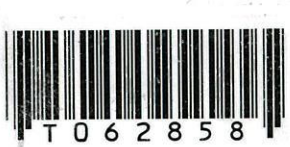
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบการวัดและควบคุมกระบวนการแบบไร้สาย

WIRELESS MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEM



โดย

นายจรัญ แสนสุข

นายชาญชัย วงษ์วิจารณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์

ปพ. จ415ว 2547

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 62858

วัน,เดือน,ปี 23 ส.ค. 2549

ข 41554133

ง.....

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบการวัดและควบคุมกระบวนการแบบไร้สาย

ผู้จัดทำ

1. นายจรัญ แสนสุข รหัสประจำตัว 45015314
2. นายชาญชัย วงษ์วิจารณ์ รหัสประจำตัว 45015317

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการวัดและควบคุมกระบวนการแบบไร้สาย

นายจรัญ แสนสุข
นายชาญชัย วงษ์วิจารณ์
ผศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบการวัดและควบคุมกระบวนการแบบไร้สาย ระบบการวัดและควบคุมแบบไร้สายที่นำเสนอนี้ สามารถทำการควบคุมกระบวนการที่ต้องการ โดยแสดงผลการทำงานแบบเวลาจริงผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ การควบคุมและประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS- 51 จะติดต่อสื่อสารข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุ 433 MHz ในที่นี้ได้นำไปประยุกต์ใช้งานในการควบคุมกระบวนการระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นเป็นไปตามที่ต้องการ

Abstract

The wireless measurement and control system is designed and proposed in this project. The proposed system can be controlled the process parameters, and displayed the status of the process variable via a computer's screen. The communication between microcontroller MCS-51 and computer is based on the use of a radio frequency of 433 MHz. As an application example, he cold conditioner system in two step press type is used which the control results are closed agreement with the desired valve.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ

หน้า

สารบัญรูปภาพ

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตโครงงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น 3

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C 3

2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C 4

2.3 หลักการทำงานของบัส I^2C 5

2.4 การทำงานบนบัส I^2C 7

2.5 อุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ I^2C 9

2.6 การเขียนโปรแกรมติดต่อบัส I^2C 11

2.7 รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรม SCON 12

2.8 การกำหนดอัตรารับส่ง 16

2.9 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ 18

2.10 โครงสร้างภายในของ MCS-51 18

2.11 พอร์ตของ 8051 21

2.12 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาของ 8051 26

2.13 ผังสัญญาณเวลาซีพียู 27

2.14 การแบ่งประเภทของหน่วยความจำ 29

บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นของระบบทำความเย็น 31

3.1 บทนำ 31

3.2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น 32

3.3 การออกแบบระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นและอุปกรณ์ต่างๆ 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ระบบควบคุมระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น 39

4.1 หลักการทำงาน 39

4.2 วงจรการรับข้อมูลและสั่งงาน 42

4.3 กระบวนการวัดและควบคุมกระบวนการ 44

4.4 ผลการทดลอง 48

บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป

5.1 บทวิจารณ์และสรุป 54

5.2 ปัญหาในการทำงาน 54

5.3 สรุปผลการทำงาน 54

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก โปรแกรมสั่งงานทางผู้ใช้งาน

ภาคผนวก ข คู่มือไอซี(Data sheet)

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆบนระบบบัส I^2C	3
รูปที่ 2.2	การต่อตัวต้านทานพูลอัพบนสายสัญญาณในระบบบัส I^2C	4
รูปที่ 2.3	การต่อตัวต้านทาน Rs เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I^2C	5
รูปที่ 2.4	ผังสัญญาณเวลาแสดงสถานะต่างๆ ในบัส I^2C	7
รูปที่ 2.5	รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเอรสที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต	8
รูปที่ 2.6	วงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 กับอุปกรณ์ระบบบัส	10
รูปที่ 2.7	บล็อกไดอะแกรมของ MCS-51	19
รูปที่ 2.8	ตำแหน่งของรีจิสแตอร์ต่าง ๆ	20
รูปที่ 2.9	การจัดวางขาของ MCS-51	20
รูปที่ 2.10	โครงสร้าง พอร์ต 0 (บิต)	21
รูปที่ 2.11	โครงสร้างของพอร์ต 1 (บิต)	22
รูปที่ 2.12	โครงสร้างของพอร์ต 2 (บิต)	23
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของพอร์ต 3 (บิต)	24
รูปที่ 2.14	การต่อบารีเซ็ทให้กับ 8051	25
รูปที่ 2.15	วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาของ 8051	26
รูปที่ 2.16	ผังเวลาการทำงานของคำสั่ง	27
รูปที่ 2.17	แสดงผังเวลาการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก	28
รูปที่ 2.18	ผังเก็บความจำ	29
รูปที่ 3.1	หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น	33
รูปที่ 3.2	หอผสม	35
รูปที่ 3.3	วาล์วขยาย (expension valve)	36
รูปที่ 3.4	วาล์วขยายขับด้วยสเตปมอเตอร์	36
รูปที่ 3.5	การติดตั้งมาตรวัดความดันในระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 บล็อคไดอะแกรม แสดการทำงานของระบบควบคุม 40
รูปที่ 4.2 ระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น 41
รูปที่ 4.3 วงจรการรับข้อมูลและสั่งงาน 42
รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการติดต่อคอมพิวเตอร์กับ MCS-51 43
รูปที่ 4.5 วงจรการวัดและควบคุมกระบวนการ 45
รูปที่ 4.6 วงจรการต่อไมโครลคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ 45
รูปที่ 4.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง +5V และ 12V 46
รูปที่ 4.8 หน้าต่างแสดงผล 47
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทางเข้าและออกหอระเหย 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงงาน

ในปัจจุบันนี้ไม่ว่าจะเป็นงานด้านอุตสาหกรรมหรือแม้แต่ชีวิตประจำวันของมนุษย์จะมีการสร้างเครื่องอำนวยความสะดวกมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ การควบคุมแบบไร้สายก็เป็นส่วนหนึ่งในสิ่งที่อำนวยความสะดวกทั้งหลาย ซึ่งสามารถดูผลการเปลี่ยนแปลงต่างๆของการวัด และสามารถสั่งการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ได้ทันที หรือควบคุมให้ระบบมีการทำงานเป็นไปตามความต้องการได้ โดยไม่ต้องเดินสายสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุมและเครื่องมือวัดไปยังคอมพิวเตอร์ให้ยุ่งยาก เพราะจะใช้การติดต่อผ่านทางคลื่นวิทยุแทน จึงทำให้เกิดความคล่องตัว มีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น

โครงงานนี้จึงได้นำเสนอการออกระบบควบคุมแบบไร้สายเพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิในห้องทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นตอน เพื่อให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ซึ่งการควบคุมแบบไร้สายนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำอีกทั้งเทคโนโลยีในการสร้างไม่ได้มีความซับซ้อนมากนัก

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานตลอดจนคุณลักษณะต่างๆ ของ MCS – 51
2. เพื่อศึกษาและออกแบบการอินเตอร์เฟสผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS 232 ของคอมพิวเตอร์
3. เพื่อศึกษาการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานตัวรับส่งข้อมูลและ MCS – 51
4. สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นได้
5. สามารถสั่งการ ควบคุม และแสดงสถานะการทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตโครงงาน

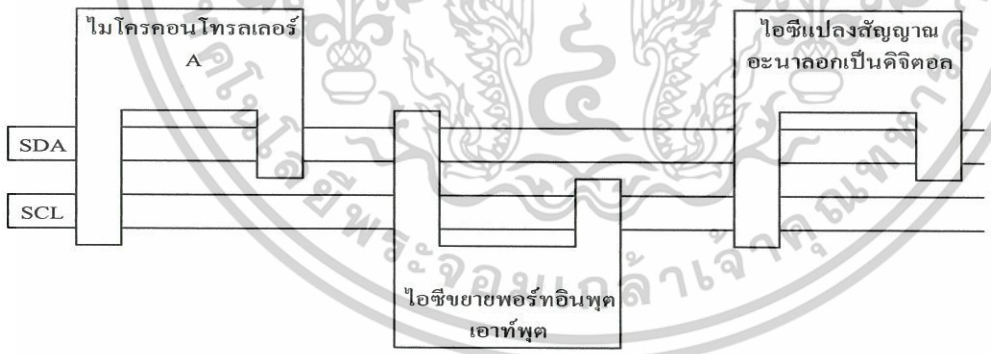
1. สามารถวัดค่าอุณหภูมิโดยเซนเซอร์และสามารถควบคุมกระบวนการที่ต้องการได้แบบเวลาจริง
2. การติดต่อรับส่งข้อมูลโดยผ่านทางความถี่วิทยุ UHF 2.4 GHz
3. การควบคุมและสั่งงานโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม
4. สามารถควบคุมอุณหภูมิ สั่งการ และแสดงผลการทำงาน ของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น ผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้
5. สามารถแสดงผลการทำงานของกระบวนการจำลองให้เป็นไปตามต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C

I^2C ย่อมาจากคำว่า Inter-IC communication ซึ่งหมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างไอซี ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยบริษัทฟิลิปส์จำกัดด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อสั่งงาน และควบคุมภายใต้สายสัญญาณ 2 เส้น เส้นหนึ่งสายข้อมูลอีกเส้นหนึ่งสายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I^2C สามารถทำได้ง่ายมากเพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวจะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสภาวะลอจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว สายข้อมูลบนบัส I^2C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่าสายข้อมูลอนุกรมหรือ SDA (Serial Data Line) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกามีชื่อเรียกว่าสายสัญญาณนาฬิกาอนุกรมหรือ SCL (Serial Clock Line) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า สาย SDL และ สาย SCL



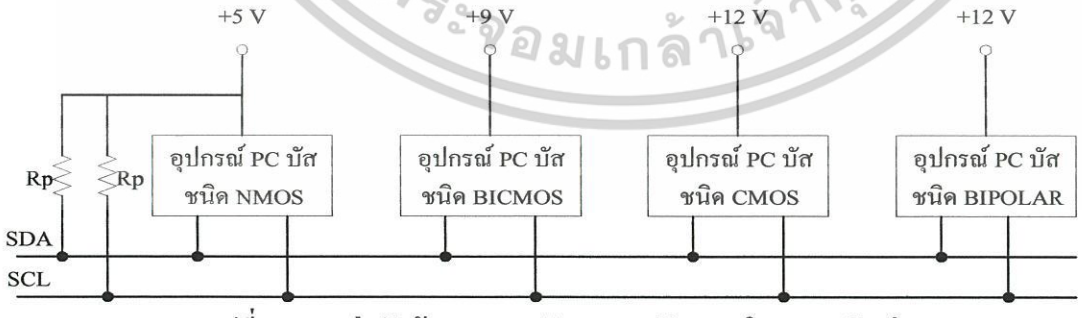
รูปที่ 2.1 ผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ บนระบบบัส I^2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.1 แสดงผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆบนบัส I^2C จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อบนบัส I^2C มีหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นไอซีขยายพอร์ตอินพุต-เอาท์พุต (I\O Expander) ไอซีแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog-To-Digital Converter,ADC) และแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก (Digital-To-Analog Converter, DAC) หรือไอซีเรียลไทม์ล็อก (Real Time Clock, RTC) เป็นต้น

2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C

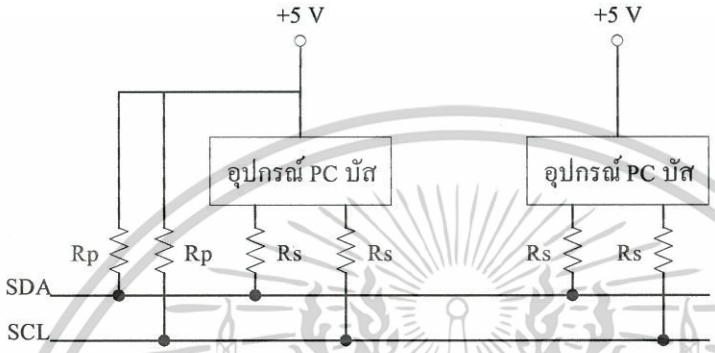
สาย SDA และ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (bi-directional line) ต้องมีการต่อตัวต้านทานพูลอัพกับแรงดัน +5 V ไว้ตลอดเวลาเพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงในขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งานทั้งยังช่วยในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสองวงจรเอาท์พุตของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I^2C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรเดรนเปิด (open-drain) หรือคอลเล็กเตอร์เปิด (open-collector) อัตราการถ่ายทอดข้อมูลบนบัส I^2C สูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปกติ (standard mode) และสูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง (fast mode) อุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่บนบัส I^2Cจะต้องมีค่าความจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นระหว่างสาย SDA และ SCL ไม่เกิน 400pF การเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C ใช้ข้อมูลสำหรับการเข้าถึง 2 ค่าคือ 7 บิต (7-bit addressing) หรือ 10 บิต (10-bit addressing) ข้อดีอีกประการหนึ่งของบัส I^2C คือสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยอุปกรณ์บนบัส I^2C ตัวหนึ่งอาจใช้ไฟเลี้ยง +5V ในขณะที่อีกตัวหนึ่งใช้ไฟเลี้ยง +12V การต่อร่วมกันบน I^2C สามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกับกรณีที่อุปกรณ์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยงต่างกัน กล่าวคือให้ต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน และต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ (Rp) เข้ากับแรงดัน +5V ไว้เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การต่อตัวต้านทานพูลอัพบนสายสัญญาณในระบบบัส I^2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อาจจะมีแรงดันไฟกระชากขนาดใหญ่ ปะปนเข้ามาในบัส I^2C ที่ขา SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวต้องต่อตัวต้านทาน R_S อนุกรมกับขาSDAและSCLก่อนต่อเข้าสู่บัส I^2C ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อตัวต้านทาน Rs เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I^2C

2.3 หลักการทำงานของระบบบัส I^2C

ระบบบัส I^2C ประกอบด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ SDA และ SCL อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงบนบัสสามารถมีได้มากมาย ดังนั้นจึงมีการกำหนดรูปแบบของการติดต่อบนบัสหรือโปรโตคอล (protocol) เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่า ขณะนี้มีอุปกรณ์ใดติดต่อกันอยู่ และอุปกรณ์ตัวใดเป็นตัวรับหรือตัวส่ง ต่อไปนี้จะขออธิบายลักษณะ หน้าที่และนิยามของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนระบบบัส I^2C

