการเอาต์พุตข้อมูลได้ การดำเนินการใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับพอร์ตทั้งสี่นี้จะมีผลทำให้ข้อมูลที่ตำแหน่งของพอร์ตเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน นอกจากนี้พอร์ต P0 และ P2 ยังสามารถนำมาใช้ในการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมหรือหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ โดยพอร์ต P2 จะเป็นค่าของแอดเดรส 8 บิตบนของหน่วยความจำ ช่วงเวลาต่อมาจึงจะนำพอร์ต P0 ไปใช้เป็นบัสสำหรับการรับหรือส่งข้อมูลกับหน่วยอุปกรณ์ภายนอก สำหรับพอร์ต P3 นั้นนอกเหนือจะใช้ในลักษณะของพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตเช่นปกติแล้ว ยังนำมาใช้ในฐานะบัสควบคุมเกี่ยวกับสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้อีกด้วย

รีจิสเตอร์ SBUF เป็นบัฟเฟอร์ขนาด 8 บิต สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมทั้งการรับและส่งข้อมูล ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วบัฟเฟอร์นี้มีอยู่ด้วยกันสองชุดและแยกออกจากกันอย่างชัดเจน สำหรับการส่งและการรับ โดยซีพียูจะทำการเลือกบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมให้โดยอัตโนมัติ

รีจิสเตอร์ PCON เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมหน้าที่การทำงานในสามลักษณะ ซึ่งได้แก่ การควบคุมการทำงานของโปรเซสเซอร์ (บิต IDL และ PD) การกำหนดอัตราการทรีควินซ์ของอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลอนุกรม(บิต SMOD) และแฟล็กสถานะสำหรับการใช้งานทั่วไป (บิต GR0 และ GR1)

บิต PD(Power down) เป็นการกำหนดให้ลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับส่วนของโปรเซสเซอร์ภายในลง โดยยังคงมีกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับหน่วยความจำข้อมูลภายในผ่านทางขาสัญญาณ RST วิธีการนี้มักนำมาใช้ในกรณีที่มีการตรวจสอบการไม่มีกำลังไฟฟ้า (Power failure) โดยวงจรตรวจสอบภายนอกจะต้องมีการอินเตอร์รัปต์เข้ามา เพื่อทำการเก็บข้อมูลที่กำลังประมวลผลอยู่ก่อนและเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้ป็นปกติแล้ว จึงค่อยนำข้อมูลนั้นมาประมวลผลต่อไป

บิต ILD(Idle Mode) เป็นการกำหนดให้โปรเซสเซอร์หยุดทำงานชั่วคราว (Sleep) และจะกลับมาอยู่ในสภาพปกติอีกครั้งเมื่อทำการรีเซตทางฮาร์ดแวร์ หรือมีการอินเตอร์รัปต์อย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้น การทำงานในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้ก็เนื่องจากว่าสถานะการหยุดการทำงานชั่วคราวนั้นเป็นเพียงการห้ามไม่ให้มีสัญญาณนาฬิกาจ่ายให้ส่วนของโปรเซสเซอร์เท่านั้น ส่วนของวงจรการอินเตอร์รัปต์พอร์ตอนุกรมและวงจรนับ/จับเวลา ยังคงมีสัญญาณนาฬิกาอยู่เป็นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบิต: PCON

ตำแหน่ง:97h

ค่าบิตเริ่มต้น: 0XXX 0000

SCON	-	-	-	GF1	GF0	PD	IDL
------	---	---	---	-----	-----	----	-----

ชื่อบิต	ตำแหน่ง	ความหมาย
SMOD	PCON.7 PCON.6 PCON.5 PCON.4	บิตกำหนดการทวีคูณของอัตราบอดปกติ
GF1	PCON.3	แฟล็กสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป Flag 1
GF0	PCON.2	แฟล็กสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป Flag 0
PD	PCON.1	บิตสำหรับการกำหนด Power down
IDL	PCON.0	บิตสำหรับการกำหนด Idle mode

รูปที่ 2.12 บิตต่างๆ ภายในรีจิสเตอร์ PCON(Power Control Register)

รีจิสเตอร์ IP,IE,TMOD,SMOD,SCON เป็นกลุ่มของรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่กำหนดการควบคุม และการทำงานของอินเทอร์รีปต์ต่างๆ ของ 8051

## 2) หน่วยความจำข้อมูลภายนอก

การใช้หน่วยความจำข้อมูลภายนอกเป็นวิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่ง ในกรณีที่มีความต้องการหน่วยความจำสำหรับการเก็บข้อมูลชั่วคราว หรือหรือตัวแปรของโปรแกรมมากเกินไปขนาดความจำของหน่วยความจำข้อมูลภายใน ซึ่งมีขนาดเพียง 128 หรือ 256 ไบต์เท่านั้น บางครั้งการใช้หน่วยความจำข้อมูลภายนอกก็เหมาะสมกับงานประยุกต์บางอย่างที่จำเป็น ต้องมีการเก็บสำรองข้อมูลบางอย่างไว้ไม่ให้สูญหายแม้ว่าจะไม่มีการจ่ายไฟให้กับระบบ ก็สามารถทำได้โดยการใช้ไอซีหน่วยความจำ RAM พร้อมแบตเตอรี่สำรองประเภทลิเทียมหรือนิเกิล-แคดเมียมเป็นตัวเก็บข้อมูลเหล่านี้ไว้แทน อย่างไรก็ตามไม่ว่าสาเหตุการนำไอซีหน่วยความจำภายนอกมาใช้จะเป็นอะไรจะมีผลทำให้พอร์พินพุต/เอาต์พุตข้อมูลของ 8051 ถูกนำไปใช้เพื่อการติดต่อกับหน่วยความจำเหล่านี้แทน ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องมีการใช้วงจรประกอบอื่นๆ เพื่อชดเชยความสามารถเหล่านี้ของ 8051 แทน

### 2.1.7 พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตของ 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาย่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
พอร์ต มีความหมายถึงแอสเซมบลีหนึ่งที่ได้รับกำหนดไว้เพื่อการ โอนย้ายข้อมูลระหว่างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายนอก การกำหนดประเภทของการติดต่อขึ้นอยู่กับทิศทาง การ

ไหลของข้อมูลเมื่อพิจารณาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลัก (รูปที่ 2.13) ดังนั้นการนำเข้าข้อมูลจากวงจรภายนอกจึงเรียกว่า การอินพุต(Input) และในกรณีตรงกันข้ามเพื่อส่งออกข้อมูลก็จะเรียกว่า การเอาต์พุต(Output)



รูปที่ 2.13 (a) แผนภาพแสดงการส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตเอาต์พุต ซึ่งเป็นเส้นสัญญาณจำนวน 8 เส้น สำหรับส่งข้อมูลจากระบบออกไปให้กับอุปกรณ์ภายนอก



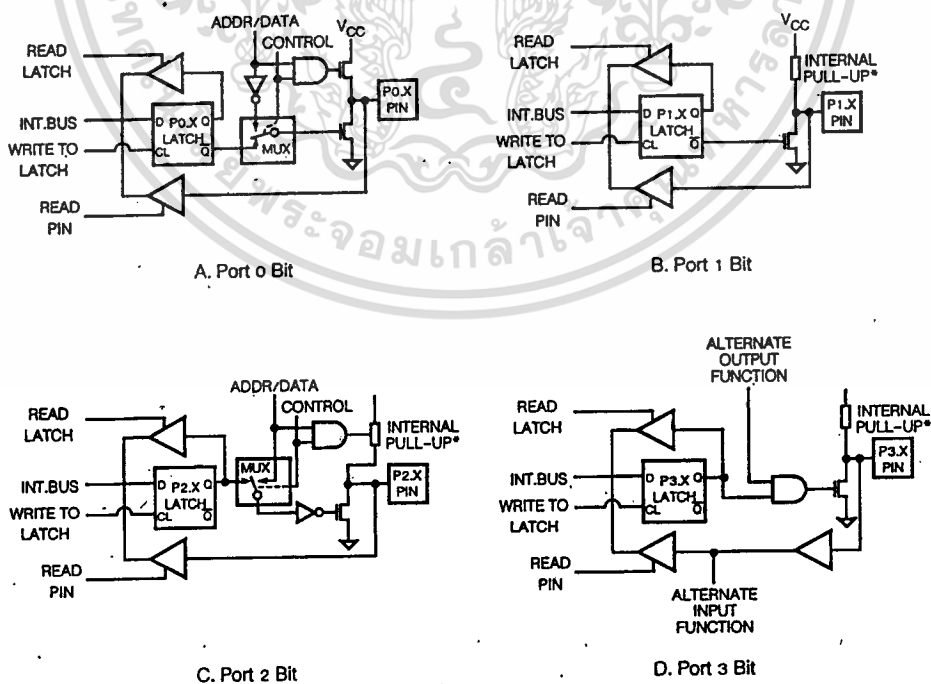
รูปที่ 2.13 (b) แผนภาพแสดงการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกเข้ามายังพอร์ตอินพุตของระบบ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นสัญญาณจำนวน 8 เส้น

เมื่อพิจารณาถึงการส่งข้อมูลภายในพอร์ตจะสามารถแยกประเภทของพอร์ตออกได้เป็นสองลักษณะคือ พอร์ตแบบขนาน(Parallel port) ซึ่งทำการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดออกมาหรือนำเข้าไปพร้อมกันทีเดียว และ พอร์ตแบบอนุกรม(Serial Port) ซึ่งทำการโอนย้ายข้อมูลคราวละบิตๆ จนครบจำนวน

พอร์ตแบบขนานของ 8051 8051 มีโครงสร้างของพอร์ตเรียกชื่อเรียงตามลำดับว่า พอร์ต 0,1,2 และ 3 และเป็นพอร์ตขนาด 8 บิตทั้งหมด การใช้งานพอร์ตสามารถทำได้ทั้งในลักษณะของ

สัญญาณเดี่ยวๆหรือกลุ่มของสัญญาณได้ นอกจากนี้พอร์ต 0,2 และ 3 ยังสามารถนำไปใช้งานอื่นๆที่ไม่ใช่เป็นพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตได้ โดยพอร์ต 0 จะทำหน้าที่มัลติเพล็กซ์ ระหว่างบัสแอดเดรสไบต์ค่าและบัสข้อมูลสำหรับการติดต่อกับวงจรประกอบร่วมกับข้อมูลบัสแอดเดรสไบต์สูงซึ่งจะส่งออกมาทางพอร์ต 2 สำหรับพอร์ต 3 นั้น นอกเหนือไปจากความสามารถเช่นปกติแล้ว สามารถนำไปเป็นขาสัญญาณของการอินเตอร์รัปต์ต่างๆ ซึ่งรวมทั้งการสร้างสัญญาณควบคุม RD\ และ WR\ เพื่อทำหน้าที่อ่านหรือเขียนหน่วยความจำข้อมูลภายนอกด้วย การใช้งานพอร์ตลักษณะอื่นๆ ที่ไม่ใช่เป็นพอร์ตแบบอินพุต/เอาต์พุตนี้จะดำเนินการโดย 8051 เองโดยอัตโนมัติ

โครงสร้างการทำงานของพอร์ต 8051 จากลักษณะโครงสร้างของแต่ละบิตภายในพอร์ตทั้งหมดของ 8051 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2.14 นั้น จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกันตามลักษณะโครงสร้างที่เรียกว่า Quasi-bidirectional port ยกเว้นพอร์ต 0 ซึ่งเพียงแต่ไม่มีตัวต้านทานทำหน้าที่ Pull-up สัญญาณไว้ภายในเท่านั้น วงจรประกอบอื่นภายในยังมีฟลิปฟล็อปแบบ D ซึ่งมีผลทำให้พอร์ตสามารถแลตช์หรือค้างสถานะของสัญญาณได้ นอกจากนี้ในส่วนเอาต์พุตของฟลิปฟล็อปเฉพาะของพอร์ต 0 และ พอร์ต 2 จะมีโครงสร้างที่ทำหน้าที่คล้ายคลึงกับสวิตช์เพิ่มเติมขึ้น เพื่อควบคุมให้เอาต์พุตนี้ต่อเข้ากับส่วนของทรานซิสเตอร์ใน ระหว่างที่ไม่มีการทำงานในลักษณะของบัสแอดเดรสหรือบัสข้อมูลด้วย สำหรับบัพเฟอร์จำนวนสองตัวของทุกบิตในพอร์ตนั้นมีการทำงานแยกกันอย่างอิสระ โดยตัวที่อยู่ทางด้านบนจะยอมให้สัญญาณผ่านได้ก็ต่อเมื่อได้มีการอ่านสถานะของขาสัญญาณเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้เป็นของเจ้าของลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ของบรรดาผู้ถือลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของแต่ละบิตภายในพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตของ 8051

### 2.1.8 การใช้งานพอร์ตเป็นการอินพุต

การใช้งานพอร์ตเป็นการอินพุตข้อมูลจะต้องเริ่มด้วยการส่งข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 ออกมาทาง บิตของพอร์ตนั้นก่อนเป็นลำดับแรก เพื่อหยุดการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับสัญญาณ เอาต์พุตของบิตนั้น ทำให้ขาสัญญาณของบิตถูกต่อเข้ากับตัวต้านทานซึ่งทำหน้าที่ Pull-up ภายในซึ่ง มีผลให้บิตนั้นๆ ของพอร์ต 1, 2 และ 3 เป็นสถานะของลอจิกสูง ตัวต้านทานซึ่งมีค่าประมาณ 50 K $\Omega$  ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก และทำให้อุปกรณ์ภายนอกสามารถขับสัญญาณของพอร์ตเหล่านี้เป็นลอจิกต่ำ ได้ง่าย สำหรับบิตของพอร์ต 0 นั้นแม้ว่าจะมีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกันกับบิตของพอร์ตอื่นๆ แต่เนื่องจากการที่ไม่มีตัวต้านทานทำหน้าที่ Pull-up ภายในไว้ ทำให้เมื่อทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับ สัญญาณเอาต์พุตนั้นหยุดการทำงาน ก็จะเป็นผลให้ขาสัญญาณนี้อยู่ในสถานะอิมพีแดนซ์สูงแทน

### 2.1.8 การใช้งานพอร์ตเป็นการเอาต์พุต

เมื่อมีการส่งข้อมูลที่มีค่าเป็น 0 ให้กับแต่ละบิตของพอร์ตทุกพอร์ต ข้อมูลนี้จะถูกส่งให้กับฟลิป ฟล็อปซึ่งจะค้างค่านี้ไว้ และมีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับสัญญาณเอาต์พุตนั้นทำงานดังนั้น ขาสัญญาณก็จะมีสถานะลอจิกเป็นลอจิกต่ำด้วย

ส่วนการส่งข้อมูลที่มีค่าเป็นหนึ่งออกมานั้น ในกรณีที่มีการทำงานในแต่ละบิตของพอร์ต 1, 2 และ 3 จะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับสัญญาณเอาต์พุตนั้นหยุดการทำงาน มีผลทำให้ขาของ สัญญาณเป็นลอจิกสูงด้วยตัวต้านทานที่ Pull-up อยู่ภายในนั้น แต่สำหรับการทำงานในแต่ละบิตทาง พอร์ต 0 เป็นการเอาต์พุตข้อมูล จึงจำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานภายนอก Pull-up สัญญาณไว้กับลอจิก สูงแทน

ความสามารถอีกประการหนึ่งเกี่ยวกับพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตของ 8051 เป็นวิธีอ่านค่าลอจิก จากพอร์ตซึ่งมีได้สองวิธีคือ การอ่านค่าลอจิกที่ขาสัญญาณ (Port pin) แลการอ่านค่าลอจิกของการ แลตช์ที่พอร์ต (Port latch) ดังจะตั้งแควได้ดังรูปที่ 4.2 วิธีการอ่านค่าจากพอร์ตทั้งสองแบบนี้จะช่วย ให้ระบบทำงานได้ด้วยความสะดวกมากยิ่งขึ้น

### 2.1.9 การอินเทอร์รัปต์ของ 8051

การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายนอก มักจะทำโดยการตรวจสอบ สถานะของสัญญาณติดต่อกัน การอินเทอร์รัปต์เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กับไมโคร คอนโทรลเลอร์ เพื่อสามารถทำการตรวจรับหรือบริการกับอุปกรณ์ต่างๆ ให้เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ความสามารถในการดำเนินการจัดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ จากแหล่งกำเนิด สัญญาณหลายหลาย ประเภทของ 8051 ถือได้ว่าเป็นลักษณะเด่นประการหนึ่ง ซึ่งหากว่าได้นำมาใช้ในการออกแบบ ก็จะ ส่งผลให้ระบบตอบสนองต่อเหตุการณ์ภายนอกที่เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น

### 2.1.10 การอินเทอร์รัปต์

ลักษณะการอินเทอร์รัปต์เป็นการขัดจังหวะการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งกำลังดำเนินอยู่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 สามารถเกิดการอินเทอร์รัปต์ โดยจำแนกจากแหล่งที่มาของ สัญญาณ(Signal Source) ของสัญญาณอินเทอร์รัปต์นั้นๆ ได้แก่

- สัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก(External Interrupt) การตรวจสอบสัญญาณที่เข้ามา อินเทอร์รัปต์นี้ จะสามารถกำหนดให้มีการตรวจสอบในลักษณะเมื่อได้มีระดับการเปลี่ยนแปลงระดับ สัญญาณ(Level sensitive) ไปแล้ว หรือในช่วงเวลาขณะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากลอจิกสูง ไปลอจิกต่ำ(Edge sensitive)

- สัญญาณอินเทอร์รัปต์ภายใน(Internal Interrupt) แหล่งกำเนิดของสัญญาณนี้จะเป็นวงจร ภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์เอง เช่น วงจรนับ/จับเวลา วงจรเชื่อมต่อสัญญาณอนุกรม เป็นต้น

#### โครงสร้างการอินเทอร์รัปต์

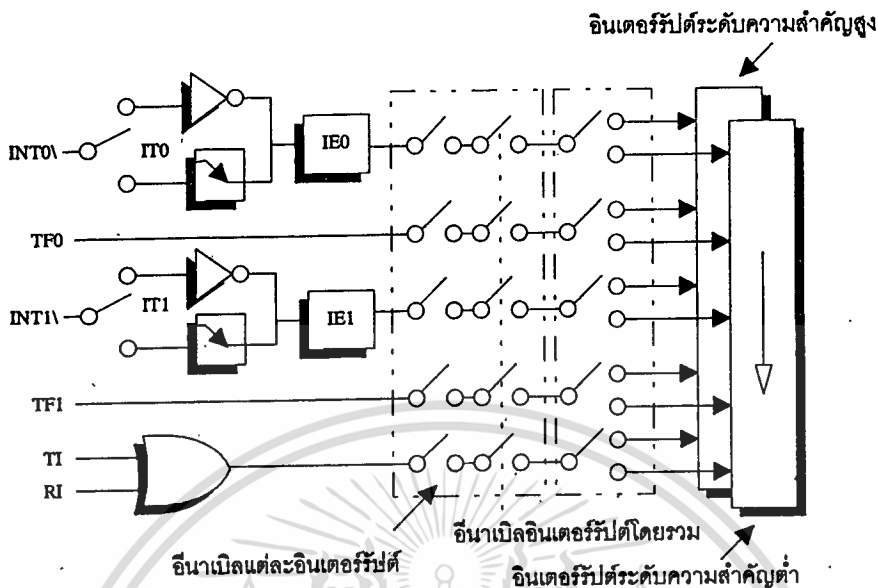
สัญญาณที่เข้ามาสู่การอินเทอร์รัปต์ 8051 เกิดขึ้นได้ 5 ลักษณะคือ

สัญญาณ	ความหมาย
INT0	สัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกทางขาสัญญาณ P3.2 โดย 8051 จะทำการสุ่มตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดทุกแมชชีนไซเคิล
INT1	สัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกทางขาสัญญาณ P3.3 โดย 8051 จะทำการสุ่มตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดทุกแมชชีนไซเคิล
Timer0	สัญญาณการเกิด โอเวอร์โฟลว์ Timer 0
Timer1	สัญญาณการเกิด โอเวอร์โฟลว์ Timer 0
พอร์ตอนุกรม	การเกิดอินเทอร์รัปต์ที่เกิดขึ้นจากการรับ/ส่งข้อมูลอนุกรมทำให้มีผลต่อ แฟล็กอินเทอร์รัปต์ R1 และ T1 ตามลำดับ

จากแผนภาพโครงสร้างระบบอินเทอร์รัปต์ของ 8051 ในรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าเมื่อเกิดการอินเทอร์รัปต์สัญญาณต่างๆ ขึ้น จะส่งผลให้มีการควบคุมเพื่อสั่งให้โปรเซสเซอร์กระโดดไปทำงานที่ตำแหน่งแอดเดรสต่างๆ ตามประเภทของแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งปกติแล้วจะต้องมีการสร้างโปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์

การกำหนดให้ 8051 สามารถตอบรับการอินเทอร์รัปต์แต่ละประเภท ทำได้โดยการกำหนด บิตข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมักจะอยู่ภายในรีจิสเตอร์ TCON และ SCON หากว่าได้มีการกำหนดค่าของ บิตซึ่งอยู่ภายในรีจิสเตอร์ IE (Interrupt Enable Register) ด้วยแล้ว ก็จะสามารถตอบรับการอินเทอร์รัปต์ของสัญญาณนั้นๆ ได้ นอกจากนี้แล้วตามแผนภาพในรูปที่ 5.1 ยังแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ ไมวาร์กณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเทอร์แต่ละประเภท ยังสามารถกำหนดระดับความสำคัญ (Priority) ของการอินเทอร์รัปต์ได้สองลักษณะคือ ระดับ



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงโครงสร้างระบบการอินเทอร์รัปต์ของ 8051

ความสำคัญสูงหรือต่ำ (High/Low Priority) กล่าวคือ ขณะที่กำลังประมวลผลอยู่ภายในส่วนของโปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์ของสัญญาณที่มีระดับความสำคัญต่ำอยู่ ก็อาจจะถูกขัดจังหวะให้ไปประมวลผลของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ที่มีระดับความสำคัญสูงกว่าได้ แต่หากว่าระดับสัญญาณอินเทอร์รัปต์ที่มีระดับความสำคัญเช่นเดียวกันแล้วก็จะต้องรอให้เสร็จสิ้นการประมวลผลที่ดำเนินการอยู่ก่อน

#### การควบคุมอินเทอร์รัปต์

ตามโครงสร้างด้านการจัดการอินเทอร์รัปต์ของ 8051 สามารถกำหนดเลือกเพื่อยินยอมหรือไม่ยินยอม (Enable/Disable) ให้มีการอินเทอร์รัปต์ของแต่ละสัญญาณได้ โดยใช้วิธีการกำหนดค่าของภายในรีจิสเตอร์ IE ซึ่งจะมีทั้งแบบที่จะระบุถึงอินเทอร์รัปต์โดยรวมทั้งหมด (บิตที่ 7) และอินเทอร์รัปต์แต่ละประเภทได้ ในกรณีที่กำหนดค่าข้อมูลเป็นหนึ่ง ให้กับบิตจะมีความหมายถึงการยินยอมให้มีการอินเทอร์รัปต์เกิดขึ้นได้ และจะเป็นกรณีตรงข้ามกันสำหรับการกำหนดค่าข้อมูลที่เป็น 0 หากลองย้อนกลับไปพิจารณาแผนภาพในรูปที่ 2.15 อีกครั้ง จะเห็นว่าจะต้องทำการกำหนดให้ยินยอมการอินเทอร์รัปต์ทั้งหมดให้เกิดขึ้นก่อน จึงจะมีผลทำให้การกำหนดบิตเพื่อยินยอมของแต่ละอินเทอร์รัปต์มีผลขึ้นได้

#### ระดับความสำคัญของการอินเทอร์รัปต์

การกำหนดระดับความสำคัญให้กับสัญญาณอินเทอร์รัปต์แต่ละประเภทนั้น สามารถทำได้การตั้งค่าโดยการกำหนดข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 หรือ 0 ให้กับบิตภายในรีจิสเตอร์ IP (Interrupt Priority) ดังแสดง

ในตารางของรูปที่ 2.17 โดยหากว่ามีค่าเป็น 1 ก็จะทำให้สัญญาณอินเทอร์รัปต์นั้นๆ มีระดับความสำคัญสูง และในกรณีตรงกันข้ามกันสำหรับการกำหนดค่าเป็น 0

ชื่อบิต: IE

ตำแหน่ง: A8h

ค่ากำหนดเริ่มต้น: 0X00 0000

EA	-	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0
----	---	-----	----	-----	-----	-----	-----

ชื่อบิต	ตำแหน่ง	ความหมาย
EA	IE.7	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์โดยรวม
-	IE.6	
ET2	IE.5	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ Timer 0
ES	IE.4	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ฟอร์ตอนุกรม
ET1	IE.3	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ Timer 1
EX1	IE.2	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ INT1
ET0	IE.1	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ Timer0
EX0	IE.0	อินทิราเบิล/คิสเอเบิลการเกิดอินเทอร์รัปต์ INTO

รูปที่ 2.16 บิตต่างๆ ภายในรีจิสเตอร์ IE (Interrupt Enable)

กรณีสัญญาณที่เข้ามาอินเทอร์รัปต์มีระดับความสำคัญเดียวกันเกิดขึ้นพร้อมกัน ก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตาม 8051 ก็มีโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์ในการพิจารณาตามลำดับของตารางดังต่อไปนี้

ระดับความสำคัญ	สัญญาณ	ความหมาย
1	IE0	อินเทอร์รัปต์ภายนอก 0
2	TF0	วงจรรนับ/จับเวลา 0
3	IE1	อินเทอร์รัปต์ภายนอก 1
4	TF1	วงจรรนับ/จับเวลา 1
5	RI หรือ TI	วงจรรรับ/ส่งข้อมูลอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนเวสหาหรับการแข่งงานเพอการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การจัดการอินเทอร์รัปต์

เมื่อมีการอินเทอร์รัปต์เกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำคำสั่งที่กำลังดำเนินการอยู่ให้แล้วเสร็จ จากนั้นจึงจะทำการเก็บค่าตำแหน่งแอดเดรสของคำสั่งที่จะทำงานต่อไปไว้ยังบริเวณของหน่วยความจำที่ถูกกำหนดไว้ให้เป็นสแต็กและกระโดดไปยังตำแหน่งแอดเดรสที่ได้มีการกำหนดไว้แน่นอนตำแหน่ง

ชื่อบิต: IP

ตำแหน่ง: B8h

ค่าบิตเริ่มต้น: 0000 0000

-	-	PT2	PS	PT1	PX1	PT0	PX0
---	---	-----	----	-----	-----	-----	-----

ชื่อบิต	ตำแหน่ง	ความหมาย
	IP.7	
	IP.6	
PT2	IP.5	ระดับความสำคัญของ Timer2
PS	IP.4	ระดับความสำคัญของพอร์คอนุกรม
PT1	IP.3	ระดับความสำคัญของ Timer1
PX1	IP.2	ระดับความสำคัญของ INT1
PT0	IP.1	ระดับความสำคัญของ Timer0
PX0	IP.0	ระดับความสำคัญของ INTO

รูปที่ 2.17 บิตต่างๆ ภายในรีจิสเตอร์ IP (Interrupt Priority)

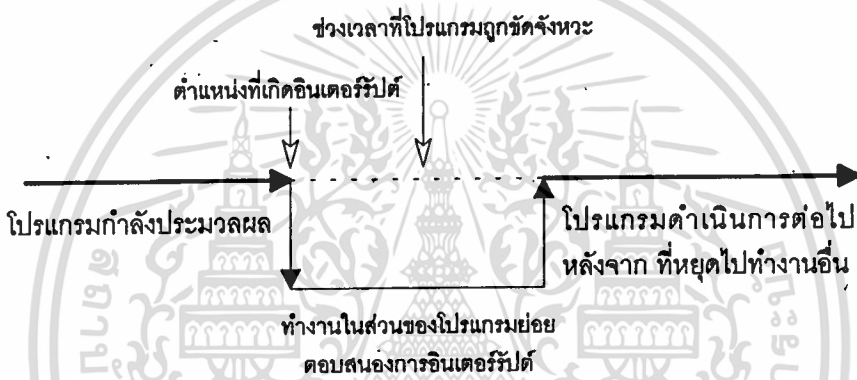
หนึ่งโดยอัตโนมัติ (รูปที่ 5.4) ตำแหน่งนี้เรียกว่า แอดเดรสของอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ (Interrupt Vector Address) ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำการเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutine) ยิงตำแหน่งแอดเดรสเหล่านี้ไว้ ซึ่งเรียกว่า โปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์ (Interrupt Service Routine) ตำแหน่งของแอดเดรสเหล่านี้ ได้แก่

แหล่งกำเนิดสัญญาณ	สัญญาณ	ตำแหน่งแอดเดรส
IE0	อินเทอร์รัปต์ภายนอก 0	0003
TF0	วงจรรนับ/จับเวลา 0	000B
IE1	อินเทอร์รัปต์ภายนอก 1	0013
TF1	วงจรรนับ/จับเวลา 1	001B
RI หรือ TI	วงจรรับ/ส่งข้อมูลนุกรม	0023

สิ่งที่ควรให้ความสนใจในการเขียนโปรแกรมย่อยบริการการอินเทอร์รัปต์ คือ

1. ส่วนเริ่มต้นของโปรแกรมย่อย ควรจะมีการเก็บค่าของรีจิสเตอร์หรือแฟล็กสถานะต่างๆ ที่จะต้องนำไปใช้ภายในโปรแกรมย่อย มิฉะนั้นอาจจะมีผลทำให้โปรแกรมปกติที่ทำอยู่ก่อนหน้าการมาทำงานโปรแกรมย่อยบริการการอินเทอร์รัปต์ทำงานผิดพลาดไปได้

2. บรรทัดสุดท้ายของโปรแกรมย่อยจะต้องสิ้นสุดด้วยคำสั่ง RETI (Return from interrupt) เพื่อสั่งให้มีการนำค่าที่ได้เก็บไว้ก่อนหน้าการกระโดดมายังโปรแกรมย่อยบริการการอินเทอร์รัปต์นี้ออกจากสแต็คและกลับไปทำงานเดิมต่อไป นอกจากนี้แล้วยังมีผลทำให้แฟล็กสถานะที่เกี่ยวข้องกับการอินเทอร์รัปต์นั้นๆ ถูกรีเซ็ตกลับเป็นค่าปกติเพื่อรอรับการอินเทอร์รัปต์การอินเทอร์รัปต์ครั้งใหม่ต่อไปด้วย



รูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นถึงแผนภาพการทำงานของโปรแกรมซึ่ง โดยปกติจะทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งอยู่ เมื่อมีการอินเทอร์รัปต์เกิดขึ้น โปรแกรมส่วนนี้จะหยุดค้างอยู่ เนื่องจากโปรเซสเซอร์จะทำการกระโดดไปทำงานในส่วน of โปรแกรมย่อยบริการการอินเทอร์รัปต์ เมื่อเสร็จสิ้นงานในโปรแกรมย่อยนี้แล้วจึงจะได้กลับไปทำงานเก่าที่ค้างอยู่ต่อไป

### การอินเทอร์รัปต์ภายนอก

การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการใช้เทคนิคการอินเทอร์รัปต์ จัดได้ว่าเป็นสิ่งที่ควรให้ความสนใจมากเป็นพิเศษ เพราะจะเป็นการช่วยให้การออกแบบระบบเป็นไปได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการอินเทอร์รัปต์จะได้รับการจำแนกตามแหล่งที่มาของสัญญาณอินเทอร์รัปต์นั้นๆ แต่โดยส่วนมากแล้วก็มักจะเป็นสัญญาณที่มาจากภายนอกระบบและผ่านเข้ามาทางขาสัญญาณของ 8051

### ประเภทของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ภายนอก

8051 สามารถตอบรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกได้สองสัญญาณ ทางขาสัญญาณ INTO และ INT1 โดยการรับรู้ถึงสัญญาณที่อินเทอร์รัปต์สามารถโปรแกรมเลือกให้เกิดขึ้นที่บริเวณ

ช่วงขอบของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจากระดับลอจิกสูงไปเป็นลอจิกต่ำ (High-to-low-transition) หรือขณะที่ระดับของสัญญาณได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นระดับลอจิกต่ำแล้ว (Low level Interrupt)

การเลือกประเภทของการสัญญาณอินเทอร์รัปต์ภายนอก INT1 ใช้การกำหนดค่าข้อมูลที่ตำแหน่งบิต 2 ภายในรีจิสเตอร์ TCON ซึ่งเป็นตำแหน่งบิต IT1 โดยทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดประเภทของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ของ INT1 ถ้ามีค่าเป็น 0 จะเป็นลักษณะแบบทำงานที่ระดับสัญญาณในกรณีที่บิตนี้ได้รับการกำหนดใหม่ค่าเป็น 1 ซึ่งเป็นลักษณะของการทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณจะมีแฟล็กสถานะ IE1 ซึ่งเป็นบิตภายในรีจิสเตอร์ TCON เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยกล่าวคือเมื่อไรก็ตามที่ขาสัญญาณ INT1 มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณจากลอจิกสูงเป็นลอจิกต่ำแล้ว แฟล็กสถานะ IE1 นี้ก็จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 1 เช่นกัน

สำหรับการทำงานของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ INTO ก็มีลักษณะเดียวกับสัญญาณของอินเทอร์รัปต์ INT1 ข้างต้นเช่นกัน โดยบิต 0 ภายในของรีจิสเตอร์ TCON เป็นตำแหน่งของบิต ITO และตำแหน่งของบิต ITO จะอยู่ที่ตำแหน่งบิต 1 ภายในรีจิสเตอร์ TCON

#### การตอบรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์ภายนอก

ซีพียูของ 8051 จะทำการตรวจสอบสถานะของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ภายนอกนี้เป็นระยะๆ ทุกเมกซ์ซินไซเคิลของการทำงาน ดังนั้นสัญญาณที่จะเข้ามาอินเทอร์รัปต์นี้จะต้องค้างสถานะไว้เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 12 คาบของออสซิลเลเตอร์ (Oscillator period) มิฉะนั้นซีพียูจะตรวจไม่พบการอินเทอร์รัปต์ของสัญญาณดังกล่าว และกรณีที่มีการกำหนดให้อินเทอร์รัปต์ภายนอกทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณ จะต้องทำให้สัญญาณอินเทอร์รัปต์นั้นมีระดับลอจิกต่ำเป็นเวลายาวอย่างน้อยหนึ่งเมกซ์ซินไซเคิลเช่นกัน และแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์นี้จะต้องทำให้สัญญาณกลับไปเป็นลอจิกสูงในเวลาก่อนที่ซีพียูจะทำงานในโปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์เสร็จสิ้น มิฉะนั้นซีพียูจะมองเห็นว่ามีการอินเทอร์รัปต์ใหม่เข้ามาอีกครั้ง