อุปกรณ์ที่เป็นผู้สร้างข้อมูลหรือส่งข้อมูล เรียกว่าตัวส่ง (transmitter) อุปกรณ์ที่เป็นผู้รับข้อมูล เรียกว่าตัวรับ (receiver) ในอุปกรณ์บนบัส I^2C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่งบางอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวรับอย่างเดียว จะไม่มีอุปกรณ์ใดบนบัส I^2C ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งเพียงอย่างเดียวอุปกรณ์ที่ทำหน้าควบที่คุมจังหวะการติดต่อบนบัส I^2C เรียกว่า มาสเตอร์ (master) อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I^2C เรียกว่า สเลฟ (slave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดที่สำคัญ 2 ปะการสำคัญของการติดต่อบนบัส I^2C คือ

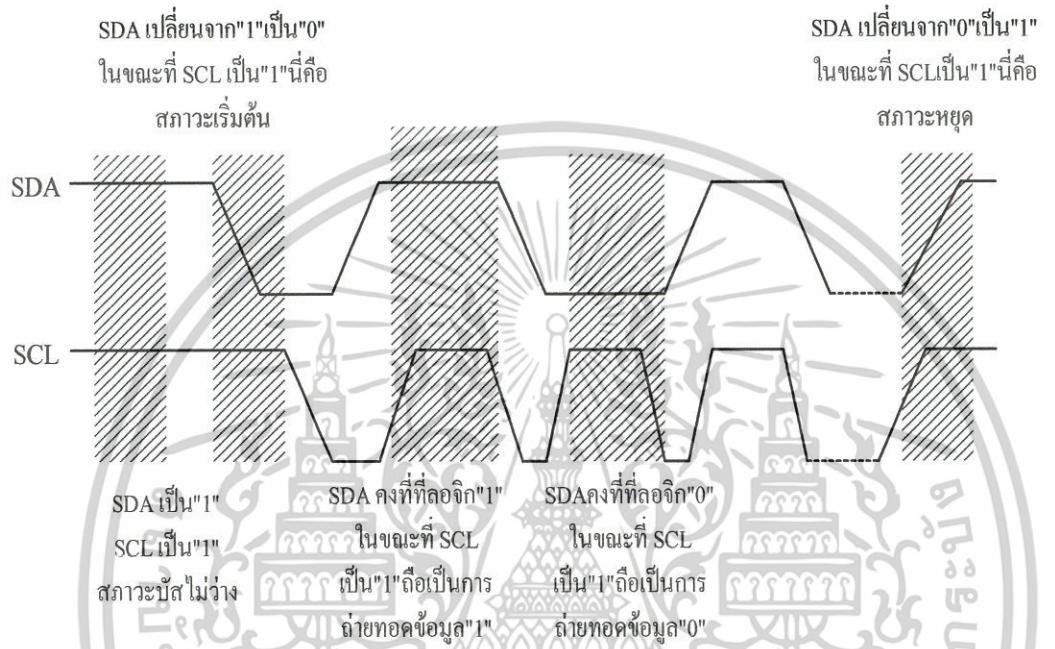
- การถ่ายทอดข้อมูลจะเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น
- ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูงสายข้อมูลจะรักษาข้อมูลไว้ อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเด็ดขาด มิฉะนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้นจะได้รับการแปลความหมายเป็นสัญญาณควบคุมแทน

สภาวะที่เกิดขึ้นบนบัส I^2C มีด้วยกัน 5 สภาวะ ดังนี้

1. บัสว่าง (bus not busy) สภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่อสถานะลอจิกบนสาย SDA และ SCLเป็นลอจิกสูงทั้งคู่นั่นหมายความว่า การถ่ายทอดข้อมูลสามารถเริ่มต้นขึ้นได้
2. เริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูล (start data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาวะเริ่มต้น(start)
3. หยุดการถ่ายทอดข้อมูล (stop data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการแปลงเปลี่ยนระดับลอจิกจากต่ำไปสูง ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นว่า สภาวะหยุด (stop)
4. ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส (data valid) สภาวะนี้เกิดขึ้นถัดจากสภาพวะเริ่มต้น โดยสถานะลอจิกที่เกิดขึ้นบนสาย SDA ก็คือข้อมูลที่ทำการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสูงสถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ข้อมูลในจังหวะนั้นว่า เป็น “0”หรือ “1” ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการให้เกิดการถ่ายทอดข้อมูลอย่างสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่ขา SDA ต้องคงที่ตลอดช่วงเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะลอจิกในขณะที่สาย SCL มีลอจิกสูงอยู่นั้น อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ทำการควบคุมการถ่ายทอดข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสภาวะหยุดหรือสภาวะเริ่มต้นก็ได้ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดอาจผิดพลาดไป
5. รับรู้ข้อมูล (acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากที่การถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิตเรียกว่าบิตรับรู้ (acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์มาสเตอร์จะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกาเพื่อตอบสนองบิตรับรู้ที่ส่งมาจากตัวส่ง ทางด้านตัวรับจะส่งบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำลงบนบัส อุปกรณ์สเลฟที่ถูกอ้างถึงในการติดต่อ หรือกำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำเนิดบิตรับรู้เพื่อตอบสนองให้ทราบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับข้อ มูลในแต่ละบิตเรียบร้อยแล้วในรูปที่ 2.3 เป็นไดอะแกรมเวลาที่แสดงถึงการเกิดสภาวะต่างๆบนบัส I^2C ไม่ว่าจะเป็นสภาวะบัสว่าง เริ่มต้น ถ่ายทอดข้อมูล รับรู้ และหยุดการถ่าย ทอดข้อมูล



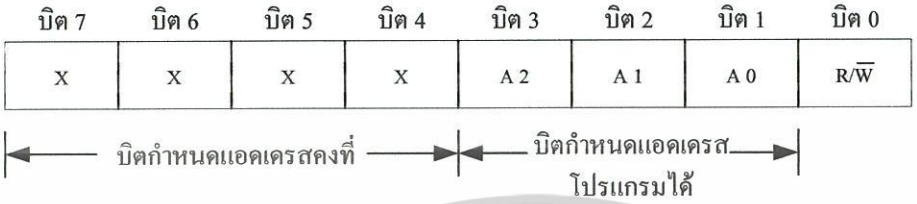
รูปที่ 2.4 ผังสัญญาณเวลาแสดงสถานะต่างๆในบัส I^2C

2.4 การทำงานบนบัส I^2C

ก่อนที่จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่บนบัสต้องมีการอ้างถึงเสียก่อนโดยการอ้างถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C นั้นจะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตหรือ 10 บิต ในกรณีที่มีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสไม่มาก ใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอ แต่ถ้ามีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสมากกว่า 127 แอดเดรส จำเป็นต้องใช้การอ้างถึงแบบ 10 บิต หลังจากที่ติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้เรียบร้อยแล้วก็จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลกันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นหัวใจสำคัญอันดับแรกของการทำงานบนบัส I^2C คือการอ้างถึงอุปกรณ์แต่ละตัว ซึ่งในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของการอ้างถึงทั้ง 2 รูปแบบ



รูปที่ 2.5 รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเอรสที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต

2.4.1 การอ้างถึงแบบ 7 บิต (7-bit addressing)

ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังจากสภาวะเริ่มต้นคือ ข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อหรือข้อมูลกำหนดแอดเดรส โดยมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 2.5 ใน 7 บิตบนรวมทั้งบิต MSB ด้วยจะเป็นข้อมูลแอดเดรสของอุปกรณ์สเลฟที่ต้องการติดต่อ โดยแบ่งเป็น บิตกำหนดแอดเดรสคงที่ (fixed address bit) จำนวน 4 บิต ซึ่งข้อมูลนี้อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิตเป็นบิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (programmable address bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้กับขา A0-A2 ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I^2Cส่วนในแบบ LSB เป็นที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์ สเลฟตัวนั้นๆ หากบิต LSB เป็น “0” หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลควบคุม (control byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวมีการกำหนดข้อมูลควบคุมแตกต่างกันไปยกตัวอย่างไอซีขยายพอร์ตมีข้อมูลควบคุมที่ใช้กำหนดว่า บิตใดเป็นอินพุต บิตใดเป็นเอาท์พุตในขณะที่ไอซี ADC/DAC ต้องการข้อมูลควบคุมเพื่อกำหนดให้ทำงานเป็นวงจร ADC หรือ DAC เป็นต้น ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดจริง (data) หลังจากที่มีการถ่ายทอดข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณรับรู้ตอบกลับมาทุกครั้ง เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การอ้างถึงแบบ 10 บิต

ในการอ้างถึงแบบนี้ยังคงใช้รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกันแบบ 7 บิต หากแต่จะมีข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกันแบบ 7 บิตหากแต่ยังมีข้อมูลเพิ่มเติมขึ้นมาเล็กน้อย โดยในข้อมูลไบต์แรกหลังจากเกิดสภาวะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิตบนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิตถัดมาเป็นบิตแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรกยังคงเป็นการกำหนดว่า ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลแอดเดรสในไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุม ข้อมูลหลังจากนั้นก็จะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อเช่นเดียวกับการอ้างถึงแบบ 7 บิต หลังจากการถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสภาวะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้

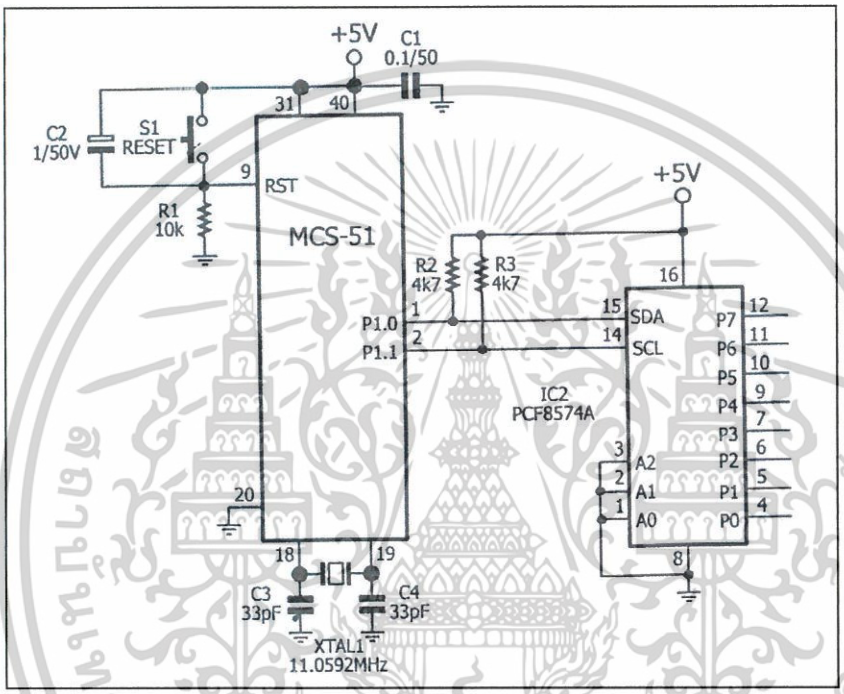
2.5 อุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ บัส I^2C

ในปัจจุบันบัสI^2Cได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆด้วยข้อดีที่ชัดเจนคือใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น และการขยายระบบไมโครคอลโทรลเลอร์ ที่มีจำนวนอินพุตเอาท์พุตและหน่วยความจำจำกัดสามารถทำได้ง่ายขึ้นด้วยระบบบัสI^2Cเมื่อเป็นเช่นนี้จึงมีอุปกรณ์เพอริเฟอรัลที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบบัส I^2C มากมายจากหลายผู้ผลิตออกมาให้ได้ใช้งาน ดังมีตัวอย่างต่อไปนี้

- ไอซีขยายพอร์ตอินพุต-เอาท์พุต (I/O expander) : PCF8574, PCF8582, PCF8584
- ไอซีหน่วยความจำอีพรอมอนุกรม (serial EEPROM) : 24Cxx, PCF8570, PCF72/73, PCF8582
- ไอซี ADC/DAC : PCF8591
- ไอซีเรียลไทม์คล็อก (Real-time clock, RTC) : PCF8583, PCF8593, PCF8598, 41T56c
- ไอซีขับ LCD (LCD driver) : PCF8466, PCF8576, PCF8577/78, PCF8579, SAA1064
- ไอซีกำเนิดสัญญาณ DTMF (DTMF generator) : PCD3311/12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เข้ากับระบบบัส I^2C นั้นสามารถทำได้ เพียงใช้ขาพอร์ต 2 ขา โดยกำหนดให้ขาหนึ่งเป็น SDA อีกขาหนึ่งเป็น SCL และต่อตัวต้านทานค่าประมาณ 4.7kΩ พูลอัพที่ขาพอร์ตทั้งสองขา เพียงเท่านี้ก็สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ระบบบัส I^2C ได้แล้ว



รูปที่ 2.6 วงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 กับอุปกรณ์ระบบบัส

รูปที่ 2.6 แสดงวงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เข้ากับระบบบัส I^2C จากวงจรจะใช้ขาพอร์ต P1.0 เป็นขา SDA และ P1.1 เป็นขา SCL อุปกรณ์ที่ทำการติดต่อด้วยคือไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุทเบอร์ PCF8574

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเขียนโปรแกรมติดต่อบัส I^2C

เริ่มต้นด้วยการสร้างสภาวะมาตรฐานของบัส I^2C อันประกอบด้วย สภาวะเริ่มต้น สภาวะสิ้นสุดการส่งข้อมูล สภาวะหยุด และสัญญาณนาฬิกาบนขา SCL การสร้างสภาวะหยุด

เมื่อต้องการหยุดส่งข้อมูลจะต้องส่งสภาวะหยุดออกไป โดย

1. ต้องกำหนดให้ขา SCL และ SDA เป็นลอจิก “0” ทั้งคู่ก่อน
2. กำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น “1” โดย SDA ยังคงมีลอจิกเป็น “0”
3. จากนั้นทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น “1” ซึ่งจะทำให้ระบบบัสกลับเข้าสู่บัสว่างอีกครั้ง พร้อมที่จะรับหรือส่งข้อมูลต่อไป