สัญญาณ	ตำแหน่งอินเทอร์รัปต์แอดเดรส
INT0	0003H
INT1	0013H

#### การอินเทอร์รัปต์ของวงจรมุม/จับเวลา

การออกแบบระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ มักจะต้องการวงจรที่มีหน้าที่การเป็นฐานเวลานำหรับการดำเนินงานหรือการนับบางอย่างว เช่น จำนวนพัลส์ที่เข้ามายังระบบ การหน่วงเวลาภายในโปรแกรม เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากดำเนินการด้วยวิธีด้านซอฟต์แวร์ ก็มักจะเป็นการวนรอบนับหรือจับเวลาไปโดยตลอด โปรเซสเซอร์จะต้องเสียเวลามาดูแลงานเหล่านี้มาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาทางด้านนี้ หรือช่วยให้มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับจับเวลาได้แม่นยำมากขึ้น 8051 ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงได้มีวงจรนับ/จับเวลาอยู่ภายในตัวไอซีให้ใช้งานได้หลายชุด โดยที่สามารถกำหนดเลือกลักษณะการทำงานต่างๆ ได้โดยวิธีการซอฟต์แวร์ควบคุม

### วงจรรนับ/จับเวลา

8051 ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตจำนวนสองตัว คือ T0(TIMER 0) และ T1(TIMER 1) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้อย่างอิสระ โดยสามารถควบคุมให้ทำหน้าที่เป็นตัวจับเวลา(Timer) เพื่อนับจำนวนพัลส์สัญญาณนาฬิกาภายใน หรือควบคุมให้ทำหน้าที่เป็นตัวนับ(Counter) เพื่อนับจำนวนพัลส์ของระบบได้

ภายในรีจิสเตอร์แต่ละตัวยังสามารถแยกออกได้เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต คือ TH0 กับ TLO สำหรับรีจิสเตอร์ T0 และ TH1 กับ TL1 สำหรับรีจิสเตอร์ T1 โดยการทำงานของรีจิสเตอร์ทั้งสองตัวนี้มีผลมาจากการกำหนดค่าของบิตที่อยู่ภายในรีจิสเตอร์ TMOD (Timer mode control register) และรีจิสเตอร์ TCON (Timer/Counter control register)

โครงสร้างของบิตภายในรีจิสเตอร์ TMOD มีการจัดแบ่งออกเป็นสองส่วนอย่างชัดเจน โดยบิตจำนวนสี่บิตทางด้านบนจะเป็นของรีจิสเตอร์ T1 และสี่บิตที่เหลือทางด้านล่างจะเป็นของรีจิสเตอร์ T0 การกำหนดประเภทของการทำงานทำได้โดยการกำหนดค่าภายในบิต C/T ที่ตำแหน่งบิต 6 และ 2 โดยหากเป็นข้อมูลที่มีค่า 0 จะทำหน้าที่เป็นตัวจับเวลาและหากมีค่าเป็น 1 จะทำหน้าที่เป็นตัวนับสัญญาณ

เมื่อกำหนดให้ทำงานเป็นตัวจับเวลา รีจิสเตอร์จะทำการเพิ่มค่าขึ้นทีละหนึ่งในทุกๆ เมกซ์ซินไคเคิลการทำงานของซีพียู ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ในอีกลักษณะว่าการทำงานเป็นตัวจับเวลา ก็เป็นการนับหน่วยเวลาซึ่งสร้างมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ของซีพียูเอง การคำนวณค่าระยะเวลาของหนึ่งเมกซ์ซินไคเคิลนั้นใช้เวลานานเท่ากับคาบเวลาของออสซิลเลเตอร์จำนวน 12 คาบ หรือคิดเป็นค่าอัตราการนับในแต่ละครั้งจะใช้เวลาเท่ากับ  $1/12$  เท่าของความถี่ออสซิลเลเตอร์

กรณีกำหนดให้ทำงานเป็นการนับสัญญาณ รีจิสเตอร์จะเพิ่มค่าทีละหนึ่งตามการเปลี่ยนแปลงสถานะของสัญญาณทางขา T0 หรือ T1 การเปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงจากระดับลอจิกสูงไปเป็นลอจิกต่ำซึ่งซีพียูจะทำการตรวจสอบสัญญาณนี้ทุกๆ เมกซ์ซินไคเคิลหากพบว่าเมกซ์ซินไคเคิลแรกเป็นระดับลอจิกสูงและเมกซ์ซินไคเคิลต่อไปเป็นระดับลอจิกต่ำ จึงจะทำการเพิ่มค่าในรีจิสเตอร์ ดังนั้นซีพียูจะต้องใช้เวลาถึง 2 เมกซ์ซินไคเคิลในการตรวจสอบสัญญาณซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตภายนอกทางขา T0 หรือ T1 มีได้สูงสุดไม่เกินค่า  $1/24$  เท่าของความถี่ออสซิลเลเตอร์

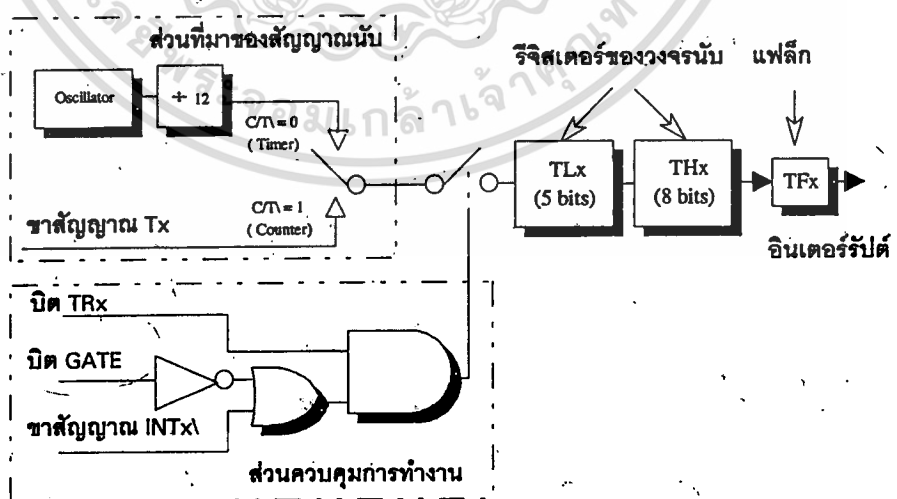
การอินเทอร์รัปต์ของวงจรรนับ/จับเวลา จากกระบวนการทำงานของวงจรรนับ/จับเวลาของ 8051 จำเป็นต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่ารีจิสเตอร์ T0 หรือ T1 ค่านี้จะเป็นจำนวนของพัลส์ภายในที่ต้องการจะให้นับหรือค่าของจำนวนพัลส์ภายนอกที่เข้ามาทางขาสัญญาณ T0 และ T1 ค่าตัวเลขภายในรีจิสเตอร์นี้จะต้องลดให้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ต้องการอยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของรี

จิสเตอร์จะเพิ่มค่าจากที่กำหนดไปเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดของรีจิสเตอร์ และกลับไปเป็นค่าศูนย์เมื่อมีพัลส์สุดท้ายเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่ามี การโอเวอร์โฟลว์ เกิดขึ้น ทำให้เกิดการกำหนดค่าของแฟล็กเพื่อแจ้งให้ซีพียูได้รับทราบ ดังนั้นโปรแกรมทั่วไปจึงมักใช้สถานะของแฟล็กนี้ (TFO และTF1) ซึ่งเป็นบิตอยู่ในรีจิสเตอร์ TCON เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการนับได้เสร็จสิ้นลงแล้ว หรือใช้เพื่อทำการอินเตอร์รัปต์โปรแกรมต่อไป

การทำงานเป็นตัวจับเวลา เมื่อกำหนดให้ทำงานจับเวลา รีจิสเตอร์จะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกๆ แมกซิมัซไคเคิล ซึ่งอาจกล่าวในอีกลักษณะได้ว่าเป็นการนับหน่วยเวลาของพัลส์ซึ่งสร้างมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ของซีพียูเอง โดยการกำหนดค่าให้อยู่ในสถานะเช่นในตารางต่อไปนี้

การกำหนดค่าบิต	รีจิสเตอร์	ความหมาย
C/T	TMOD	กำหนดให้เป็นการจับเวลา
TR1 หรือ TR0 = 1	TCON	กำหนดสถานะให้มีการทำงาน
GATE = 0	TMOD	กำหนดสถานะการควบคุมการทำงาน
หรือระดับสัญญาณที่ขา INTO หรือ INT1 เป็นสถานะลอจิกสูง		

การจับเวลาในโหมด 0 การทำงานในโหมด 0 นี้ วงจรนับ/จับเวลาจะทำหน้าที่เป็นตัวนับขนาด 13 บิต (โดยใช้รีจิสเตอร์ TH0 หรือ TH1 เป็นตัวนับขนาด 8 บิต และรีจิสเตอร์ TL0 หรือ TL1 มีขนาด 5 บิต) ตามลักษณะแผนภาพในรูปที่ 7.4



รูปที่ 2.19 การทำงานของ Timer/Counter 0 หรือ 1 ในโหมด 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรสังเกตเกี่ยวกับการคำนวณหาค่าเริ่มต้นของการนับ ในกรณีที่ต้องการใช้วงจรมับ/จับเวลาในลักษณะของการจับเวลา สมมุติว่าระบบ 8051 ทำงานด้วยคริสตอลความถี่ 12 MHz ดังนั้นความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่จะใช้เป็นฐานเวลาในการนับมีค่าเท่ากับความถี่ของคริสตอลนี้หารด้วยเลข 12 (เท่ากับค่า 1 เมกเฮิรตซ์) จะใช้เวลานาน  $1/12 * 12 * 10^6$  ยกกำลัง 6 = 1 ไมโครวินาที

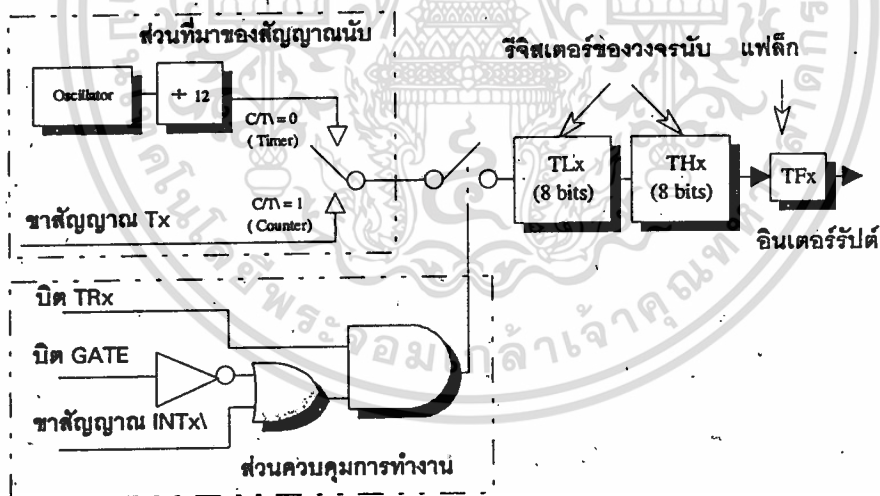
เพราะฉะนั้น หากต้องการจับเวลา 1 มิลลิวินาที

จะต้องนับจำนวนพัลส์  $1000/1 = 1000$  ครั้ง

= 03E8 เลขฐานสิบหก

ค่าของการคำนวณนี้จะนำไปกำหนดให้กับรีจิสเตอร์ TH0 (หรือ TH1) และ TLO (หรือ TL1) อย่างไรก็ดีเนื่องจากว่าการทำงานของวงจรมับ/จับเวลาเป็นการนับขึ้น จนกระทั่งเกิดโอเวอร์โฟลว์ดังนั้นจึงต้องใช้การทำทอคอมพลิเมนต์ของค่าดังกล่าว

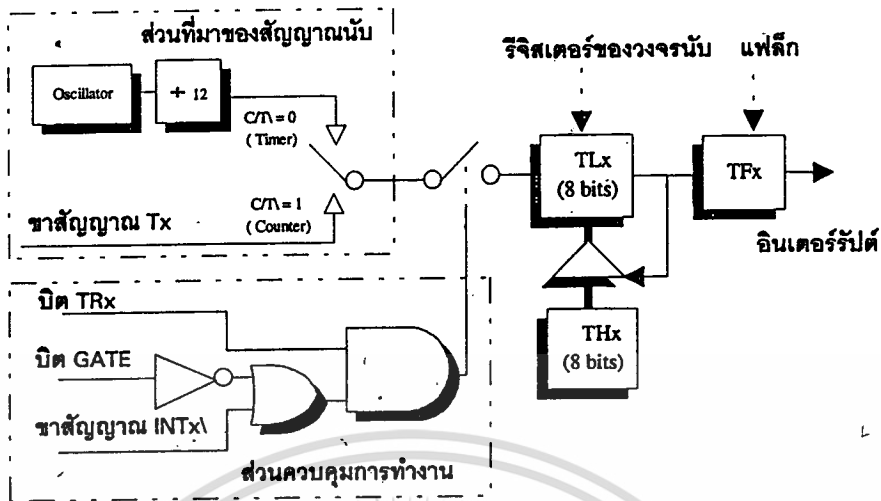
การจับเวลาในโหมด 1 การทำงานในโหมด 1 มีความคล้ายคลึงกับโหมด 0 มาก เพียงแต่ต่างกันเฉพาะจำนวนบิตของการนับเท่านั้น ซึ่งรีจิสเตอร์ของการนับ/จับเวลาจะถูกใช้เต็มทุกบิตของการนับแบบ 16 บิตล้วน โดยค่าภายในรีจิสเตอร์ TH0 (หรือ TH1) จะเก็บค่าไบต์บน (High order byte) ของตัวเลขตามแผนภาพการทำงานในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การทำงานของ Timer/Counter 0 หรือ 1 ในโหมด 1

การจับเวลาในโหมด 2 การทำงานในโหมด 2 ของวงจรมับ/จับเวลาจะมีความพิเศษต่างออกไป กล่าวคือจะมีเพียงการใช้รีจิสเตอร์ TH0 (หรือ TH1) เป็นตัวนับเพียง 8 บิตเท่านั้น ส่วนรีจิสเตอร์ TH0 (หรือ TL1) ใช้สำหรับทำหน้าที่เก็บค่าเริ่มต้นของการนับไว้ เมื่อรีจิสเตอร์ TLO (หรือ TL1) เกิดการโอเวอร์โฟลว์จากค่า 0FFH เป็น 00H ระบบจะทำการนำค่าจากรีจิสเตอร์ TH0 (หรือ TH1) กลับมาใส่ให้โดยอัตโนมัติ (Automatic reload) ดังการแสดงในแผนภาพของรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์ได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การทำงานของ Timer/Counter 0 หรือ 1 ในโหมด 2

การจับเวลาในโหมด 3 การทำงานในโหมด 3 จะสามารถใช้ได้กับ Timer 0 เท่านั้น

หากว่านำไปกำหนดให้ Timer 1 จะทำให้หยุดการทำงานไป เมื่อ Timer 0 ได้รับการกำหนดทำงานในโหมด 3 จะมีผลทำให้รีจิสเตอร์ของมันแยกกันทำงานอิสระ โดยรีจิสเตอร์ TLO จะถูกควบคุมจากบิตภายในรีจิสเตอร์ TCON และขาสัญญาณ INTO และเมื่อมีการ โอเวอร์ โฟลว์เกิดขึ้นจากค่า 0FFH เป็น 00H ก็จะมีผลให้แฟล็ก TFO มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น สำหรับรีจิสเตอร์ TH0 จะถูกกำหนดให้ทำงานในแบบของตัวจับเวลา ภายใต้การควบคุมของบิต TR1 ในรีจิสเตอร์ TCON เท่านั้น และหากเกิดโอเวอร์ โฟลว์ขึ้นก็จะมีผลเฉพาะต่อแฟล็ก TF1

ในส่วนของ Timer 1 ขณะเมื่อ Timer 0 ถูกกำหนดให้ทำงานในโหมด 3 ก็ยังสามารถทำงานในโหมดอื่นๆที่ไม่ใช่โหมด 3 ได้เช่นเดิม ยกเว้นจะไม่มีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้นเท่านั้น (เนื่องจากแฟล็ก TF1 ถูกใช้งานโดย Timer 0 ไปแล้ว)

การทำงานเป็นตัวนับสัญญาณ

การใช้งานวงจรมับ/จับเวลาในลักษณะของตัวนับ(Counter) โดยหลักการแล้วจะเหมือนกับลักษณะของการทำงานเป็นตัวจับเวลา(Timer) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา มีข้อแตกต่างประการเดียวคือ แทนที่จะเป็นการนับสัญญาณพัลส์จากวงจรรอสซซิลเลเตอร์ภายในและผ่านวงจรหาร 12 มาเป็นการสับสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นทางขาสัญญาณ T0 (พอร์ต P3.4) ให้กับ Timer 0 หรือทางขาสัญญาณ T1 (พอร์ต P3.5) ให้กับ Timer 1 เท่านั้น นอกจากนี้ก่อนการเริ่มต้นใช้งานจะต้องกำหนดค่าของบิต C/T ภายในรีจิสเตอร์ TCON ให้มีค่าเป็น 1 เสียก่อน เพื่อยอมให้สัญญาณภายนอกสามารถผ่านเข้ามายังวงจรมับ นอกจากนี้สัญญาณพัลส์ที่เข้ามานั้นควรจะมียุทธเวลายาวนานกว่าค่า 1 เมกซ์ซินไซเคิลของระบบนั้นๆ

### 2.1.11 การอินเทอร์รัปต์ของการสื่อสารอนุกรม

เนื่องจากการส่งหรือรับข้อมูลอนุกรมในการส่งข้อมูลไบต์หนึ่งๆ ก่อนข้างจะใช้เวลานานหลายมิลลิวินาที ดังนั้นเพื่อให้การจัดการเกี่ยวกับการสื่อสารแบบนี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ 8051 จึงได้กำหนดให้บิตหรือแฟล็กสถานะที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จัดรวมอยู่ภายในรีจิสเตอร์ SCON เท่านั้น เช่น แฟล็ก TI ซึ่งจะมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อข้อมูลได้ส่งออกไปภายนอกเสร็จสิ้นแล้ว และแฟล็ก RI ซึ่งจะมีค่าเป็น 1 เพื่อแจ้งให้ทราบว่าได้รับข้อมูลผ่านมาจากพอร์ตอนุกรม เมื่อแฟล็กตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเป็น 1 จะมีผลทำให้เกิดการอินเทอร์รัปต์ขึ้น ดังนั้นภายในโปรแกรมจะต้องทำการตรวจสอบสถานะของแฟล็กเหล่านี้เองว่ามีการอินเทอร์รัปต์เกิดขึ้นเพราะสาเหตุใด จากนั้นจึงค่อยทำการกำหนดค่า 0 ให้กับแฟล็กนั้น ลักษณะดังกล่าวนี้จะมีความแตกต่างไปจากการอินเทอร์รัปต์จากสัญญาณอื่นๆ เช่น วงจรนับ/จับเวลา เป็นต้น ซึ่งจะมีการกำหนดค่า 0 ให้กับแฟล็กสถานะที่เกี่ยวข้องโดยอัตโนมัติ ภายหลังจากที่ได้เข้าไปทำงานยังส่วนโปรแกรมน้อยบริการอินเทอร์รัปต์

กระบวนการรับและส่งข้อมูลอนุกรมของ 8051 การส่งข้อมูลออกทางพอร์ตอนุกรมของ 8051 จะเริ่มต้นขึ้น ภายหลังจากเมื่อมีการเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ SBUF ข้อมูลนี้จะถูกจัดการด้วยวิธีการทางด้านฮาร์ดแวร์ในการเลื่อนบิตและส่งสัญญาณออกไปภายนอกโดยอัตโนมัติ เมื่อข้อมูลเหล่านี้ได้ส่งออกครบถ้วนแล้ว จึงทำการกำหนดค่าของแฟล็ก TI ให้เป็น 1 เพื่อแจ้งให้ทราบว่าขณะนี้รีจิสเตอร์ SBUF วางและพร้อมที่จะส่งข้อมูลไบต์ต่อไปแล้ว ในกรณีที่ผู้ใช้เขียนข้อมูลใหม่ลงในรีจิสเตอร์ SBUF โดยไม่รอให้แฟล็ก TI มีค่าเป็น 1 ก่อนจะมีผลทำให้ข้อมูลที่ส่งออกไปผิดพลาดได้

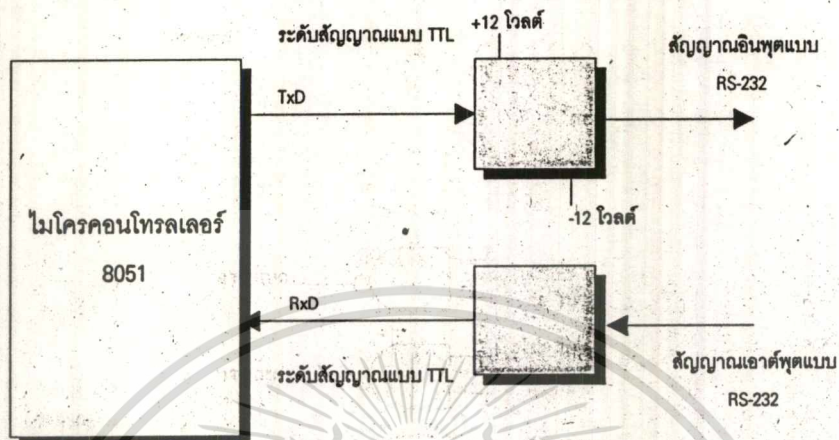
สำหรับการรับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรมจะเริ่มต้นโดยการกำหนดค่าบิต REN(Receiver Enable) ให้มีค่าเป็น 1 ก่อน หลังจากนั้นเมื่อมีบิตของข้อมูลถูกส่งเข้ามาจากภายนอกระบบฮาร์ดแวร์ของ 8051 จึงจะทำการเลื่อนบิตเหล่านี้เข้ามาโดยอัตโนมัติ และเมื่อบิตสุดท้ายถูกเลื่อนเข้ามาเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลนั้นจะถูกย้ายเข้ามาเก็บไว้ยังรีจิสเตอร์ SBUF และทำการกำหนดให้แฟล็ก RI ให้มีค่าเป็น 1 ซึ่งมีผลทำให้เกิดการอินเทอร์รัปต์โปรแกรมขึ้น

### 2.1.12 การเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน RS-232C

ในการเชื่อมต่อแบบอนุกรมเข้ากับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เทเล็กซ์ หรือ โทรพิมพ์ เป็นต้น มักกำหนดใช้การเชื่อมต่อตามมาตรฐาน RS-232C ทั้งนี้เพื่อให้มีการใช้งานเส้นสัญญาณหรือรูปแบบของตัวเชื่อมต่อที่สอดคล้องกัน จะได้ลดปัญหาการเข้ากันไม่ได้ระหว่างสัญญาณของอุปกรณ์ที่มาเชื่อมต่อกันทั้งสองด้านให้น้อยลง เนื่องจากระดับโวลเตจที่ใช้และการแทนความหมายของระดับลอจิกตามมาตรฐานนี้แตกต่างไปจากที่ใช้กันกันในระบบดิจิทัลทั่วไปโดยระดับสัญญาณของ RS-232 เป็นแบบไบโพลาร์(Bipolar) ระดับโวลเตจทางด้านลบช่วง -3V ถึง -20V แทนค่าลอจิก 1 และโวลเตจทางด้านบวกช่วง +3V ถึง +20V แทนค่าลอจิก 0 ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์หรือวงจรพิเศษเข้าไป เพื่อเปลี่ยนระดับโวลเตจจากระบบไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งใช้ทั้งหมัดให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของสัญญาณที่นำมาใช้

จากขาสัญญาณของ 8051 เป็นระดับโวลเตจที่สูงกว่าค่า +3.0V หรือต่ำกว่า -3.0V

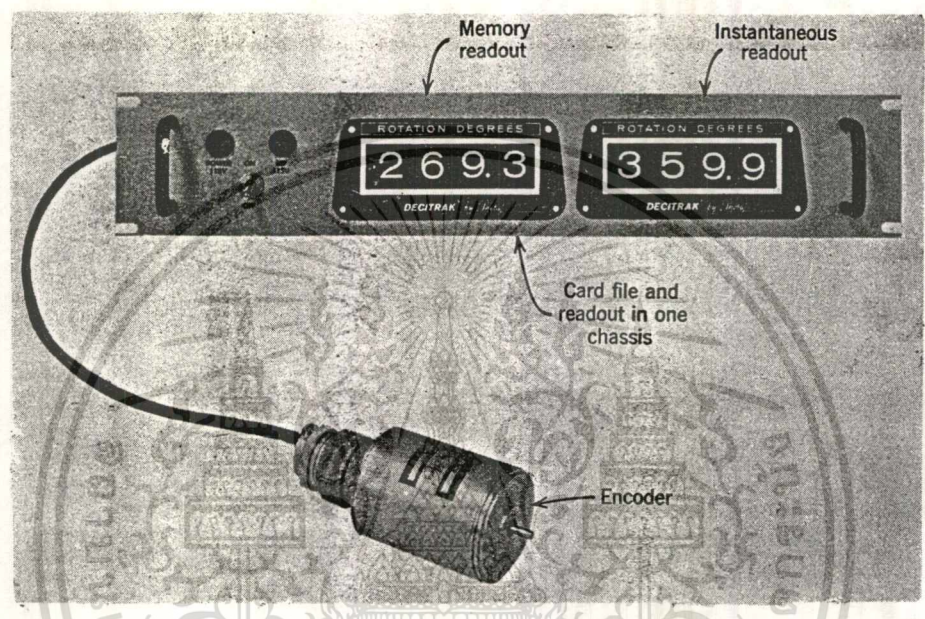
ดังในภาพที่ 2.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณแบบ TTL จากขาสัญญาณ TxD และ RxD ของ 8051 จะต้องถูกปรับเปลี่ยนไปเป็นระดับสัญญาณ RS-232 ก่อน ที่จะทำการส่งออกไปในสายนำสัญญาณต่อไป



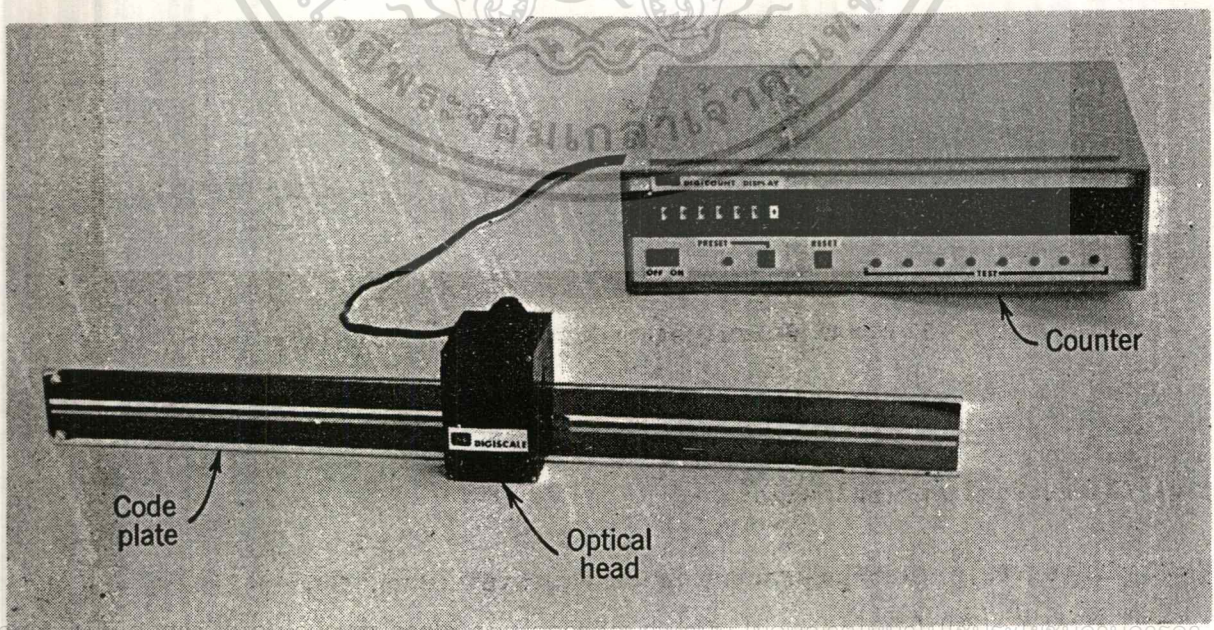
รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงให้เห็นถึงแนวการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแบบ TTL จากไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ไปเป็นระดับสัญญาณแบบ RS-232 และการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอินพุตแบบ RS-232 ไปเป็นระดับสัญญาณแบบ TTL ก่อนที่จะได้เชื่อมต่อกับสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

### 2.2 อินคริमेंท์เอนโคเดเดอร์

ในระบบการบังคับตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ต้องใช้อินคริमेंท์เอนโคเดเดอร์หรือเอนโคเดเดอร์สำหรับรักษาค่าแหน่งและสำหรับสร้างสัญญาณป้อนกลับโดยที่ตัวเอนโคเดเดอร์จะสร้างสัญญาณที่แปรผันตรงกับการหมุนของเพลตซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของมอเตอร์ในรูปแบบของอัตราจำนวนพัลส์ได้ ในรูป 2.23 และ 2.24 แสดงรูปลักษณะของอินคริमेंท์เอนโคเดเดอร์แบบโรตารีและแบบลิเนียร์



รูปที่ 2.23 ระบบเอนโคเดเดอร์แบบโรตารี

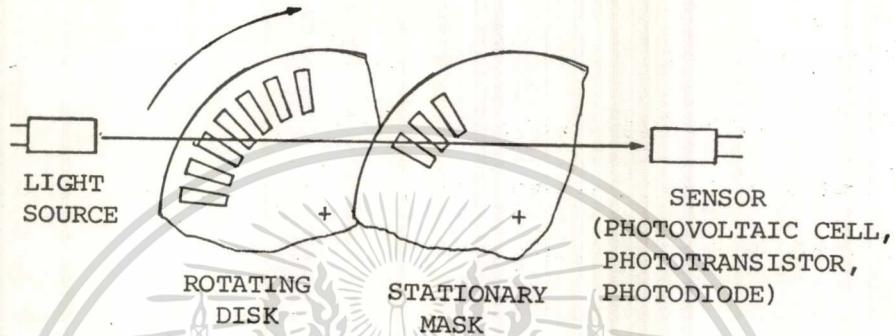


รูปที่ 2.24 อินคริमेंท์เอนโคเดเดอร์แบบลิเนียร์

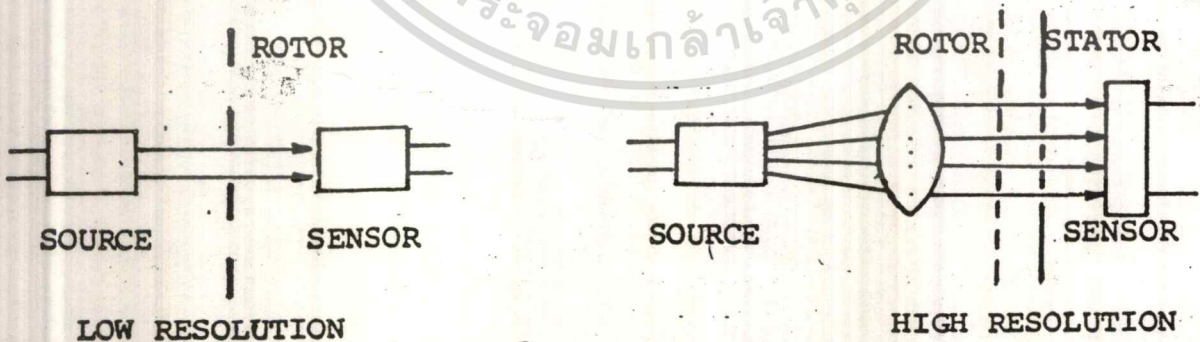
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลใดๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผู้อื่นหรือเครื่องใช้

อินคริเม็นต์เอนโคเดอ์ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือตัวกำเนิดแสง งานหมุน (Rotary Disk) งานอยู่กับที่และตัวเซนเซอร์ บนแผ่นงานหมุนทำเป็นช่องโดยรอบคังแสดงในรูป 2.25 และบนแผ่นอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสงผ่านตรงข้ามไปยังตัวเซนเซอร์ ถ้าเป็นตัวเอนโคเดอ์ที่ใช้วัดความเร็วค่าไม่ต้องมีแผ่นอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงจะเป็นหลอดไฟหรือ LED ก็ได้คังแสดงในรูป 2.26



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างกลไกของออฟโตอินคริเม็นท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะโดยทั้งสิ้น หรือบางส่วนให้มีอันเป็นไปขอสงวนสิทธิ์ในลิขสิทธิ์ได้ของเดิมและแบบมีหลายช่อง  
 รูปที่ 2.26 แสดงถึงตัวเซนเซอร์แบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและแบบมีหลายช่อง

### 2.2.1 ความละเอียดของอินทรีเม้นท์เอนโคดเดอร์

ความละเอียดของอินทรีเม้นท์เอนโคดเดอร์คือจำนวนคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตต่อการหมุนของเพลท 1 รอบ ซึ่งบอกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบหรือจำนวนไซเคิลต่อ 360 องศา มุมทางเชิงกลหรือไซเคิลต่อองศา เอนโคดเดอร์ที่ใช้กันทั่วๆ ไปมีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 พัลส์ต่อรอบ ในทางปฏิบัติเนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดี่ยว ถ้าเราต้องการให้ผ่านช่องไปยังเซนเซอร์เป็นเส้นตรงพร้อมๆ กันก็ทำได้โดยใช้เลนส์หรือ พาราโบลิกรีเฟลคเตอร์ดังแสดงในรูป 2.27

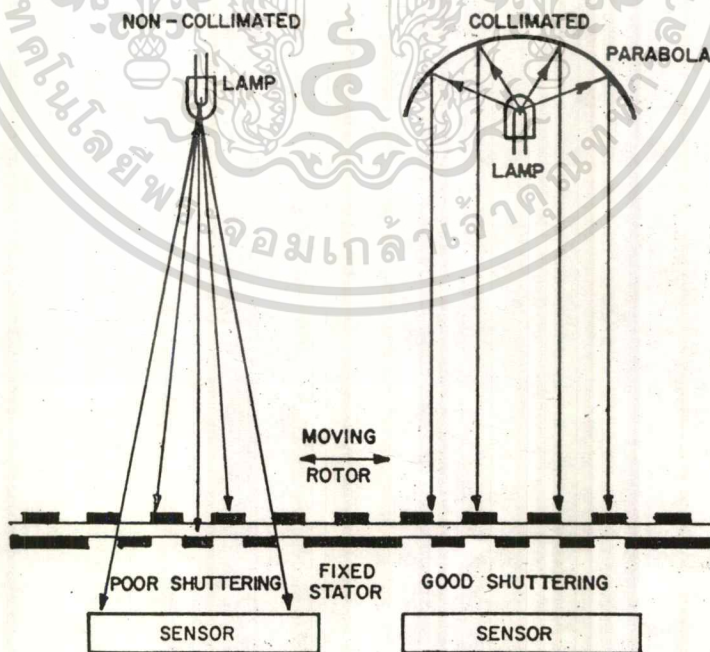
จำนวนพัลส์ต่อ 1 รอบของสัญญาณที่เอนโคดเดอร์สร้างออกมาจะเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของช่องว่างกับความกว้างของแถบที่บระหว่างช่องว่างจะเท่ากัน เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาความกว้างของช่องว่าง ( $\omega$ ) ได้จาก

$$\omega = \pi D / 2N$$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเพ็ทเทิน