<u>การส่งข้อมูลลอจิก “0” และลอจิก “1”</u>

หลังจากที่ทำการส่งบิตเริ่มต้นแล้ว ลำดับต่อไปคือ จะต้องส่งข้อมูลควบคุมซึ่งจะเป็นขบวนการของลอจิก “0” และลอจิก “1” สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก “0” ต้องดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ขา SDA เป็น “0” สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก “0”
2. ทำให้ขา SCL เป็น “1” สำหรับการป้อนสัญญาณนาฬิกา ในขณะที่ขา SDA ยังคงเป็น “0” อยู่
3. จากนั้นทำให้ขา SCL กลับมามีสถานะเป็นลอจิก “0”เหมือนเดิม

<u>ในขณะที่การส่งข้อมูลลอจิก “1” มีขั้นตอนดังนี้</u>

1. ทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น “1” สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก “1”
2. ทำให้ขา SCL เป็น “1” สำหรับการส่งสัญญาณนาฬิกา ในขณะที่ขา SDA ยังคงเป็น “1”อยู่
3. จากนั้นทำให้ขา SCL เป็น “1” กลับมามีสถานะเป็นลอจิก “0” เหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรม (Serial Port Control Register)

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรม SCON เป็นรีจิสเตอร์เฉพาะที่ทำหน้าที่ควบคุมโหมดการทำงานของพอร์ตอนุกรม และเป็นที่เก็บข้อมูลบิตที่ 9 ของการรับส่งข้อมูล (บิต TB8 และ RB8) และมีแฟลกของการร้องขออินเตอร์รัพของพอร์ตอนุกรมรวมอยู่ด้วย การควบคุมการทำงานเราจะกำหนดบิตต่างๆ ในรีจิสเตอร์ตัวนี้ด้วยคำสั่งการ โอนย้ายข้อมูลหรือใช้คำสั่งการเซตหรือเคลียร์บิตก็ได้เนื่องจากรีจิสเตอร์ SCON อ้างตำแหน่งแบบบิตได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	T1	R1

SCON : Serial Port Control Register

ความหมายของบิตต่างๆในรีจิสเตอร์ SCON เป็นดังนี้

SM0 และ SM1 : เป็นบิตกำหนดโหมดการทำงานของพอร์ตอนุกรมซึ่งมี 4 โหมดการทำงานดังตารางที่ 2.2

SM0	SM1	โหมด	การทำงาน	อัตรารับส่ง
0	0	0	shift register	$f_{osc}/12$
0	1	1	8 bit UART	Variable
1	0	2	9 bit UART	$f_{osc}/32$ หรือ $f_{osc}/64$
1	1	3	9 bit UART	Variable

ตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SM2 : เป็นบิตควบคุมให้ทำงานในลักษณะการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์หลายตัวเข้าด้วยกันสำ-หรับการใช้งานในโหมด 2 หรือโหมด 3เป็นดังนี้

SM2 = 1 จะทำให้มีแฟลกอินเตอร์รัพต์ทางด้านรับ (RI) ไม่ถูกเซตเมื่อรับข้อมูลเข้ามาแล้วมีค่าบิตที่ 9 เป็น 0 (อยู่ในบิต RB8) สำหรับการทำงานในโหมด 1 ถ้าเซต SM2 = 1 แฟลกอินเตอร์รัพต์ทางด้านรับ (แฟลก RI) จะไม่ถูกเซตหากข้อมูลที่รับเข้ามาไม่มี STOP BIT การใช้งานในโหมด 0 ต้องกำหนดให้ SM2 = 0

REN : เซตหรือรีเซตด้วยซอฟต์แวร์เป็นตัวควบคุมการรับข้อมูลของพอร์ตอนุกรมดังนี้

1 = ให้มีการรับข้อมูล

0 = ไม่ให้มีการรับข้อมูล

TB8 : เป็นบิตข้อมูลบิตที่ 9 ที่ต้องการส่งในโหมด 2 และ 3 สามารถเซตหรือเคลียร์ด้วยซอฟต์แวร์

RB8 : เป็นบิตเก็บข้อมูลที่รับเข้ามาบิตที่ 9 ในโหมด 2 และ 3 สำหรับการทำงานในโหมด 1 หากกำหนดให้บิต SM2 = 0 บิต RB8 จะเป็นค่าของ STOP BIT ที่รับเข้ามา สำหรับโหมด 0 ไม่มีการใช้ RB8

T1 : แฟลกของการอินเตอร์รัพต์ด้านส่งข้อมูล แฟลกนี้จะถูกเซตด้วยฮาร์ดแวร์เมื่อจบการส่งข้อมูลบิตที่ 8 ในโหมด 0 หรือเมื่อเริ่มต้นส่ง STOP BIT ในโหมด 1,2 หรือ 3 เราต้องเคลียร์แฟลกนี้ด้วยซอฟต์แวร์ เมื่อจบโปรแกรมตอบสนองการอินเตอร์รัพต์ของการส่งข้อมูลแล้ว

R1 : แฟลกอินเตอร์รัพต์ด้านรับข้อมูล ถูกเซตด้วยฮาร์ดแวร์ เมื่อข้อมูลบิตที่ 8 ในโหมด 0 ถูกรับเข้ามาหรือเมื่อ STOP BIT ถูกรับเข้ามาในครึ่งเวลาแรกในโหมด 1,2 หรือ 3 เราต้องเคลียร์ แฟลกนี้ด้วยโปรแกรม เมื่อจบโปรแกรมตอบสนองการอินเตอร์รัพต์ของการส่งข้อมูลแล้ว การเลือกโหมดการทำงานของพอร์ตสามารถกำหนดโหมดต่างๆได้ดังตารางที่ 2.3

.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODE	รีจิสเตอร์ SCON	บิต SM2 Variable
0	10 H	Single Mode Environment (SM2 = 0)
1	50 H	
2	90 H	
3	D0 H	
0	NA	Multiprocessor Environment (SM2 = 1)
1	70 H	
2	B0 H	
3	F0 H	

ตารางที่ 2.3

การส่งและรับข้อมูลของพอร์ตอนุกรมจะมีรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลอยู่1ตัวคือรีจิสเตอร์ SBUF การส่งข้อมูลออกไปยังพอร์ตอนุกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำโดยการใส่ข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ SBUF การอ่านข้อมูลจากภายนอกที่รับเข้ามาทางพอร์ตอนุกรมจะอ่านจากรีจิสเตอร์ SBUF เช่นกัน วงจรด้านรับจะมีบัฟเฟอร์ขนาด 1 ไบต์ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่รับเข้ามาประกอบอยู่ภายใน (การมีบัฟเฟอร์รับข้อมูลทำให้ด้านรับสามารถรับข้อมูลไบต์ที่ 2 เข้ามาได้ทันทีหลังจากข้อมูลไบต์แรกเข้ามาแล้วแม้ยังไม่ถูกอ่านออกไปแต่ถ้าข้อมูลไบต์แรกยังไม่ถูกอ่านก่อนที่ข้อมูลไบต์ที่ 2 จะเข้ามาครบข้อมูลไบต์ที่ 2 จะถูกยกเลิก)

โหมด 1

ใช้การรับส่งข้อมูลแบบ 10 บิต ซึ่งข้อมูลอนุกรม 10 บิต เข้ามาทางขา RXD และข้อมูลขนาด 10 บิตส่งออกแบบอนุกรมทางขา TXD โดยข้อมูล 10 บิตประกอบด้วย 1 Strat bit (ค่า 0), 8 บิตข้อมูล (การรับ/ส่งจะเริ่มจากบิตต่ำก่อน) และ 1 Stop bit (ค่า 1) ด้านรับข้อมูลจะนำค่า Stop bit ที่รับเข้ามาไปในบิต RB8 ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ SCON อัตราการรับส่งข้อมูลในโหมดนี้สามารถกำหนดได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับส่งข้อมูลในโหมด 1

การส่งข้อมูลจำนวน 10 บิต จะส่งออกไปที่ขา TXD และรับข้อมูลเข้ามาทางขา RXD ข้อมูล 10 บิต ประกอบด้วย 1 Start bit (ค่าลอจิก 0) ข้อมูลจำนวน 8 บิต (LSB ส่งหรือรับก่อน) และ 1 Stop bit (ค่าลอจิก 1)

ในกรณีของการรับข้อมูล Stop bit จะถูกนำเข้าไปเก็บในบิต RB8 ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ SCON ความเร็วในการรับส่งข้อมูลจะกำหนดโดยโอเวอร์โฟลวของ Timer1 หรือ Timer2 หรือกำหนดจากทั้ง 2 ตัว (ตัวหนึ่งสำหรับด้านส่ง ตัวหนึ่งสำหรับด้านรับ)

การส่งข้อมูลจะเริ่มต้นหลังจากกำหนดค่าลงในรีจิสเตอร์ข้อมูล SBUF ด้านส่งจะมีสัญญาณ Write to SBUF ควบคุมให้มีการใส่ค่า 1 ลงในตำแหน่งของบิตที่ 9 ของ Shift Register ด้านส่ง และเริ่มทำการส่งข้อมูลของ TX Control Unit การส่งข้อมูลออกจะเริ่มต้นในช่วงเวลา S1P1 ของแมชชีนไซเคิลและบิตต่อไปตามจังหวะของตัวกำหนดอัตราส่งที่มาจากโอเวอร์โฟลวของ Timer1 หรือ Timer2 ที่หารด้วย 16

การส่งข้อมูลจะเริ่มด้วยการส่งสัญญาณ SEND ให้แอคทีฟ เมื่อเริ่มต้นการส่งข้อมูลบิตแรกออกไปที่ TXD และบิตของข้อมูลจะถูกส่งตามออกไปโดยการทำงานของ Shift Register ซึ่งจะทำการ

เลื่อนข้อมูลไป 1 ตำแหน่งตามจังหวะของอัตราส่งที่เข้ามายัง TX Clock เมื่อบิตข้อมูลทั้งหมดถูกเลื่อนออกไปทางขวา จะมี 01 เข้ามาทางด้านซ้าย จนกระทั่งบิตข้อมูลสูงสุด (MSB) ออกไปอยู่ที่เอาต์พุตของ Shift Register จะทำให้บิตที่ 1 ที่ได้โหลดเข้าไปตอนเริ่มต้นในตำแหน่งที่ 9 ซึ่งอยู่ทางซ้ายมือของ MSB และมีบิตต่างๆที่อยู่ทางซ้ายของบิตที่ 9 เป็น 0 ทั้งหมด เมื่อเกิดเงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้ TX Control Unit ทำการเลื่อนข้อมูลออกไปทางขวาอีก 1 ครั้ง เป็นครั้งสุดท้าย แล้วเลิกส่งสัญญาณ SEND และเซตแฟลก TI = 1 เวลาการส่งข้อมูลจะจบในช่วง Clock ลูกที่ 10 ของสัญญาณการส่งข้อมูล หลังจากมีสัญญาณ Write to SBUF

การรับข้อมูลจะเริ่มต้นเมื่อสัญญาณที่ขา RXD เปลี่ยนจาก 1 ไป 0 โดยซีพียูจะมีการตรวจสอบด้วยความเร็ว 16 เท่า ของอัตราความเร็วในการรับข้อมูล เมื่อซีพียูตรวจสอบได้ว่ามีการส่งข้อมูลเข้ามา จะทำการรีเซตวงจรหาร 16 ทันทีเพื่อเริ่มต้นใหม่ให้สัมพันธ์กับข้อมูลที่เข้ามาและค่า 1FFH จะถูกกำหนดให้กับ SHIFT REGISTER ด้านรับ

การรับข้อมูลจะทำการตรวจสอบบิตข้อมูลที่ขา RXD 3 ครั้งในช่วงบิต RCLK ที่ 7, 8 และ 9 เข้ามาในวงจรหาร 16 โดยจะใช้ค่าที่อ่านได้จาก 2 ใน 3 ครั้งเป็นข้อมูล การทำเช่นนี้ก็เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนออก หากตรวจสอบว่าในช่วงบิตที่ 0 ของ RCLK ข้อมูลที่ RXD ไม่เป็น 0 วงจรด้านรับจะรีเซตกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปรอการเปลี่ยนค่าที่ขา RXD จาก 1 ไป 0 ใหม่ การทำเช่นนี้เพื่อป้องกันการผิดพลาดของ Start bit หากค่า Start bit ถูกต้อง จะทำการเลื่อนข้อมูลเข้าไปใน Shift Register และรอรับบิตต่อๆไป โดยบิตข้อมูลจะเข้ามาทางขวาของ Shift Register และค่า 1 ที่กำหนดไปตอนเริ่มจะถูกเลื่อนไปทางซ้ายตามลำดับ เมื่อ Start bit ที่เข้ามาถูกเลื่อนไปทางซ้ายมือสุดของ Shift Register จะทำให้ RX CONTROL BOX ทำการเลื่อนอีก 1 ครั้ง เป็นครั้งสุดท้าย และนำค่าใน Shift Register ไปเก็บในรีจิสเตอร์ SBUF และ RB8 และการเซตแฟลก RI จะเกิดขึ้นหลังจากเลื่อนข้อมูลครั้งสุดท้ายแล้วก็ต่อเมื่อเราได้กำหนด

1) RI = 0 (จะต้องเคลียร์ RI หลังจากทำโปรแกรมอ่านข้อมูลไปแล้ว) และ
2) SM2 = 0 หรือได้รับ STOP BIT = 1

หากเงื่อนไขทั้ง 2 ไม่จริง ข้อมูลที่รับเข้ามาจะถูกยกเลิก ถ้าเงื่อนไขทั้ง 2 เป็นจริง STOP BIT จะถูกนำไปเก็บใน SBUF และ RB8 ถูกเซต วงจรรับข้อมูลจะกลับไปตรวจสอบค่าที่ขา RXD ต่อ เพื่อรับข้อมูลไบต์ใหม่ต่อไป

2.8 การกำหนดอัตรารับส่ง (Baud Rate Generator)

อัตรารับส่งข้อมูลเป็นความเร็วในการส่งข้อมูลในหน่วย บิต/วินาที ซึ่งเราสามารถกำหนดอัตรารับส่งที่แตกต่างกันได้ในโหมด 1 และโหมด 3 สำหรับอัตรารับส่งในโหมด 0 จะคงที่ส่วนในโหมด 2 เลือกได้ 2 อัตราความเร็ว

อัตรารับส่งข้อมูลในโหมด 0 จะใช้สัญญาณนาฬิกาของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นฐานคือ

อัตรารับส่งโหมด 0 = ความถี่ใช้สัญญาณนาฬิกาของไมโครคอนโทรลเลอร์/12

อัตรารับส่งโหมด 2 เลือกได้ 2 อัตราความเร็ว ขึ้นอยู่กับบิต SMOD ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ PCON เป็นตัวเลือก

ถ้าบิต SMOD = 0 (เป็นค่าหลังจากรีเซต)

อัตรารับส่งโหมด 2 = 1/64 เท่าของสัญญาณนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ถ้าบิต SMOD = 1

อัตรารับส่งโหมด 2 = 1/32 เท่าของสัญญาณนาฬิกา

สำหรับอัตราการรับและส่งข้อมูลในโหมด 1 และโหมด 3 จะกำหนดได้ตามต้องการ โดยใช้อัตราการเกิดโอเวอร์โฟลวของ Timer1 หรือ Timer2 เป็นตัวกำหนด (8052 มี Timer2 เพิ่มขึ้นมา) อัตราการรับและส่งข้อมูลสามารถกำหนดได้จาก Timer2 หรือจากทั้ง 2 ตัว (ตัวหนึ่งสำหรับส่งอีกตัวสำหรับรับข้อมูล) ความเร็วในการรับและส่งข้อมูลอาจกำหนดไม่เท่ากันได้

<u>การใช้ Timer1 สร้างอัตรารับส่ง</u>

เมื่อใช้ Timer1 เป็นตัวสร้างอัตราการรับส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรมในโหมด 1 หรือโหมด 3 ต้องควบคุมไม่ให้ Timer1 ส่งสัญญาณอินเตอร์รัพต์อัตราการรับและส่งข้อมูลจะมาจากอัตราการเกิดโอ-เวอร์โฟลวของ Timer1 และค่าของบิต SMOD ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ PCON (รีจิสเตอร์ PCON ไม่สามารถอ้างตำแหน่งแบบบิต การเซตค่าให้ใช้คำสั่งทางลอจิกของการ OR เช่น ORL PCON,#01111111B เท่ากับการเคลียร์บิต 7 ของ PCON) เราคำนวณอัตรารับส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$\text{อัตรารับส่งในโหมด 1 และ 3} = \frac{2^{s\,\mathrm{mod}}}{32} * (\text{Timer1 Overflow rate})$$

เมื่อใช้ Timer1 สร้างอัตราการรับและส่งข้อมูลจะต้องทำให้ไม่มีการร้องขออินเตอร์รัพต์ที่เกิดจาก Timer1 (โดยการควบคุมที่รีจิสเตอร์ IE) เราจะใช้ Timer1 ทำงานในลักษณะของตัวจับเวลาหรือตัวนับอย่างใดอย่างหนึ่งในโหมดต่างๆทั้ง 3 โหมด สำหรับการใช้งานทั่วไปเราจะกำหนดให้ Timer1 ทำงานในลักษณะของตัวจับเวลาในโหมด auto-relode (มีค่าการควบคุมใน TMOD = 0010XXXX) ซึ่งจะได้อัตราการรับส่งข้อมูลดังนี้

$$\text{อัตราการรับส่งของโหมด 1 และโหมด 3} = \frac{2^{s\,\mathrm{mod}}}{} * \frac{\textit{Oscillator}}{}$$

62858

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราต้องการให้ Timer1 มีอัตรารับส่งต่ำมากๆเราทำได้โดยใช้ให้ Timer1 ทำงานในลักษณะของตัวจับเวลาแบบ 16 บิต (มีค่าของการควบคุมใน TMOD = 0001XXXX) และให้มีการอินเตอร์รัพต์จาก Timer1 ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นใหม่ (relode) ให้กับตัวจับเวลา ซึ่งเป็นการทำงานที่เป็นแบบ 16 บิต

2.9 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์

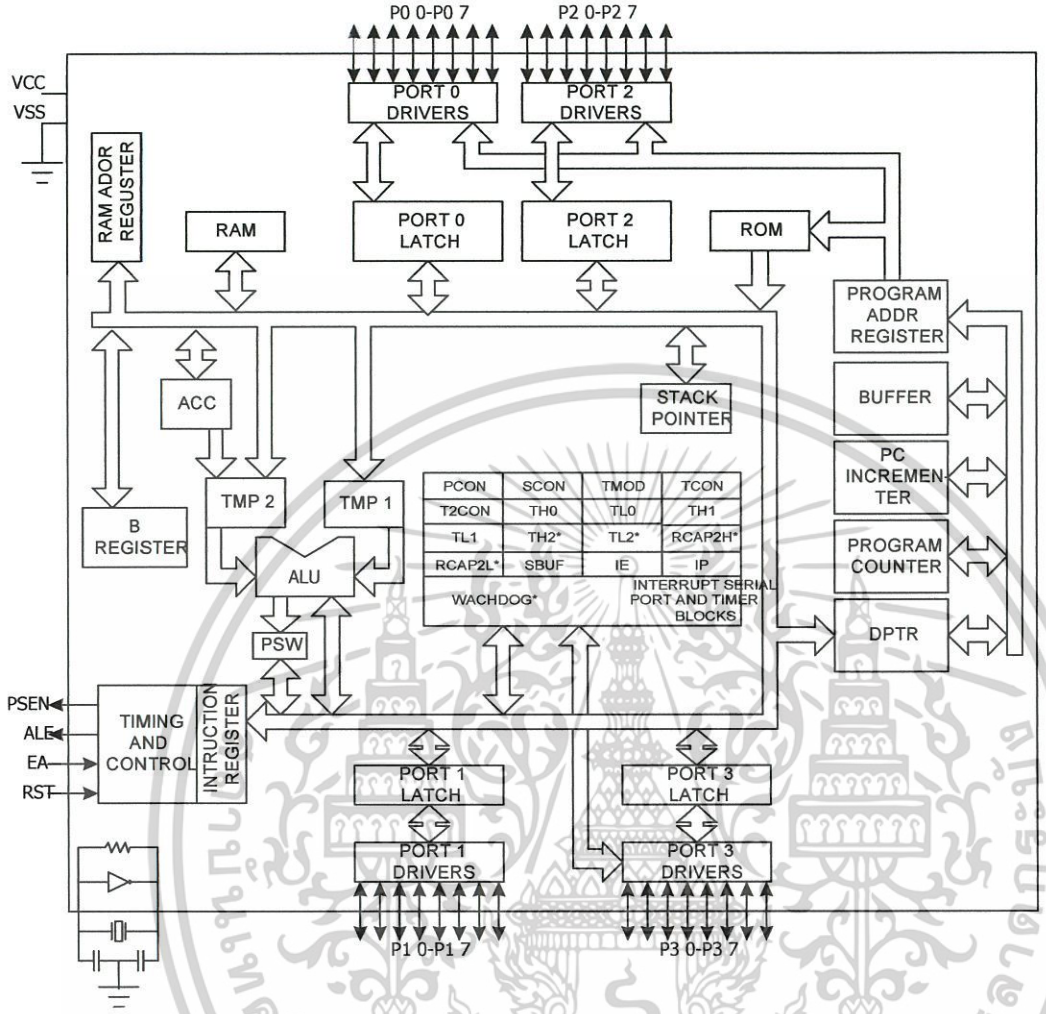
คุณสมบัติทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรายละเอียดสำคัญดังต่อไปนี้

- แหล่งจ่ายไฟ + 5 V
- หน่วยความจำโปรแกรม (program memory) ขนาด 4 กิโลไบต์สำหรับเบอร์ 8051 8031 และ8032 ไม่มีหน่วยความจำชุดนี้ ส่วน 8032 มีหน่วยความจำถึง 8 กิโลไบต์ มีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล (data memory) ขนาด 128 ไบต์สำหรับ 8052 มีถึง 256 ไบต์
- หน่วยความจำสำหรับโปรแกรมและดาต้า (program memory และ data memory แยกจากกันอย่างละ 64 กิโลไบต์)
- คำสั่งที่ใช้เวลาน้อยที่สุดประมาณ 1 µs เมื่อทำงานที่ความถี่ 12 MHz
- มี timer/counter ขนาด 16 บิต 2 ชุด (สำหรับ 8052 มี 3 ชุด) ทำงานได้ 4 โหมด
- รับอินเตอร์รัพท์ได้ 6 แหล่ง 5 เวกเตอร์
- มีพอร์ตรับส่งข้อมูลอนุกรม (UART) 2 พอร์ต ทั้งรับและส่งในเวลาเดียวกันได้ (full duplex) เลือกการรับส่งได้ 4 โหมดมีคำสั่งในการทำ AND, OR หรือ complement ได้ทั้งแบบ 8 บิตและ 1 บิต

2.10 โครงสร้างภายในของ MCS-51

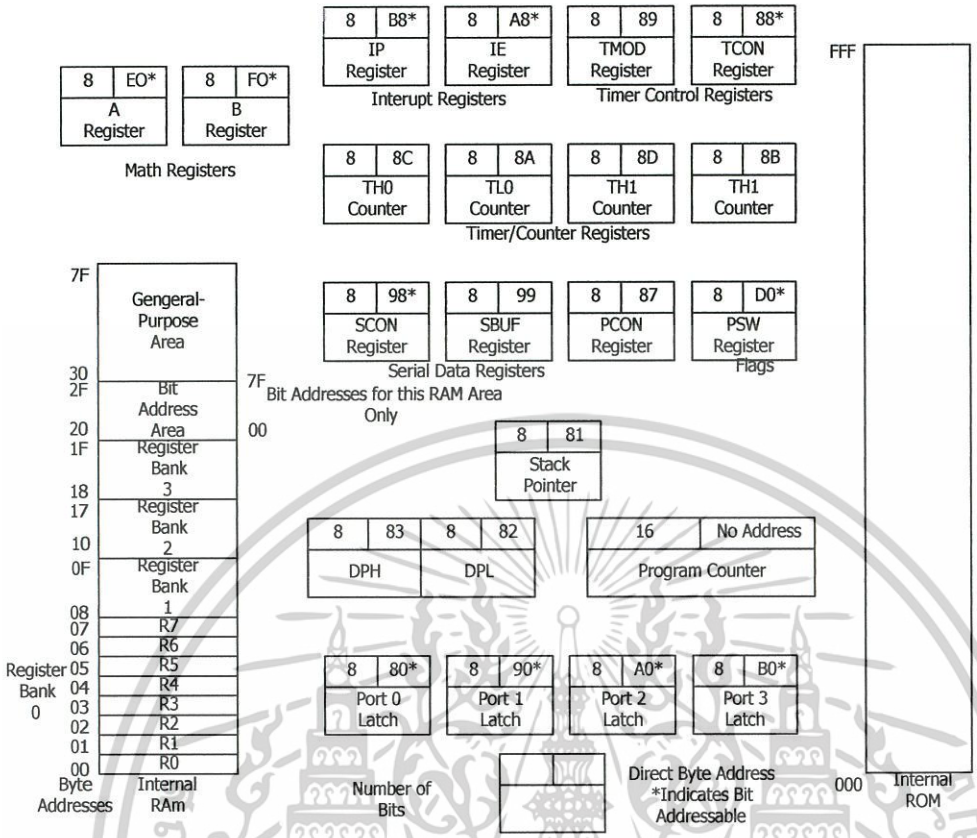
MCS-51 ใช้เทคโนโลยีในการผลิตแบบ NMOS และ CMOS เบอร์ 8032 และ 8052 จะมี ROM BASIC อยู่ภายในจึงสะดวก สำหรับโปรแกรมเมอร์ที่จะเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเบสิก โครงสร้างสำหรับเบอร์ 8051 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

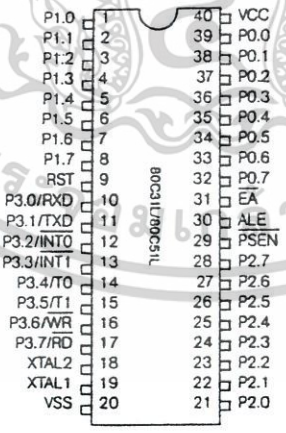


รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งของรีจิสแตอร์ต่าง ๆ



รูปที่ 2.9 การจัดวางขาของ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

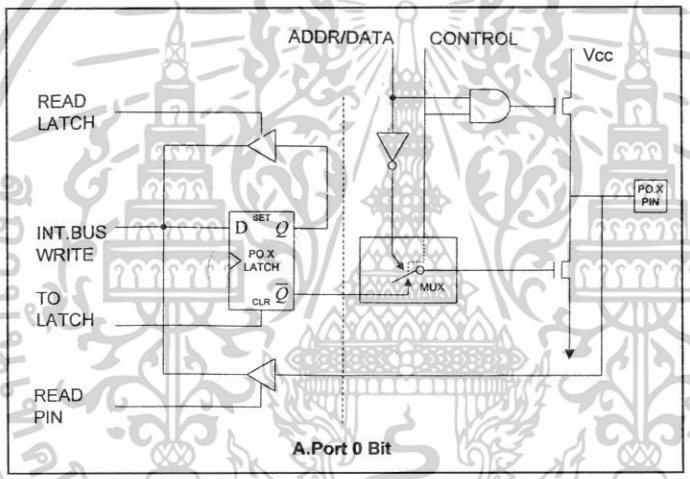
2.11 พอร์ตของ 8051

8051 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 40 ขาดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีขาต่าง ๆ ดังนี้

-Vcc (ขา 40) ต่อกับ + 5 V

-Vss (ขา 20) เป็นขา GND

-PORT 0 (ขา 32-39) มีทั้งหมด 8 บิตคือ (P0.0-P0.7) มีโครงสร้างแบบ open drain bi-directional ดังแสดงในรูปที่ 2.10