N = จำนวนของความละเอียดเป็นพัลส์ต่อรอบ

$\omega$  = ความกว้างของช่องว่าง

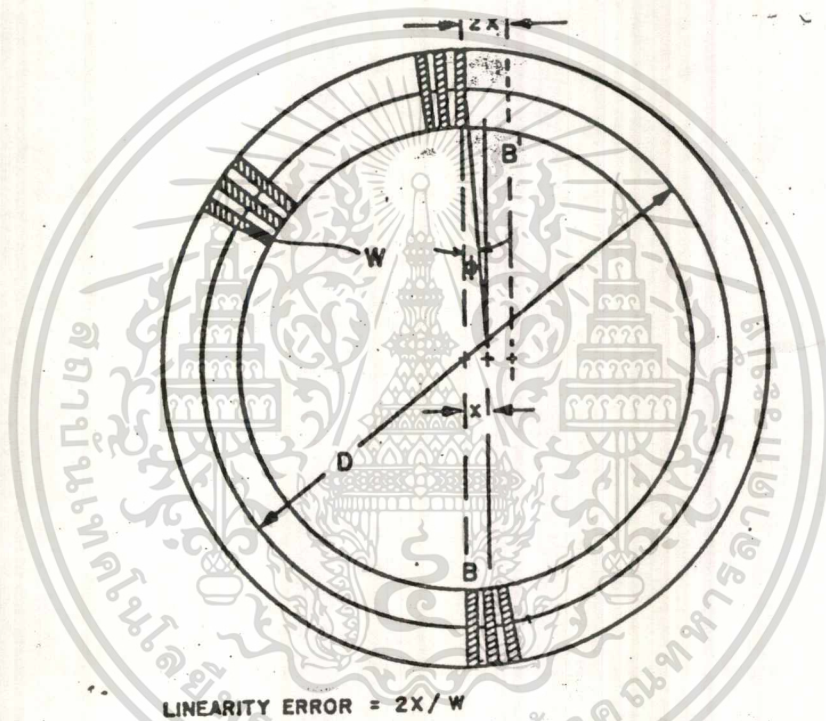


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร  
รูปที่ 2.27 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของตัวแปรของสมการ 3-30 นี้หาได้จากรูป 2.28 ถ้าให้  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นหมุนของเอนโคคเคอร์ค่าประมาณที่ใกล้เคียงมากของค่าความกว้างของช่องว่าง แสดงได้ดังนี้

$$\omega = 0.75\pi D/2N$$

ตัวอย่างถ้าแผ่นหมุนของเอนโคคเคอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ต้องการค่าความละเอียด 200 พัลซ์ต่อรอบจะได้ค่าความกว้างของพัลซ์เท่ากับ 0.002356 นิ้ว

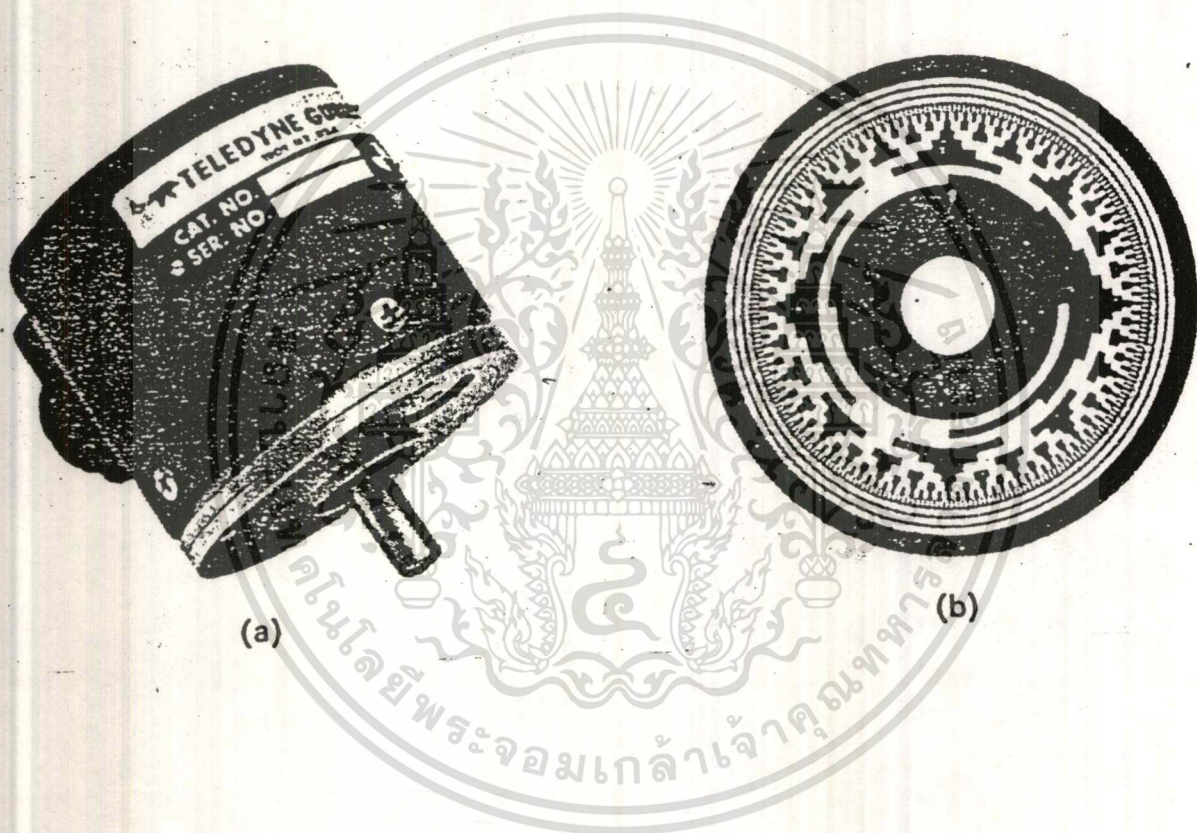


รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นลิเนียร์กับความไม่ได้ศูนย์กลาง

### 2.2.2 เอาท์พุทของเอนโคคเคอร์

โดยทั่วไปแล้วสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากเอนโคคเคอร์โดยตรงจะมีระดับสัญญาณไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลผล ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างรูปคลื่นสัญญาณต่อไว้ในตัวเอนโคคเคอร์ด้วยเสมอ สัญญาณลูกคลื่นที่ได้จากตัวเซนเซอร์ปกติแล้วจะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปสัญญาณซายน์อยู่กับความละเอียดที่ต้องการ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้โดยการต่อตัวคอมพิวเตอร์เข้ากับลิเนียร์แอมพลิไฟของเอนโคคเคอร์ก็จะได้อาท์พุทเป็นรูปสี่เหลี่ยมตามต้องการ รูปที่ 2.30 (ก) แสดงถึงรูปคลื่นเอาท์พุทสี่เหลี่ยมของเอนโคคเคอร์ชนิดนี้ ช่องไม่ว่าเพลตจะหมุนไปในทิศทางใดก็ได้สัญญาณออกมาเหมือนกันจึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่กำหนดทิศทางเท่านั้น ส่วนในรูป 2.30 (ข) สัญญาณ 2 ชุดที่ได้จาก

สัญญาณ 2 ช่องเฟสของสัญญาณ 2 ช่องนี้จะต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าเรียกสัญญาณนี้ว่าควอดราเจอร์(Quarature)กันซึ่งเหมาะใช้ในการรับรู้ทิศทางของเพลาหรือใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อนอื่นๆ จากสัญญาณในรูป 2.30 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองจะเริ่มจาก 0 ถึง 1 และ 1 ถึง 0 ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแผ่นหมุนของเอนโคเดอร์



3.36

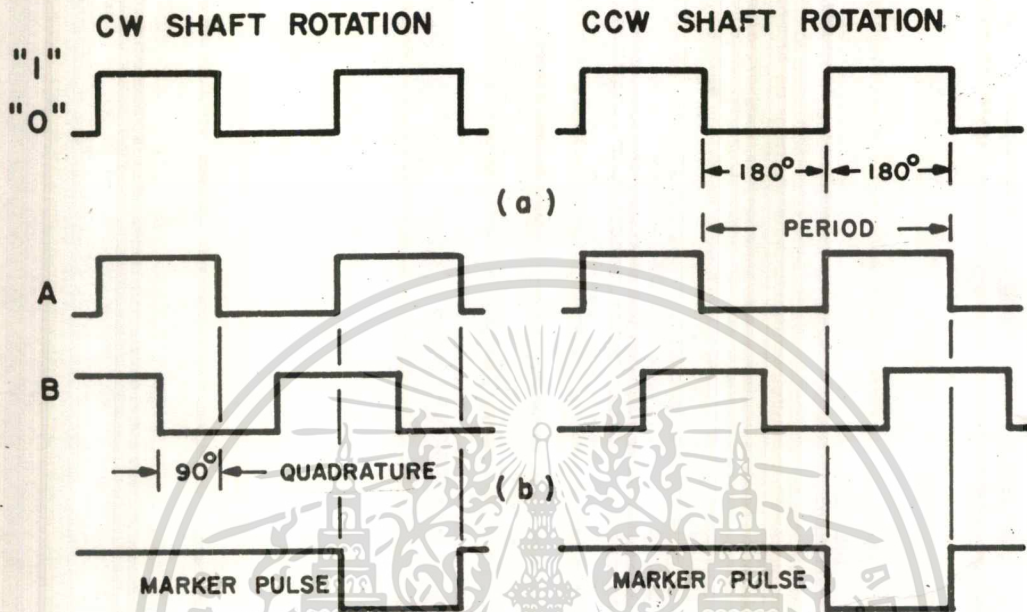
รูปที่ 2.29 โรตารีเอนโคเดอร์ที่มีเอาต์พุตแบบไบนารี

ก. ลักษณะตัวอย่างแบบหนึ่ง

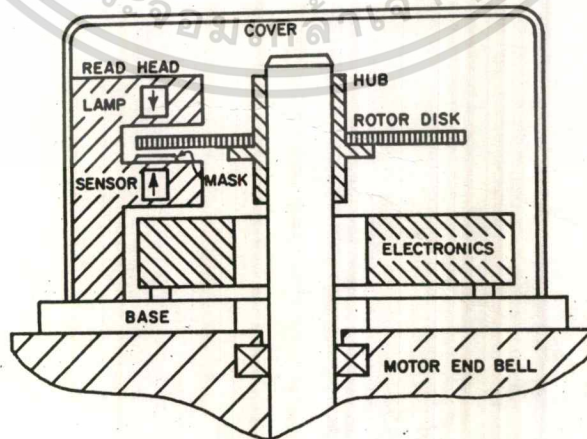
ข. แผ่นจานภายในที่ประกอบด้วยข้อมูลไบนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

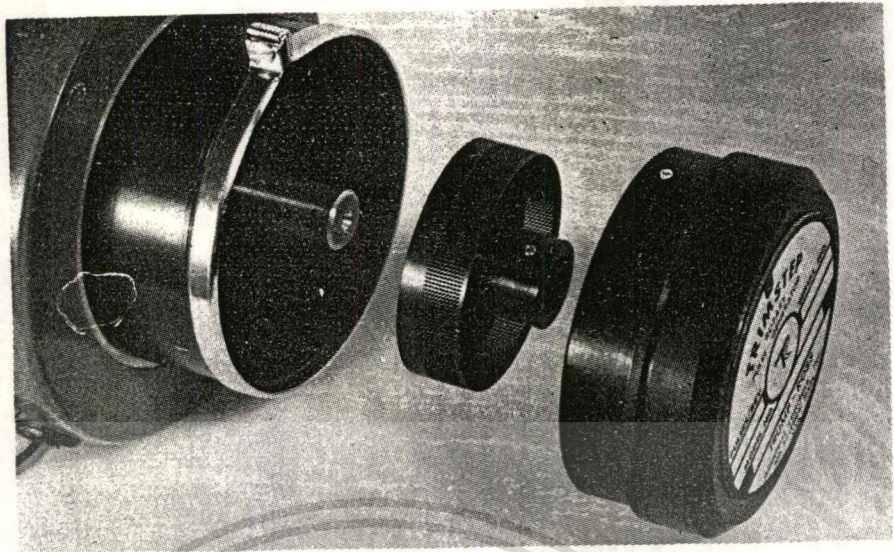
ในอินคริमेंท์เอ็น โคดเดอร์บางชนิดจะมีพัลส์แสดงถึงจำนวนรอบของการหมุนสำหรับใช้เป็นศูนย์ในการอ้างอิงพัลส์ที่ใช้แสดงจำนวนรอบนี้จะเกิดขึ้น 1 พัลส์ต่อ 1 รอบ โดยทั่วไปแล้วใช้บอกถึงตำแหน่งเชิงกลหรือใช้เป็นสัญญาณเคลียร์จำนวนที่นับไว้ในหน่วยเก็บข้อมูล



- รูปที่ 2.30 ก. ตัวอย่างลูกคลื่นเอาต์พุตสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์เอ็น โคดเดอร์ช่องเดียว (ไบโคเรียกชัน)  
 ข. ตัวอย่างสัญญาณเอ็นโคดเดอร์ 2 ช่องที่มีมุมต่างเฟสกัน 90 องศา (สองทิศทาง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดรูปที่ 2.31 ตัวอย่างคิทของเอ็นโคดเดอร์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 เอนโคคเคอร์ที่ติดตั้งอยู่บนเพลาคือเดียวกับสเตปมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### 2.3.1 สมการพื้นฐานของมอเตอร์ (Basic Motor Equation)

แรงบิดเฉลี่ยที่เกิดจากการหมุนของอเมเจอร์ได้โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์ (เช่น ความยาว รัศมีของอเมเจอร์ พื้นที่ของอเมเจอร์ เป็นต้น) ให้เป็นค่าคงที่ สมการแรงบิดจะเป็นดังนี้

$$T = K\phi I_a \quad 2-1$$

เมื่อ

$T$  = แรงบิดที่อเมเจอร์

$K$  = ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์

$\phi$  = ฟลักแม่เหล็กต่อขั้ว

$I_a$  = กระแสไฟฟ้าที่อเมเจอร์

จากสมการ 2-1 เป็นสมการแรงบิดพื้นฐานทางไฟฟ้า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า แรงบิดของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่อเมเจอร์ ( $I_a$ ) และฟลักแม่เหล็กที่เกิดจากแกนเหล็ก ( $\phi$ ) ในทำนองเดียวกันเขียนสมการพื้นฐานทางกลเป็นดังนี้คือ

$$\alpha = T/J \quad 2-2$$

เมื่อ

$T$  = แรงบิดเอาต์พุต

$\alpha$  = อัตราเร่ง (Acceleration)

$J$  = โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

จากสมการ 2-2 สรุปได้ว่า การที่มอเตอร์จะหมุนได้นั้น ต้องมีอัตราเร่ง ( $\alpha$ ) มากกว่าความเฉื่อยในการหมุนตัว ( $J$ ) ของอเมเจอร์

### 2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลังไฟ (Relationship Between Torque and Power)

เอาต์พุตของมอเตอร์อาจเป็นแรงบิด ( $T$ ) หรือกำลังไฟฟ้า ( $P$ ) ก็ได้  $P$  อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้าคูณด้วยกระแสไฟฟ้า) ส่วน  $T$  อยู่ในรูปพลังงานกล (การหมุน) ดังสมการ 2-2 แต่ถ้าทราบค่าใดค่าหนึ่ง ( $P$  หรือ  $T$ ) ก็จะคำนวณหาอีกค่าหนึ่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = 7.04P/S$$

2-3

เมื่อ

$T$  = แรงบิดเอาต์พุต

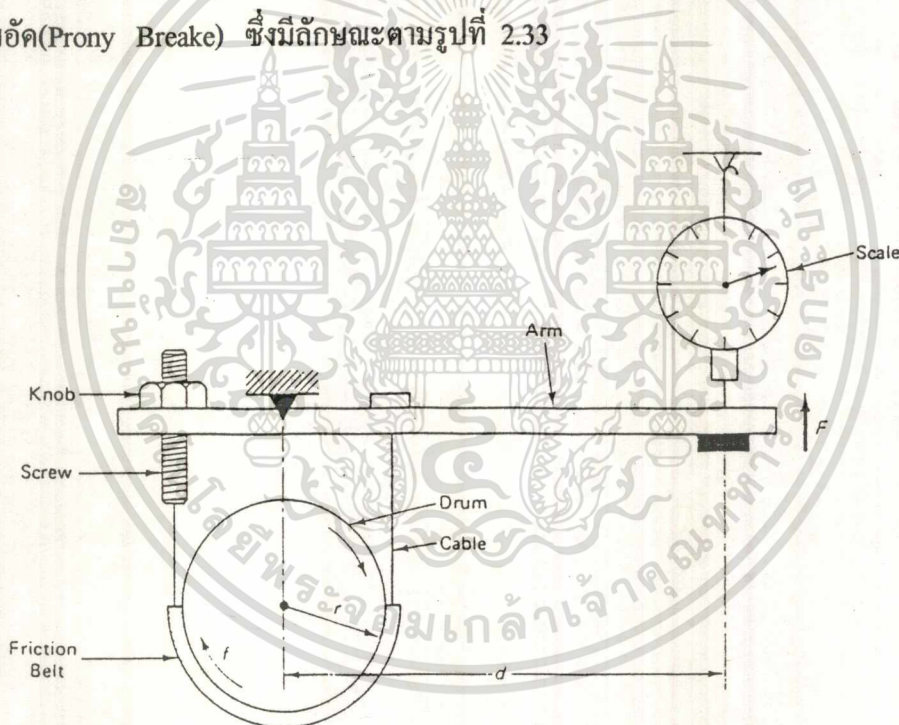
$P$  = กำลังเอาต์พุต

$S$  = ความเร็วรอบ

ในกรณีถ้า  $P$  เป็นกำลังเอาต์พุต ค่า  $T$  จะต้องเป็นแรงบิดเอาต์พุตด้วย และถ้า  $P$  เป็นกำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ (Developed Power;  $E' I_a$ )  $T$  จะต้องเป็นแรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (Developed Torque)

### 2.3.3 การวัดแรงบิด (Measurement of Torque)

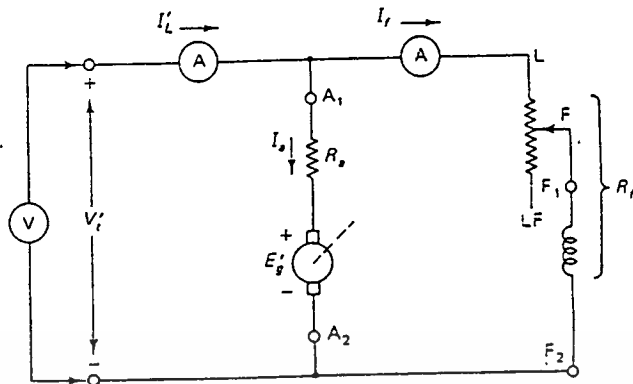
กำลังเอาต์พุตของมอเตอร์วัดได้ยาก แต่ถ้าทราบค่าแรงบิดเอาต์พุตที่ความเร็วระดับใดระดับหนึ่งจะคำนวณค่ากำลังเอาต์พุตได้โดยใช้สมการ 2-3 สำหรับแรงบิดนั้นวิธีวัดง่ายที่สุด คือ ใช้การเบรกแบบอีด (Prony Brake) ซึ่งมีลักษณะตามรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงการวัดแรงบิด

### 2.3.4 แรงดันต้านกลับ (Back Electromotive Force; Back EMF)

ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้อาร์เมเจอร์ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะสร้างแรงและส่งผลให้เกิดแรงบิด จึงทำให้อาร์เมเจอร์หมุนได้ ขณะที่มอเตอร์หมุน มีแรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ส่วนหนึ่งที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อาร์เมเจอร์ เราเรียกไฟฟ้านี้ว่าแรงดันต้านกลับ (Back EMF,  $E'_g$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34

จากสมการ 2-2 ทำให้ทราบว่าแรงบิดที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้นั้นต้องมีอัตราเร่งมากกว่าความเฉื่อย เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์(ดังรูปที่ 2.34)เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำและทำให้เกิดแรงบิด ส่งผลให้มีอัตราเร่งเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์อย่างต่อเนื่องเช่นกัน จนกระทั่งมอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่คืออัตราเร่งเท่ากับศูนย์ แรงบิดจะเป็นศูนย์ด้วย เมื่อเป็นเช่นนี้จึงค้นพบตามสมการ 2-1 ( $T = K \phi I_a$ ) ได้ว่า กระแสที่อาร์เมเจอร์กลายเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้มอเตอร์อยู่ เราจึงตั้งสมมติฐานว่า มีแรงดันไฟฟ้าอื่นที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ เราเรียกว่าแรงดันไฟฟ้านับกลับ (Back EMF,  $E'_g$ )

ในข้อสมมติฐานของเราคือ ขณะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาร์เมเจอร์ต้องมีค่าเป็นศูนย์นั้น ตามความเป็นจริงแล้วกระแสไฟฟ้านี้ไม่มีค่าเป็นศูนย์ แต่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อสร้างแรงบิดมาหักล้างความฝืดของมอเตอร์ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ( $V'$ ) ต้องมากกว่าแรงดันไฟฟ้านับกลับ ( $E'_g$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$E'_g = V' - I_a R_a \quad 2-4$$

เมื่อ

$E'_g$  = แรงดันไฟฟ้านับกลับ

$V'$  = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจ่ายให้มอเตอร์

$I_a$  = กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์

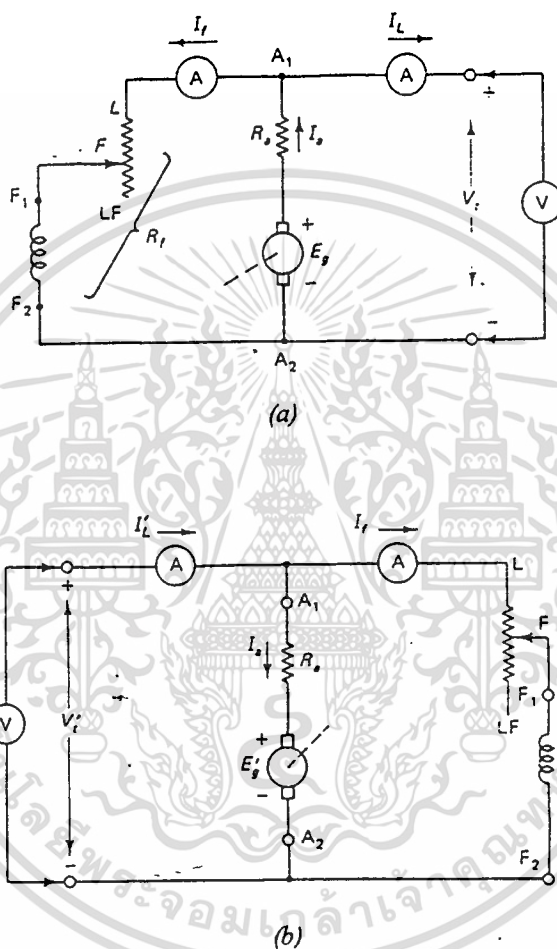
$R_a$  = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

จากรูป 3.34 จะเห็นว่าทิศทางของ  $E'_g$  จะสวนกับทิศทางของ  $I_a$  เมื่อ  $I_a$  เป็นส่วนประกอบของสมการแรงบิด จึงสรุปได้ว่า  $E'_g$  เป็นตัวต้านแรงบิดหรือตัวต้านการหมุนของมอเตอร์นั่นเอง

ความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าด้านกลับของมอเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ ( $I_a$ ) ส่งไปยังฟิลต์ ( $I_f$ ) และโหลด ( $I_L$ ) ดังรูป 2.35a ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าจะรับกระแสจากภายนอก ( $I'_L$ ) จ่ายมายังฟิลต์ ( $I_f$ ) และอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ )

ดังรูป 2.35b



รูปที่ 2.35

**2.3.5 เคอร์แรงบิด-ความเร็วรอบ(Torque-Speed Curve)**

ก่อนที่จะเขียนคอร์ดแรงบิด-ความเร็วรอบได้ต้องหาค่าแรงบิดที่โหลด(Load Torque)เสียก่อน โดยนำสมการ 2-1 ( $T=K\phi I_a$ ) มาพิจารณาและกำหนดให้ค่าฟลักคิงที่ จะได้สมการใหม่เป็น

$$T = K' I_a \tag{4-5a}$$

เมื่อ  $K = K\phi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ขณะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่(อัตราเร่งเป็น 0 ) แรงบิดที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์เท่า  
 กับการบิดที่โหลด จากสมการ 2-5a ถ้าให้แรงบิดที่โหลดเป็น  $T_L$

$$T_L = K'I_a \quad 4.5b$$

จากสมการ 4-4 ซึ่งกล่าวได้ว่า  $E'_g = V'_t - I_a R_a$  ทำให้ทราบว่

$$I_a = (V'_t - E'_g) / R_a$$

แทนค่า  $I_a$  ลงในสมการ 4-5b

$$T_L = [K'(V'_t - E'_g)] / R_a \quad 4-6c$$

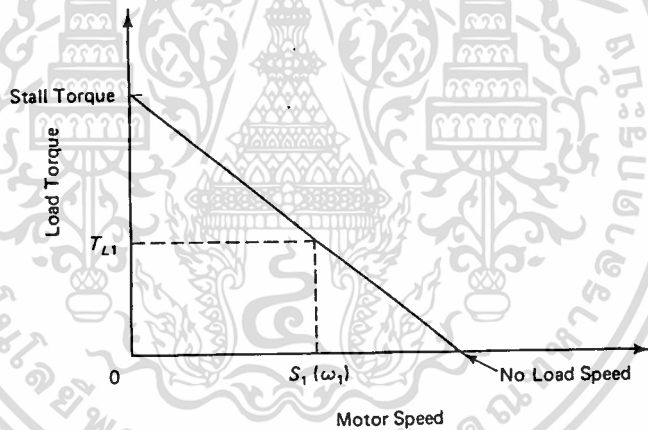
ถ้าให้ค่า  $E'_g$  เป็นค่าคงที่  $K''$

$$T_L = (K'V'_t / R_a) - (K'K''S / R_a) \quad 4-6d$$

ถ้าให้  $K_m = K' / R_a$  และ  $K_B = (K'K'') / R_a$

$$T_L = K_m V'_t - K_B \omega \quad 4-6e$$

เมื่อนำส่วนประกอบในสมการ 4-6e มาเขียนกราฟโดยค่า  $V'_t$  เป็นค่าที่กำหนดให้จะได้  
กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบในรูป 2.36



รูปที่ 2.36

จากกราฟในรูปที่ 2.36 ทำให้เราทราบว่า ขณะมอเตอร์หมุนตัวเปล่า (No Load) ค่าแรงบิดที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อต่อโหลดเข้าไปความเร็วรอบจะลดลงมาที่  $S_1$  แต่ค่าแรงบิดที่โหลดจะเพิ่มเป็น  $T_L$  ถ้าเพิ่มโหลดอย่างต่อเนื่อง ความเร็วรอบจะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน จนกระทั่งในที่สุดมอเตอร์จะหยุดหมุน ค่าแรงบิดค่าที่สุดของโหลด ซึ่งทำให้มอเตอร์หยุดหมุนขณะนี้เรียกว่า แรงบิดสถอลต์ (Stall Torque)

ประโยชน์ของกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบก็คือเป็นเครื่องมือทำนายความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะขับโหลดใดๆ ก็ได้

## 2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ( Three Phase Induction Motor )

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส ( Poly Phase Induction Motor ) ก็ได้ มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสนั้นมักนิยมเรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และมีข้อดีข้อเสียคือ

### ข้อดี ( Advantage )

1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และทนทาน หรือกล่าวได้ว่าเกือบ ไม่มีการชำรุด โดยเฉพาะ ชนิดกรงกระรอก ( Squirrel-cage Type )
2. ราคาไม่แพง และไม่เสี้ง่าย
3. มีประสิทธิภาพสูงพอในสถานะที่มอเตอร์หมุนปกติไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อย และมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ดี
4. ต้องการการดูแลและบำรุงรักษาต่ำ
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน ( Start ) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

### ข้อเสีย ( Disadvantage )

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้
2. เหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์ ความเร็วรอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด
3. แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์

### 2.4.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสประกอบด้วยส่วนใหญ่อะไรๆ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

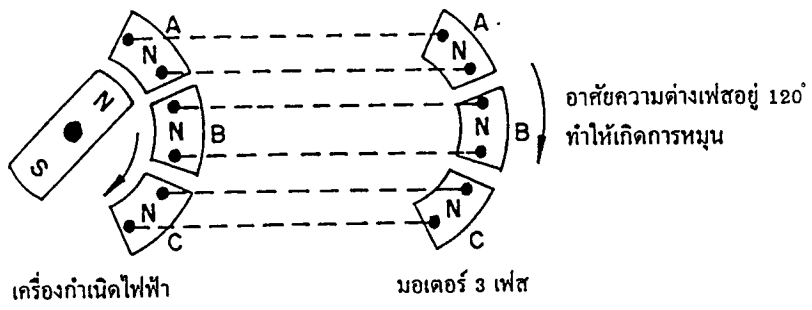
1. สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่ ( Stator ) และ
2. โรเตอร์หรือส่วนที่หมุน ( Rotor )

### 2.4.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์นั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลัก และดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการดูดและผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และ โรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

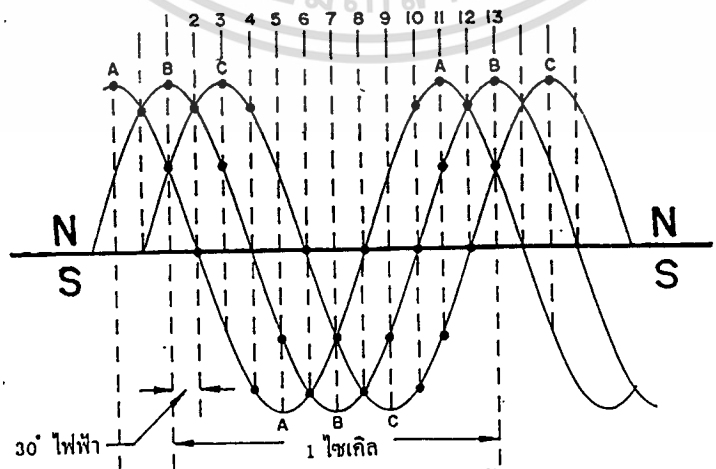
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส จากรูปที่ 2.37 เป็นการแสดงให้เห็นว่า ถ้าเราจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสให้กับขดลวดในสเตเตอร์ ในช่วงขณะหนึ่ง สมมติให้เป็นครึ่งไซเคิลบวกดังแสดงในรูปที่ 2.37 ด้านขวามือ โดยการต่อไฟฟ้าเฟส A เข้ากับเฟส A ของมอเตอร์ และเฟส B เฟส C เข้ากับมอเตอร์ในเฟสถัดไป เมื่อกระแสไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกเฟส A ไหลเข้าไปในขดลวดของเฟส A มอเตอร์จะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในเฟส A ของมอเตอร์นั้น ทำให้เกิดขั้ว N ขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ที่จ่ายให้กับเฟส A มอเตอร์ค่อยๆ ลดลง อำนาจแม่เหล็กขั้ว N ก็จะค่อยๆ ลดอำนาจหรือความเข้มลง และในขณะที่เฟสถัดไปก็จะมีอำนาจแม่เหล็กคล้ายๆ กับเฟส A แต่ในเวลาถัดไปจนครบ 3 เฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (คือ เฟส A เฟส B และเฟส C) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกสิ้นสุดเรียบร้อยแล้ว ในครึ่งไซเคิลลบถัดไปที่ขั้วแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นก็จะเปลี่ยนสถานะจากขั้ว N ไปเป็นขั้ว S และในอีกหนึ่งขั้วแม่เหล็กมีการหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เหมือนกับหมุนไปรอบๆ นี้เรียกสั้นๆ ว่า สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)



รูปที่ 2.38 แสดงรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส

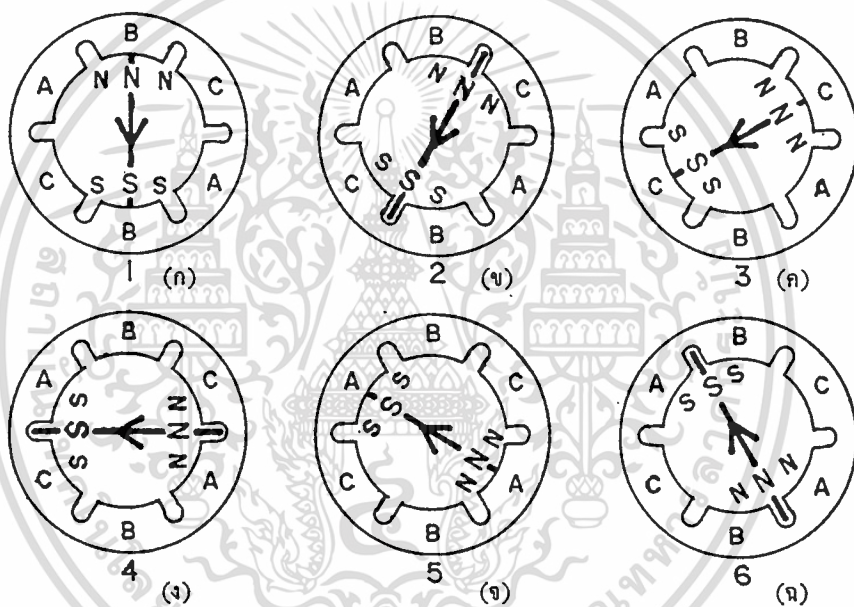
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ ลิขสิทธิ์นี้เป็นของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จากรูปที่ 2.38 และรูปที่ 2.39 เป็นการแสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟสชนิด 2 ขั้ว ที่สามารถพิจารณาที่ละขั้นได้คือ

ที่จุดที่ 1 บนรูปคลื่นไซน์จะเห็นว่าเฟส B อยู่ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส A ก็เป็นขั้วเหนือ แต่ลดลงจากสูงสุดและเฟส C เป็น ขั้วเหนือและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.40 (ก) ของสเตเตอร์ คือเฟส B เป็นขั้วเหนือมาก เฟส A และเฟส C เป็นขั้วเหนือ

ที่จุดที่ 2 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A เป็น 0 (Zero) เฟส B เป็นขั้วเหนือแต่กำลังลดลง ส่วน เฟส C เป็นขั้วเหนือแต่กำลังเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.40 (ข) ของสเตเตอร์ เฟส A เป็น 0 เฟส B และเฟส C เป็นขั้วเหนือและมีความเข้มเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟสคือ เฟส B กับเฟส C ดังนั้นจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (30 Electrical Degree Clockwise)