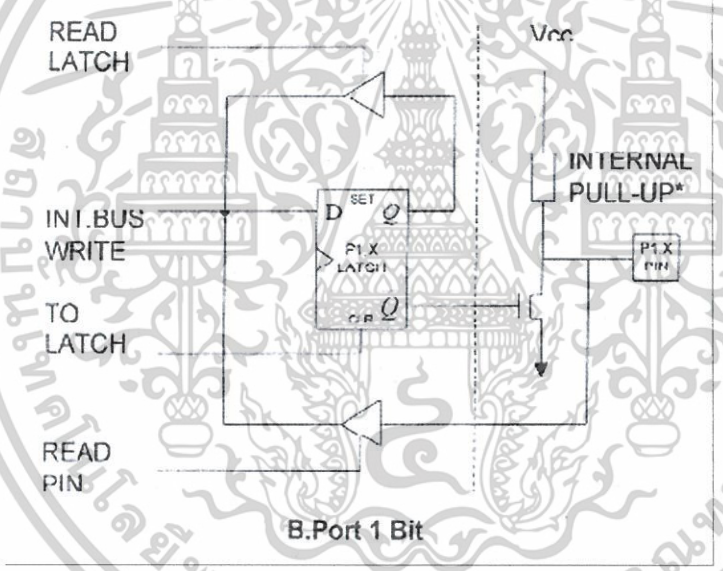


รูปที่ 2.10 โครงสร้าง พอร์ต 0 (บิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พอร์ต 0 (ขา 32-39) มีทั้งหมด 8 บิต คือ (P0.0-P0.7) ใช้งานได้ 2 หน้าที่คือ ส่งแอดเดรสและดาต้าออกไปให้หน่วยความจำภายนอกเมื่อทำการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำภายนอกควบคุมด้วยขา control ดังรูปที่ 2.10 ประกอบและอีกหน้าที่หนึ่งหน้าที่ก็คือ เป็นพอร์ต i/o ถ้าต้องการให้ทำงานเป็นอินพุตพอร์ตต้องส่งลอจิก " 1 " ไปยังพอร์ตนี้ จะมีผลให้ $\overline{Q}$ ของ D-FF เป็น " 0 " ทำให้ FET ตัวล่างมีสถานะ OFF สัญญาณที่ใช้อ่านอินพุทพอร์ต PIN (พอร์ต P0.X PIN) จะใช้สัญญาณ READ LATCH เมื่อถูกกระตุ้นที่ Tri-State Buffer ตัวบน

- พอร์ต 1 (ขา 1-8) มีทั้งหมด 8 บิตคือ (P1.0-P1.7) มีโครงสร้างคล้าย พอร์ต 0 แต่จะใช้ความต้านทานภายในพูลอัพแทน (Internal Pull Up Reggister) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11

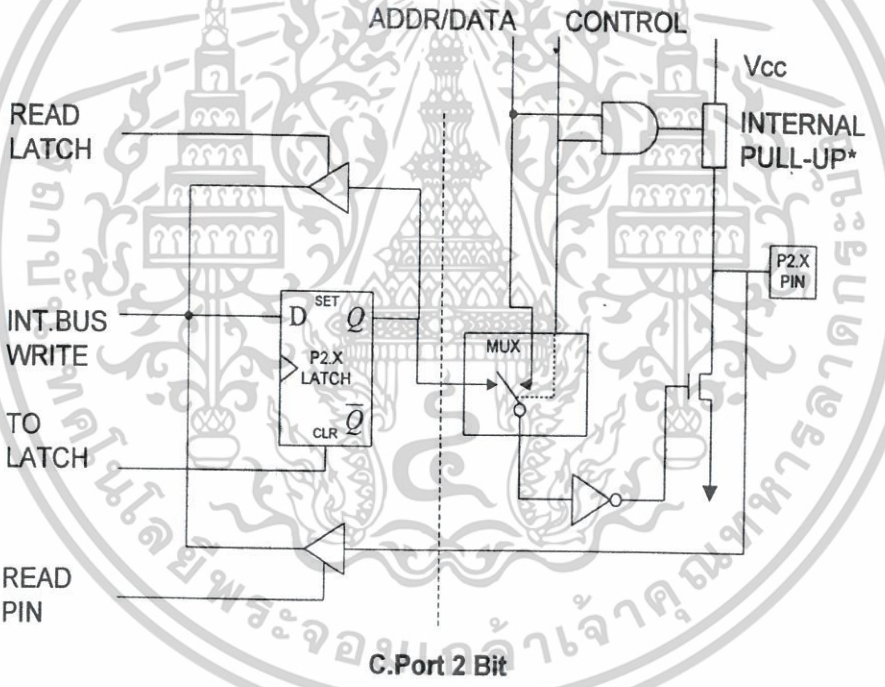


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพอร์ต 1 (บิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พอร์ต 2 (ขา 21-28) มีทั้งหมด 8 บิต คือขา (P2.0-P2.7) มีโครงสร้างคล้าย พอร์ต 0 โดยมี FET ตัวล่างตัวเดียวส่วนตัวด้านบนใช้ความต้านทานพูลอัพแทน(internal pull up)พอร์ตนี้ทำงาน 2 หน้าที่คือสามารถใช้เป็นพอร์ตสำหรับส่งแอดเดรส 8 บิตบน (A8-A15) และเป็น I/O พอร์ตใช้งานทั่วไป เมื่อจะใช้งานเป็นอินพุตพอร์ต ต้องส่งลอจิก " 1 " มาที่พอร์ตนี้ก่อนเพื่อบังคับให้ FET อยู่ในสภาวะ OFF ดังแสดงในรูปที่ 2.12

- พอร์ต 3 (ขา 10-17) มีทั้งหมด 8 บิต คือขา (P3.0-P3.7) มีโครงสร้างคล้าย พอร์ต 1 พอร์ตนี้ทำหน้าที่เป็น I/O พอร์ต ถ้าจะให้พอร์ตนี้เป็น I/O PORT ก็ส่งลอจิก " 1 " มาที่พอร์ตนี้และอีกหน้าที่หนึ่งคือ ส่งสัญญาณควบคุมออกมา และรับสัญญาณเข้าไป สัญญาณต่าง ๆ มีดังนี้

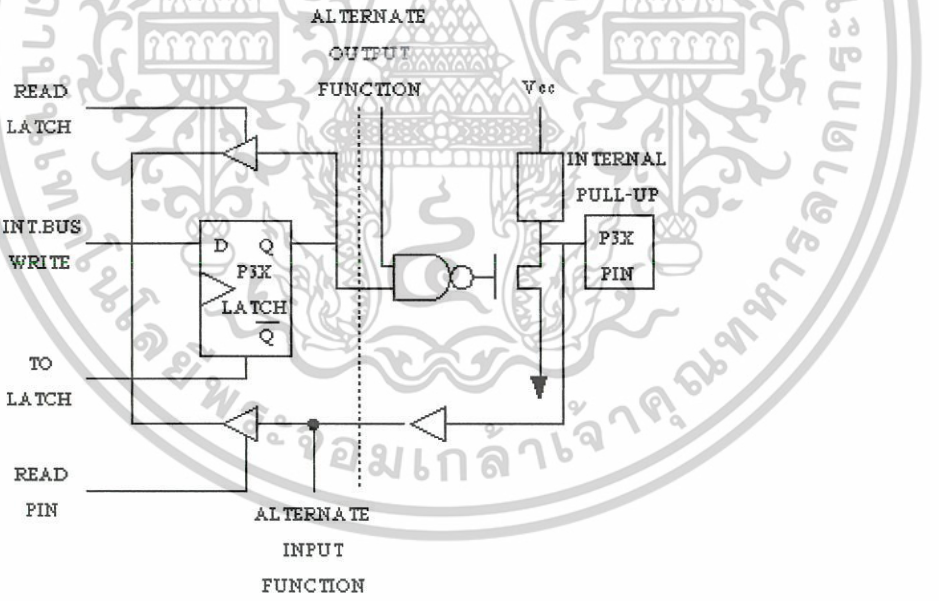


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของพอร์ต 2 (บิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- P3.0/RXD (serial input port) เป็นขาที่ใช้รับข้อมูลแบบอนุกรม
- P3.1/TXD (serial output port) เป็นขาที่ใช้ส่งข้อมูลแบบอนุกรม
- P3.2/$\overline{INT\ 0}$ (external interrupt) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก
- P3.3/$\overline{INT\ \ 1}$ (external interrupt) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก
- P3.4/T0 (timer/counter 0 external input) ขารับสัญญาณเข้าไปยังวงจร timer/counter 0 ที่ทำหน้าที่นับสัญญาณไซเคิลของสัญญาณ T1 นี้หรือสัญญาณนาฬิกาก็ได้
- P3.5/T1 (timer/counter1 external input) ขารับสัญญาณเข้าไปยัง timer/counter1 ซึ่งมีการทำงานเหมือน T0
- P3.6/$\overline{W\ R}$ (external data memory write strobe) ขาสัญญาณควบคุมการเปลี่ยนข้อมูลไปยังหน่วยความจำสำหรับข้อมูลภายนอก 8051
- P3.7/$\overline{R\ D}$ (external data memory read strobe) ขาสัญญาณควบคุมการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำสำหรับข้อมูลภายนอก

โครงสร้างของ พอร์ต 3 แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอร์ต 3 (บิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ALE (ขา 30) เป็นขาส่งสโตรบสำหรับใช้ในการแลตซ์แอดเดรสไบร์ต่ำ (A0-A7) ที่ส่งออกมาจาก (พอร์ต 0) สัญญาณนี้จะแอคทีฟทุก ๆ 2 ครั้ง ใน 1 แมชชีนไซเคิล (1/6 ของสัญญาณนาฬิกา)

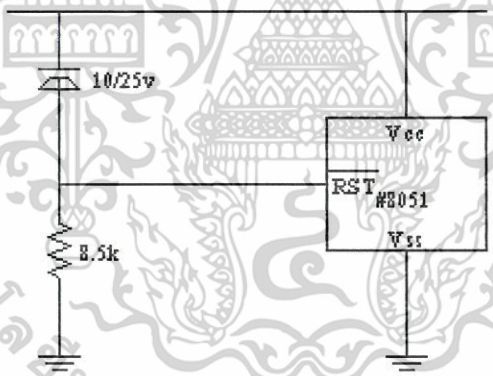
PESN (ขา 29) เป็นขาที่ใช้ส่งสโตรบสำหรับอ่านข้อมูลจาก program memory ภายนอก (หน่วยความจำประเภท ROM EPROM) สัญญาณนี้จะส่งออกมา 2 ครั้งในแต่ละแมชชีนไซเคิลแต่ถ้าเป็นการอ่าน internal program memory จะไม่มีสัญญาณออกที่ขานี้

EA (ขา 30) ถ้าป้อนลอจิก " 0 " เข้ามาที่ขานี้ซีพียูจะอ่านค่าจาก program memory ภายนอกชิพเท่านั้น แต่ถ้าถูกป้อนด้วยลอจิก " 1 " ก็จะอ่านโปรแกรมภายในชิพ

RST(ขา 9) เป็นขารีเซ็ตซีพียูจะรีเซ็ตได้ก็ต่อเมื่อ ป้อนลอจิก " 1" เข้ามาที่ขานี้อย่างน้อย 2 แมชชีนไซเคิล เมื่อซีพียูถูกรีเซ็ตค่าต่าง ๆ ในรีจิสเตอร์ใด ๆ

XTAL1 (ขา 19) ใช้ต่อคริสตอลภายนอกโดยเป็นอินพุตเข้าสู่วงจรออสซิเลเตอร์

XTAL2 (ขา 18) ใช้ต่อคริสตอลภายนอกโดยเป็นอินพุตเข้าสู่วงจรออสซิเลเตอร์

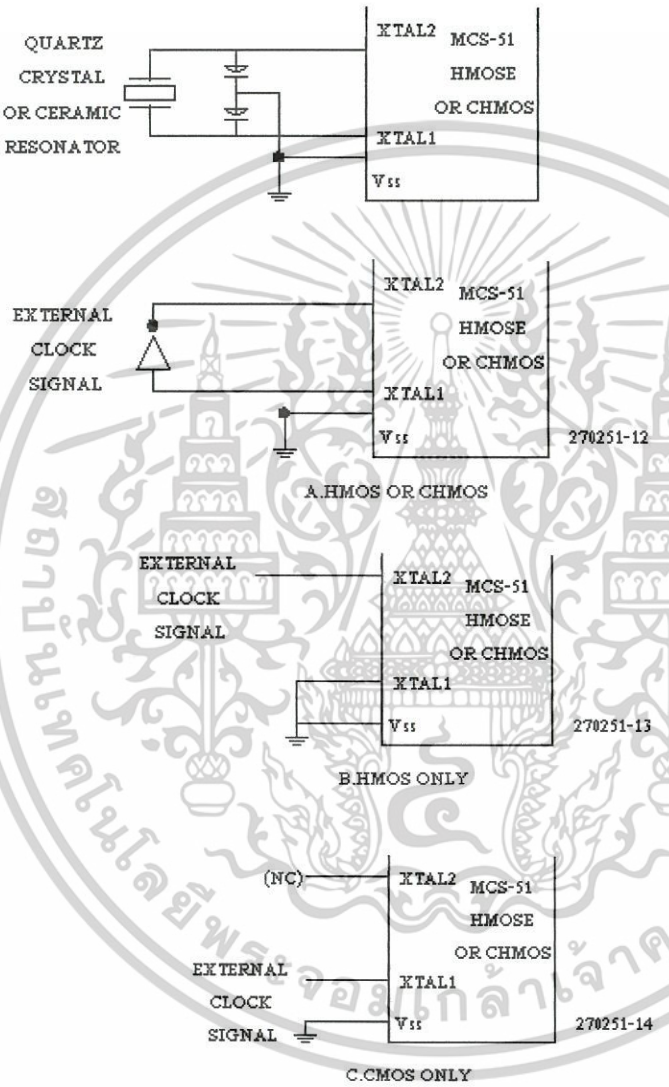


รูปที่ 2.14 การต่อขารีเซ็ทให้กับ 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาของ 8051

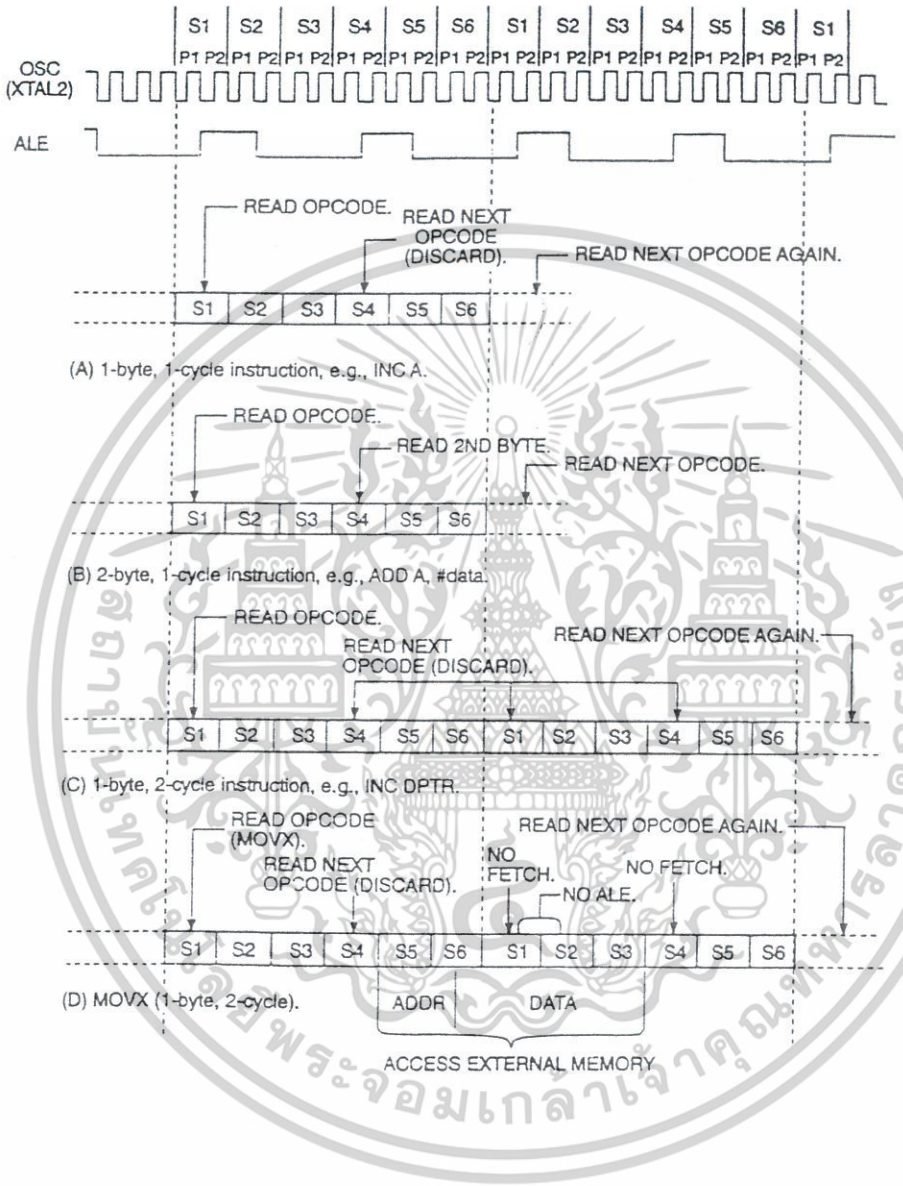
การต่อวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกามีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือแบบภายในและแบบภายนอกแสดงดังได้รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาของ 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ผังสัญญาณเวลาซีพียู (CPU Timming)

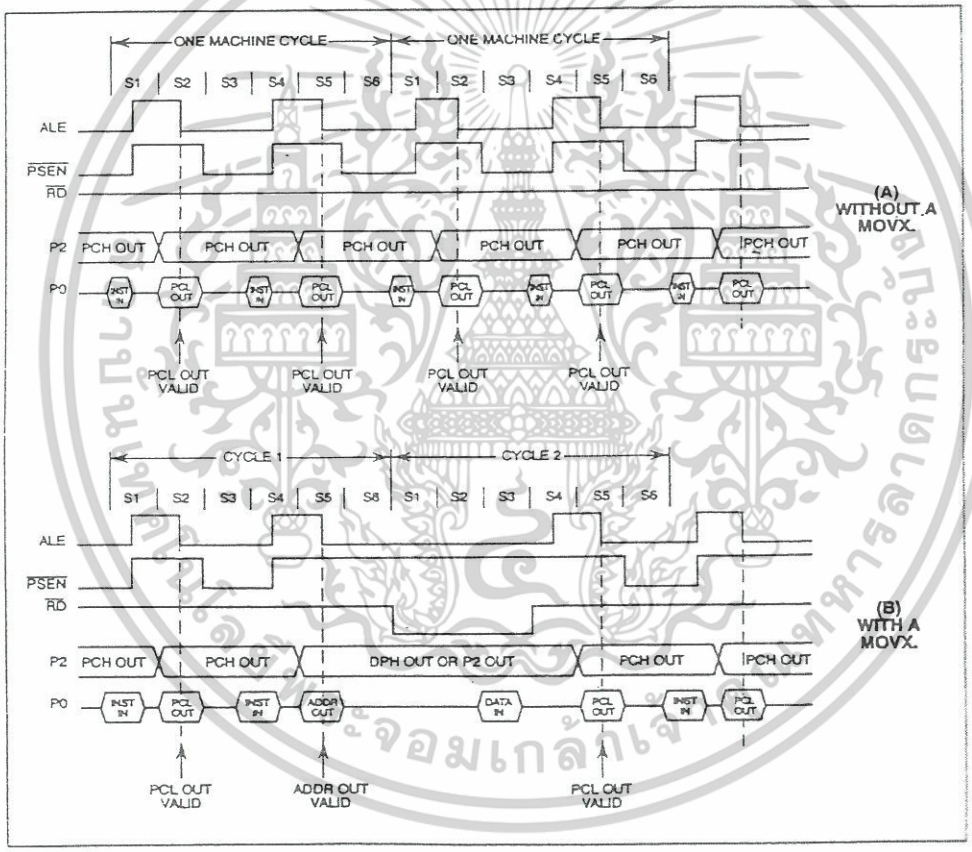


รูปที่ 2.16 ผังเวลาการทำงานของคำสั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีพียูจะ RUN ด้วยความเร็วเท่ากับ 12 MHz ดังนั้น คล็อก12 ลูกจะกินเวลาเท่ากับ $(1/(12*10^{6})*12 = 1\ \mu S)$ ว่า 1 แมชีนไซเคิล คือช่วงการทำงานตั้งแต่ S1 จนถึง S6 รูปที่2.16 แสดงการทำงานของคำสั่งต่างๆดังต่อไปนี้

- แสดงการทำงานของคำสั่ง INT A ซึ่งเป็นคำสั่ง 1 ไบต์ทำงาน เสร็จ ภายใน 1 แมชชีนไซเคิล
- แสดงการทำงานของคำสั่ง ADD A.#Data ซึ่งเป็นคำสั่ง 2 ไบต์ทำงานเสร็จใน 1 แมชชีนไซเคิล
- แสดงการทำงานของคำสั่ง INC DPTR ซึ่งเป็นคำสั่ง 1 ไบต์ แต่ทำงานเสร็จใน 2 แมชชีนไซเคิล
- แสดงการทำงานของคำสั่ง MOVX ซึ่งเป็นคำสั่ง 1 ไบต์ แต่ทำงานเสร็จใน 2 แมชชีนไซเคิล



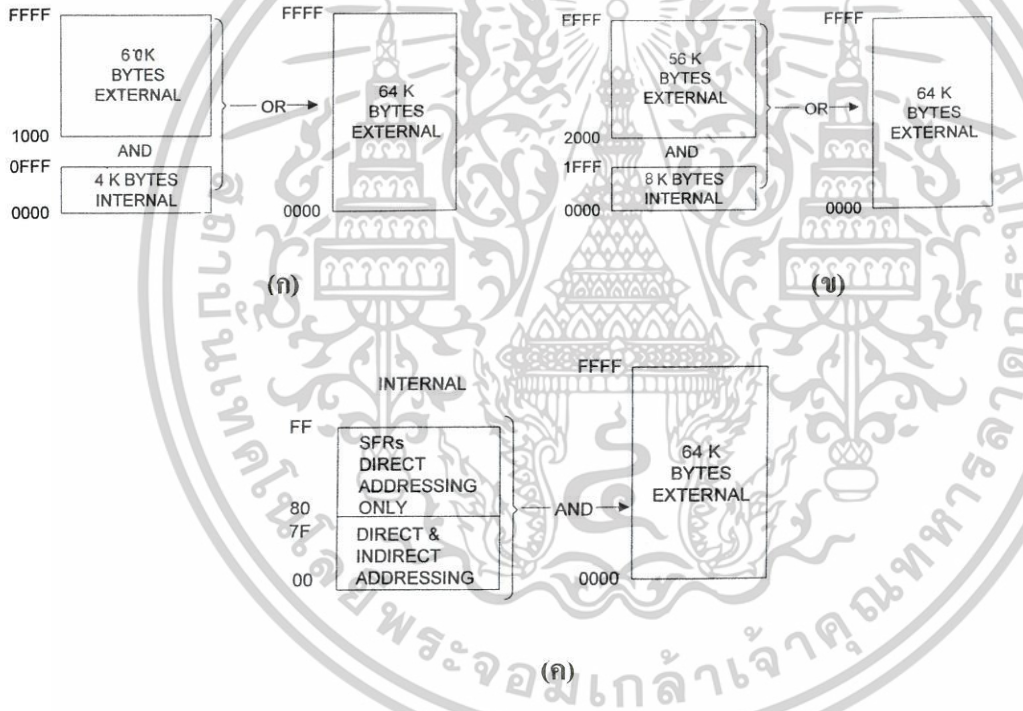
รูปที่ 2.17 แสดงผังเวลาการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 (ก) เป็นผังเวลาของสัญญาณซึ่งเกี่ยวข้องกับเฟิทซ์เมื่อส่วนของ program memory อยู่ภายนอก ดังนั้น สัญญาณที่จะนำมาใช้อ่าน op-code จาก program memory ก็คือ $\overline{PSEN}$ ซึ่งจะแอคทีฟ 2 ครั้ง ใน 1 แมชชีนไซเคิล ดังนั้นสัญญาณที่ใช้อ่านข้อมูลจาก program memory จะใช้สัญญาณ $\overline{PSEN}$

รูปที่ 2.17 (ข) เป็นผังเวลาของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการอ่านข้อมูลจาก data memory โดยใช้สัญญาณ $\overline{RD}$ (อาจสรุปได้ง่าย ๆ ว่าการอ่านข้อมูลจาก program memory จะใช้สัญญาณ $\overline{PSEN}$ และการอ่านข้อมูลจาก data memory จะใช้สัญญาณ $\overline{RD}$ ส่วนสัญญาณ ALE คือสัญญาณที่ใช้ในการ latch address A0-A7 นั่นเอง)

2.14 การแบ่งประเภทของหน่วยความจำ



รูปที่ 2.18 ผังเก็บความจำ

(ก) สำหรับโปรแกรมของเบอร์ 8051

(ข) สำหรับโปรแกรมของเบอร์ 8052

(ค) สำหรับข้อมูลของเบอร์ 5081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำที่ใช้กับ MCS-51 มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ หน่วยความจำสำหรับโปรแกรม(program memory) และหน่วยความจำสำหรับข้อมูล (data memory) ซึ่งเป็นหน่วยความจำที่ใช้เก็บโปรแกรมสั่งงานบรรจุอยู่ในชิพ 8051 ส่วนที่เป็นก็คือ ROM ขนาด 4 กิโลไบต์นั่นเอง แต่ถ้าเป็นเบอร์ 8052 ก็คือ ROM ขนาด 8 กิโลไบต์ ดังแสดงในรูปที่2.18(ก) และ ที่ 2.18(ข) สำหรับข้อมูลของเบอร์ 8051 แสดงในรูปที่ 2.18(ค)

หน่วยความจำสำหรับใช้เก็บข้อมูลหน่วยความจำนี้ สามารถเขียนข้อมูลลงไป และอ่านข้อมูลออกมาได้ ซึ่งเป็นหน่วยความจำภายในชิปมีเพียง 128 ไบต์ สำหรับเบอร์ 8051 และ 256 ไบต์ สำหรับเบอร์ 8052 ส่วนหน่วยความจำภายนอกชิพมี 64 กิโลไบต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีเบื้องต้นของระบบทำความเย็น

3.1 บทนำ

ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของระบบเป็นสำคัญ ของ วัฏจักรการทำงานจริงของระบบจะมีความแตกต่างจากวัฏจักรทางทฤษฎี เนื่องจากสภาวะการทำงานที่ผันกลับไม่ได้ในอุปกรณ์หลายส่วน ซึ่งสาเหตุหลักๆ เนื่องมาจากความต้านทานภายในท่อ การถ่ายโอนความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม ข้อจำกัดการทำงานของอุปกรณ์ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ต้องควบคุมให้วัฏจักรการทำงานจริงของระบบมีความแตกต่างจากวัฏจักรทางทฤษฎี ตำแหน่งที่วัฏจักรการทำงานจริงมีความแตกต่างจากวัฏจักรทางทฤษฎีและส่งผลกระทบต่อระบบ ได้แก่ ตำแหน่งที่สารความเย็นออกจากเครื่องระเหยและเข้าเครื่องอัดเราไม่สามารถควบคุมสารความเย็นให้อยู่ในสถานะไออิ่มตัวได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบเผื่อให้สารความเย็นอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวดเล็กน้อยที่สภาวะทางเข้าเครื่องอัด เพื่อให้มั่นใจว่าสารความเย็นที่ไหลเข้าสู่เครื่องอัดมีการระเหยอย่างสมบูรณ์เพราะถ้ามีของเหลวเข้าสู่เครื่องอัดจะทำให้เกิดความเสียหายได้ แต่การทำให้สารความเย็นที่เข้าเครื่องอัดอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวดก็มีผลเสียหลายประการ ดังนี้ อุณหภูมิลิ้นทางออกจากเครื่องอัดสูงขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องระวังไม่ให้สูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ต้องใช้เครื่องอัดที่มีขนาดใหญ่ไม่เป็นการประหยัด ปริมาตรจำเพาะของไอสารความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดมีค่าสูงขึ้น ทำให้อัตราการไหลโดยมวลลดลง ความสามารถในการทำความเย็นก็จะลดลง ถ้ากระบวนการกลายเป็นไอร้อนยิ่งยวดเกิดในเครื่องระเหยแทนที่จะเกิดในท่อดูด ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยลดลง เพราะสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของไอแห้งต่ำกว่าของเหลว งานที่ให้กับเครื่องอัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการควบแน่นลดลงเพราะเมื่อสารทำความเย็นอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวดก่อนเข้าเครื่องอัด เมื่อถูกอัดจะมีอุณหภูมิสูงกว่าสารความเย็นที่ถูกอัดในสถานะไออิ่มตัว แต่ความดันยังเท่าเดิมสารความเย็นต้องคายความร้อนให้สารหล่อเย็นเพิ่มขึ้นเพื่อควบแน่นเป็นของเหลว