รูปที่ 2.39 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว

ที่จุดที่ 3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส C จะมีความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส B ลดลงจากสูงสุด และเฟส A เพิ่มขึ้น แต่เฟส A เป็นขั้วได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.39 (ค) ของสเตเตอร์ เฟส C จะเป็น ขั้วเหนือและมีความเข้มมาก ส่วนเฟส B มีความเข้มของขั้วเหนือน้อย และเฟส A เป็นขั้วได้น้อย ดังนั้นจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

### 2.4.3 สลิป (Slip, S )

ในทางปฏิบัตินั้น โรเตอร์ไม่เคยมุมุนได้เร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วความเร็วของโรเตอร์จะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่ออยู่กับมอเตอร์นั้น

ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่ที่สเตเตอร์หรือความเร็วซิงโครนัส ( N ) และความเร็วรอบของโรเตอร์ขณะใช้งาน ( Actual Speed, N ) ของโรเตอร์เรียกว่าสลิป สลิปของมอเตอร์โดยปกติเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์สลิปสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$\text{สลิป} = \frac{\text{ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์} - \text{ความเร็วของโรเตอร์}}{\text{ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์สลิป} = \frac{\text{ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์} - \text{ความเร็วของโรเตอร์}}{\text{ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์}} \times 100$$

$$\text{หรือ } S = [(N_s - N) / N_s]$$

$$\% \text{ Slip} = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

แต่ในบางครั้ง  $N_s - N$  ก็เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip Speed)

จะเห็นได้ว่าความเร็วของโรเตอร์ (หรือมอเตอร์) คือ  $N = N_s (1 - S)$

### 2.4.4 ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ (Frequency of Rotor Current)

เมื่อในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุนหรือหยุดอยู่กับที่นั้น ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ แต่เมื่อมอเตอร์หรือโรเตอร์เริ่มหมุนความถี่ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Speed) หรือความเร็วสลิป

ถ้ากำหนดให้ความเร็วสลิปใด ๆ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์เป็น  $f'$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$N_s - N = 120f' / P \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{เมื่อ } N_s = 120f / P \quad \dots\dots (2)$$

$$(1)/(2) \text{ จะได้ว่า } (N_s - N) / N_s = (120f' / P) \times (P / 120f)$$

$$\text{ดังนั้น } S = f' / f$$

จะเห็นได้ว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์นั้นมีค่า  $f' = Sf$

### 2.4.5 แรงบิดขณะเริ่มหมุน (Starting Torque)

แรงบิดที่เกิดในมอเตอร์ขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนเรียกว่า แรงบิดขณะเริ่มหมุน ซึ่งในบางครั้งมันจะมีค่ามากกว่าแรงบิดของมอเตอร์เมื่อหมุนปกติ และในบางครั้งก็อาจจะน้อยกว่าหรือต่ำกว่าเมื่อมอเตอร์หมุนปกติ

กำหนดให้

$E_2$  = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน

$R_2$  = ความต้านทานของโรเตอร์ต่อเฟส

$X_2$  = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน

$(Z_2)^2$  = อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน

$$(Z_2)^2 = (R_2)^2 + (X_2)^2$$

$$\text{ดังนั้น } I_2 = E_2 / Z_2 = E_2 / \sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2}$$

$$\cos\theta_2 = R_2 / Z_2 = R_2 / \sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2}$$

แรงบิดในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุนหรือแรงบิดขณะเริ่มหมุน

$$T_s = K_1 E_2 I_2 \cos\theta_2$$

$$\text{หรือ } T_s = K_1 E_2 \{ E_2 / \sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2} \} \times \{ R_2 / \sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2} \}$$

$$\text{นั่นคือ } T_s = K_1 (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2]$$

ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V$  ให้คงที่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) และ  $E$  ก็จะมีคงที่ด้วย

$$T_s = K_2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2]$$

$$= K_2 R_2 / (Z_2)^2$$

$$\text{เมื่อ } K_2 = \text{ค่าคงที่}$$

### สถานะของแรงบิดเริ่มหมุนสูงสุด (Condition for Maximum Starting Torque)

แรงบิดขณะเริ่มหมุนจะมีค่าสูงสุดเมื่อความต้านทานของโรเตอร์เท่ากับรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } T_s = K_2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2]$$

$$\text{ดังนั้น } dT_s/dR_2 = K_2 \{ 1/[(R_2)^2 + (X_2)^2] - R_2(2R_2)/[(R_2)^2 + (X_2)^2]^2 \}$$

$$= 0$$

$$1/[(R_2)^2 + (X_2)^2] = 2(R_2)^2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2]^2$$

$$(R_2)^2 + (X_2)^2 = 2(R_2)^2$$

$$\text{ดังนั้น } X_2 = R_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าให้มอเตอร์ จะเห็นว่าจากสมการของแรงบิดคือ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{array}{ll}
 T_s & = K_2(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2] \\
 \text{เมื่อ } E_2 & \sim \text{แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์} = V \\
 \text{ดังนั้น } T_s & = K_3 V^2 R_2 / (Z_2)^2 \\
 \text{เมื่อ } K_3 & = \text{ค่าคงที่} \\
 \text{ดังนั้น } T_s & = V^2
 \end{array}$$

แรงบิดจะมีความไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่มีผลแต่เพียงแรงบิดขณะเริ่มหมุนเท่านั้น แต่ยังเป็นผลต่อแรงบิดในสภาวะที่โรเตอร์ยังหมุนอีกด้วย ถ้าแรงดันไฟฟ้าลดลงแล้วแรงบิดก็จะลดลงด้วย ถ้าต้องการให้แรงบิดมีค่าคงที่ ผลิจะเพิ่มมากขึ้น ความเร็วจะลดลง

ให้  $V$  เปลี่ยนแปลงเป็น  $V'$

$S$  เป็น  $S'$  และ  $T$  เป็น  $T'$

$$\text{ดังนั้น } T/T' = S V'^2 / S (V)^2$$

#### 2.4.6 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์และรีแอกแตนซ์ภายใต้สภาวะที่กำลังหมุน (Rotor E.M.F. and Reactance Under Running Condition)

ถ้าโรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ดังนั้น  $S = 1$  ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ ค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ใน ตำแหน่งพร้อมที่จะหมุนจะมีค่าสูงสุด เพราะว่าความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กที่ หมุนที่สเตเตอร์มีค่าสูงสุดซึ่งมอเตอร์นั้นความจริงแล้วมีวงจรสมมูลเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่ทางด้านขดลวดคิกขุมที่หมุนนั้นถ่วงจร

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนแล้ว ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กที่หมุน อยู่ที่สเตเตอร์จะลดลง ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ ความเร็วสัมพัทธ์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์จึงมีค่าลดลง (และอาจไม่มีเลย ถ้าความเร็วของโร เตอร์เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์) เมื่อเป็นเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงมีค่า เป็น  $S$  เท่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ในขณะที่มอเตอร์อยู่ในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน ถ้ากำหนดให้

$$E_2 = \text{แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน}$$

$$X_2 = \text{รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน}$$

$$I_2 = \text{กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ต่อเฟสในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน}$$

$$f_2 = \text{ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน}$$

$$E_r = \text{แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ต่อเฟสภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลัง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การคัดลอก การทำซ้ำ การแจกจ่าย การเผยแพร่ การแสดง หรือการนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ หมุน

- $X_s$  = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน  
 $Z_r$  = อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน  
 $I_r$  = กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน  
 $f_r$  = ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน

ดังนั้นจะได้ว่าภายใต้สภาวะที่มอเตอร์หมุน

$$\begin{aligned}
 E_r &= SE_2 \\
 I_r &= E_r/Z_r \\
 X_r &= SX_2 \\
 Z_r &= \sqrt{[(R_2)^2 + (SX_2)^2]} \\
 f_r &= Sf
 \end{aligned}$$

หรือ  $f_r = Sf_2$

เมื่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ลดลง จะทำให้รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ลดลงด้วยเช่นกัน

#### 2.4.7 แรงบิดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน (Torque Under Running Condition)

จาก  $T \sim E_2 I_2 \cos\theta_2$

ดังนั้นแรงบิดขณะหมุนของมอเตอร์จึงได้ว่า

$$T \sim E_r I_r \cos\theta_2$$

หรือ  $T \sim \Phi I_2 \cos\theta_2$  (เพราะว่า  $E_r \sim \Phi$ )

จาก  $E_r = SE_2$

และจาก  $I_r = E_r/Z_r$

$$I_r = E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (SX_2)^2]}$$

แต่  $\cos\theta_2 = R_2/Z_r$

$$= R_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (SX_2)^2]}$$

ดังนั้น  $T \sim S\Phi E_2 R_2 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2]$

$$T = K_1 S\Phi E_2 R_2 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2]$$

นั่นคือ  $T = K_1 S(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2]$  (เพราะว่า  $E_2 \sim \Phi$ )

เมื่อ  $K_1 =$  ค่าคงที่

ค่าของ  $K_1$  สามารถพิสูจน์ได้ว่ามีค่าเท่ากับ  $3 \times 60 / \pi N_s$  เมื่อเป็นเช่นนี้สมการของแรงบิดจึงจะได้ว่า

$$T = (3 \times 60 / \pi N_s) \times \{S(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2]\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดใจเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_s = K_1 (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2]$$

$$\text{หรือ } T_s = [3 \times 60 / 2\pi N_s] \times \{ (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (X_2)^2] \}$$

แรงบิดสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน (Maximum Torque Under Running Condition)

จากแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน จะได้ว่า

$$T = K \Phi E_2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2]$$

$$\text{หรือ } T = K_1 S (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2] \quad \dots(1)$$

สภาวะที่เกิดแรงบิดสูงสุดอาจทำได้ โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการข้างบนนี้เทียบกับสลิปให้มามีค่าเท่ากับศูนย์ (0) โดยให้  $Y = 1/T$  แล้วทำการดิฟเฟอเรนเชียล

$$\text{แต่เพราะ } Y = [(R_2)^2 + (S X_2)^2] / K \Phi S E_2 R_2$$

$$Y = [R_2 / K \Phi S E_2] + [(S X_2)^2 / K \Phi E_2 R_2]$$

$$dY/dS = -[R_2 / K \Phi S^2 E_2] + [(X_2)^2 / K \Phi E_2 R_2]$$

$$= 0$$

$$\text{ดังนั้น } R_2 / K \Phi E_2 = (X_2)^2 / K \Phi E_2 R_2$$

$$\text{หรือ } R_2 = S X_2$$

ดังนั้นแรงบิดในสภาวะที่โรเตอร์กำลังหมุนอยู่จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าของสลิปกับค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสเท่ากับความต้านทานของโรเตอร์ต่อเฟส สลิปในบางครั้งอาจเขียนแทนด้วย  $S_b$  และแรงบิดสูงสุดใช้  $T_b$

$$\text{จาก } R_2 = S X_2$$

ทำให้ได้สลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด คือ

$$S = R_2 / X_2$$

ถ้าแทนค่า  $R_2$  ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$T_{\max} = K \Phi S^2 E_2 X_2 / [(S X_2)^2 + (S X_2)^2]$$

$$T_{\max} = K \Phi S^2 E_2 X_2 / 2 (S X_2)^2$$

$$T_{\max} = K \Phi E_2 / 2 X_2 \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{หรือ } T_{\max} = K \Phi S E_2 R_2 / 2 (R_2)^2 \quad \dots\dots(3)$$

$$T_{\max} = K \Phi S E_2 / 2 R_2$$

ถ้าแทนค่า  $S = R_2 / X_2$  ลงในสมการที่ (1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง  $T_{\max} = \frac{K_1 [(R_2/X_2)(E_2)^2 R_2]}{[(R_2)^2 + (R_2/X_2)^2 (X_2)^2]}$  ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{\max} = \frac{K_1[(R_2)^2 (E_2)^2 / X_2]}{2(R_2)^2}$$

ดังนั้น  $T_{\max} = K_1(E_2)^2 / 2X_2$

เมื่อ  $K_1 = 3 \times 60 / 2\pi N_s$  จะได้ว่า

$$T_{\max} = (3 \times 60 / 2\pi N_s) \times [(E_2)^2 / 2X_2] \quad \text{N-m}$$

จากสมการจะเห็นว่า

1. แรงบิดสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความต้านทานของโรเตอร์
2. ถึงอย่างไรก็ตามความเร็วหรือสลลิปที่ตำแหน่งแรงบิดสูงสุด สามารถคำนวณหาได้โดยค่าความต้านทานของโรเตอร์ และจากสมการจะเห็นว่าแรงบิดจะมีค่าสูงสุดเมื่อความต้านทานของโรเตอร์มีค่าเท่ากับรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ และจะเป็นเช่นนี้ได้โดยการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ (ทำได้ในกรณีที่เป็นสลลิปริงมอเตอร์เท่านั้น)
3. แรงบิดสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงเป็นส่วนกลับกับแรงบิดในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน
4. แรงบิดสูงสุดจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
5. เพื่อให้ได้แรงบิดสูงสุดเมื่อขณะเริ่มหมุน ( $S = 1$ ) ความต้านทานของโรเตอร์จะต้องเท่ากับรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์

แรงบิดที่โรเตอร์และแรงบิดสุดกำลัง ( Rotor Torque and Break Down Torque )

แรงบิดที่โรเตอร์ที่สลลิปต่าง ๆ สามารถทำให้อยู่ในเทอมของแรงบิดสูงสุด หรือแรงบิดสุด

กำลัง ( $T_b$ ) โดยสมการต่อไปนี้

$$T = T_b \times 2 / [(S_b / S) + (S / S_b)]$$

เมื่อ  $S_b$  เป็นสลลิปที่เกิดแรงบิดสุดกำลังหรือสลลิปที่แรงบิดดึงออก ( Pull-out Slip )

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลลิป (Relation Between Torque and Slip)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลลิปแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยเริ่มจาก  $S = 0$  จนถึง  $S = 1$

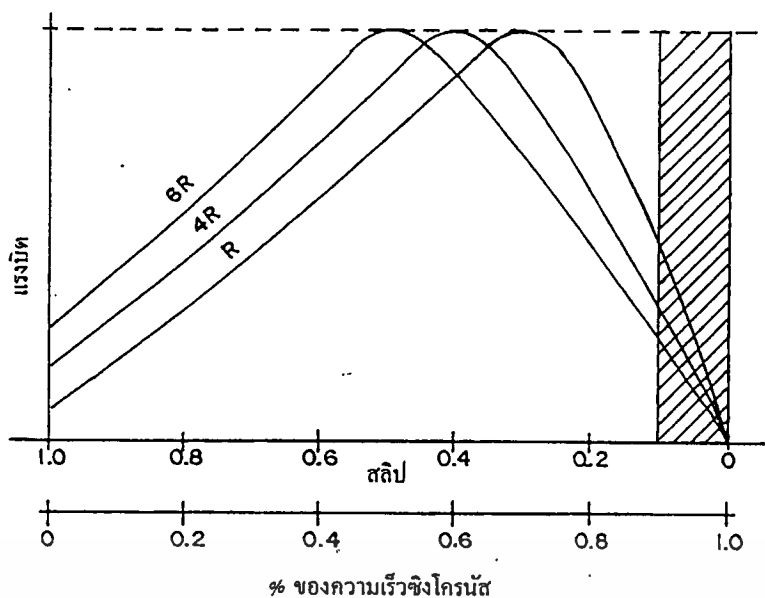
เมื่อ  $R_2$  คือค่าคงที่ความต้านทาน และจากสมการที่กล่าวมาแล้วจะพบว่า

$$T = K S \Phi E_2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2]$$

เมื่อ  $S = 0$  และ  $T = 0$  ดังนั้น Curve จะเริ่มขึ้นที่จุด 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสลิป

ที่ความเร็วปกติค่าของ  $SX_2$  จะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาและจะเขียนได้ว่า

$$T \sim S/R_2$$

ดังนั้น  $T \sim S$  ถ้า  $R_2$  มีค่าคงที่

ดังนั้นสำหรับค่าสลิปต่ำ ๆ เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสลิป จะประมาณได้ว่าเป็นเส้นตรง ถ้าสลิปเพิ่มขึ้น (โดยการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์) แรงบิดจะเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุด เมื่อ  $S = R_2/X_2$  แรงบิดนี้เรียกว่า แรงบิดที่ดึงออกหรือแรงบิดสุดกำลัง ถ้าสลิปเพิ่มมากขึ้น (ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง) ด้วยการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์อย่างมาก ดังนั้น  $R_2$  จึงไม่นำมาพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับ  $SX_2$  จะมีค่ามาก

$$T \sim S/(SX_2)^2$$

$$\sim 1/S$$

ดังนั้นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสลิป จึงเป็นเส้นโค้งคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Hyperbola) เราจะเห็นว่าเมื่อเลยจุดแรงบิดสูงสุดนั้น เป็นการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์อย่างมาก ผลที่เกิดขึ้นคือแรงบิดที่เกิดขึ้นจะลดลง ผลอันนี้จะทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง และในที่สุดก็จะหยุดสวิทช์ตัดคอนก็จะตัดวงจรทันที ถ้าวงจรนี้มีอุปกรณ์ป้องกัน

แรงบิดเมื่อมอเตอร์มีโหลดเต็มที่และแรงบิดสูงสุด ( Full-load Torque and Maximum Torque)

ถ้ากำหนดให้  $S_f$  เป็นสลิปเมื่อแรงบิดขณะที่มีโหลดเต็มที่ ดังนั้น

$$T_f \sim SR_2/((R_2)^2 + (S_f X_2)^2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ดังนั้น อีกทั้ง  $T_f/T_{max} = 2SR_2 X_2/((R_2)^2 + (S_f X_2)^2)$  ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการถ่วงน้ำหนักด้วย  $(X_2)^2$  ทั้งเศษและส่วน จะได้

$$T_f/T_{ma} = [2SfR_2/X_2]/\{[(R_2)^2/(X_2)^2]+(Sf)^2\}$$

$$T_f/T_{max} = [2SfR_2/X_2]/\{[(R_2)/(X_2)]^2+(Sf)^2\}$$

ดังนั้น  $T_f/T_{max} = 2aSf/[a^2+(Sf)^2]$

เมื่อ  $a = R_2/X_2$

= ค่าความต้านทาน/ค่ารีแอคแตนซ์ในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน

เขียนเป็นสมการทั่ว ๆ ไปจะได้ว่า

$$(\text{แรงบิดในการทำงานที่สลลิปต่าง ๆ})/(\text{แรงบิดสูงสุด}) = 2aS/(a^2+S^2)$$

หรือ (Operating Torque at Slip S)/(Maximum Torque) =  $2aS/(a^2+S^2)$

**แรงบิดเมื่อเริ่มหมุนและแรงบิดสูงสุด ( Starting Torque and Maximum Torque)**

$$T_s = R_2/[(R_2)^2+(X_2)^2]$$

$$T_{max} = 1/2X_2$$

$$T_s/T_{max} = 2R_2X_2/[(R_2)^2+(X_2)^2]$$

$$= 2(R_2/X_2)[1+(R_2/X_2)^2]$$

$$T_s/T_{max} = 2a/(1+a^2)$$

เมื่อ  $a = R_2/X_2$

= (ความต้านทานของโรเตอร์) (รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์)

#### 2.4.8 แรงบิด กำลังทางกลและโรเตอร์เอาต์พุต (Torque, Mechanical Power and Rotor

Output)

สเตเตอร์อินพุต = สเตเตอร์เอาต์พุต + การสูญเสียที่สเตเตอร์

สเตเตอร์เอาต์พุตนั้นสามารถหาได้โดยการย้าย (Transfer) มาจากวงจรโรเตอร์ทั้งหมด

นั่นคือ

โรเตอร์อินพุต = สเตเตอร์เอาต์พุต

โรเตอร์เอาต์พุตทั้งหมด = โรเตอร์อินพุต - การสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์

โรเตอร์อินพุตสามารถที่จะเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลได้ (Mechanical Energy)

และให้เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโรเตอร์ ( $T_r$ ) แรงบิดเอาต์พุตจะน้อยกว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโรเตอร์อยู่เท่ากับการสูญเสียไปเนื่องจากแรงลมและความเสียดในโรเตอร์นั้น

แรงบิดที่ได้ออกมา

ใช้งานจริงนั้นเรียกว่า แรงบิดที่เพลา (Shaft Torque,  $T_{sh}$ )

ถ้ากำหนดให้

$$N/60 = \text{ความเร็วรอบที่เป็นรอบต่อวินาที (ความเร็วของโรเตอร์)}$$

$$T_r = \text{แรงบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโรเตอร์เป็นนิวตัน-เมตร (N-m)}$$

ดังนั้น  $T_{sh} \times 2\pi N/60 = \text{เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์เป็นวัตต์ (W)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน

$$T_g = (\text{เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์เป็นวัตต์}) \times 60 / (9.81 \times 2 \pi N) \text{ Kg-m}$$

$$T_g = (\text{เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์เป็นวัตต์}) \times 60 / (2 \pi N) \text{ N-m.. (1)}$$

ถ้าไม่มีการสูญเสีย คือ การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์แล้ว โรเตอร์เอาต์พุตเท่ากับโรเตอร์อินพุต และโรเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับความเร็วเชิงโคโรนัส

$$\text{ดังนั้น } T_g = \text{โรเตอร์อินพุต} \times 60 / (2 N_s) \text{ (เพราะว่า } N = N_s) \dots (2)$$

จากสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$\text{โรเตอร์เอาต์พุต} = T_g \times (2 \pi N / 60) \dots (3)$$

และจากสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$\text{โรเตอร์อินพุต} = T_g \times (2 \pi N_s / 60) \dots (4)$$

สมการที่ (4) - (3) จะได้ว่า

$$\text{โรเตอร์อินพุต} - \text{โรเตอร์เอาต์พุต} = [T_g \times (2 \pi N_s / 60)] - [T_g \times (2 \pi N / 60)]$$

$$\text{การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์} = (N_s - N) / T_g \times 2 \pi$$

$$\text{หรือการสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์} = T_g \times 2 \pi (N_s - N) \dots (5)$$

สมการที่ (5) หาคด้วยสมการที่ (4) จะได้ว่า

การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์/ โรเตอร์อินพุต

$$= [T_g \times 2 \pi (N_s - N)] / (T_g \times 2 \pi N_s)$$

การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์/โรเตอร์อินพุต

$$= (N_s - N) / N_s$$

$$= S$$

ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์ = S × โรเตอร์อินพุต

$$= S \times \text{กำลังที่เกิดระหว่างช่องว่าง} \dots (6)$$

เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์

$$= \text{โรเตอร์อินพุต} - \text{การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์}$$

$$= \text{โรเตอร์อินพุต} - (S \times \text{กำลังที่เกิดระหว่างช่องว่าง})$$

$$= \text{โรเตอร์อินพุต} - (S \times \text{โรเตอร์อินพุต})$$

ดังนั้นเอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์

$$= \text{โรเตอร์อินพุต} (1 - S)$$

เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์/โรเตอร์อินพุต

$$= (1 - S)$$

$$= 1 - (N_s - N) / N_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา  $N/N_s$  อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= Actual Speed of Rotor/Synchronous Speed

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพที่โรเตอร์} = N/N_s$$

ดังนั้น การสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์/เอาต์พุตทั้งหมดของโรเตอร์

$$= S/(1-S)$$

สำหรับการสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ( $P_c$ )

$$\begin{aligned} P_c &= 3(I_2)^2 R_2 \\ \text{เมื่อ } I_2 &= S E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]} \end{aligned} \quad A$$

$$P_c = 3S^2 (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2] \quad W$$

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ } P_2 &= P_c / S \\ &= 3S(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2] \quad W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_m &= P_2(1-S) \\ &= 3S(1-S)(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2] \end{aligned}$$

แรงบิดที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (Gross Torque Developed by Rotor)

$$\begin{aligned} T_g &= P_m / \omega \\ &= P_m / [\pi N / 60] \\ &= P_m / [2\pi N_s (1-S) / 60] \end{aligned}$$

$$T_g = 1 / [2\pi N_s / 60]$$

$$\text{ดังนั้น } T_g = 3S(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2] \quad N-m$$

เปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Analogy With a D.C. Motor)

จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อมีการเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการพิจารณาจากสมการ คือ  $V = E_b + I_a R_a$  ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ( $E_b$ ) กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์เท่ากับ  $E_b I_a$  เป็นกระแสที่อาร์เมเจอร์ และกำลังอันนี้เราสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นกำลังทางกล หรือที่เรียกว่า กำลังทางกลในอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

แต่ในของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์มีค่าลดลงจากเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน ซึ่งจะมีค่าเป็น  $E_2$  ถึง  $S E_2$  เมื่อโรเตอร์กำลังหมุนจะเห็นได้ว่าความแตกต่าง  $(1-S)E_2$  เป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกมาจากโรเตอร์ซึ่งคล้ายกันกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นกำลังทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ ( $P_g$ ) กำหนดให้โดยผลคูณของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับกับกระแสที่อาร์เมเจอร์ และเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่โรเตอร์

เมื่อก่อนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อก่อนนี้... หนึ่งสน... อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } P_g = (1-S) E_2 \times I_2 \cos\theta_2$$

$$\text{เมื่อ } I_2 = S E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}$$

$$\text{และ } \cos\theta_2 = R_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_g = (1-S) E_2 \times [S E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}] \times R_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}$$

$$P_g = (1-S) S \times (E_2)^2 \times R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2]$$

เอา S คูณตลอดทั้งเศษและส่วน จะได้ว่า

$$P_g = [(1-S)/S] \times S^2 (E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (S X_2)^2]$$

$$\text{เพราะว่า } I_2 = S E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}$$

$$\text{ดังนั้น } P_g = [(1-S)/S] (I_2)^2 R_2$$

เมื่อ  $(I_2)^2 R_2 =$  การสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์ต่อเฟส

ดังนั้นการสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์/โรเตอร์เอาต์พุต

$$= S/(1-S)$$

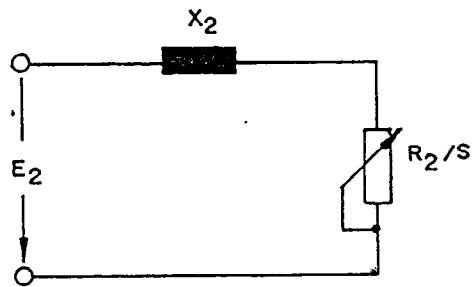
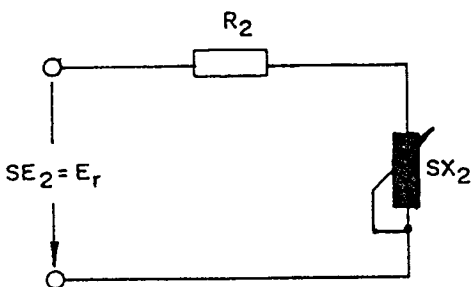
#### 2.4.9 วงจรสมมูลของโรเตอร์ (Equivalent Circuit of Rotor)

เมื่อมอเตอร์มีโหลด ให้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ เป็น  $I_2$  จะได้ว่า

$$I_2 = S E_2 / \sqrt{[(R_2)^2 + (S X_2)^2]}$$

$$= E_2 / \sqrt{[(R_2/S)^2 + (X_2)^2]}$$

จากสมการข้างบนจะเห็นว่าสมการของโรเตอร์นั้น ประกอบด้วยความต้านทานคงที่ (Fixed Resistance :  $R_2$ ) และรีแอกแตนซ์เปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Reactance :  $S X_2$ ) ต่อคร่อม กับ  $E_r = S E_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ก) จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลของโรเตอร์นั้น มีค่ารีแอกแตนซ์ที่คงที่  $X_2$  ต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทานเปลี่ยนแปลงค่าได้  $R_2/S$  (เป็นส่วนกลับกับสลิป) และจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่  $E_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ข)



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

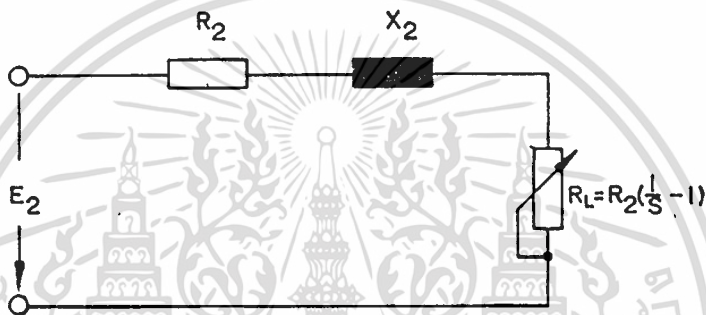
รูปที่ 2.41 แสดงวงจรสมมูลของโรเตอร์

เมื่อ ความต้านทาน  $R_2/S = R_2 + R_2[(1/S)-1]$

ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน 2 ส่วน

ส่วนที่ 1  $R_2$  เป็นความต้านทานของโรเตอร์ในตัวโรเตอร์เอง และแทนการสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์

ส่วนที่ 2 เป็น  $R_2[(1/S)-1]$  ส่วนนี้เป็นความต้านทานของโหลด  $R_L$  และเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโหลดทางกลของมอเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโหลดทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถเขียนแทนได้ด้วยค่าความต้านทานของ  $R_2[(1/S)-1]$  วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ประกอบด้วยความต้านทานของโหลด  $R_L$  อาจเขียนได้ดังแสดงในรูป 2.42

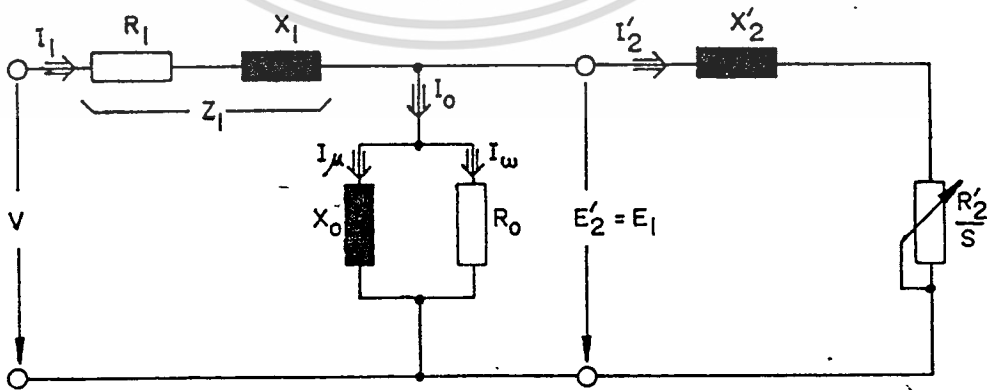


รูปที่ 2.42 แสดงวงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ประกอบด้วยความต้านทานของโหลด

2.4.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit of Induction Motor)

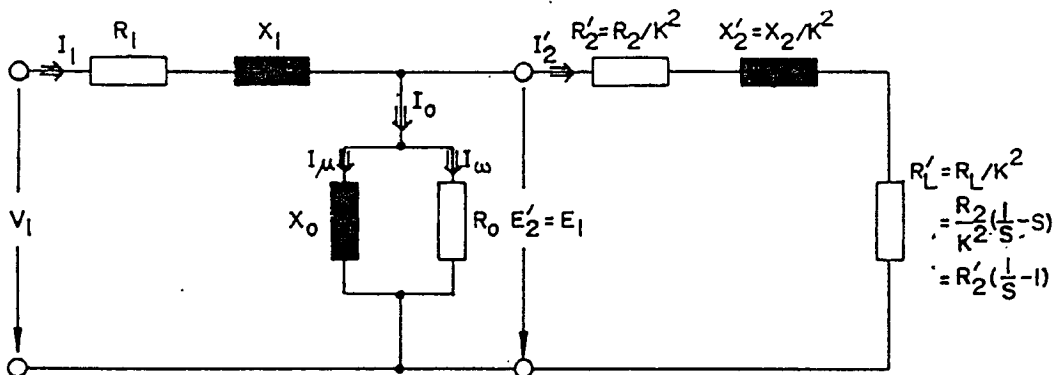
วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ (สเตเตอร์) ดังแสดงในรูปที่

2.43 และรูปที่ 2.44



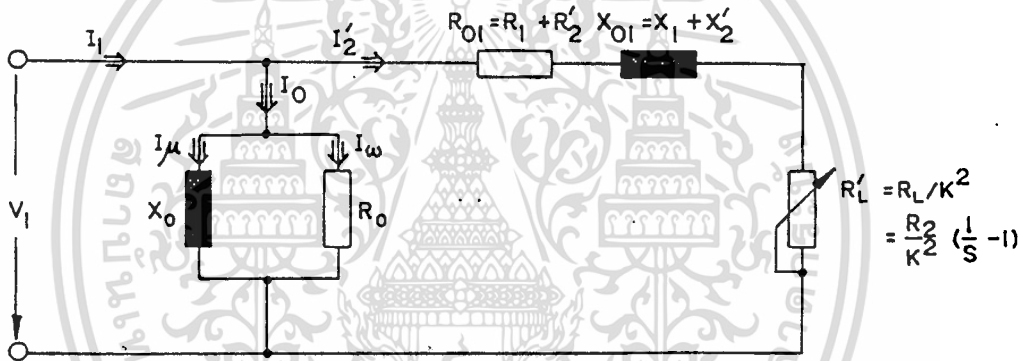
รูปที่ 2.43 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



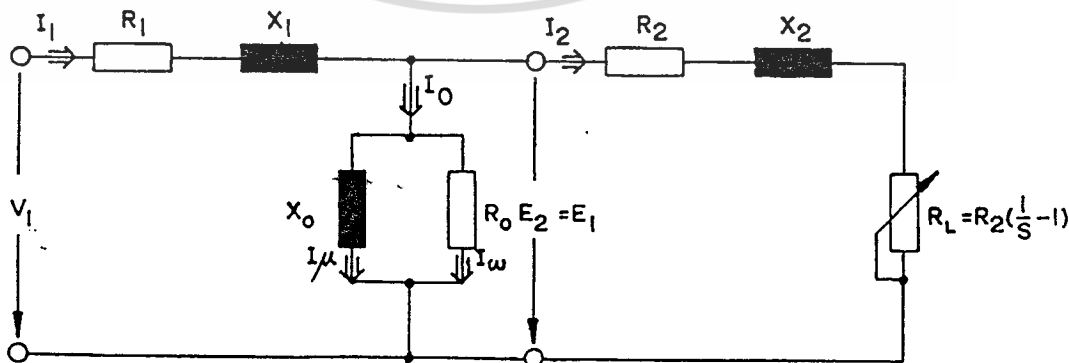
รูปที่ 2.44 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.44 นั้น วงจรกระตุ้นอาจย้ายไปไว้ทางซ้ายได้เพราะว่าเป็นค่าที่ไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะไม่นำมาพิจารณาก็ได้ แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นจึงเขียนไดอะแกรมของวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ถ้าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็น 1 นั่นคือ  $E_2/E_1 = 1$  ดังนั้นวงจรสมมูลจึงเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.46