ท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องระเหยและเครื่องอัดมีความยาวมาก อันเป็นสาเหตุทำให้มีความดันลดเนื่องจากความต้านทานการไหลภายในท่อ รวมทั้งมีการถ่ายโอนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่สารความเย็น ซึ่งทำให้สารความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยมีความดันและอุณหภูมิต่ำ ปริมาตรจำเพาะสูงขึ้นค่าการทำความเย็นลดลง กระบวนการอัดของเครื่องอัดทางทฤษฎีมีลักษณะเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกคือมีค่าเอนโทรปีคงที่ แต่กระบวนการอัดจริงจะมีผลที่เกิดจากสภาวะผันกลับไม่ได้ในอุปกรณ์เนื่องจากความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานการไหลซึ่งทำให้ค่าเอนโทรปีมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การสิ้นเปลืองกำลังขับของเครื่องอัดก็จะสูงขึ้นไปด้วย

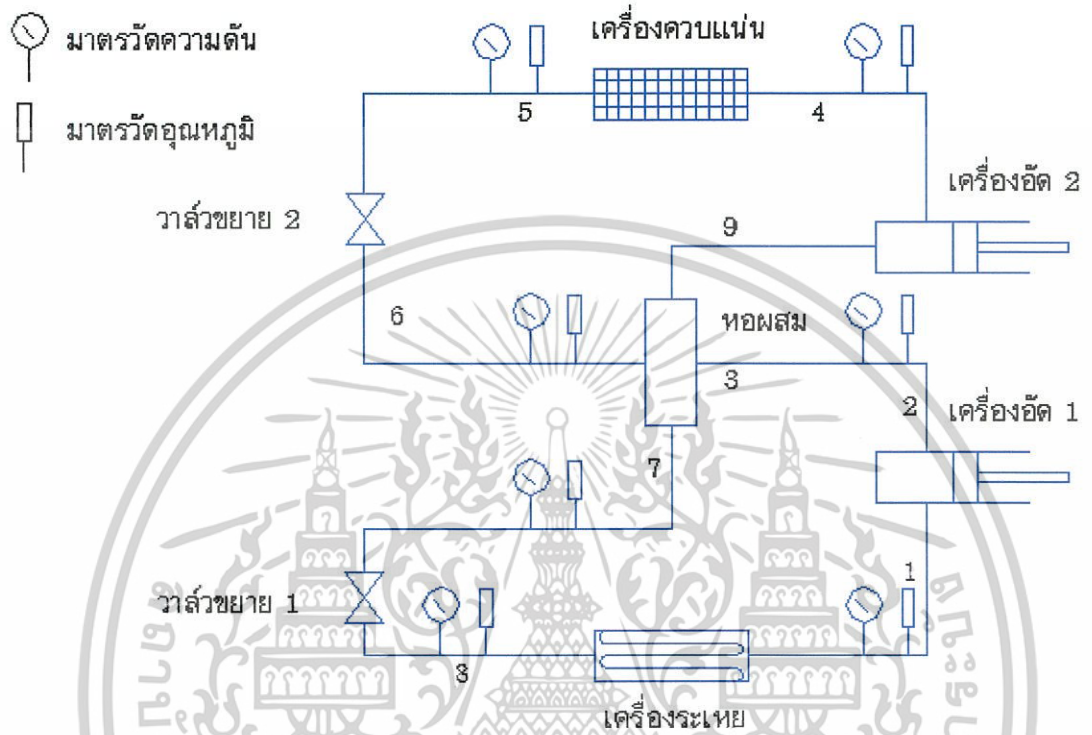
ฉะนั้นในการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นนั้นจะต้องออกแบบควบคุมการทำงานของระบบให้มีวัฏจักรการทำงานให้มีความใกล้เคียงกับวัฏจักรทางทฤษฎีมากที่สุด เพื่อความประหยัดพลังงานและประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ดีที่สุด

3.2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น

หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 เริ่มจากสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น มีสถานะเป็นของเหลวไหลผ่าน วาล์วขยาย เพื่อลดความดันจนมีความดันเท่ากับความดันในหอผสม ซึ่งมีความดันเท่ากับความดันระหว่าง เครื่องอัด ทั้งสองตัว ในระหว่างกระบวนการนี้จะมีของเหลวบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไออิ่มตัว (สภาวะ 3) ไปผสมกับไอร้อนยวดยิ่งที่มาจากเครื่องอัด ความดันต่ำ (สภาวะ 2) จากนั้นไอผสมนี้จะถูกดูดโดยเครื่องอัดความดันสูง (สภาวะ 9) ส่วนสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวอิ่มตัวในหอผสมจะไหลผ่าน วาล์วขยาย (สภาวะ 8) เข้าสู่เครื่องระเหย เพื่อรับความร้อนจากผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการทำความเย็น

ในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า -๙ F ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองวงจรการทำงานคือ วงจรความดันต่ำและวงจรความดันสูง โดยมีหอผสม (mixing chamber) เป็นตัวเชื่อมระหว่างวงจรทั้งสองและทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อสารทำความเย็นเหลวที่ควบแน่นออกจากเครื่องควบแน่น จะเข้าวาล์วขยายตัวที่ 2 ทำการลดความดันเท่ากับความดันในหอผสม และขณะที่ไหลเข้าหอผสมจะทำให้ของเหลวบางส่วนระเหยกลายเป็นไอแยกออกจากหอผสมในสภาวะไอ 100 % จำนวน X kg และผสมกับไอร้อนยิ่งยวดที่มาจากคอมเพรสเซอร์ (compressor) ความดันต่ำ จำนวน (1-X) kg ไอผสมนี้จะถูกดูดโดย เครื่องอัดของวงจรความดันสูงตัวที่ 2 จำนวน 1 kg เข้าสู่ เครื่องควบแน่น เพื่อควบแน่นเป็นของเหลวอีกครั้ง ส่วนของเหลวที่แยกจาก หอผสมจะเข้าสู่วาล์วขยายตัวที่ 1 ในวงจรความดันต่ำซึ่งมีของเหลวจำนวน (1-X) kg จากนั้นก็เข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อดึงความร้อนจากห้องที่ต้องการทำความเย็นและเข้าสู่เครื่องอัดตัวที่ 1 ของวงจรความดันต่ำต่อไป ในการควบคุมความดันให้ได้สภาวะที่ออกแบบไว้นั้นจะกระทำโดยการปรับวาล์วทั้งสองตัว ให้ได้ตามกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นที่อุณหภูมิห้องต่างๆตั้งแต่ –15 $\overline{C}$ ถึง 20 $\overline{C}$ โดยการควบคุมสภาวะการทำงานที่ตำแหน่งต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ค่าไอร้อนยิ่งยวดที่ทางออกเครื่องระเหย ค่าของเหลวอัดตัวที่ทางออกเครื่องควบแน่น ซึ่งวิธีการทดลองนั้นใช้วัตต์มิเตอร์ (watt meter) จำนวนสองเครื่องเพื่อวัดพลังงานที่จ่ายให้กับระบบทำความเย็นซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องอัดทั้งสอง พัดลมเครื่องควบแน่น และพัดลมเครื่องระเหย เพื่อเปรียบเทียบกับภาระที่ให้กับห้องทำความเย็นซึ่งใช้หลอดไฟชนิดไส้เป็นภาระให้กับระบบ การบันทึกค่านั้นจะเดินระบบให้ได้อุณหภูมิห้องคงที่ตามค่าที่ต้องการ โดยการปรับภาระที่จ่ายให้กับระบบจนกระทั่งสมดุลกับความสามารถสูงสุดกับระบบในสภาวะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นและอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบมีดังนี้คือ

3.3.1 เครื่องระเหย การออกแบบ เครื่องระเหย ต้องคำนึงสิ่งต่อไปนี้คือ

- จำนวนแถวและขนาดของท่อซึ่งการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึง ความดันลดที่เกิดขึ้น ขนาดที่เหมาะกับพื้นที่ และประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน

- จำนวนครีบที่ออกแบบจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเพิ่มขึ้นถ้าจำนวนครีบมาก เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่แต่ก็มีผลเสียเนื่องจากจะเป็นตัวกั้นกระแสลมที่ไหลผ่าน และเกิดการอุดตันได้ง่าย และถ้าใช้ในงานที่มีอุณหภูมิต่ำการอุดตันที่เกิดจากคอยล์เป็นน้ำแข็งก็จะสูงขึ้น.

- ทิศทางของลมที่ไหลผ่านมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย การออกแบบทิศทางการไหลของลมนั้นเองให้กระแสลมเย็นสัมผัสกับน้ำยาอุณหภูมิต่ำเพื่อให้ลมที่ผ่านคอยล์ออกไปมีอุณหภูมิต่ำ

- วัสดุที่ใช้โดยส่วนใหญ่ ทำจากทองแดงซึ่งการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและราคาของวัสดุเครื่องระเหย การออกแบบ เครื่องระเหย ต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้คือ

- ชนิดพัดลมที่ใช้ ต้องคำนึงถึงปริมาณลม ระยะการกระจายลม รวมถึงเสียงดังที่เกิดจากการทำงานต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุด

ในที่นี้เลือกเครื่องระเหยแบบขดท่อและครีบ (fined-tube coil) และใช้พัดลมเป็นตัวช่วย เพิ่มความเร็วลมผ่านขดท่อและครีบท่อเป็นท่อทองแดงครีบทำจากอะลูมิเนียมซึ่งจำนวนครีบ 7 ครีบ/นิ้ว การเลือกจำนวนครีบนั้นพิจารณาจากอุณหภูมิการใช้งานซึ่งงานที่ใช้อุณหภูมิต่ำควรเลือกจำนวนครีบน้อยๆ เนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำนั้นมักมีน้ำแข็งเกาะซึ่งจะเป็นตัวปิดกั้นกระแสลมที่ผ่านซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ปริมาณลมปานกลางประมาณ 500-800 ft/min ทิศทางลม ให้น้ำยาเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำต้องสัมผัสกับลมที่มีอุณหภูมิต่ำด้วยเสมอ เนื่องจากจะช่วยให้ลมออกมีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนพัดลมตัวเย็นใช้แบบกรงกระรอก ซึ่งให้ความดันสูง ดันอากาศผ่านได้ดี

3.3.2 เครื่องควบแน่นเป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับระบายความร้อนเพื่อให้ไอสารทำความเย็นควบแน่นเป็นของเหลว เลือกใช้ชนิดที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ จำนวนวงจร 1 วงจร 5 แถว ความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น คำนวณได้จาก

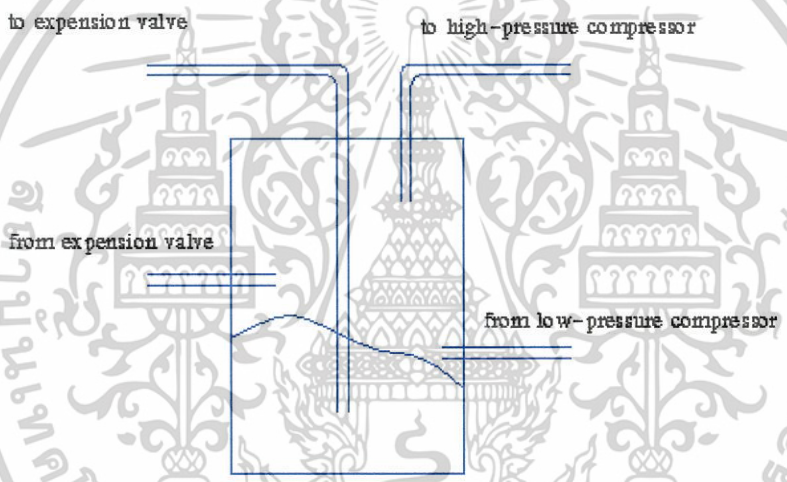
ภาระเครื่องควบแน่น = ความสามารถเครื่องอัด x ตัวประกอบการถ่ายเทความร้อน

ภาระเครื่องควบแน่น = 1296 x 1.5 = 1944 Btu/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 เครื่องอัดใช้ชนิด hermatic แบบลูกสูบ ซึ่งเป็นที่มีมอเตอร์และเครื่องอัด อยู่ภายในตัวเรือนที่เชื่อมปิดมิดชิดที่เลือกใช้ชนิดนี้เพราะพื้นที่ติดตั้งน้อย น้ำหนักเบา ทำงานเสียงไม่ดัง ซึ่งเหมาะสำหรับเครื่องทำความเย็นชนิด ตู้เย็น ตู้แช่ ซึ่งในระบบนี้จะต้องใช้สองตัว คือ Model: AE3430Y, isplacement: 8.86 cm^3/r, Nominal capacity: 2593 Btu/hr และ Model: AE 2415 AK Displacement : 16.08 cm^3/r, Nominal Capacity: 1296 Btu/hr

3.3.4 หอผสม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากวัฏจักรความดันต่ำสู่วัฏจักรความดันสูงตามที่ออกแบบไว้มีลักษณะทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 12 นิ้ว ซึ่งการออกแบบนั้นให้มีพื้นที่สำหรับน้ำยาในสถานะแก๊ส 1 ใน 3 ของพื้นที่ทั้งหมด ลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.2