เอกสารนี้เป็นเอกสารซึ่งแสดงวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่ออัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ของแรงดันไฟฟ้าเป็น 1 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.11 สมการของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังอินพุต} &= 3V_1 I_1 \cos\theta & W \\
 \text{การสูญเสียในแกนเหล็กที่สเตเตอร์} &= (I\omega)^2 R_0 & W \\
 \text{การสูญเสียในลวดทองแดงที่สเตเตอร์} &= 3(I_1)^2 R_1 & W \\
 \text{กำลังที่ย้ายไปโรเตอร์} &= 3(I'_2)^2 (R'_2)/S & W \\
 \text{การสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์} &= 3(I'_2)^2 (R'_2) & W \\
 \text{กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ (Pm) หรือ กำลังที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่โรเตอร์ (Pg)} &= \text{โรเตอร์อินพุต} - \text{การสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์} \\
 &= [3(I'_2)^2 (R'_2)/S] - [3(I'_2)^2 (R'_2)] \\
 &= 3(I'_2)^2 (R'_2)/S [(1/S)-1]
 \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } P_g = 3(I'_2)^2 (R'_2) [(1-S)/S]$$

ถ้า  $T_g$  เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่โรเตอร์

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } T_g &= T_g \times 2\pi N/60 \\
 &= \text{กำลังที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่โรเตอร์}
 \end{aligned}$$

$$\text{นั่นคือ } T_g \times \omega = 3(I'_2)^2 (R'_2) [(1-S)/S]$$

$$\text{ดังนั้น } T_g = \{3(I'_2)^2 (R'_2) [(1-S)/S]\} / (2\pi N/60)$$

$$\text{แต่ } N = N_s (1-S)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } T_g = \{3(I'_2)^2 (R'_2) [(1-S)/S]\} / [2\pi (1-S) N_s / 60]$$

$$\text{นั่นคือ } T_g = [3(I'_2)^2 (R'_2) / S] / (2\pi N_s / 60) \quad N\text{-m}$$

แต่แรงบิดทั้งหมดในซิงโครไนส์วัตต์เท่ากับ กำลังที่ย้ายไปโรเตอร์ที่คร่อมช่องว่าง

$$T_g = [3(I'_2)^2 (R'_2) / (S \times \text{ซิงโครไนส์วัตต์})]$$

หมายเหตุ  $T_g$  นี้มีค่าแรงบิดที่เพลลา ซึ่งแรงบิดที่เพลลาจะน้อยกว่า  $T_g$  โดย  $T_g$  นั้นรวมทั้ง

การสูญเสียเนื่องจากแรงลมและเนื่องจากความฝืด

จากวงจรโดยสมมูลโดยประมาณจะเห็นว่า

$$(I'_2) = V_1 / \{ [R_1 + (R'_2)/S] + j[X_1 + (X'_2)] \}$$

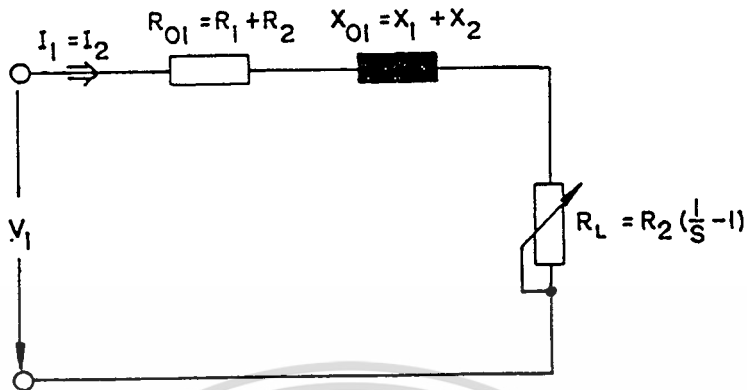
$$T_g = [3 / (2\pi N_s / 60)] \times (V_1)^2 / \{ [R_1 + (R'_2)/S]^2 + [X_1 + (X'_2)]^2 \} \times (R'_2) / S$$

### กำลังเอาต์พุตสูงสุด(Maximum Power Output)

เอกสารนี้จากวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบที่ 2.47 สามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยการค่า

ไม่ว่ากรณีใดวงจรกระตุ้นนั้นข้ามไปคือนำมาพิจารณาต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า สมมติเป็น 1



รูปที่ 2.47 แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จะเห็นได้ว่ากำลังเอาต์พุตทั้งหมด สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเฟสเป็น

$$P_g = 3(I_1)^2 R_L$$

เมื่อ  $I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01} + R_L)^2 + (X_{01})^2}}$

ในสถานะที่เกิดกำลังเอาต์พุตสูงสุดนั้นเราสามารถทำได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการข้างบนนี้ให้มีค่าเท่ากับศูนย์(0) แล้วจะพบว่า

$$\begin{aligned} (R_L)^2 &= (R_{01})^2 + (X_{01})^2 \\ &= (Z_{01})^2 \end{aligned}$$

เมื่อ  $Z_{01}$  = ลีคเกจอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ

ดังนั้น  $R_L = Z_{01}$

ดังนั้นกำลังเอาต์พุตจะมีค่าสูงสุด เมื่อความต้านทานสมมูลของโหลดเท่ากับลีคเกจอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ในตำแหน่งพร้อมที่จะหมุน

เมื่อ  $R_L = R_2 \left[ \frac{1}{S} - 1 \right]$

ดังนั้น  $Z_{01} = R_L$

$$= R_2 \left[ \frac{1}{S} - 1 \right]$$

หรือ  $S = \frac{R_2}{R_2 + Z_{01}}$

สลีปนี้ทำให้เกิดกำลังเอาต์พุตสูงสุดทั้งหมด ค่าของ  $P_{g(max)}$  หาได้โดยแทนค่า  $R_L$  โดย  $Z_{01}$

ในสมการข้างบนนี้

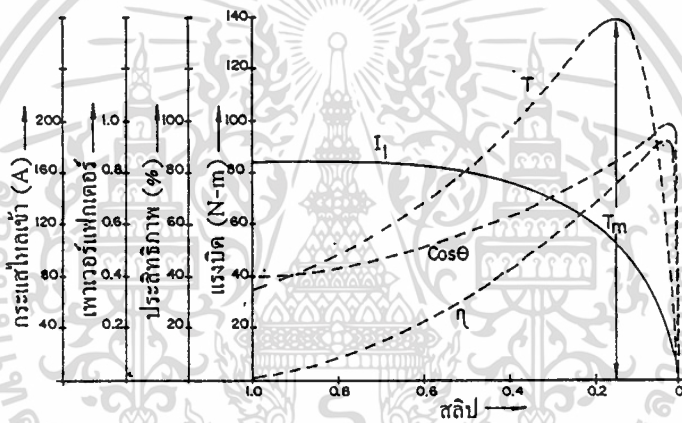
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{g(\max)} &= 3(V_1)^2 Z_{01} / [(R_{01} + Z_{01})^2 + (X_{01})^2] \\
 &= 3(V_1)^2 Z_{01} / [(R_{01})^2 + (Z_{01})^2 + 2R_{01}Z_{01} + (X_{01})^2] \\
 &= 3(V_1)^2 Z_{01} / [(R_{01})^2 + (Z_{01})^2 + (X_{01})^2 + 2R_{01}Z_{01}] \\
 &= 3(V_1)^2 Z_{01} / [2(Z_{01})^2 + 2R_{01}Z_{01}] \\
 &= 3(V_1)^2 Z_{01} / [2Z_{01}(Z_{01} + R_{01})] \\
 \text{ดังนั้น } P_{g(\max)} &= 3(V_1)^2 / [2(Z_{01} + R_{01})]
 \end{aligned}$$

ถ้า  $V_1$  เป็นแรงดันไฟฟ้า/เฟส ของมอเตอร์ และ  $K$  เป็น 1

จากที่กล่าวมาแล้วสามารถนำมาเขียนเส้นโค้งคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังแสดงรูป

ที่ 2.58



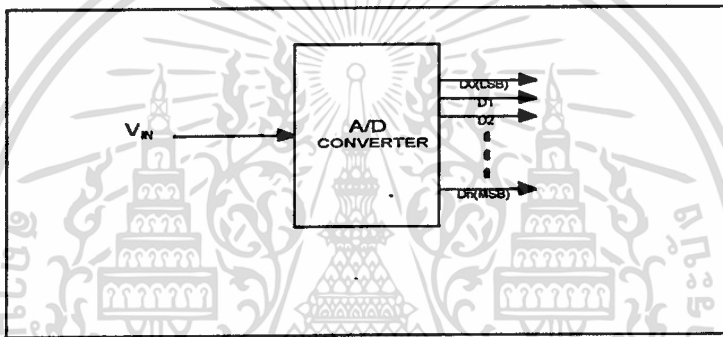
รูปที่ 2.48 แสดงคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

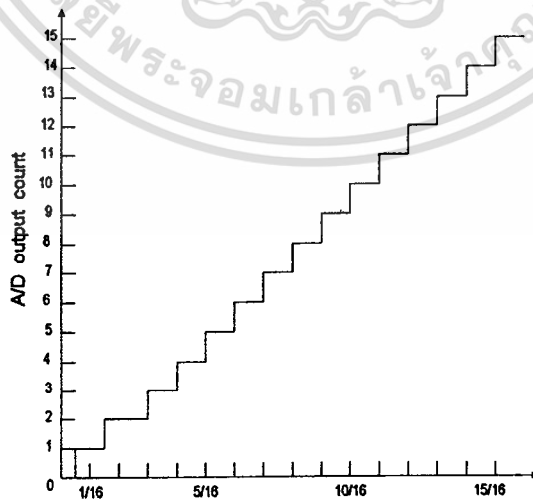
## 2.5 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ในการวัดสัญญาณต่างๆ ด้วยคอมพิวเตอร์พีซีนั้น ปกติแล้วจะทำการประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์จากพีซี ซึ่งการรับข้อมูลของพีซีเป็นแบบดิจิทัล ดังนั้นในการติดต่อกับสัญญาณอนาลอกที่ได้จากอุปกรณ์ภายนอกหรือจากตัวแปลงสัญญาณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกดังกล่าวให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเสียก่อนแล้วจึงนำมาประมวลผล

A/D คอนเวอร์เตอร์นั้นก็คืออุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล รูปที่ 2.49 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ A/D คอนเวอร์เตอร์ วงจรนี้จะผลิตเอาต์พุตแบบไบนารี  $n$  บิต ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันอินพุต รูปที่ 2.50 แสดงถึงคุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 บิต หลังจากนั้นจะไปพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.49 สัญญาณของ A/D คอนเวอร์เตอร์

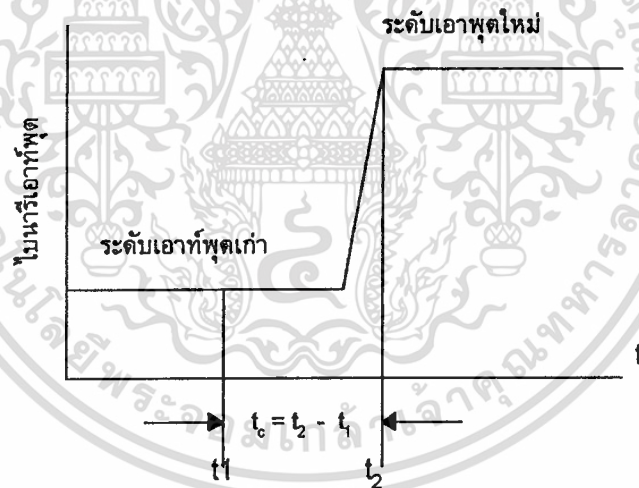


รูปที่ 2.50 คุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

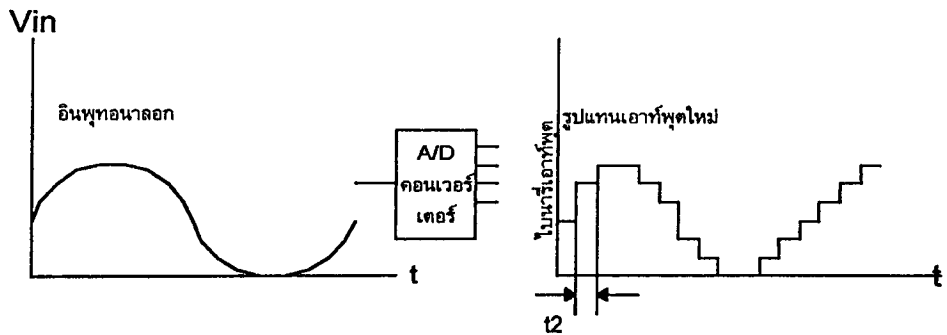
### 2.5.1 หลักการของ A/D คอนเวอร์เตอร์

A/D คอนเวอร์เตอร์อินพุตเป็นสัญญาณอนาล็อก และเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิทัลจำนวน  $n$  บิต อินพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์ เป็นสัญญาณอนาล็อกที่ผ่านออกมาจากวงจรแซมเปิลและโฮลด์ (Sample and Hold) ซึ่งส่วนของวงจรนี้ทำหน้าที่รับสัญญาณอนาล็อกที่ต้องการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้ามาในวงจรแล้วนำเอาต์พุตไปต่อเชื่อมกับอินพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์ โดยการแปลงสัญญาณจาก A/D คอนเวอร์เตอร์ แต่ละครั้ง วงจรนี้จะรับสัญญาณอนาล็อกแล้วส่งเข้าที่ขาอินพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ในช่วงเวลาที่เท่ากับเวลาแซมเปิล (Sample Time) ที่กำหนดจากความถี่แซมเปิล (Sample frequency) ที่กำหนดในวงจร ดังนั้นในการควบคุมการทำงานของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ในการแปลงสัญญาณจะมีค่าจำนวนข้อมูลเท่าใดพิจารณาได้จากความถี่แซมเปิล ภายในการแซมเปิลและโฮลด์นี้ อย่างไรก็ตามการพิจารณาเวลาการทำงานของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ยังขึ้นอยู่กับผลของเวลาในการแปลงสัญญาณ (Conversion time,  $t_c$ ) ภายใต้อินพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์คือ เวลาที่ใช้ในระหว่างที่อินพุตเข้ามาจนถึงการแสดงค่าระดับเอาต์พุตใหม่ ตามรูปที่ 2.51 เกิดผลการหน่วงเวลา (Time Delay) ขึ้น



รูปที่ 2.51 แสดงการตอบสนองของเวลาแปลงสัญญาณของ A/D คอนเวอร์เตอร์

พิจารณาตามรูปที่ 2.51 อินพุตจากสัญญาณอนาล็อก ที่เข้าใน A/D คอนเวอร์เตอร์จะอยู่ ณ เวลา  $t_1$  และสัญญาณตอบสนองของอินพุตอนาล็อกนั้นเกิดขึ้น โดยผลต่างของเวลาทั้งสองคือ เวลาในการแปลงสัญญาณ  $t_0$  ซึ่งเวลาดังกล่าวนี้เป็นเวลาที่ใช้จริงของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ดังนั้นการกำหนดเวลาแซมเปิลจากความถี่แซมเปิลควรมีเวลามากกว่าเวลาในการแปลงสัญญาณจาก A/D คอนเวอร์เตอร์ เพราะสัญญาณอนาล็อกที่เป็นอินพุตต้องคงค่าอยู่ตลอดเวลาในการแปลงสัญญาณ จึงจะได้ค่าดิจิทัลเอาต์พุตที่ถูกต้องและเพื่อให้ทราบถึงผลของการแซมเปิลจนสัญญาณอินพุตอนาล็อกไปเป็นดิจิทัลเอาต์พุตพิจารณาจากกราฟไซน์ ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 ขบวนการแปลงสัญญาณดิจิตอลด้วย A/D คอนเวอร์เตอร์

ถ้าให้เวลาแปลงสัญญาณน้อยมากๆ จน คัดทิ้งได้เวลาในการแซมปลิง  $1/10$  ของสัญญาณอินพุตจะได้กราฟเป็นรูปลักษณะแบบรูปที่ 2.52 ถ้าลดเวลาแซมปลิงให้น้อยลงจะเพิ่มเรตไซลูชั่นจะเพิ่มเรตไซลูชั่น(จำนวนเอาต์พุตบิต) ให้มากขึ้นก็จะได้ผลของสัญญาณอนาลอกอินพุตมากขึ้น

### 2.5.2 ความผิดพลาดของ A/D คอนเวอร์เตอร์

หลักสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลนั้นสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.50 จะเห็นว่าจำนวนขั้นบันไดทั้งหมดมี 15 ขั้นเอาพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์ นั้นจะประมาณว่าเป็นสัญญาณอินพุตแบบดิจิตอล กราฟแสดงข้อผิดพลาดในเอาต์พุตที่จุดต่างๆ ดูได้จากรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 ข้อผิดพลาดของ A/D คอนเวอร์เตอร์

ในกรณีของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ที่มีเรตไซลูชั่นสูงๆ (เอาต์พุตบิตมากๆ) ความกว้างสูงสุดของข้อผิดพลาด ( $-1/2$  LSB ถึง  $1/2$  LSB) จะลดลงซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเป็น A/D คอนเวอร์เตอร์ในอุดมคติจะต้องมีจำนวนเอาต์พุตมากจนนับไม่ได้(ถึงอนันต์) ดังนั้นจะมีค่าเรตไซลูชั่นถึงอนันต์ทำให้การผิดพลาด ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารหากครั้งที่มีการนำไปใช้ให้กราฟที่ 2.53 ขนาดแกนตั้งเท่ากับ 0 หรือความแตกต่างระหว่าง  $-1/2$  LSB ถึง  $1/2$  LSB มี

ค่าประมาณ 0 การสร้าง A/D คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเรียกข้อผิดพลาดนี้ว่าข้อผิดพลาดควอนไทซ์อัน เป็นข้อผิดพลาดที่ไม่สามารถกำจัดทิ้ง

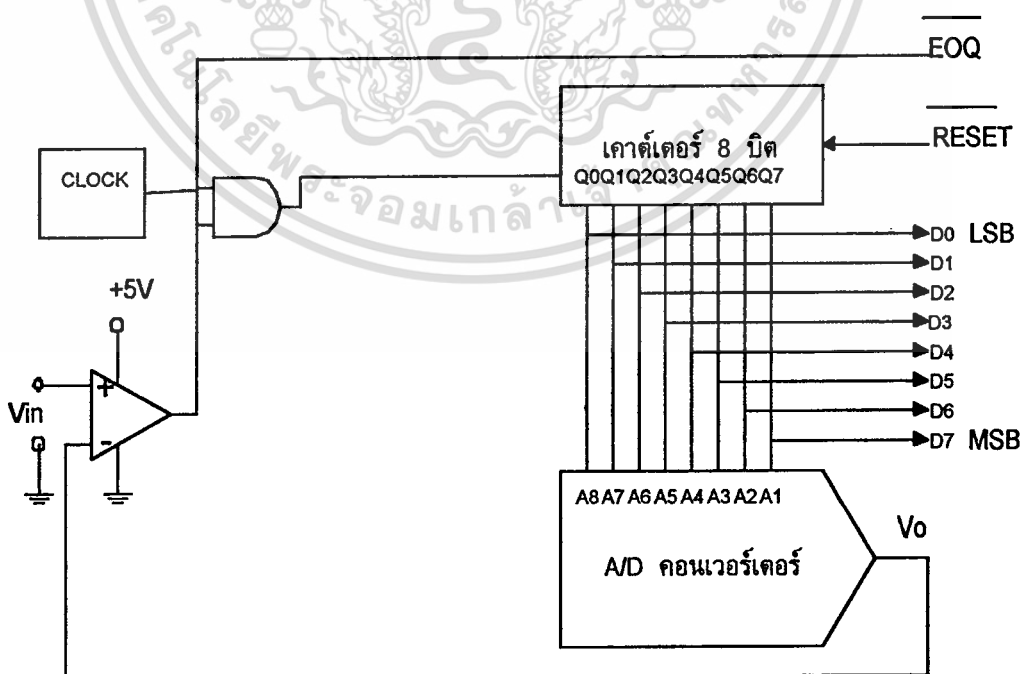
ข้อผิดพลาดอีกอย่างหนึ่งคือผลออฟเซตที่เกิดขึ้นในการแปลงสัญญาณของตัว A/D คอนเวอร์เตอร์ ทำให้ผลการแปลงผิดพลาดไปได้ แต่กรณีออฟเซตนี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับค่าความ คำนานอินพุตเข้า A/D คอนเวอร์เตอร์ เอาพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์ เกิดโอลาสซิ่ง (aliasing) ขึ้น ในการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตเร็วๆ ควรที่จะใช้การแซมเปิ้ลแบบ ความเร็วสูงเพื่อที่จะให้ได้ความถูกต้องมากขึ้น ในปัจจุบันการควบคุมระบบจะใช้การแซมเปิ้ลที่มี อัตราสูง อัตราการแซมเปิ้ลที่มากที่สุดถูกจำกัดโดยความเร็วในการแปลงสัญญาณของ A/D คอนเวอร์เตอร์ เช่นถ้าแซมเปิ้ลทุก 10ns ก็จะไม่ดีเมื่อความเร็วในการแปลงสัญญาณเป็น 500ns จะทำให้เอาพุตออกมาไม่ไปใช้งานไม่ได้

### 2.5.3 วงจรของ A/D คอนเวอร์เตอร์

ในปัจจุบันมีวิธีการและเทคโนโลยีมากมายเกี่ยวกับการแปลงสัญญาณ แต่วิธีการหลัก ก็จะเป็น พวกที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ เช่น แรอมป์ A/D คอนเวอร์เตอร์ (RAMP A/D CONVERTER) ซัสเซสซิฟ แอปพร็อกซิเมชัน A/D คอนเวอร์เตอร์ (Successive Aproximation A/D Converter, SAR) คอนเวอร์เตอร์ (DUAL A/D CONVERTER) แต่ละชนิดก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

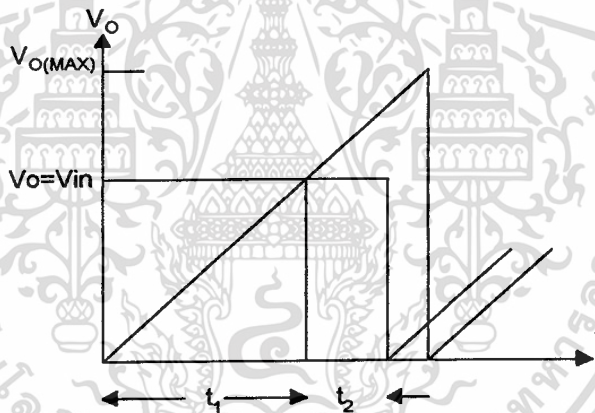
แรอมป์เอาพุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์

เป็น A/D คอนเวอร์เตอร์ ที่เข้าใจการทำงานได้ง่ายที่สุดโดยแสดงโครงสร้างการทำงานดัง รูปที่ 2.54 พิจารณาตามรูปที่ 2.54 สามารถอธิบายการทำงานตามหลักการได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.54 A/D คอนเวอร์เตอร์ แบบแรอมป์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณรีเซทไปที่เคาท์เตอร์เพื่อให้สามารถรับสัญญาณอินพุตได้โดยขณะนี้ผลจากเอาต์พุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์( $V_0$ ) มีค่าอยู่ที่ระดับต่ำสุด
2. การทำงานของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณนาฬิกาซึ่งสัญญาณอินพุตถูกนำมา AND กับสัญญาณนาฬิกาแล้วจึงส่งไปยังเคาท์เตอร์เป็นผลให้  $V_0$  แสดงระดับแรงดันที่สูงขึ้นทีละ 1 LSB
3. ณ จุดเดียวกันนั้นตัวเคาท์เตอร์จะนับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเอาต์พุตของ A/D คอนเวอร์เตอร์สูงกว่าค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เมื่อถึงจุดนี้ของคอมพาราเตอร์จะแสดงค่าไปจนกระทั่งเป็น 0 โวลต์ เมื่อถึง 0 โวลต์ที่จะหยุดสัญญาณนาฬิกาและหยุดการนับที่จุดซึ่ง  $V_0$  เริ่มมากกว่า  $V_{in}$  ขา EOC จะลกระดับเป็นระดับต่ำและส่งสัญญาณ ไปให้คอมพิวเตอร์ว่าข้อมูลขณะนี้พร้อมที่จะอ่านได้แล้วซึ่งข้อมูลที่ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยผ่านไประบบอินพุตพอร์ท
4. หลังจากคอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลเสร็จ คอมพิวเตอร์ก็จะส่งสัญญาณรีเซทมาที่ A/D คอนเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นก็เริ่มทำการกระบวนการแบบเดิมอีกครั้ง



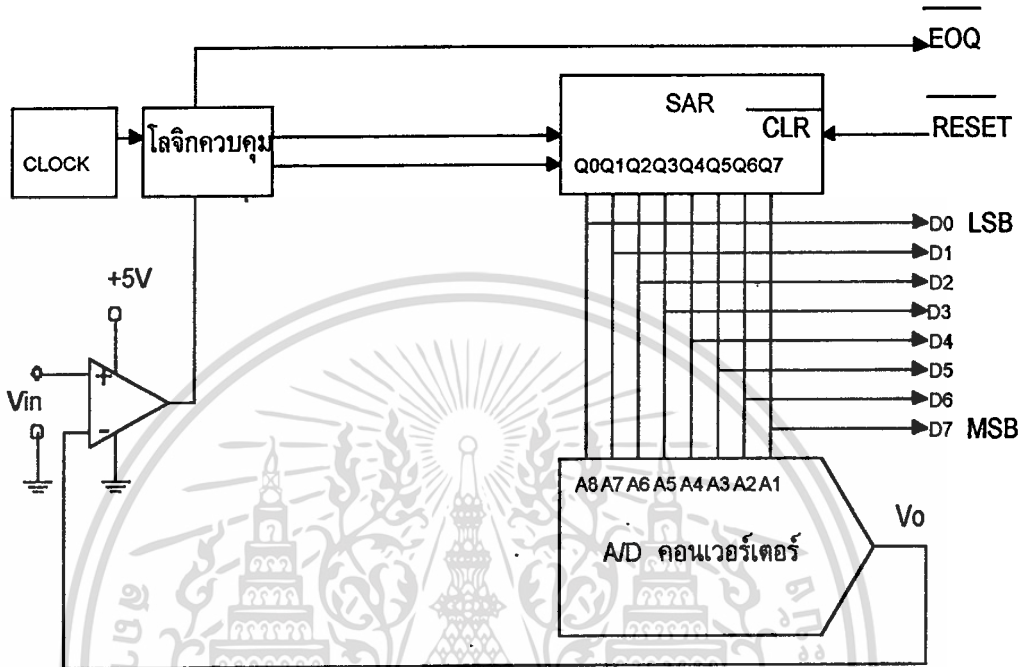
รูปที่ 2.55 กราฟเอาต์พุตของส่วน D/A ของ A/D คอนเวอร์เตอร์

กราฟรูปนี้แสดงถึงการทำงานของแรมป์ โดย  $t_1$  แทนเวลาที่นับใช้เพื่อจะแรมป์เอาต์พุตของ D/A คอนเวอร์เตอร์ ที่เริ่มจะเลย  $V_{in}$  และ  $t_2$  แทนเวลาระหว่างที่คอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลและส่งสัญญาณรีเซทกลับมาให้ A/D คอนเวอร์เตอร์ เริ่มต้นกระบวนการเดิมอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นในการเก็บข้อมูล 1 ค่าจะต้องใช้เวลาในการแปลงสัญญาณ 2 ช่วงด้วยกันคือเวลา  $t_1$  ถูกกำหนดโดยค่าของ  $V_{in}$  และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ส่วนเวลา  $t_2$  ถูกกำหนดโดยเวลาของคอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลและส่งสัญญาณรีเซทกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

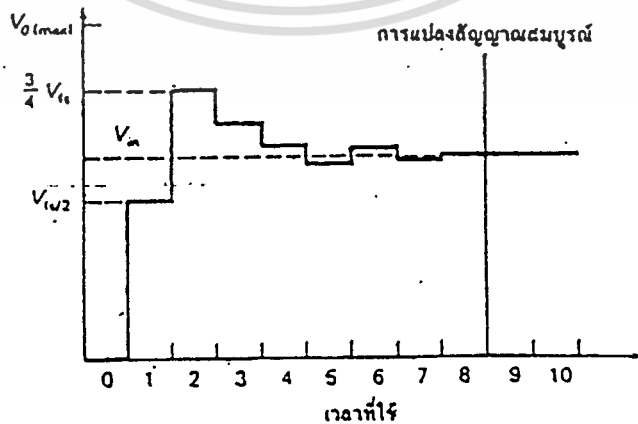
พัลส์เซตซีฟแอมพลีท็อกซิมเข้ัน A/D คอนเวอร์เตอร์

SAR เป็นตัวหลักของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบแรมปี โดยโครงสร้างการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.56 ซึ่งเป็นการแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ SAR



รูปที่ 2.56 คอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้เทคนิค SAR

SAR คอนเวอร์เตอร์ต้องใช้ D/A คอนเวอร์เตอร์และคอมพาราเตอร์ในการทำงานเหมือนกันส่วนที่แตกต่างกันจะเห็นได้แก่ ส่วนเคาทเตอร์ วิธีที่แรมปีทำงานโดยอาศัยการนับขึ้นในลำดับไบนารีจนกระทั่งเกิน  $V_{in}$  การทำงานของ SAR คอนเวอร์เตอร์จะอธิบายต่อไปและใช้รูป 2.56 และ 2.57 ในการบรรยาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.57** กราฟของส่วน D/A ระหว่างการแปลงสัญญาณ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล พิจารณาจากสัญญาณนาฬิกาที่ส่งไปยังระบบควบคุมลอจิก โดยเอาต์พุตของระบบควบคุมลอจิกจะส่งพัลส์หนึ่งลูกให้กับ SAR เพื่อเซตค่าของ MSB และลบค่าเอาต์พุตที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งจะทำให้ค่าของ  $V_0$  เท่ากับค่า  $V_{fs}/2$  ในรูปที่ 2.57 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า  $V_{in}$  และเอาต์พุตของคอมพาราเตอร์จะยังคงอยู่ในระดับ "1" ระบบควบคุมลอจิกจะตรวจสอบว่าด้วยคอมพาราเตอร์ยังคงเป็น "1" อยู่ที่จะส่งสัญญาณไปที่ SAR ซึ่งจะตั้งค่าของ MSB เป็นลอจิก "1" ที่ Q7

2. เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาถูกตัดไป MSB ตัวใหม่ซึ่งอยู่ที่ Q6 ของ SAR จะถูกเซตค่าเป็น "1" ดังรูปที่ 2.57 เอาต์พุตของ D/A จะเกินค่าของ  $V_{in}$  ทำให้เอาต์พุตของคอมพาราเตอร์เปลี่ยนระดับ ระบบควบคุมลอจิกตรวจสอบทราบก็จะไม่ทำการตั้งค่า Q6 นั่นคือค่าที่ค้างที่ตำแหน่ง Q6 เท่ากับ "0"

3. สัญญาณนาฬิกาถูกตัดมา Q6 จะถูกเคลียร์และ Q5 จะถูกเซต จากการเปรียบเทียบได้เอาต์พุตของคอมพาราเตอร์เป็น "1" ส่วนควบคุมลอจิกก็จะไม่ทำการตั้งค่า Q5 ไว้เพราะยังสูงกว่าค่าของ  $V_{in}$

โดยปกติแล้ววงจรจะทดสอบเอาต์พุตโดยเริ่มต้นที่ MSB ของ SAR ถ้าเอาต์พุตของ D/A คอนเวอร์เตอร์เกินค่า  $V_{in}$  แล้วบิตนั้นจะค้างค่าลอจิก "1" ไว้ หลังจากการตรวจสอบหมดแล้ว ไบนารีเอาต์พุตจะเป็นอัตราส่วนกับ  $V_{in}$  จะเห็นว่า A/D แบบนี้ดีกว่าแบบแรมปี คือ เวลาในการแปลงสัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนบิตของเคาท์เตอร์แบบ SAR

SAR A/D คอนเวอร์เตอร์ ก็มีข้อผิดพลาดแบบเดียวกับแบบแรมปี คือข้อผิดพลาดทางอัตราการขยายออฟเซต และความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นในส่วน D/A

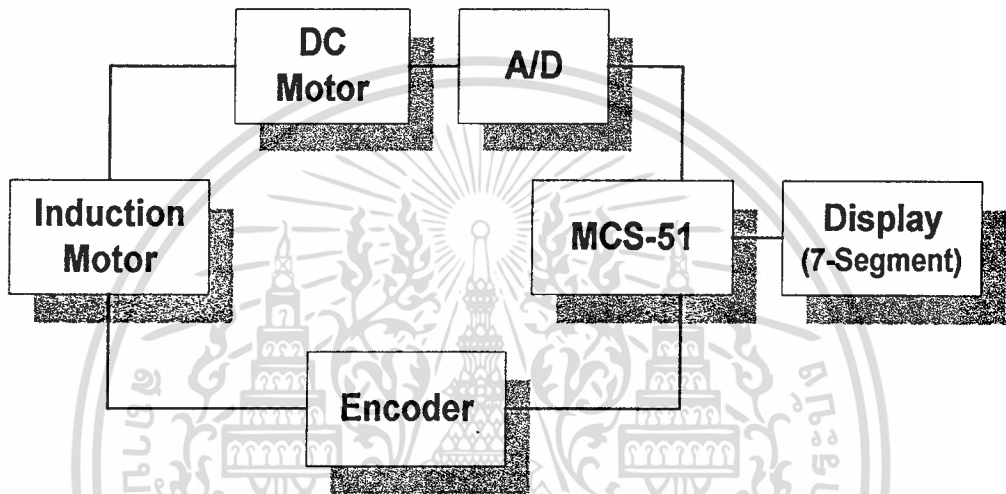
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำในโครงการนี้สามารถแสดงหลักการทำงานได้ดังแสดงในบล็อกไดอแกรมในรูปที่ 3.1



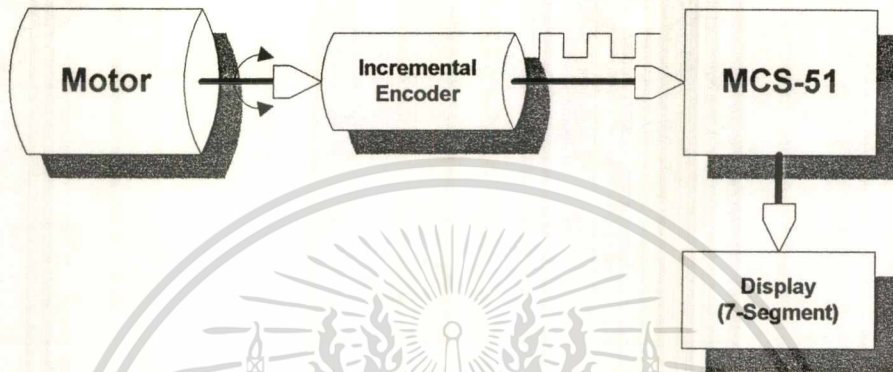
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอแกรมแสดงการทำงานของเครื่องมือวัดแรงบิด

การทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิด แสดงหลักการทำงานได้ดังในรูปที่ 3.1 โดยเราจะแบ่งการทำงานของเครื่องมือวัดออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของการวัดความเร็วรอบ(RPM) ส่วนของการวัดแรงบิด(TORQUE) และส่วนแสดงผล(แสดงผลด้วย 7-Segment) โดยการทำงานของส่วนในการวัดความเร็วรอบจะมีความสัมพันธ์กับส่วนของการวัดแรงบิดเพราะในการวัดแรงบิด เราจะต้องรู้ค่าความเร็วรอบเพื่อนำไปคำนวณหาค่าแรงบิด โดยแต่ละส่วนจะแสดงรายละเอียดได้ดังนี้คือ

#### 3.2 การวัดความเร็วรอบ

จากหลักการทำงานของตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า(Incremental Encoder) เมื่อนำมาต่อเข้ากับเพลาของมอเตอร์และจ่ายกำลังงานให้กับตัวเข้ารหัส ตัวเข้ารหัสจะผลิตพัลส์ที่แปรค่าตามความเร็วรอบของมอเตอร์ที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน โดยความถี่ของพัลส์ที่ผลิตจะมีค่าแปรไปตามความเร็วของ

มอเตอร์ ยิ่งความเร็วรอบยิ่งมากก็จะทำให้ตัวเข้ารหัสผลิตพัลส์ที่มีความถี่มากขึ้น เราจะนำพัลส์ที่ได้จากตัวเข้ารหัสไปเข้า MCS-51 เพื่อให้ไมโครโปรเซสเซอร์ประมวลผลให้เป็นค่าความเร็วรอบ(RPM) และแสดงผลต่อไปแสดงการทำงานของส่วนการวัดความเร็วได้ดังรูป



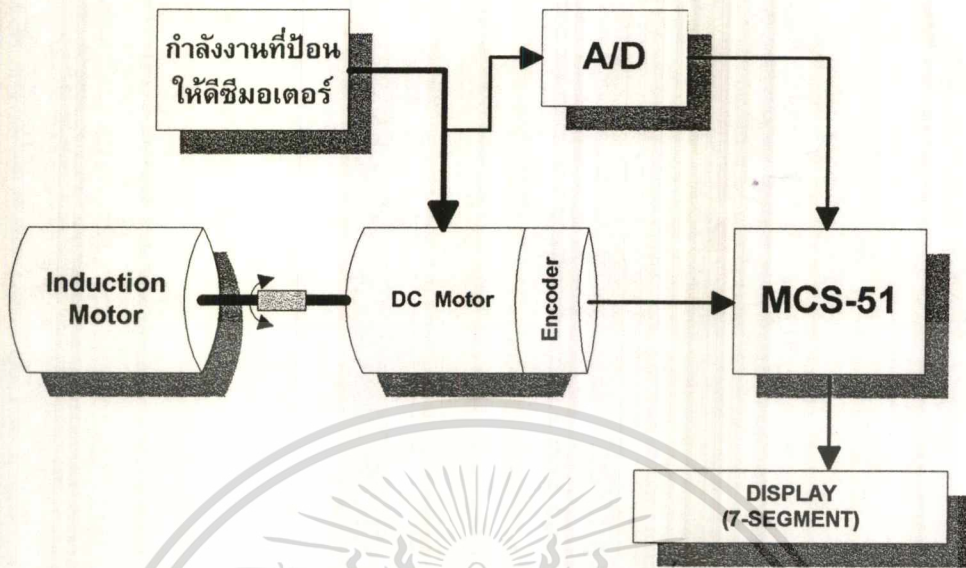
รูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของส่วนการวัดความเร็วรอบ

MCS-51 จะทำการประมวลผลสัญญาณที่ได้จากตัวเข้ารหัส โดยเราสามารถต่อตัวเข้ารหัส(Incremental Encoder) เข้าพอร์ต INTO ของ MCS-51 ได้โดยตรงและความละเอียดของตัวเข้ารหัสจะเป็นตัวแปรหนึ่งในการประมวลผลของ MCS-51 นอกจากความถี่ของพัลส์ที่รับเข้ามาแล้ว โปรแกรมการวัดความเร็วรอบแสดงได้ในภาคผนวก

### 3.3 การวัดแรงบิด

การวัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะวัดโดยการต่อปลายของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับคิซิมอเตอร์ดังแสดงในรูปหลักการวัดแรงบิดดังรูปที่ 3.3 โดยค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลลาของคิซิมอเตอร์ โดยคิซิมอเตอร์เปรียบเสมือนเป็นโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เราจะป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับคิซิมอเตอร์เพื่อให้คิซิมอเตอร์หมุนสวนทางกับการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้อัตราการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วรอบค่าใดค่าหนึ่งแล้วเราจะได้ค่าความเร็วรอบที่ได้จากการวัดของส่วนของการวัดความเร็ว เราจะวัดค่ากำลังงานที่ป้อนให้คิซิมอเตอร์และแปลงค่ากำลังงาน(V และ I) ให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งให้ MCS-51 ประมวลผลตามสมการค่าแรงบิดและแสดงผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการวัดแรงบิดโดยการเชื่อมต่อเฟลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับดิซีมอเตอร์

### 3.4 ภาคแสดงผล

ส่วนของภาคแสดงผลจะแสดงผลด้วย 7-Segment โดยในโครงงานนี้จะเลือกใช้ไอซี MAX7219 เป็นตัวขับซึ่งมีรายละเอียดของการใช้งานคือ

ไอซีขับ LED 7 ส่วน 8 หลัก วงจรขับชุดแสดงผลด้วย LED 7 ส่วน มีความสำคัญมาก สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประเภท วงจรนับ, วงจรแสดงผลทางเอาต์พุตที่เป็นตัวเลขหรือวงจรแสดงผลแบบเมตริกซ์ เป็นต้น การออกแบบวงจรขับชุดแสดงผลเหล่านี้จะเป็นการยุ่งยากและสิ้นเปลืองอุปกรณ์อีกทั้งยังทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นกลายเป็นวงจรที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกด้วยเมื่อเป็นการแสดงผลในหลาย ๆ ชุด หรือหากเป็น LED 7 ส่วน ก็เป็นหลาย ๆ หลัก จะทำให้วงจรซับซ้อนยุ่งยากโดยไม่จำเป็น จากที่ผ่าน ๆ มาเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้หากต้องออกแบบวงจรขับชุดแสดงผลหลาย ๆ หลัก และหลาย ๆ ชุด เนื่องจากปัญหาทางอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างเป็นวงจรขับชุดแสดงผลแบบ LED 7 ส่วน หลาย ๆ หลักให้เป็นแบบ LED เมตริกซ์แทน ก็สามารถลดความยุ่งยากลงไปได้ในระดับหนึ่ง

MAX 7219 เป็นทางแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดี นอกจากสามารถขับชุดแสดงผลแบบ LED 7 ส่วนได้สูงสุดถึง 8 หลักแล้ว ยังสามารถต่อโดยตรงกับชุดประมวลผลสัญญาณอื่นๆ ได้โดยตรงด้วยสายนำสัญญาณเพียงสามเส้นเท่านั้น เช่นการอินเตอร์เฟสกับไมโคร โปรเซสเซอร์ทางพอร์ตอนุกรม

ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณสมบัติ

- ความเร็วในการทำงาน 10 เมกะเฮิร์ตซ์
- ขับชุดแสดงผลแบบ LED 7 ส่วน คอมมอนแคโทดแบบเมตริกซ์ได้ 8 หลัก
- มีฟังก์ชัน การถอดรหัสและไม่ถอดรหัสในการแสดงผลได้
- ขณะไม่มีการแสดงผลกินกำลังงานต่ำเพียง 150 ไมโครแอมป์ เท่านั้น
- ควบคุมความสว่างด้วยสัญญาณดิจิทัลหรืออนาล็อก ก็ได้
- ชุดแสดงผลจะเกิดการแบลนค์(blank) หรือดับเมื่อเริ่มต้นจ่ายแรงดันให้กับไอซี

จากข้างต้นเป็นเพียงคุณสมบัติหลักๆ ต่อไปจะพิจารณาคูคุณสมบัติทางเทคนิคของ MAX 7219 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนั้นการจัดการและชื่อเรียกประจำขาใช้งานต่างๆ ก็แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่ง MAX 7219 นี้มีตัวถังเป็น DIP 24 ขาสามารถขับ LED 7 ส่วนได้โดยตรง โดยที่ไม่ต้องผ่านชุดวงจรขับ LED ภายนอกอื่นๆ อีก หน้าที่การใช้งานหลักของแต่ละขาจะได้อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ย่านแรงดัน	+V	4 ถึง 6	โวลต์
กระแสขณะ Shutdown mode	$I_Q$	150	ไมโครแอมป์
ย่านกระแสขณะทำงาน	$I_{OP}$	330	มิลลิแอมป์
กระแสไหลผ่าน $R_{set}$ สูงสุด	$I_{Rset}$	8	มิลลิแอมป์
อัตราการสแกนแสดงผล	$f_{OSC}$	500 ถึง 2,000	เฮิร์ตซ์
กระแสซิงค์ขับหลักแสดงผล	$I_{DIG1}$	500	มิลลิแอมป์
กระแสซอร์สขับเซกเมนต์ทั้งหมด	$I_{SEG A-G}$ และ DP	100	มิลลิแอมป์
แรงดันอินพุต	$V_{IN}$	+V +0.3	โวลต์
กระแสอินพุต	$I_{IN}$	-1 ถึง 1	ไมโครแอมป์
ลอจิกอินพุต "0", "1"	$V_{IL}, V_{IH}$	0.8, 3.5	โวลต์
ค่าเวลาโฮลด์ข้อมูล	$T_{idh}$	-5	นาโนวินาที
ค่าเวลาในการแสดงผลข้อมูลถึงเซกเมนต์	$T_{dspd}$	2.25	มิลลิแอมป์
การสูญเสียกำลังงานต่อเนื่อง	PD	0.87	วัตต์
อุณหภูมิโดยรอบขณะทำงาน		-65 ถึง +160	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ **ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติทางไฟฟ้า** เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

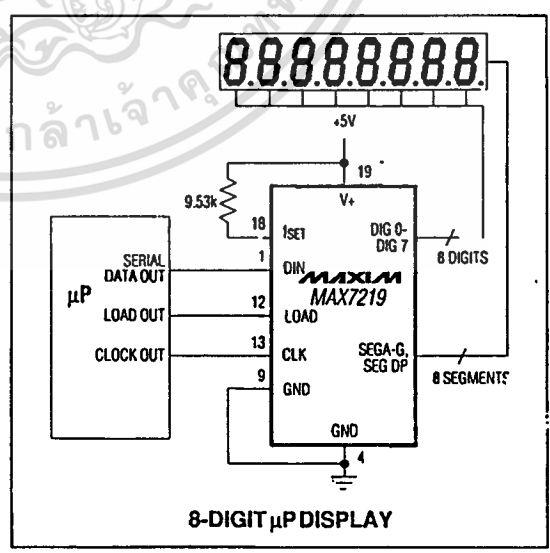
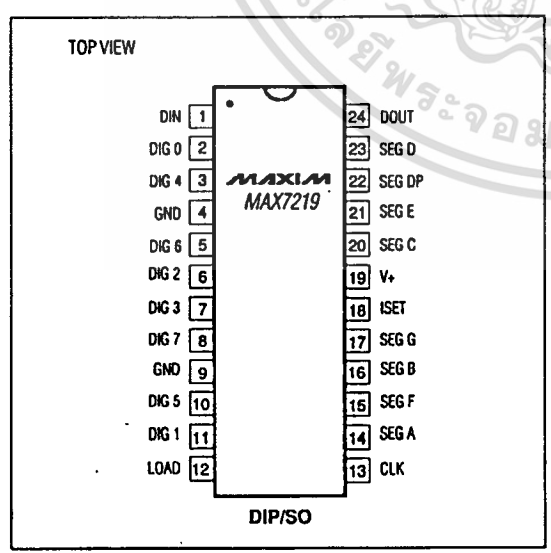
ส่วนประกอบและการทำงานภายใน MAX 7219 มีส่วนประกอบการทำงานอยู่ภายในหลายส่วน จึงทำให้การประกอบอุปกรณ์ภายนอกนั้นมีน้อยผลที่ตามมาก็คือความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ดังแสดงรูปบล็อกไดอะแกรมภายในตัวไอซีในรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาแล้วก็จะพอจะแยกอธิบายการทำงานของแต่ละส่วนเหล่านั้นได้ดังต่อไปนี้

โหมดแอดเดรสอนุกรม สัญญาณอนุกรมที่เข้ามาทางขา  $D_{IN}$  ซึ่งเป็นข้อมูลที่ถูกส่งมาในลักษณะแพ็คเกจขนาด 16 บิต สัญญาณข้อมูลนี้จะถูกนำเข้าไปสู่ชิพรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ภายในตัวไอซีซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นตอนที่สัญญาณขอขาขึ้นทุกๆ ครั้ง หลังจากนั้นเมื่อข้อมูลสุดท้ายใน 16 บิต ผ่านเข้ามาเสร็จแล้วก็เกิดการแลตซ์ข้อมูลเพื่อทำการอ่านข้อมูลต่อไปพร้อมกับการควบคุมขงรีจิสเตอร์เมื่อมีสัญญาณพัลซ์ขอขาขึ้นเข้ามาเข้าที่ขาควบคุม LOAD (ขา 12) นั่นคือที่ขา LOAD จะมีสถานะเป็น 1 หลังจากที่ขอขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาอันดับที่ 16 ผ่านไปแล้ว แต่ถ้าสัญญาณพัลซ์ที่ขา LOAD มีสถานะเป็น 1 ก่อนที่ถึงขอขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา จะทำให้เกิดการผิดพลาดของข้อมูลที่เข้ามาได้สัญญาณข้อมูลที่จะเข้าจากทางขา  $D_{IN}$  จะผ่านเข้าสู่ชิพรีจิสเตอร์และออกไปทางขา  $D_{OUT}$  ในวงรอบ 16.5 รอบของสัญญาณนาฬิกาที่ผ่านไป นั่นคือข้อมูลจะออกมาทางเอาต์พุตหลังจากที่ขา CLK มีสัญญาณนาฬิกาในช่วงของขาลงทุกๆ ครั้ง

จำนวนหลักและรีจิสเตอร์ควบคุม จำนวนหลักของตัวเลขจะถูกควบคุมโดยรีจิสเตอร์ที่มีอยู่ในตัวไอซีซึ่งเป็นสแตคิกแรมแบบพอร์ตคู่ขนาน  $8 \times 8$  ขนาดของสัญญาณจะมีแรงดันสูงประมาณ +V ซึ่งมีค่าไม่เกิน 2 โวลต์ ข้อมูลนี้สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้โดยตรงในแต่ละแอดเดรสของแต่ละหลัก ในส่วนควบคุมรีจิสเตอร์ประกอบไปด้วย โหมดคอนทราสต์, ควบคุมการแสดงผล, จำกัดการสแกน (จำนวนหลักในการสแกน), ตัดแรงดันชีพหลายอัตโนมัติและทดสอบการแสดงผล(เมื่อ LED แต่ละส่วนติดสว่าง) ภายในรีจิสเตอร์จะยังไม่เกิดการ ทำงานแต่จะยอมให้สัญญาณข้อมูลผ่านจาก  $D_{IN}$  ไปยัง  $D_{OUT}$  ได้เมื่อมีการต่ออุปกรณ์แบบคาสเคดกันโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงบนชุดแสดงผลหรือกระทบกระเทือนต่อการควบคุมรีจิสเตอร์

โหมดหยุดการทำงาน เมื่อ MAX 7219 อยู่ในโหมดการทำงานเพื่อลดการสิ้นเปลืองกำลังงาน ส่วนสแกนออสซิลเลเตอร์ภายในจะหยุดการทำงานทำให้กระแสซอร์สที่จ่ายให้กับแต่ละเซกเมนต์มีสภาพเป็นกราวด์และที่ขาคอมมอนของแต่ละหลักจะมีสภาพเป็น +V ("1") นั่นคือเป็นการดับการแสดงผลของตัวเลขแสดงผล (Blanking) ข้อมูลในแต่ละหลักที่แสดงออกไปและการควบคุมรีจิสเตอร์จะคงสถานะอยู่กับที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในโหมดนี้สามารถทำให้การใช้กำลังงานจากแหล่งจ่ายประหยัดลงอีก(น้อยลงมาก) หรืออีกวิธีหนึ่งในโหมดนี้อาจจะทำการตั้งเวลาการแสดงผลของ LED 7 ส่วนในแต่ละหลักแสดงผลแบบกะพริบที่มีอัตราการกะพริบไม่เร็วนักอาจจะทิ้งช่วงห่างแสดงผล 1 วินาที แล้วหยุดไป 10 วินาทีทำนองนี้เป็นต้น ก็จะทำให้มีการกินกระแสจากแหล่งจ่ายไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขา 1 ( $D_{IN}$ ) เป็นขารับข้อมูลอินพุตแบบอนุกรม โดยข้อมูลจะถูกโหลดเข้าไปอยู่ในชิพรีจิสเตอร์ ขนาด 16 บิต ตามลักษณะการเพิ่มขึ้นของของสัญญาณความถี่นาฬิกาที่ขา 13 (CLK)
- ขา 2,3,5-8,10,11( $DIG_{0-7}$ ) เป็นขาขับสัญญาณทางเข้าค้พุดไปเข้าคอมมอนของ LED 7 ส่วน ทั้ง 8 หลักเพื่อเป็นการจ่ายกระแสซิงค์ให้กับ LED 7 ส่วน
- ขา 4,9 (GND) ขากราวด์
- ขา 12 (LOAD) ขาคควบคุมการโหลดข้อมูลเข้าทางอินพุต(ขา1) โดยจะเกิดการโหลดข้อมูลเมื่อนานี้ได้รับพัลส์ในของขาขึ้นจนกระทั่งข้อมูลสุดท้ายใน 16 บิต ผ่านเข้าไปทางขาอินพุตอนุกรม (ขา 1) แล้วจะเกิดการแลตซ์
- ขา 13 (CLK) ขารับสัญญาณนาฬิกาอินพุตมีอัตราสูงสุด 10 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อสัญญาณนาฬิกามีลักษณะช่วงขอบขาขึ้นสัญญาณข้อมูลก็จะเลื่อนเข้าไปสู่ชิพรีจิสเตอร์ภายใน และเมื่อสัญญาณนาฬิกากลับมาเป็นขอบขาลง ข้อมูลในชิพรีจิสเตอร์ก็จะถูกส่งออกมาทางขาเอาต์พุด (ขา24  $D_{OUT}$ )
- ขา 14-17,20-23 ( $SEG_{A-G,DP}$ ) เป็นขาเอาต์พุดจ่ายกระแสซอร์สให้กับตัวเลข 7 ส่วนในเซกเมนต์ต่างๆ รวมทั้งจุดทศนิยมด้วย
- ขา 18 ( $I_{SET}$ ) จะต่อขาขึ้นเข้ากับไฟบวกโดยมีตัวต้านทานอนุกรมอยู่ ซึ่งเป็นตัวต้านทานกำหนดค่ากระแสที่จะจ่ายให้กับ LED 7 ส่วน ในแต่ละเซกเมนต์ เพื่อให้เกิดการสว่างสูงสุด ค่ากระแสกำหนดได้จากค่าของตัวต้านทานที่อนุกรมอยู่ ( $R_{SET}$ )
- ขา 19 (+V) ขารับแรงดันไฟเลี้ยงไอซีด้านบวก
- ขา 24 ( $D_{OUT}$ ) เป็นขาสัญญาณข้อมูลอนุกรมเอาต์พุด สัญญาณข้อมูลที่เข้ามาทางขา  $D_{IN}$  จะผ่านออกมาสู่ขา  $D_{OUT}$  ในวงรอบสัญญาณนาฬิกา 16.5 วงรอบสัญญาณนาฬิกา



(ก) (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.4 (ก) แสดงการจัดขา (ข) บล็อกไดอแกรมการต่อใช้งานเบื้องต้น  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายช่างเทคนิค

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ระยะเวลาของการเข้าสู่โหมด shutdown นี้ในแต่ละครั้งของการแสดงผลจะไม่ต่ำกว่า 250 ไมโครวินาที

การทำงานเริ่มต้น ในขณะที่มีการเริ่มต้นทำงานจะเกิดการรีเซ็ตในส่วนควบคุมรีจิสเตอร์ พร้อมกับไม่มีการแสดงผลออกมาของชุดแสดงผล LED 7 ส่วน (blanked) และ MAX 7219 ก็จะกลับมาเข้าสู่โหมด Shutdown เนื่องจากต้องใช้เวลาใช้การเข้าสู่โปรแกรมสำหรับขับชุดแสดงผลก่อนจนถึงการแสดงผลออกมาเพื่อเซตให้ทำการสแกนในหลักที่หนึ่งก่อนนั่นเอง นั่นคือในช่วงแรกจะไม่มีการถอดรหัสข้อมูลในรีจิสเตอร์ข้อมูลในรีจิสเตอร์ข้อมูล และจะทำการเซตความกนาแน่นของข้อมูลในรีจิสเตอร์ให้มีค่าน้อยๆ ไว้ก่อน

การแสดงผลของ LED 7 ส่วน	รีจิสเตอร์ข้อมูล						ระดับลอจิกที่เอาต์พุตแต่ละเซกเมนต์							
	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub> -D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	DP*	A	B	C	D	E	F	G
0		X	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
1		X	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
2		X	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
3		X	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
4		X	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1
5		X	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
6		X	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
7		X	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8		X	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
9		X	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
-		X	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E		X	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
H		X	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
L		X	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
P		X	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
blank		X	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 3.2 ลักษณะการถอดรหัส BCD code B

### การถอดรหัสในรีจิสเตอร์

การถอดรหัสในรีจิสเตอร์ของ MAX 7219 นั้น จะใช้การถอดรหัสแบบเลขฐาน 2 แบบ B (BCD code B) ซึ่งในเลขรหัสจะใช้เพียงแค่ถอดออกมาเป็น 0-9, E, H, L, P และ - (ปกติการถอดรหัสจะใช้เพียงแค่ถอดออกมาเป็นตัวเลขค่า 0-9 เท่านั้น) นั่นก็หมายความว่า จะไม่ทำการถอดรหัส

สำหรับหลักต่อไปแต่ละจะเป็นการขึ้นวงรอบการถอดรหัสใหม่ บิตอื่นๆ ในรีจิสเตอร์ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับในหลักที่หนึ่ง การถอดรหัสในเลขฐานสองแบบ B จะใช้ลอจิก “1” เป็นตัวถอดรหัส และจะผ่านไปสำหรับลอจิก “0” ดังแสดง ตัวอย่างการถอดรหัสของรหัส BCD แบบ B ไว้ในตารางที่ 2 การถอดรหัสในโหมดนี้จะพิจารณาเฉพาะในรหัสดำๆ ของข้อมูลในช่วง 4 หลักแรกของรีจิสเตอร์ (บิต  $D_3$ - $D_0$ ) และจะไม่คำนึงถึงอีก 4 บิตของหลักต่อไปคือ  $D_4$ - $D_6$  ส่วน  $D_7$  จะเซตค่าของจุดทศนิยมของหลักต่างๆ (SEG<sub>DP</sub>) หรือ decimal point ซึ่งจะเกิดการถอดรหัสออกมาเป็นลอจิก “1” ( $D_7 = “1”$  จุด DP จะติดสว่าง)

กระแสเซนเซอร์(ma)	แรงดันตกคร่อม LED แต่ละหลัก (v)				
	1.5	2	2.5	3	3.5
40	11.3	10.4	9.8	8.9	7.8
30	16.3	15	14	12.9	11.4
20	26.2	24.6	22.8	20.9	18.6
10	60.1	56	51.7	47	41.9

ตารางที่ 3.3 แสดงค่า  $R_{SET}$  เมื่อกำหนดค่าของ  $I_{SEG}$  และ  $V_{LED}$

การควบคุมแสงสว่างและการแบดจ์ระหว่างหลัก MAX 7219 สามารถควบคุมความสว่างของ LED 7 ส่วน ได้ด้วยการกำหนดค่าความต้านทาน( $R_{SET}$ ) จากภายนอกเพียงตัวเดียวโดยจะเชื่อมต่ออยู่ระหว่างแรงดันไฟเลี้ยง +V กับขา  $I_{SET}$  (ขา 18) ซึ่งอาศัยขบวนการทางดิจิทัลเพื่อควบคุมปริมาณข้อมูลในรีจิสเตอร์ส่วนนี้ กระแสขับในแต่ละเซนเซอร์ (กระแสซอร์ส) จะมีค่าประมาณ 100 เท่าของค่ากระแสปกติ (ต่ำสุด) ที่ออกมาทางขา  $I_{SET}$  ค่าความต้านทาน  $R_{SET}$  นี้สามารถกำหนดเป็นค่าคงที่หรือเป็นแบบปรับค่าความต้านทานได้ เพื่อให้สามารถควบคุมความสว่างของ LED 7 ส่วนได้อย่างง่ายดายโดยปกติค่าความต้านทานของ  $R_{SET}$  ต่ำสุดประมาณเท่ากับ 9.53 กิโลโอห์ม โดยจะมีกระแสขับในแต่ละเซนเซอร์จะเท่ากับ 37 มิลลิแอมป์

การใช้ดิจิทัลควบคุมการแบ่งกระแสสำหรับแต่ละเซนเซอร์นั้นจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบพัลส์วิดธ์มอดูเลต (PWM DAC) ที่บรรจุอยู่ในไอซี ซึ่งสัญญาณข้อมูลที่จะนำมาควบคุมก็จะพิจารณาเฉพาะใน 4 บิตแรกของข้อมูลในรีจิสเตอร์การเลือกสเกลของการแบ่งกระแสสำหรับเซนเซอร์ LED นั้น จะแบ่งเป็นระดับขั้นทั้งหมด 16 ลำดับ เริ่มตั้งแต่ระดับสูงสุดของ 31/32 ลงมาถึง 1/32 ของค่ากระแสสูงสุดที่กำหนดไว้จากค่ากระแสสูงสุดที่กำหนดไว้จากค่าของ  $R_{SET}$  ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์จำกัดการสแกน ส่วนของรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการจำกัดการสแกนหรือหยุดการแสดงผลในแต่ละหลักของชุดแสดงผลตั้งแต่หลักที่ 1-8 เพื่อกำหนดจำนวนหลักของการแสดงผลของชุดแสดงผล ในชุดแสดงผลจะทำการแสดงผลแบบมัลติเพล็กซ์กลับไปกลับมา ซึ่งอัตราความถี่ในการแสดงผลปกติ จะสแกนที่อัตรา 1,300 เฮิร์ตซ์ทั้งหมด 8 หลักที่แสดงผล ถ้าชุดแสดงผลมีการแสดงผลแบบไม่ครบทุกหลัก อัตราความถี่ในการสแกนจะเป็น

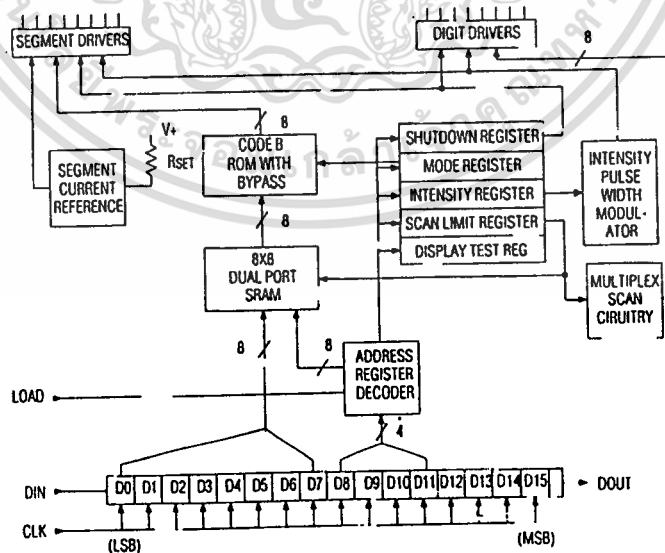
$$8f_{osc}/N \quad \text{เฮิร์ตซ์}$$

เมื่อ  $8$  = จำนวนหลักทั้งหมดของชุดแสดงผล

$f_{osc}$  = ความถี่ออสซิลเลเตอร์

$N$  = จำนวนของหลักที่ทำการสแกนแสดงผลขณะนั้น

ซึ่งจะทำให้จำนวนหลักที่ทำการสแกนจะติดสว่างขึ้น และจะเป็นการแปลงคในหลักที่ไม่มี การสแกนแสดงผลนั้นคือการจำกัดการสแกนแสดงผลนั้นคือการจำกัดการสแกน (scan-limit register) หรือเป็นการแสดงเป็นเลขศูนย์แทน ถ้าอัตราการสแกนคงที่ 8 หลัก แต่การสแกนถูกสแกนใช้งาน เพียง 3 หลัก หรือน้อยกว่ากำลังงานหรือกระแสจากแหล่งจ่ายที่สิ้นเปลืองไปกับชุดแสดงผลในแต่ละหลักจะสูงกว่าเนื่องจากการกำหนดค่าไว้ที่ 8 หลัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนค่า ความต้านทานของ  $R_{SET}$  เพื่อให้กระแสที่ใช้ขับ LED 7 ส่วนในแต่ละหลักเกิดความเหมาะสม นั่นคือค่าของ  $R_{SET}$  จะปรับเปลี่ยนไปตามจำนวนของ LED 7 ส่วนที่ถูกสแกนใช้งานให้แสดงผลในแต่ละตัวเช่นเลือกค่า  $R_{SET}$  สำหรับ LED 7 ส่วน 1 หลักจะต้องได้กระแสขับ 10 มิลลิแอมป์, 2 หลัก ก็เป็น 20 มิลลิแอมป์ หรือ 3 หลักก็เลือกไว้ที่ 30 มิลลิแอมป์เป็นต้น



รูปที่ 3.5 บล็อกไดโอดแกรมภายในตัวไอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกตัวต้านทาน  $R_{SET}$  ปริมาณกระแสที่ใช้ขับในแต่ละเซกเมนต์นั้นจะประมาณเท่ากับ 100 เท่าของค่ากระแสที่ออกมาจากขา  $I_{SEG}$  กำหนดได้จากการเปลี่ยนค่า  $R_{SET}$  ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3 เป็นตารางเลือกค่า  $R_{SET}$  เมื่อกำหนดค่าแรงดันตกคร่อม LED ในแต่ละเซกเมนต์ขณะฟอร์เวิร์ด ( $V_{LED}$ ) และกำหนดกระแส LED ในแต่ละ

เซกเมนต์ขณะฟอร์เวิร์ด( $I_{SEG}$ ) เช่นกัน สำหรับ MAX7219 แล้วกำหนดให้ค่ากระแส  $I_{SEG}$  สูงสุดเท่ากับ 40 มิลลิแอมป์ที่แรงดันตกคร่อม LED เท่ากับ 2.5 โวลต์ และค่าความต้านทาน  $R_{SET}$  จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 9.53 กิโลโห์มนั้นคือสูงกว่านี้ได้ นั้นเป็นการจำกัดระดับค่ากระแสในแต่ละเซกเมนต์ของ LED 7 ส่วน แต่ถ้าหากเป็นการจำกัดค่ากระแสที่สูงกว่านี้จำเป็นจะต้องอาศัยวงจรขับ LED 7 ส่วนจากภายนอกต่อใช้งานร่วม

นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าการสูญเสียกำลังงานสูงสุด(PD) เพื่อเหตุผลของการประหยัดพลังงานดังนั้นจะต้องทำการจำกัดค่ากำลังงานสูญเสียไว้ที่ค่าๆ หนึ่งที่เหมาะสม แต่จะต้องคำนึงถึงค่าการสูญเสียสูงสุดก่อน สำหรับค่าจำกัดสูงสุดของการสูญเสียกำลังงานใน MAX7219 สามารถคำนวณได้จากสมการ

	$PD = (+V \cdot 8 \text{ ma}) + (+V - V_{LED})(DUTY \cdot I_{SEG} \cdot N)$	วัตต์
เมื่อ	$+V =$	แรงดันจากแหล่งจ่าย
	$8\text{mA} =$	กระแสที่ไหลผ่าน $R_{SET}$ สูงสุด(8 มิลลิแอมป์)
	$V_{LED} =$	แรงดันตกคร่อม LED ใน 1 เซกเมนต์ ขณะฟอร์เวิร์ด
	$DUTY =$	ค่าควิตซ์ไซเคิลกำหนดจากความหนาแน่นในรีจิสเตอร์
	$I_{SEG} =$	กระแสสำหรับ 1 เซกเมนต์ขณะฟอร์เวิร์ดกำหนดจากค่าของ
$R_{SET}$	$N =$	จำนวนที่ขับเซกเมนต์ทั้งหมด( 1 หลักจะมีทั้งหมด 8 เซกเมนต์

ซึ่งรวมกับจุด dp ค้วย)

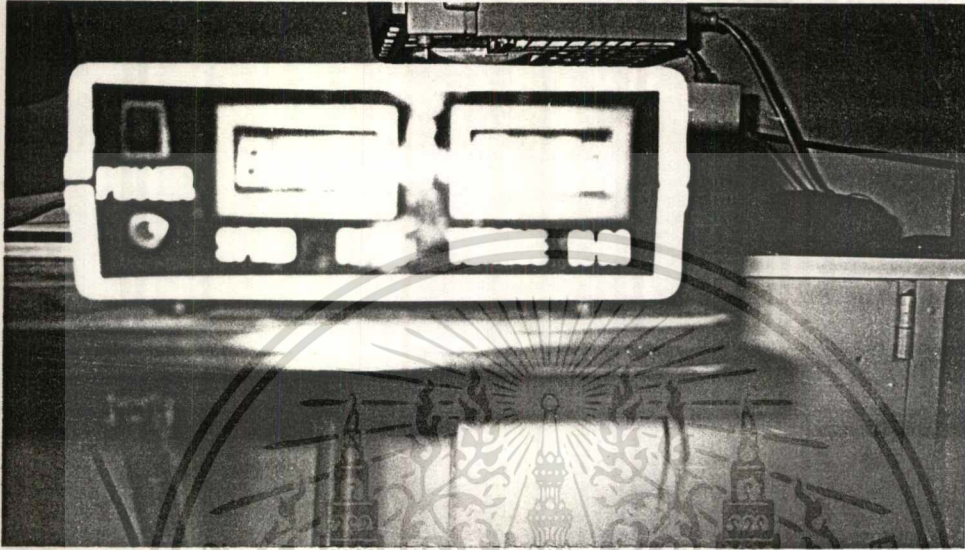
การขับ LED 7 ส่วนแบบคาสเคด ลักษณะของการต่อชุดขับ LED 7 ส่วนอีกแบบหนึ่ง เพื่อเพิ่มจำนวนหลักในการแสดงผลก็คือการต่อแบบคาสเคดกัน ดังแสดงการต่อไว้ในรูปที่ 3 เป็นวงจรขนาด 16 หลัก โดยการอินเตอร์เฟสกับไมโครโปรเซสเซอร์ด้วยสายสัญญาณ 3 เส้น ถ้าจำนวนหลักไม่ใช่ 8 หลักทั้งสองชุดที่นำมาต่อคาสเคดกันกับการสแกนในหนึ่งหลักและจะไม่สว่างมากกว่าหลักอื่นๆ นั่นคือถ้าต้องการชุดแสดงผลขนาด 12 หลัก จะต้องใช้ MAX7219 มาต่อคาสเคดกันสองตัวโดยกำหนดให้แต่ละตัวแสดงผลออกมา 6 หลักนั่นคือจะมีค่าควิตซ์ไซเคิลของชุดแสดงผลเท่ากับ 1/6 ควิตซ์ไซเคิลต่อหลัก แต่ถ้าเป็นการต่อคาสเคดกันในลักษณะที่ไม่ใช่การต่อขับ LED 7 ส่วนในหลักที่เท่ากันต่อ MAX7219 หนึ่งตัว คือถ้าต้องการชุดแสดงผลขนาด 11 หลัก จะต้องมีการสแกน 1 หลัก โดยจะแบ่งชุดขับ LED 7 ส่วนเป็นแบบ 6 หลักอีกชุดจะต้องเป็น 5 หลัก ซึ่งค่าควิตซ์ไซเคิลจะเป็น 1/6 และ 1/5 ควิตซ์ไซเคิลต่อหลักตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะภายในเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

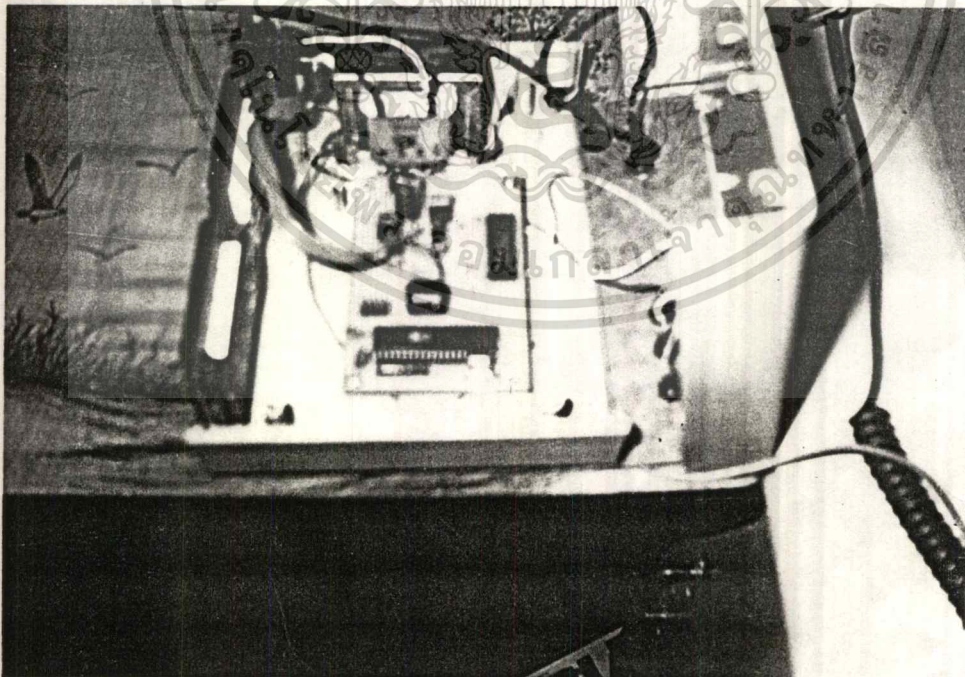
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

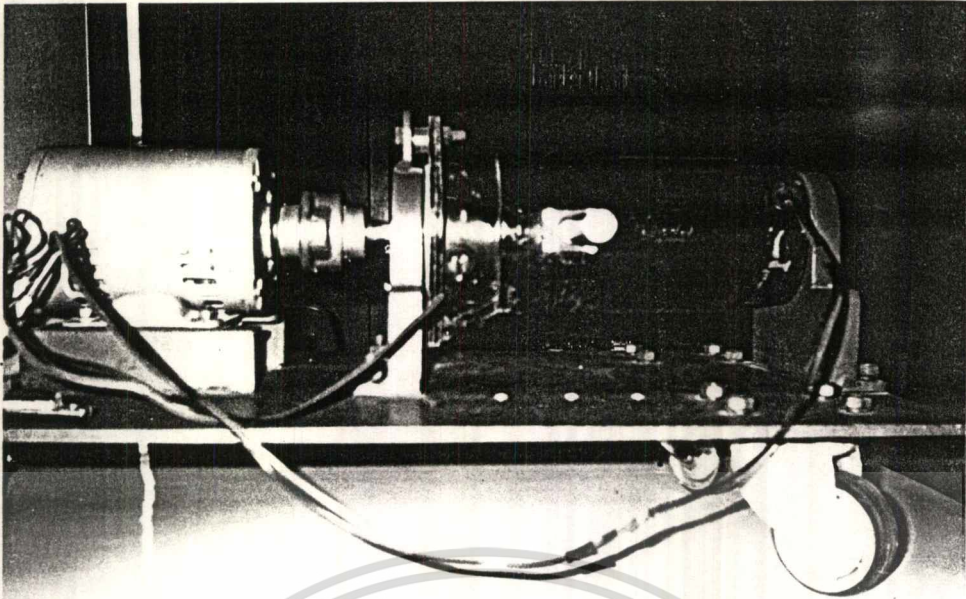
#### 4.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ทุกรูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ภายในเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกกฎหมายให้ผิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการเชื่อมต่อเพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับเพลากลางมอเตอร์เหนี่ยวนำ

#### 4.2 ผลการทดสอบการวัดความเร็วรอบ

การวัดความเร็วรอบจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Digital Tachometer ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ครั้งที่	Digital Tachometer	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น
1	507	500
2	997	1,000
3	1,506	1,500
4	2,010	2,000
5	2,445	2,500
6	3,012	3,000
7	3,511	3,500
8	3,995	4,000
9	4,494	4,500
10	4,993	5,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น, ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 4.1 ตารางการเปรียบเทียบการวัดความเร็วรอบระหว่าง Digital Tachometer กับ เครื่องวัดที่  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา, หรือ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 สร้างขึ้น

จากการทดลองวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเราจะพบว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะเป็นค่าที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จาก Digital Tachometer และจะพบว่าค่าการอ่านค่าที่ความเร็วรอบคงที่การวัดจากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีค่าคงที่กว่าการวัดจาก Digital Tachometer

#### 4.3 ผลการทดสอบการวัดแรงบิด

ในการวัดแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์นั้นจะทำการทดสอบทางพลวัต วิธีการทดสอบแรงบิดในลักษณะนี้จะทำการหมุนที่เพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนไปโดยมีทิศทางการหมุนสวนทางกับการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นทำการวัดความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาของมอเตอร์(ได้จากการวัดความเร็วรอบของแรงบิดด้านบน) ซึ่งจะคำนวณหาค่าของแรงบิดได้จากผลตอบสนองของความเร็วต่อแรงดันทางด้านไฟฟ้าทางด้านอินพุตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากสมการ

$$P = T \cdot N \quad (4-1)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับขอลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

T คือ แรงบิดที่อาเมเจอร์ของมอเตอร์

N คือ จำนวนรอบของการหมุนของเพลลามอเตอร์

จากสมการที่ (4-1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

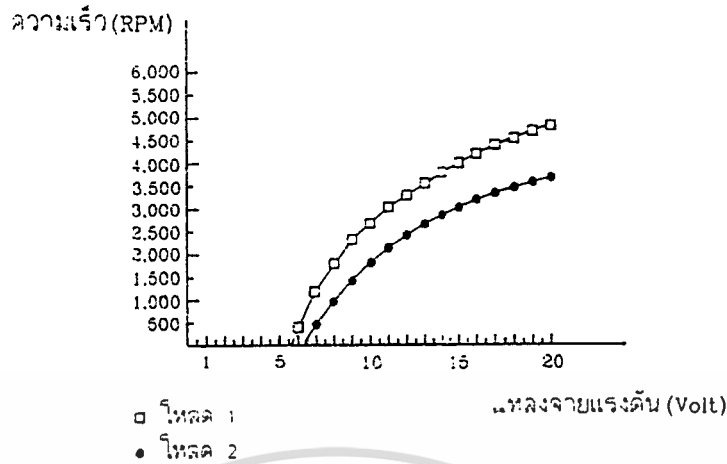
$$T = (KV)/N$$

ในการทดสอบกำลังงานเพื่อหาค่าของแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านขลวดมีค่าคงที่

จากการทดสอบค่าแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในขณะที่ทำการจุดโหลดที่มีขนาดต่างๆ จะเห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำจะให้ค่าแรงบิดที่เพลลาจะเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์กับจำนวนรอบของการหมุนของเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งแสดงผลตอบสนองได้ตามรูปที่

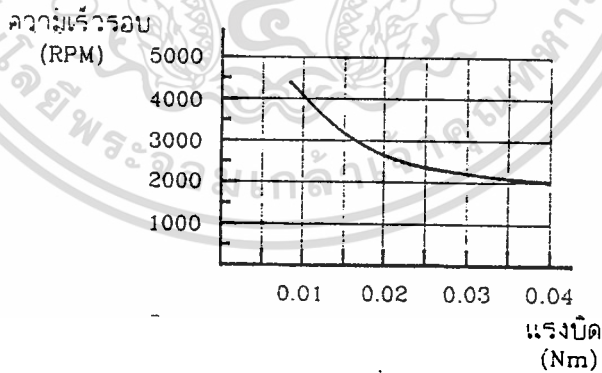
#### 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลตอบสนองของความเร็รรอบต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตในขณะที่ โหลดต่างกัน

จากกราฟในรูปที่ 4.5 สามารถแสดงผลตอบสนองของแรงบิดที่เกิดขึ้นต่อความเร็รรอบในการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลตอบสนองระหว่างแรงบิดที่เกิดขึ้นต่อความเร็รรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า , ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์

#### 5.1 สรุป

การทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้สร้างเพื่อให้เป็นประโยชน์ในการวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะขับโหลดใดๆ ซึ่งจะทำให้สามารถนำมอเตอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้องไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ อีกทั้งเครื่องมือวัดแรงบิดในประเทศไทยหาซื้อได้ยากและมีราคาแพง รวมถึงการวัดค่าแรงบิดที่กระทำกันอยู่นั้นกระทำได้ยากและการอ่านค่าก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้

จากเหตุผลดังกล่าวเราจึงคิดหาวิธีที่จะทำการวัดค่าแรงบิดที่กระทำได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายและค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โครงการนี้จึงใช้วิธีดังกล่าวดังที่เสนอมานี้ในรายละเอียดของโครงการ

#### 5.2 วิจารณ์

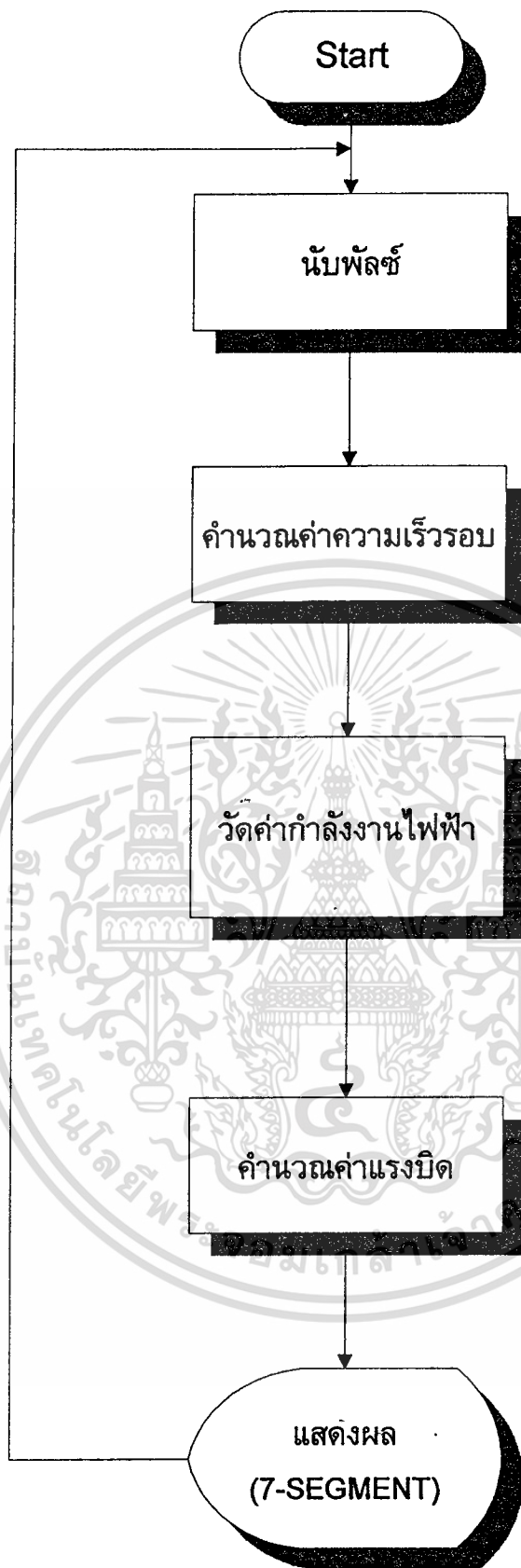
ปัญหาที่พบคือ การคับปลิงระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะถ้าหากคับปลิงแกนไม่ตรงกันจริง หรือหลวมจะทำให้ผลที่ได้มีการผิดพลาดเกิดขึ้นอย่างมาก ประกอบกับตัวคับปลิงหาซื้อได้ยากและมีราคาแพง ปัญหาอีกอย่างหนึ่งคือ ตัว Encoder ที่นำมาใช้ไม่มีรายละเอียดบอกไว้จึงทำให้ยากในการทดลองและเขียนโปรแกรมต้องใช้เวลามากในการทดลองหาค่าที่ถูกต้องประกอบกับตัว Encoder มีราคาแพง

ปัญหาที่ทำให้การทดลองไม่สมบูรณ์ เนื่องมาจากเครื่องมือต่างๆ หาได้ยากและมีราคาแพงเมื่อเกิดการชำรุดของเครื่องมือจึงไม่สามารถหามาเปลี่ยนได้ทัน อีกทั้งหลักการในการสร้างเครื่องมือวัดได้มีการปรับปรุงวิธีที่เสนอมานี้ในระยะเวลาที่จำกัดและใช้การทดลองกับทฤษฎีหลายๆ อย่างจึงทำให้การทดลองไม่เสร็จสมบูรณ์ในระยะเวลาที่จะกัก

ภาคผนวก ก.

แสดงไฟล์ซอร์ซแสดงการทำงานและ Source code program ของเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โพสซาร์ทแสดงการทำงานของเครื่องวัด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตยงอ้างอิงเชิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Source code program ในปริิณญาณิพนธ์

```
DATA EQU P1.4
LOAD EQU P1.5
CLOCK EQU P1.6
DATA_T EQU P1.1
LOAD_T EQU P1.2
CLOCK_T EQU P1.7
RE EQU P1.3
SENSOR EQU P3.4
```

```
DIG7 EQU 41H ;DISPLAY BUFFER DIG 7
DIG6 EQU 42H ;DISPLAY BUFFER DIG 6
DIG5 EQU 43H ;DISPLAY BUFFER DIG 5
DIG4 EQU 44H ;DISPLAY BUFFER DIG 4
DIG3 EQU 45H ;DISPLAY BUFFER DIG 3
DIG2 EQU 46H ;DISPLAY BUFFER DIG 2
DIG1 EQU 47H ;DISPLAY BUFFER DIG 1
DIG0 EQU 48H ;DISPLAY BUFFER DIG 0
DIGI7 EQU 51H
DIGI6 EQU 52H
DIGI5 EQU 53H
DIGI4 EQU 54H
DIGI3 EQU 55H
DIGI2 EQU 56H
DIGI1 EQU 57H
DIGI0 EQU 58H
```

```
HEX_MSB EQU 49H ;BUFFER VAR 16 BIT MSB
HEX_LSB EQU 4AH ;BUFFER VER 16 BIT LSB
OLD_SPEED_MSB EQU 4BH ;MEMORY FOR OLD SPEED MSB
OLD_SPEED_LSB EQU 4CH ;MEMORY FOR OLD SPEED LSB
HEX_MSB_T EQU 59H
HEX_LSB_T EQU 5AH
OT_MSB EQU 5BH
OT_LSB EQU 5CH
```

```
ORG 8100H
```

```
READ_SPEED:
```

```
MOV TMOD,#5 ;COUNTER 0 MODE 1 16 BIT
MOV TH0,#0 ;CLEAR TH0
MOV TL0,#0 ;CLEAR TL0
CLR TF0 ;CLEAR TCON.5
SETB SENSOR ;SET BIT P3.1
SETB TR0 ;START COUNTER
MOV A,#200
LCALL DELAY_MS ;DELAY 200 MS
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

```

CLR TR0      ;STOP COUNTER

MOV DPH,TH0  ;LOAD DATA FORM TH0 TO DPH
MOV DPL,TL0  ;LOAD DATA FORM TL0 TO DPL
LCALL TOQRE
LCALL HTOD   ;CALL SUB PROGRAM CONVERT HEX TO DECIMAL
MOV HEX_MSB,R2 ;VAR R2 IS MSB BCD(8 BIT BUFFER)
MOV HEX_LSB,R3 ;VAR R3 IS LSB BCD(8 BIT BUFFER)
JNB RE,OLD   ;IF SESET IS 0 GOTO OLD
MOV OLD_SPEED_MSB,R2
MOV OLD_SPEED_LSB,R3
OLD: LCALL INIT_MAX
LCALL HEX_TO_7_SEGBUF ;READ DATA FORM
HEX_MSB,HEX_LSB,OLD_SPEED_MSB
;AND OLD_SPEED_LSB AND WRITE TO DISPLAY BUFFER
LCALL SCAN   ;READ DISPLAY
BUFFER(41H,42H,43H,44H,45H,46H,47H,48H)
;TO 7 SEGMENT
JMP READ_SPEED ;READ NEW SPEED
;-----
;SUBPROGRAM DELAY TIME

DELAY_MS:
PUSH ACC
PUSH B
MOV B,#0
DD:
DJNZ B,$
DJNZ B,$
DJNZ ACC,DD

POP B
POP ACC
RET
;-----
;SUB PROGRAM HTOD

HTOD:
CLR A
MOV R1,A
MOV R2,A
MOV R3,A
MOV R4,#16
HTOD1:
MOV A,DPL
RLC A
MOV DPL,A
MOV A,DPH
RLC A
MOV DPH,A
MOV R5,#3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่มีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมายและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R0,#3
HTOD2:
MOV A,@R0
ADDC A,ACC
DA A
MOV @R0,A
DEC R0
DJNZ R5,HTOD2
DJNZ R4,HTOD1
RET

```

```

;-----
;SUBPROGRAM HEXTO7SEBUF

```

```

HEX_TO_7_SEGBUF:

```

```

MOV A,HEX_MSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIG3,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIG2,A
MOV A,HEX_LSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIG1,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIG0,A
MOV A,OLD_SPEED_MSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIG7,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIG6,A
MOV A,OLD_SPEED_LSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIG5,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIG4,A
RET

```

-----;  
;SUB PROGRAM SCAN;

SCAN:

PUSH 00  
PUSH ACC  
MOV B,#08  
MOV DPH,#08  
MOV R0,#41H

SCANLX:

MOV DPL,@R0  
LCALL SHIFT  
DEC DPH  
INC R0  
DJNZ B,SCANLX  
POP ACC  
POP 00  
RET  
-----;

-----;  
;SUB PROGRAM INIT-MAX7219

INIT\_MAX:

MOV DPTR,#0A08H ;INTENSITY(MIDDLE)  
LCALL SHIFT  
MOV DPTR,#0B07H ;SCAN LIMIT (8DIGIT)  
LCALL SHIFT  
MOV DPTR,#09FFH ;DECODE FOR DIGIT 7-0  
LCALL SHIFT  
MOV DPTR,#0C01H ;NOT SHUTDOWN(NORMAL OPR.)  
LCALL SHIFT  
MOV DPTR,#0F00H ;NOT DISPLAY TEST(NORMAL OPR.)  
LCALL SHIFT  
RET  
-----;

-----;  
;SUB PROGRAM SHIFT ADDRESS AND DATA TO MAX7219

SHIFT: MOV R2,#8 ;COUNTER ADDRESS OUT

MOV A,DPH ;GET ADDRESS

CLR CY

CLR CLOCK

CLR LOAD

SHIFT1: RLC A ;SHIFT OUT D15...D8

MOV DATA,C

SETB CLOCK ;SHIFT CLOCK

CLR CLOCK

DJNZ R2,SHIFT1

MOV R2,#8 ;COUNTER DATA OUT

MOV A,DPL ;GET DATA

```

CLR CY
SHIFT2: RLC A ;SHIFT OUT D7...D0
MOV DATA,C
SETB CLOCK ;SHIFT CLOCK
CLR CLOCK
DJNZ R2,SHIFT2
SETB LOAD ;LATCH DATA TO MAX7219
CLR LOAD
RET

```

```

;-----
;SUB PROGRAM TOQRE
;*****
;

```

```

TOQRE:
PUSH DPH
PUSH DPL
LCALL CAL_T
LCALL HTOD
MOV HEX_MSB_T,R2
MOV HEX_LSB_T,R3
JNB RE,OT
MOV OT_MSB,R2
MOV OT_LSB,R3
OT: LCALL INIT_MAX_T
LCALL HEX_TO_7_SEGBUF_T
LCALL SCAN_T
POP DPL
POP DPH
RET

```

```

;-----
;SUB PROGRAM CAL_T
;*****
;

```

```

CAL_T:
PUSH ACC
PUSH B
MOV A,DPH
MOV 0F0H,#2H
DIV AB
MOV DPH,A
MOV A,B
SWAP A
MOV R2,A
MOV A,DPL
ANL A,#0F0H
SWAP A
ADD A,R2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV 0F0H,#2H
DIV AB
SWAP A
MOV R1,A
MOV A,DPL
ANL A,#0FH
MOV R3,A
MOV A,B
SWAP A
ADD A,R3
MOV 0F0H,#2H
DIV AB
ADD A,R1
MOV DPL,A
POP B
POP ACC
RET
```

```
;SUB PROGRAM HEX TO 7 SEGBUF T
```

```
*****
```

```
HEX_TO_7_SEGBUF_T:
```

```
MOV A,HEX_MSB_T
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIGI3,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIGI2,A
MOV A,HEX_LSB_T
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIGI1,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIGI0,A
```

```
MOV A,OT_MSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIGI7,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIGI6,A
```

```
MOV A,OT_LSB
PUSH ACC
ANL A,#0F0H
SWAP A
MOV DIGI5,A
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DIGI4,A
RET
```

```
;-----
;SUB PROGRAM SCAN_T
```

```
*****
```

```
SCAN_T:
PUSH 00
PUSH ACC
MOV B,#08
MOV DPH,#08
MOV R0,#51H
SCAN_T1:
MOV DPL,@R0
LCALL SHIFT_T
DEC DPH
INC R0
DJNZ B,SCAN_T1
POP ACC
POP 00
RET
```

```
;-----
;SUB PROGRAM INIT_MAX_T
```

```
*****
```

```
INIT_MAX_T:
MOV DPTR,#0A08H
LCALL SHIFT_T
MOV DPTR,#0B07H
LCALL SHIFT_T
MOV DPTR,#09FFH
LCALL SHIFT_T
MOV DPTR,#0C01H
LCALL SHIFT_T
MOV DPTR,#0F00H
LCALL SHIFT_T
RET
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

**Table 6. Intensity Register Format**  
(Address (Hex) = XA)

DUTY CYCLE	REGISTER DATA								(HEX CODE)
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
1/32 (min on)	X	X	X	X	0	0	0	0	X0
3/32	X	X	X	X	0	0	0	1	X1
5/32	X	X	X	X	0	0	1	0	X2
7/32	X	X	X	X	0	0	1	1	X3
9/32	X	X	X	X	0	1	0	0	X4
11/32	X	X	X	X	0	1	0	1	X5
13/32	X	X	X	X	0	1	1	0	X6
15/32	X	X	X	X	0	1	1	1	X7
17/32	X	X	X	X	1	0	0	0	X8
19/32	X	X	X	X	1	0	0	1	X9
21/32	X	X	X	X	1	0	1	0	XA
23/32	X	X	X	X	1	0	1	1	XB
25/32	X	X	X	X	1	1	0	0	XC
27/32	X	X	X	X	1	1	0	1	XD
29/32	X	X	X	X	1	1	1	0	XE
31/32 (max on)	X	X	X	X	1	1	1	1	XF

### Scan-Limit Register

The scan-limit register sets how many digits are displayed, from 1 to 8. They are displayed in a multiplexed manner with a typical display scan rate of 1300Hz with 8 digits displayed. If fewer digits are displayed, the scan rate is  $8f_{OSC}/N$ , where N is the number of digits scanned. Since the number of scanned digits affects the display brightness, the scan-limit register should not be used to blank portions of the display (such as leading zero suppression). The scan-limit register format is listed in Table 7.

If the scan-limit register is set for three digits or less, individual digit drivers will dissipate excessive amounts of power. Consequently, the value of the RSET resistor must be adjusted according to the number of digits displayed, to limit individual digit driver power dissipation. Table 8 lists the number of digits displayed and the corresponding maximum recommended segment current when the internal digit drivers are used.

### Display-Test Register

The display-test register has two modes of operation, normal and display-test. Display-test mode turns all LEDs on by overriding all control and digit registers, including the shutdown register. The data in these registers is not altered. In display-test mode, 8 digits are scanned and the duty cycle is 31/32. The display-test register format is listed in Table 9.

**Table 7. Scan-Limit Register Format**  
(Address (Hex) = XB)

	REGISTER DATA								(HEX CODE)
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
*DISPLAY DIGIT 0 ONLY	X	X	X	X	X	0	0	0	X0
*DISPLAY DIGITS 0 & 1	X	X	X	X	X	0	0	1	X1
*DISPLAY DIGITS 0 1 2	X	X	X	X	X	0	1	0	X2
DISPLAY DIGITS 0 1 2 3	X	X	X	X	X	0	1	1	X3
DISPLAY DIGITS 0 1 2 3 4	X	X	X	X	X	1	0	0	X4
DISPLAY DIGITS 0 1 2 3 4 5	X	X	X	X	X	1	0	1	X5
DISPLAY DIGITS 0 1 2 3 4 5 6	X	X	X	X	X	1	1	0	X6
DISPLAY DIGITS 0 1 2 3 4 5 6 7	X	X	X	X	X	1	1	1	X7

\* See "Scan-Limit Register" text for application.

**Table 8. Maximum Segment Current for 1, 2 or 3 Digit Displays**

NUMBER OF DIGITS DISPLAYED	MAXIMUM SEGMENT CURRENT
1	10mA
2	20mA
3	30mA

**Table 9. Display-Test Register Format**  
(Address (Hex) = XF)

	REGISTER DATA							
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
NORMAL OPERATION	X	X	X	X	X	X	X	0
DISPLAY TEST MODE	X	X	X	X	X	X	X	1

### No-Op Register

The no-op register is used when cascading MAX7219s. Connect all devices' LOAD inputs together and connect DOUT to DIN on adjacent MAX7219s. DOUT is a CMOS logic level output that easily drives DIN of a successively cascaded MAX7219. Refer to the "Serial Addressing Modes" section for detailed information on serial input/output timing. For example, if four MAX7219s are cascaded, then to write to the fourth chip, send the desired 16-bit word, followed by three no-op codes (hex X0XX, see Table 2). When load goes high, data is latched in all devices. The first three chips receive no-op commands, and the fourth receives the intended data.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MAXIM

## Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

MAX7219

### General Description

The MAX7219 is a compact, serial input/output common-cathode display driver that interfaces microprocessors ( $\mu$ Ps) to 7-segment numeric LED displays of up to 8 digits, bar-graph displays, or 64 individual LEDs. Included on-chip are a BCD code-B decoder, multiplex scan circuitry, segment and digit drivers, and an 8x8 static RAM that stores each digit. Only one external resistor is required to set the segment current for all LEDs.

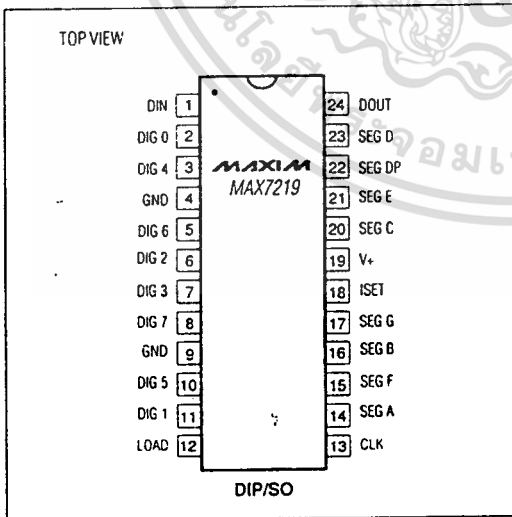
A convenient 3-wire serial interface connects to all common  $\mu$ Ps. Individual digits may be addressed and updated without rewriting the entire display. The MAX7219 also allows the user to select code-B decoding or no-decode for each digit.

The MAX7219 includes a 150 $\mu$ A low-power shutdown mode, analog and digital brightness control, a scan-limit register which allows the user to display from 1 to 8 digits, and a test mode which forces all LEDs on.

### Applications

- Bar-Graph Displays
- 7-Segment Displays
- Industrial Controllers
- Panel Meters
- LED Matrix Displays

### Pin Configuration



### Features

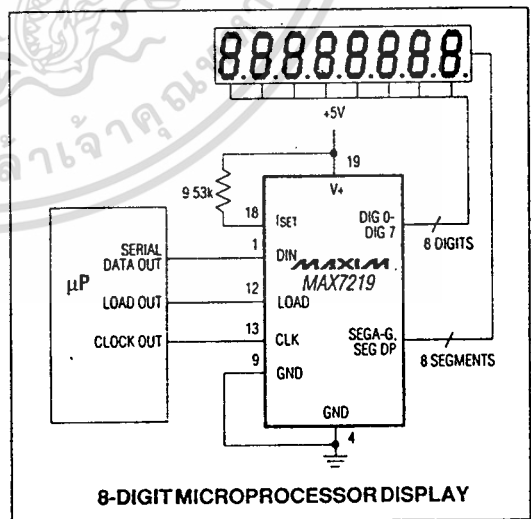
- ◆ 10MHz Serial Interface
- ◆ Individual LED Segment Control
- ◆ Decode/No-Decode Digit Selection
- ◆ 150 $\mu$ A Low-Power Shutdown (Data Retained)
- ◆ Digital and Analog Brightness Control
- ◆ Display Blanked on Power-Up
- ◆ 24-Pin DIP and SO Packages
- ◆ Drives Common-Cathode LED Display

### Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MAX7219CNG	0°C to +70°C	24 Narrow Plastic DIP
MAX7219CWG	0°C to +70°C	24 Wide SO
MAX7219C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX7219ENG	-40°C to +85°C	24 Narrow Plastic DIP
MAX7219EWG	-40°C to +85°C	24 Wide SO
MAX7219ERG	-40°C to +85°C	24 Narrow CERDIP

\* Contact factory for dice specifications.

### Typical Application Circuit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MAX7219**

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V+ Voltage	7V
DIG0-DIG7 Sink Current	500mA
SEG A-G, DP Source Current	100mA
Input Voltage (any pin)	V+ + 0.3V to -0.3V
Continuous Power Dissipation (TA = +85°C)	
Narrow Plastic DIP	0.87W
Wide SO	0.76W
CERDIP	1.1W

## Operating Temperature Ranges:

MAX7219C _ G	0°C to +70°C
MAX7219E _ G	-40°C to +85°C
Storage Temperature Range	-65°C to +160°C
Lead Temperature (soldering, 10 sec)	+300°C

Stresses beyond those listed under 'Absolute Maximum Ratings' may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V+ = 5V ±10%, RSET = 9.53kΩ ±1%, TA = TMIN to TMAX, unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Operating Supply Voltage	V+		4.0		6.0	V
Shutdown Supply Current	I <sub>o</sub>	DIN, CLK and LOAD = GND or V+, shutdown register set to 0, TA = +25°C			150	μA
Operating Supply Current	I <sub>OP</sub>	RSET = infinity			8	mA
		All segments and decimal points on, ISEGO = -40mA		330		mA
Display Scan Rate	f <sub>OSC</sub>	V+ = 5V, 8 digits scanned	500	1300	2000	Hz
Digit Drive Sink Current	I <sub>DIGI</sub>	TA = +25°C, V+ = 5V, V <sub>OUT</sub> = 0.65V	320			mA
Segment Drive Current Source	I <sub>SEGO</sub>	TA = +25°C, V+ = 5V, V <sub>OUT</sub> = V+ - 1V	-30	-37	-40	mA
Segment Drive Current Matching				3.0		%
Digit Drive Source Current	I <sub>DIGO</sub>	Digit off, V <sub>OUT</sub> = V+ - 0.3V	-2			mA
Segment Drive Current Sink	I <sub>SEGI</sub>	Segment off, V <sub>OUT</sub> = 0.3V	5			mA
<b>LOGIC INPUTS</b>						
Input Current	I <sub>I</sub>	DIN, CLK and LOAD VIN = 0V VIN = V+			-1 1	μA
Logic 1 Input Voltage	V <sub>IH</sub>		3.5			V
Logic 0 Input Voltage	V <sub>IL</sub>				0.8	V
Hysteresis Voltage		DIN, CLK, and LOAD		1.0		V
Output High Voltage	V <sub>OH</sub>	DOUT I <sub>OUT</sub> = -1mA, I <sub>OUT</sub> = 1μA	V+ - 1.0	V+		V
Output Low Voltage	V <sub>OL</sub>	DOUT, I <sub>OUT</sub> = 1.6mA			0.4	V
Data-Hold Time DATAIN to Clock	t <sub>HDH</sub>		0	-5		ns
Data-Setup Time DATAIN To Clock	t <sub>SDS</sub>		25			ns
Clock-to-Serial Output Prop Delay	t <sub>OPD</sub>	C <sub>LOAD</sub> = 50pF			25	ns
Clock Low Time	t <sub>CKL</sub>		50			ns
Clock High Time	t <sub>CKH</sub>		50			ns
Data-to-Segment Prop Delay (Note 1)	t <sub>DSPD</sub>	C <sub>LOAD</sub> = 50pF	0		2.25	ms
Load-Rising Edge to Next Clock Rising Edge	t <sub>LDCK</sub>		50			ns
Clock-to-Load Rising Edge Setup Time	t <sub>CKLD</sub>		0			ns
Load Low Time	t <sub>LDL</sub>		50			ns
Load High Time	t <sub>LDH</sub>		50			ns

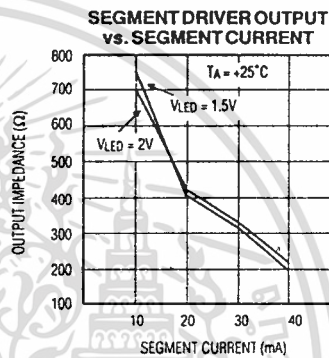
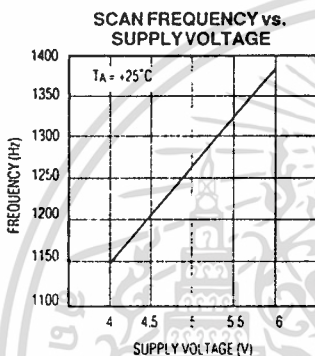
**Note 1:** Guaranteed by design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

## Typical Operating Characteristics

MAX7219



## Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	DIN	Serial Data Input. Data is loaded into an internal 16-bit shift register on the rising edge of CLK.
2, 3, 5-8, 10, 11	DIG0-7	8 digit drive lines that sink current from the display.
4, 9	GND	Ground (both GND pins must be connected)
12	LOAD	Load Data Input. On LOAD's rising edge, the last 16 bits of serial input data are latched.
13	CLK	Clock Input, 10MHz maximum rate. On CLK's rising edge, data is shifted into the internal shift register. On CLK's falling edge, data is clocked out of DOUT.
14-17, 20-23	SEG A-G, DP	7-segment drive and decimal point lines that source current to the display.
18	ISET	Connect to V+ through a resistor (RSET) to set the peak segment current (Refer to "Selecting RSET Resistor" section).
19	V+	Supply Voltage
24	DOUT	Serial Data Output. The data into DIN is valid at DOUT 16.5 clock cycles later.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

## Block Diagram

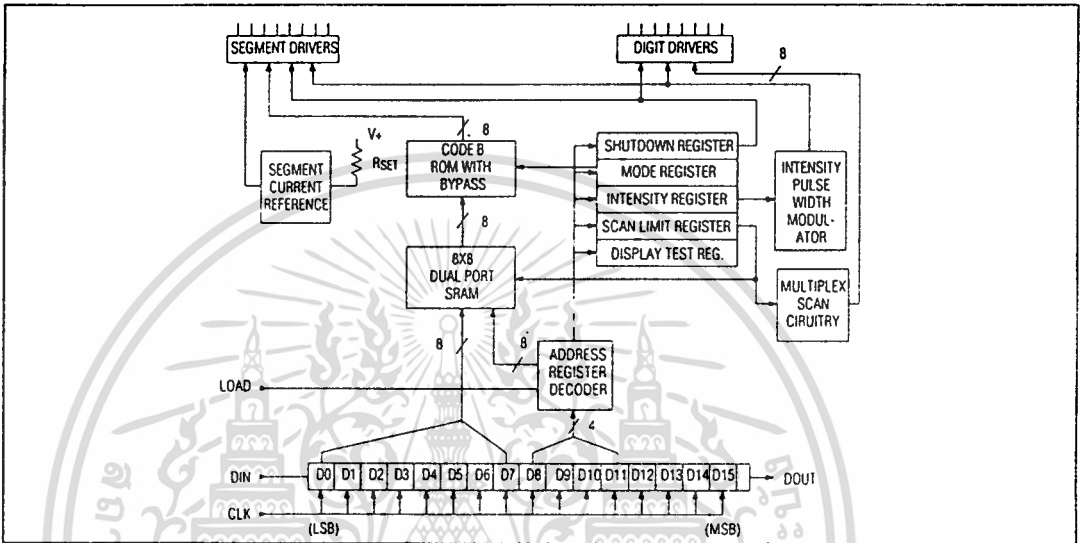


TABLE 1. SERIAL DATA FORMAT (16 BITS)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
X	X	X	X	ADDRESS				MSB				DATA				LSB

X = "don't care" bit

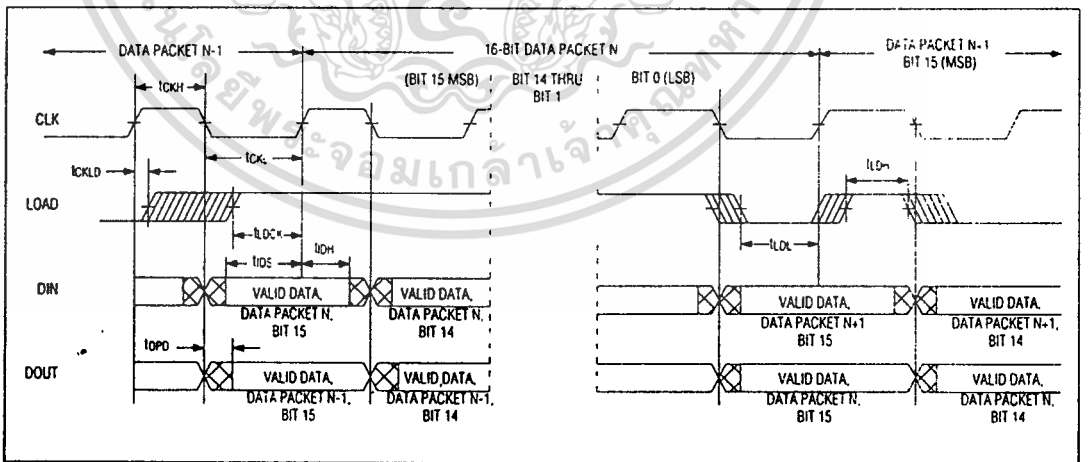


Figure 1. Timing Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

## Detailed Description

### Serial Addressing Modes

Serial data at DIN, sent in 16-bit packets, is shifted into the internal 16-bit shift register with each rising edge of CLK. The data is then latched into either the digit or control registers on the rising edge of LOAD. LOAD must go high concurrently with or after the 16th rising clock edge, but before the next rising clock edge or data will be lost. Data at DIN is propagated through the shift register and appears at DOUT 16.5 clock cycles later. Data is clocked out on the falling edge of CLK. Data bits are labeled D0-D15 (Table 1). D8-D11 contain the register address, D0-D7 contain the data, and D12-D15 are "don't care" bits. The first bit received is D15, the most significant bit (MSB).

### Digit and Control Registers

Table 2 lists the 14 addressable digit and control registers. The digit registers are realized with an on-chip, 8x8 dual-port SRAM. They are addressed directly so that individual digits can be updated and retain data as long as  $V+$  typically exceeds 2V. The control registers consist of: decode mode, display intensity, scan limit (number of scanned digits), shutdown, and display test (all LEDs on). A no-operation (no-op) register is also included, which allows data to be passed from DIN to DOUT when devices are cascaded without changing the display or affecting any control registers.

### Shutdown Mode

When the MAX7219 is in shutdown mode, the scan oscillator is halted, all segment current sources are pulled to ground, and all digit drivers are pulled to  $V+$ , thereby blanking the display. Data in the digit and control registers remains unaltered. Shutdown can be used to save power or as an alarm to flash the display by successively entering and leaving the shutdown mode. For minimum supply current in shutdown mode, logic inputs should be at ground or  $V+$  (CMOS logic levels).

Typically, it takes less than 250 $\mu$ s for the MAX7219 to leave shutdown mode. Note that the display driver can still be programmed while in shutdown mode, and that shutdown mode can be overridden by the display-test function.

Table 3. Register Address Map

REGISTER	ADDRESS					HEX CODE
	D15-D12	D11	D10	D9	D8	
NO-OP	X	0	0	0	0	X0
DIGIT 0	X	0	0	0	1	X1
DIGIT 1	X	0	0	1	0	X2
DIGIT 2	X	0	0	1	1	X3
DIGIT 3	X	0	1	0	0	X4
DIGIT 4	X	0	1	0	1	X5
DIGIT 5	X	0	1	1	0	X6
DIGIT 6	X	0	1	1	1	X7
DIGIT 7	X	0	0	0	0	X8
DECODE MODE	X	1	0	0	1	X9
INTENSITY	X	1	0	1	0	XA
SCAN LIMIT	X	1	0	1	1	XB
SHUTDOWN	X	1	1	0	0	XC
DISPLAY TEST	X	1	1	1	1	XF

Table 3. Shutdown Register Format (Address (Hex) = XC)

	ADDR CODE (HEX)	REGISTER DATA							
		D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SHUTDOWN MODE	XC	X	X	X	X	X	X	X	0
NORMAL OPERATION	XC	X	X	X	X	X	X	X	1

### Initial Power-Up

On initial power-up, all control registers are reset, the display is blanked, and the MAX7219 enters shutdown mode. Therefore the user must program the display driver prior to display use since it will initially be set to scan one digit, it will not decode data in the data registers, and the intensity register will be set to its minimum value.

### Decode-Mode Register

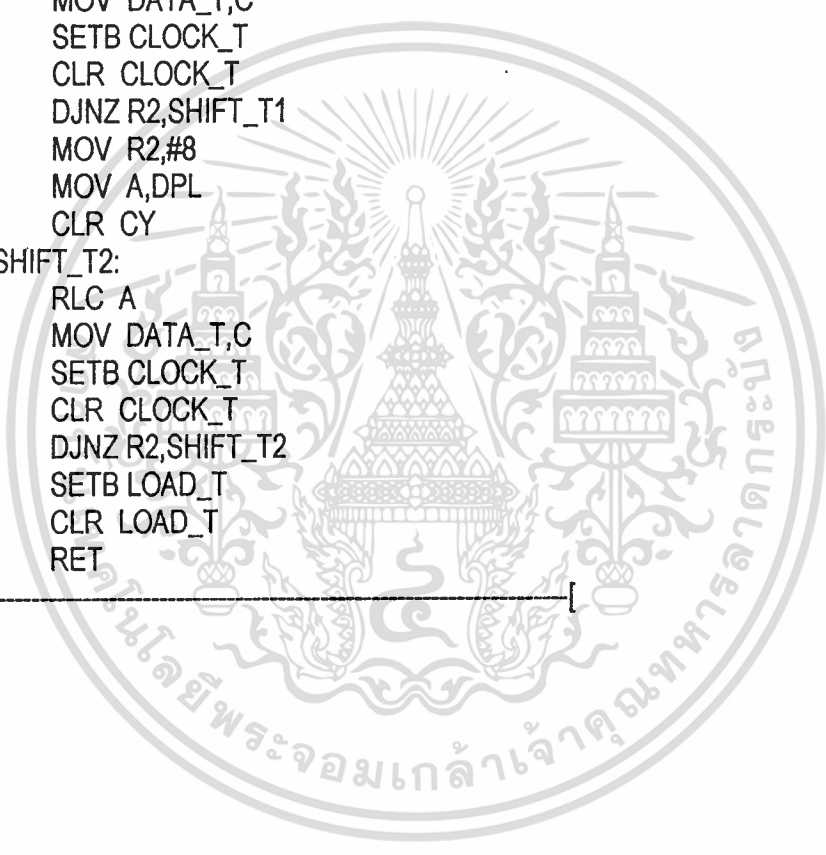
The decode-mode register sets BCD code B (0-9, E, H, L, P, and -) or no-decode operation for each digit. Each bit in the register corresponds to one digit. A logic high selects code B decoding while a logic low bypasses the decoder. Examples of the decode mode control-register format are shown in Table 4.

-----  
;SUB PROGRAM SHIFT\_T

\*\*\*\*\*

SHIFT\_T:  
MOV R2,#8  
MOV A,DPH  
CLR CY  
CLR CLOCK\_T  
CLR LOAD\_T  
SHIFT\_T1:  
RLC A  
MOV DATA\_T,C  
SETB CLOCK\_T  
CLR CLOCK\_T  
DJNZ R2,SHIFT\_T1  
MOV R2,#8  
MOV A,DPL  
CLR CY  
SHIFT\_T2:  
RLC A  
MOV DATA\_T,C  
SETB CLOCK\_T  
CLR CLOCK\_T  
DJNZ R2,SHIFT\_T2  
SETB LOAD\_T  
CLR LOAD\_T  
RET

-----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

Table 4. Decode-Mode Register Examples (Address (Hex) = X9)

	REGISTER DATA								
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	(HEX CODE)
NO DECODE FOR DIGITS 7-0	0	0	0	0	0	0	0	0	00
CODE B DECODE FOR DIGIT 0 NO DECODE FOR DIGITS 7-1	0	0	0	0	0	0	0	1	01
CODE B DECODE FOR DIGITS 3-0 NO DECODE FOR DIGITS 7-4	0	0	0	0	1	1	1	1	0F
CODE B DECODE FOR DIGITS 7-0	1	1	1	1	1	1	1	1	FF

Table 5. Code B Font

7-SEGMENT CHARACTER	REGISTER DATA							ON SEGMENTS = 1						
	D7*	D6-D4	D3	D2	D1	D0	DP*	A	B	C	D	E	F	G
0		X	0	0	0	0		1	1	1	1	1	1	0
1		X	0	0	0	1		0	1	1	0	0	0	0
2		X	0	0	1	0		1	1	0	1	1	0	1
3		X	0	0	1	1		1	1	1	1	0	0	1
4		X	0	1	0	0		0	1	1	0	0	1	1
5		X	0		0	1		1	0	1	1	0	1	1
6		X	0		1	0		1	0	1	1	1	1	1
7		X	0	1	1	1		1	1	1	0	0	0	0
8		X	1	0	0	0		1	1	1	1	1	1	1
9		X	1	0	0	1		1	1	1	1	0	1	1
-		X	1	0	1	0		0	0	0	0	0	0	1
E		X	1	0	1	1		1	0	0	1	1	1	1
H		X	1		0	0		0	1	1	0	1	1	1
L		X	1		0	1		0	0	0	1	1	1	0
P		X	1		1	0		1	1	0	0	1	1	1
blank		X	1		1	1		0	0	0	0	0	0	0

\* The decimal point is set by bit D7 = 1

When the code B decode mode is used, the decoder looks only at the lower nibble of the data in the digit registers (D3-D0), disregarding bits D4-D6. D7, which sets the decimal point (SEG DP), is independent of the decoder and is positive logic (D7=1 turns the decimal point on). The code-B font is listed in Table 5.

### Intensity Control and Interdigit Blanking

The MAX7219 allows the display brightness to be controlled with an external resistor (RSET) connected between V+ and ISET, and digitally using the intensity register. The peak current sourced from the segment drivers will nominally be 100 times the current entering ISET. This resistor can either be fixed, or variable to allow

brightness adjustment from the front panel. Its minimum value should be 9.53kΩ, which typically sets the segment current at 37mA.

Digital control of segment current is provided by an internal pulse-width modulated DAC, which is loaded from the lower nibble of the intensity register. The DAC scales the average segment current in 16 steps from a maximum of 31/32, down to 1/32 of the peak current set by RSET. The intensity register format is listed in Table 6. Maximum brightness occurs with a duty cycle of 31/32 because the interdigit blanking time is set to 1/32 of a cycle. Interdigit blanking time can be increased by decreasing the duty cycle.

# Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

## Applications Information

### Supply Bypassing and Wiring

To minimize power-supply ripple due to the peak digit driver currents, connect a 10 $\mu$ F electrolytic and a 0.1 $\mu$ F ceramic capacitor between V+ and GND as close to the device as possible. The MAX7219 should be placed in close proximity to the LED display, and connections should be kept as short as possible to minimize the effects of wiring inductance and electromagnetic interference. Also, both GND pins must be connected to ground.

### Selecting R<sub>SET</sub> Resistor and Using External Drivers

The current per segment is approximately 100 times the current in I<sub>SET</sub>. To select R<sub>SET</sub>, see Table 10. The MAX7219's maximum allowable segment current is 40mA. For an LED forward voltage drop of 2.5V, R<sub>SET</sub> must be greater than 9.53k. For segment current levels above the MAX7219 limits, external drivers will be needed. In this application, the MAX7219 serves as only a controller for other high-current drivers or transistors. Therefore, to conserve power in the MAX7219, use R<sub>SET</sub> = 47k when using external current sources as segment drivers.

The example in Figure 2 uses the MAX7219's segment drivers, a MAX333 single-pole double-throw analog switch, and external transistors to drive 4.0" AND4107SCL common-cathode displays. The 5.6V zener diode has been added in series with the decimal point LED because the decimal point LED forward voltage is typically 4.2V, while for all other segments the LED forward voltage is typically 8V. Note that since external transistors are used to sink current (DIG 0 and DIG 1 are used as logic switches), peak segment currents of 40mA are allowed even though only two digits are displayed. In applications where the MAX7219's digit drivers are used to sink current and fewer than four digits are displayed, see Table 8 which specifies the maximum allow-

Table 10. R<sub>SET</sub> vs. Segment Current and LED Forward Voltage

I <sub>SEG</sub> (mA)	V <sub>LED</sub> (V)				
	1.5	2	2.5	3	3.5
40	11.3	10.4	9.8	8.9	7.8
30	16.3	15	14	12.9	11.4
20	26.2	24.6	22.8	20.9	18.6
10	60.1	56	51.7	47	41.9

able segment current. R<sub>SET</sub> must be selected accordingly (see Table 10).

Refer to the "Power Dissipation" section to calculate acceptable limits for ambient temperature, segment current, and the LED forward-voltage drop.

Table 11. Package Thermal Resistance Data

PACKAGE	THERMAL RESISTANCE ( $\theta_{JA}$ )
24 Narrow DIP	+75°C/W
24 Wide SO	+85°C/W
24 CERDIP	+60°C/W
Maximum Junction Temperature (T <sub>J</sub> ) = +150°C	
Maximum Ambient Temperature (T <sub>A</sub> ) = +85°C	

### Computing Power Dissipation

The upper limit for power dissipation (PD) for the MAX7219 is determined from the following equation:

$$PD = (V+ \times 8mA) + (V+ - V_{LED})(DUTY \times I_{SEG} \times N)$$

where:

V+ = Supply Voltage

DUTY = Duty Cycle set by intensity register

N = number of segments driven (worst case is 8)

V<sub>LED</sub> = LED forward voltage

I<sub>SEG</sub> = Segment Current set by R<sub>SET</sub>

Dissipation Example:

I<sub>SEG</sub> = 40mA, N = 8, DUTY = 31/32, V<sub>LED</sub> = 1.8V at 40mA, V+ = 5.25V

$$PD = 5.25V(8mA) + (5.25V - 1.8V)(31/32 \times 40mA \times 8) = 1.11W$$

Thus, for a CERDIP package ( $\theta_{JA}$  = +60°C/W), the maximum allowed ambient temperature T<sub>A</sub> is given by:

$$T_{Jmax} = T_A + PD \times \theta_{JA}$$

$$+150^\circ C = T_A + 1.11W \times +60^\circ C/W$$

$$T_A = +83.4^\circ C$$

### Cascading Drivers

The example in Figure 3 drives 16 digits using a 3-wire  $\mu$ P interface. If the number of digits is not a multiple of 8, set both drivers' scan-limit registers to the same number so one display will not appear brighter than the other. For example, if 12 digits are needed, use 6 digits per display



## Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Driver

with both scan-limit registers set for 6 digits so that both displays have a 1/6 duty cycle per digit. If 11 digits are needed, set both scan-limit registers for 6 digits and leave one digit driver unconnected. If one display is set

for 6 digits and the other for 5 digits, the second display will appear brighter because its duty cycle per digit will be 1/5 while the first display's will be 1/6. Refer to the "No Op Register" section for additional information.

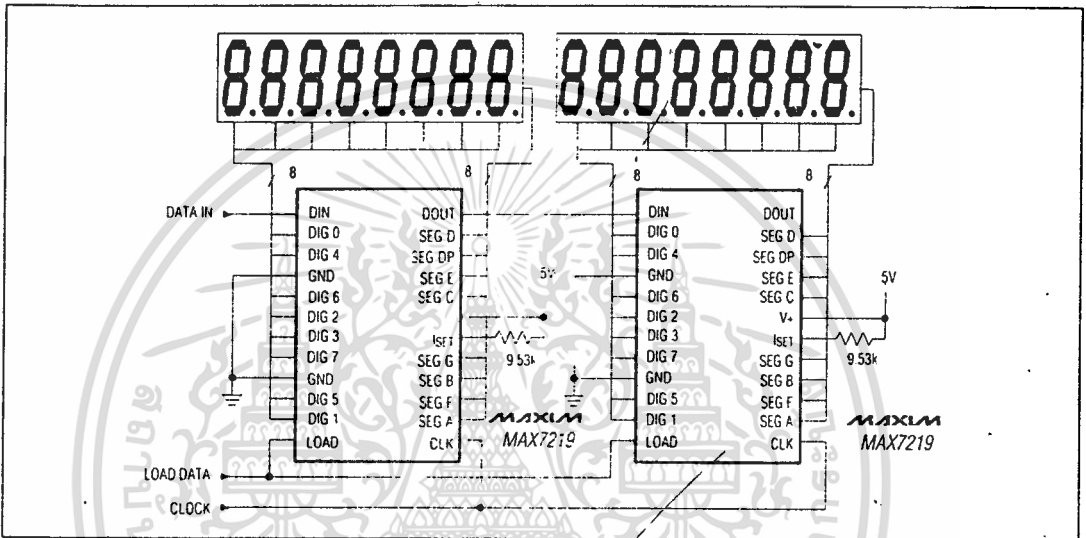
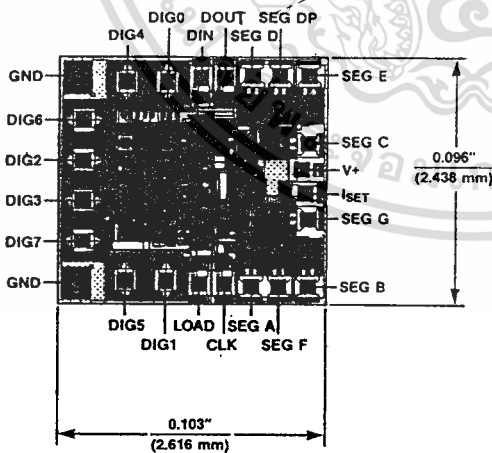


Figure 3. Cascading MAX7219s to drive 16 7-segment LED digits

### Chip Topography



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



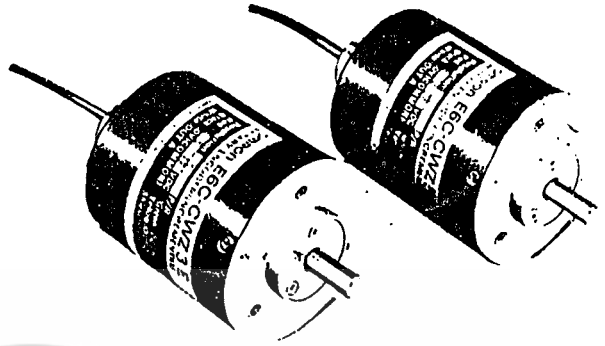
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ROTARY ENCODER (Incremental)

### E6C-C

#### Optical Incremental Encoder with Zero Index Function

- Measures only 50 mm in diameter, offers resolution as high as 1,024 pulses/revolution
- Dripproof, oilproof oil-sealed construction (conforming to IP62)
- Rigid construction: shaft loading of 4 kg (radial) and 3 kg (axial)
- Zero index function indispensable to industrial machinery added to output a reference pulse signal



#### Ordering Information

Cable outlet	Resolution (pulse/revolution)	Output type (Phase)	Supply voltage	
			5 to 12 VDC Voltage output	12 to 24 VDC Open collector output
Back	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 720, 800, 1000, 1024	A, B (reversible) and Z (zero)	E6C-CWZ3E	E6C-CWZ5C
Side			E6C-CWZ3E-F	E6C-CWZ5C-F

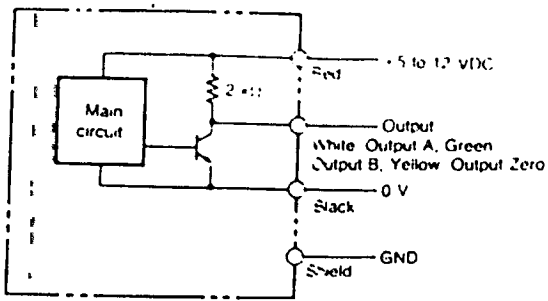
#### Specifications

Model	E6C-CWZ3E	E6C-CWZ5C
Operating voltage	5 VDC $-5\%$ to 12 VDC $+10\%$ , permissible ripple (p-p): 5% max.	12 VDC $-10\%$ to 24 VDC $+15\%$ , permissible ripple (p-p): 5% max.
Current consumption	50 mA max.	
Output capacity	Output resistance: 2 k $\Omega$ (Residual voltage: 0.4 V max. Sink current: 20 mA max.)	Applied voltage: 30 VDC max Sink current: 80 mA max. Residual voltage: 1 V max. (at 80 mA sink current) 0.4 V max. (at 20 mA sink current)
Maximum response frequency	30 kHz.	
Phase difference of output	90° $\pm 1.45^\circ$ between A and B	
Rise and fall times of output	1.0 $\mu$ s max. (at sink current of 10 mA max. with 2 m cable)	1.0 $\mu$ s max. (at supply voltage of 5 V and load resistance of 1 k $\Omega$ with 2 m cable)
Starting torque	100 g-cm max.	
Moment inertia	10 g-cm <sup>2</sup> max.	
Shaft loading	Radial	4 kg
	Axial	3 kg
Stewing speed	5000 rpm	
Ambient operating temperature	-10° to 55°C	
Degree of protection	IEC IP52F	
Vibration	10 to 55 Hz, 1.5 mm double amplitude in X, Y, and Z directions for 2 hours each	
Shock	50 G in X, Y, and Z directions 3 times each	

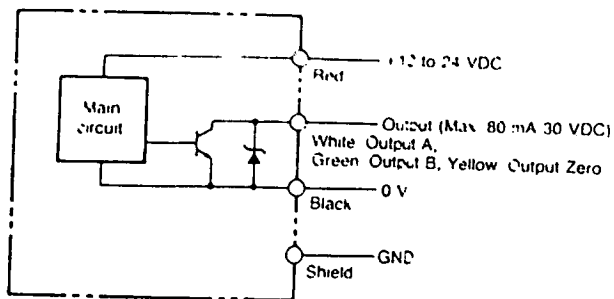
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

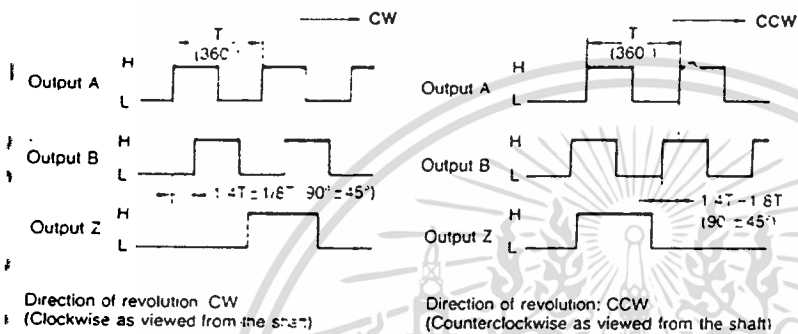
Output Stage Circuit Diagram:  
Voltage output type  
(E6C-CWZ3E)



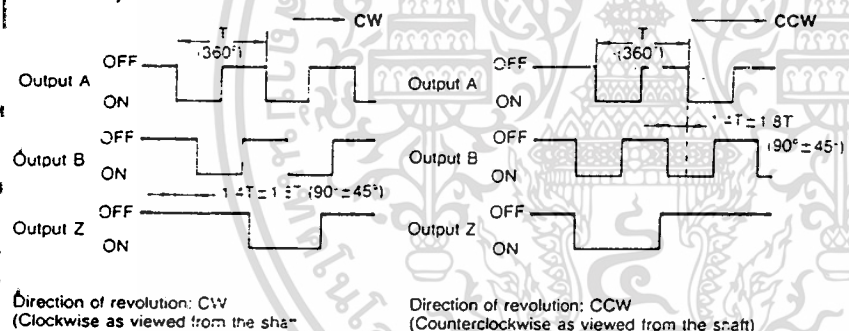
Open collector output type  
(E6C-CWZ5C)



Timing chart  
Voltage output type  
(E6C-CWZ3E)



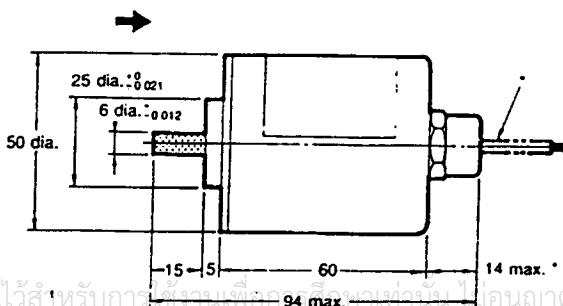
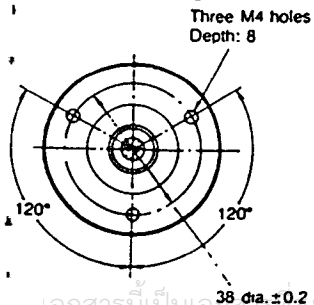
Open collector output type  
(E6C-CWZ5C)



- Note:
1. The shield of the shielded cable is connected neither internally nor to the housing.
  2. Phase output signals A, B, and Zero all have the same circuit.
  3. The voltage output type is also capable of sinking a maximum of 20 mA ( $V_{OL} = 0.4$  V)
  4. Normally connect the ground terminal (GND) to 0 V or to the earth ground.

Dimensions

Weight: approx. 400 g

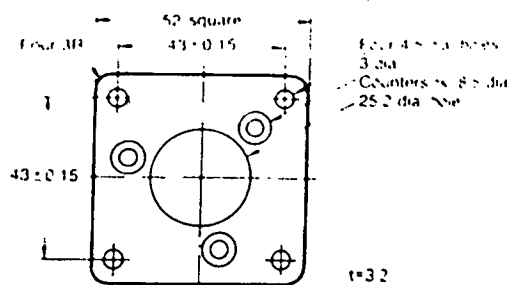
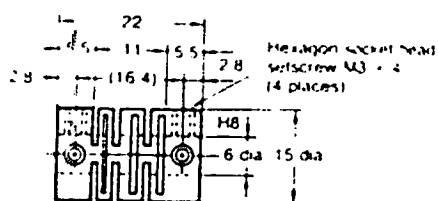


เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทโอโอมิทรอน จำกัด ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลใดๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\* Output cable (shielded)  
O.D. 3.5 dia. 5/7/0.16 dia.  
Standard length: 2 m

Coupling E69-C06B (included)

E69-FCA FLANGE (Order separately)



Note:  
 Material: Glass-filled polyacetal resin (GC-25)  
 The coupling may be used if a center offset between the encoder shaft and mating shaft is 0.5 mm or less.  
 Each setscrew must be tightened to 2.5 kg-cm torque.  
 Heat resistivity: 100°C

Material: SPCC



ALL DIMENSIONS SHOWN ARE IN MILLIMETERS.

To convert millimeters into inches multiply by 0.03937. To convert grams into ounces multiply by 0.03527.

No. Q14-E1-3 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

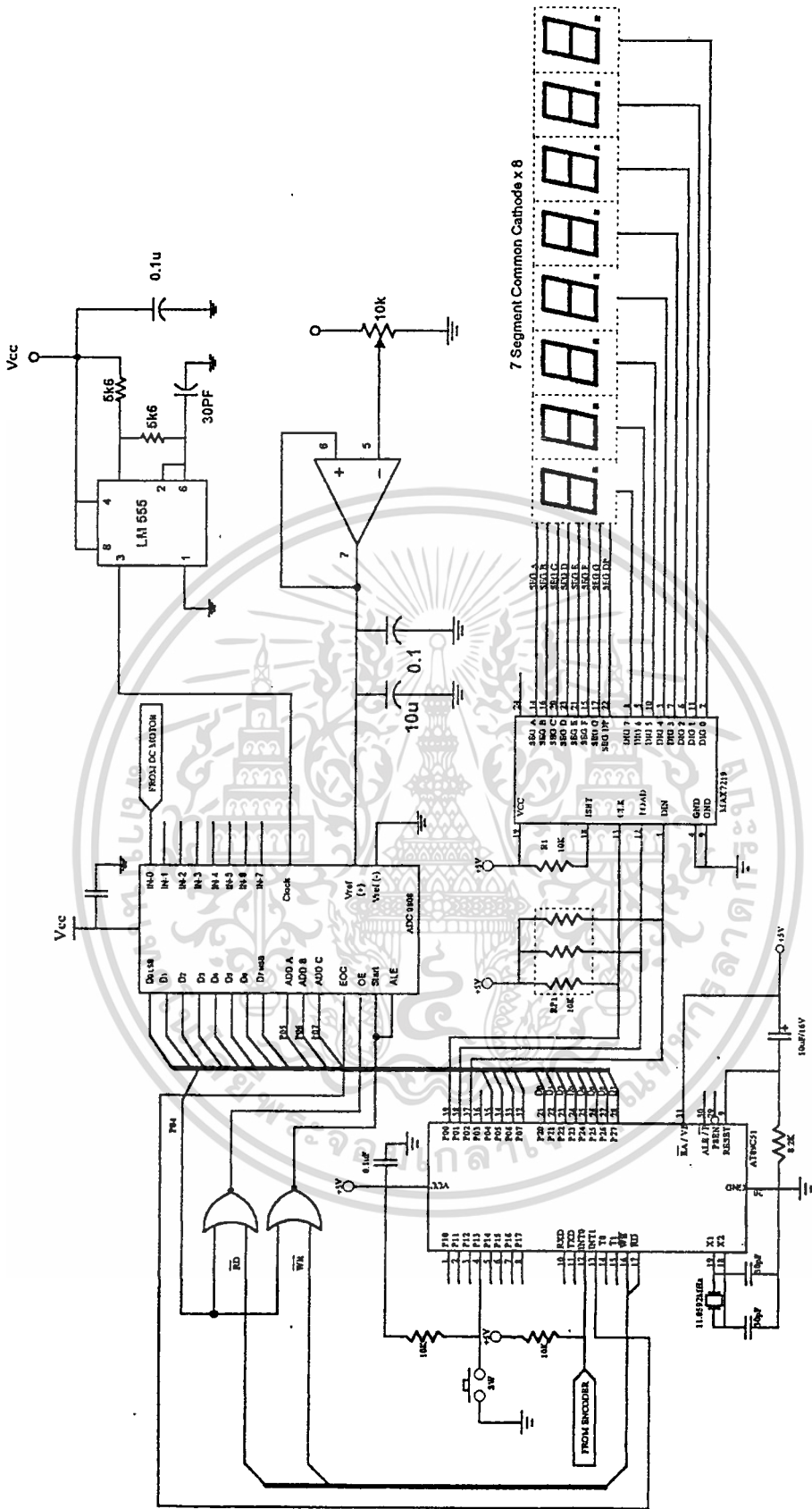
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

วงจรรวมของเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในองค์กรซึ่งมีลิขสิทธิ์และสงวนไว้สำหรับใช้ภายในองค์กร  
 รูปแสดงวงจรรวมของเครื่องวัดความเร็วรอบและแรงบิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- (1.) ไชยชาต หินเกิด. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2541
- (2.) มงคล ทองสงคราม. เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง. กรุงเทพฯ : รามาการพิมพ์, 2538
- (3.) ศุนทร วิทูรพจน์. การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล 8051. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2537
- (4.) โยธิน เปรมปราวณีรัชต์. วิเคราะห์และออกแบบ ระบบควบคุมมอเตอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2526
- (5.) ศุนทร วิทูรพจน์. การโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้