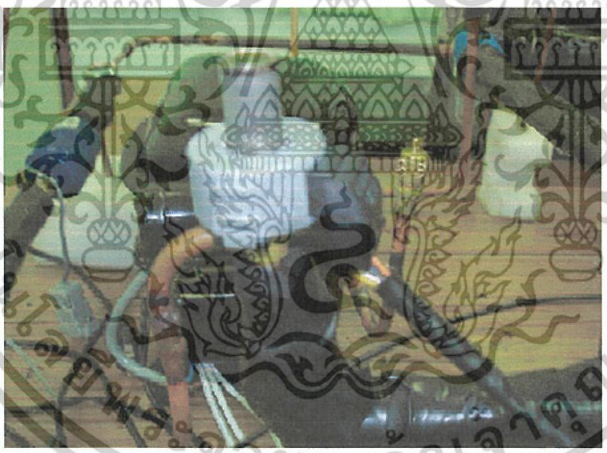


รูปที่ 3.2 หอผสม

3.3.5 วาล์วขยาย (expansion valve) ในการออกแบบนั้นใช้วาล์วขยาย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 เพราะง่ายต่อเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน ง่ายต่อการออกแบบในการทดลองเบื้องต้น และเป็นแนวทางในการนำไปใช้กับวาล์วขยายแบบขับด้วยสเตปมอตอร์ ซึ่งง่ายต่อการควบคุม และมีเสถียรภาพในการทำงาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 วาล์วขยาย (expansion valve)



รูปที่ 3.4 วาล์วขยายขับด้วยสเตปมอเตอร์

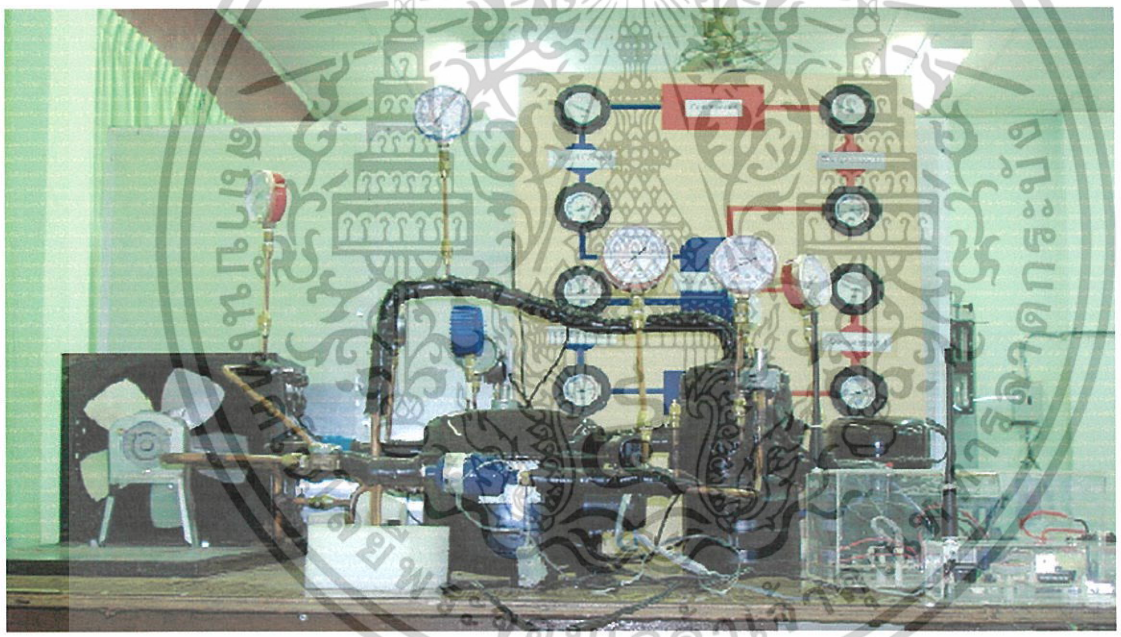
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 กระจกมองน้ำยาใช้สำหรับดูน้ำยาในระบบว่าในระบบมีความชื้นและการไหลของสารความเย็นเต็มท่อหรือไม่ ซึ่งระบบนี้จำเป็นต้องใช้สองตำแหน่งโดยติดตั้งก่อนถึง วาล์วขยาย ทั้งสองตัว

3.3.7 กรองความชื้นและสิ่งสกปรก มีหน้าที่ดูดความชื้นและกรองสิ่งสกปรก ซึ่งสิ่งสกปรกจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องอัด และจะทำให้วาล์วขยายอุดตันได้ ซึ่งระบบนี้ใช้จำนวนสองตัวติดตั้งที่ตำแหน่งก่อนผ่าน วาล์วขยาย ทั้งสองตัว

3.3.8 มาตรวัดความดันเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความดันซึ่งมีความจำเป็นในการวิเคราะห์ระบบต้องติดตั้งทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความดันแต่ละจุดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบ

3.3.9 มาตรวัดอุณหภูมิ เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิซึ่งตำแหน่งที่ติดตั้งทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ควบคู่ไปกับมาตรวัดความดัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบ



รูปที่ 3.5 การติดตั้งมาตรวัดความดันในระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.10 สารทำความเย็น ชื่อตามมาตรฐาน ASHRAE R-12 ชื่อทางเคมี CCl_2F_2 จุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ -29.8 ˚C สามารถละลายในน้ำมันได้ดีทุกสถานะ รหัสถังบรรจุน้ำยา สีขาว นิยมใช้สำหรับตู้เย็น เครื่องปรับอากาศรถยนต์ เป็นต้น

3.3.11 ท่อสารทำความเย็น ใช้ท่อทองแดงซึ่งประกอบด้วยท่อต่างๆดังนี้คือ ท่อทางดูด โดยปกติท่อทางดูดต้องมีความระมัดระวังในการออกแบบมากกว่าท่อสารทำความเย็นอื่น ถ้าขนาดของท่อทางดูดเล็กเกินไป จะทำให้ความดันของสารทำความเย็นในท่อดูดลดลง ถ้าหากมีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ความเร็วของสารทำความเย็นลดลง จากการออกแบบท่อทางดูดมีขนาด 3/8 นิ้ว ท่อทางออก ขนาดท่อทางออกจะคล้ายกับท่อทางดูด สิ่งที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพและความสามารถของระบบคือความตกคร่อม จากการออกแบบท่อทางออกมีขนาด 3/8 นิ้ว ท่อของเหลว เป็นตัวพาสารทำความเย็นเหลวผ่านวาล์วขยาย ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือการกลายเป็นไอของสารทำความเย็นก่อนที่สารทำความเย็นจะไหลผ่าน วาล์วขยาย จากการออกแบบท่อของเหลวมีขนาด 1/4 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ระบบควบคุมระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น

4.1 หลักการทำงาน

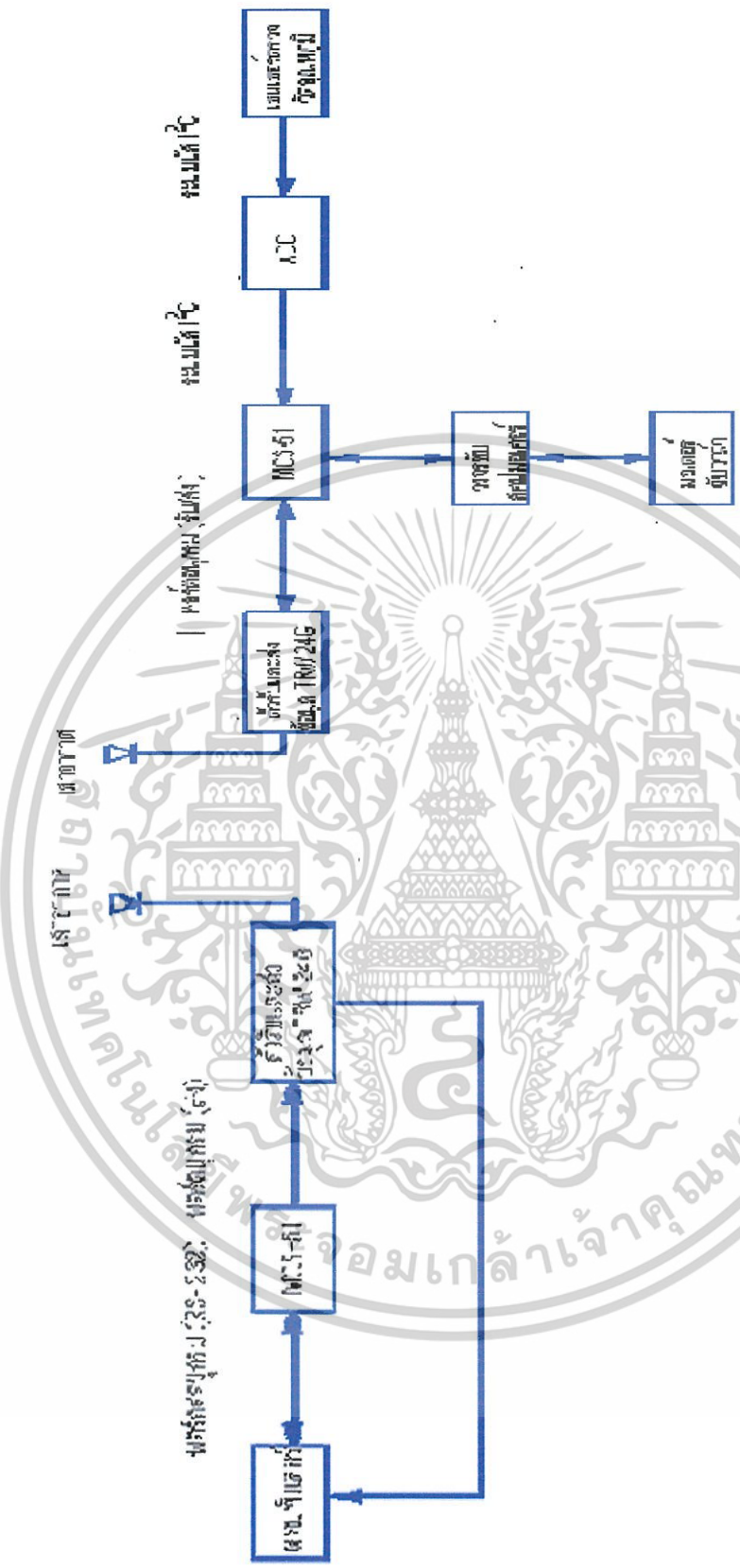
หลักการทำงานของระบบควบคุมกระบวนการไร้สายแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์(MCS-51) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆได้แก่ สเตปมอเตอร์, เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, อุปกรณ์รับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์

ในที่นี้กระบวนการที่ต้องการควบคุมคือควบคุมวาล์วขยายของระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นดังรูปที่ 4.2 เพื่อทำหน้าที่ควบคุมสารทำความเย็นภายในท่อน้ำยา ทางเข้าเครื่องระเหย (evaporator) ซึ่งจะรักษาระดับแรงดันภายในท่อน้ำยาให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันภายในท่อน้ำยาหลังออกเครื่องระเหย เมื่อแรงดันทั้งสองจุดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ (compressor) รับภาระโหลดที่เหมาะสมและทำให้คอมเพรสเซอร์ ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อระบบเริ่มทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทำการรับข้อมูลแบบดิจิตอล จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิสองจุดด้วยกัน ได้แก่ อุณหภูมิของท่อน้ำยาสารทำความเย็นทางเข้าเครื่องระเหย และทางออกของเครื่องระเหยภายในห้องทำความเย็นของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดสองขั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองจุด ค่าความแตกต่างที่ได้นั้นจะมีผลต่อการควบคุมวาล์ว โดยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จะส่งสัญญาณไปขับสเตปมอเตอร์ในการหมุนเพื่อทำการเปิดหรือปิดวาล์วควบคุมความดันของสารทำความเย็นในท่อน้ำยาก่อนเข้าเครื่องระเหย

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 สั่งงานขับสเตปมอเตอร์ ในเวลาเดียวกันไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณมายังตัวรับส่งข้อมูล TRW-24 GHz (transceiver) ส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุมายังผู้ใช้งานผ่านระบบรับข้อมูล และแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ในส่วนของผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานสามารถสั่งการทางคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังตัวรับส่งข้อมูล TRW-24 GHz ให้เปิดหรือปิดวาล์วได้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 ระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้น

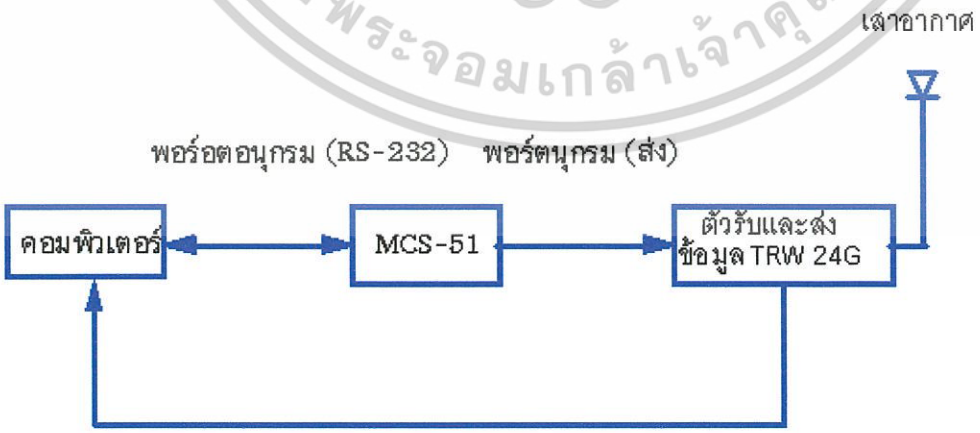
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรการรับข้อมูลและสั่งการ

วงจรการรับข้อมูลและสั่งการแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 การทำงานในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การรับข้อมูล และการส่งข้อมูล โดยผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 เพื่อใช้ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานผ่านทางคีย์บอร์ดและดูข้อมูลต่างๆได้ทางหน้าจอ โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ที่เขียนขึ้นมา ในโหมดการทำงานการรับส่งข้อมูลเมื่ออุปกรณ์รับและส่งข้อมูล TRW-24 GHz ได้รับสัญญาณแล้วก็จะแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลติดต่อกับคอมพิวเตอร์โดยตรง โดยไม่ผ่าน MCS-51 ส่วนในโหมดการทำงานการส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์จะสั่งการผ่านขา TXD ของ MCS-51 ผ่านไปยังอุปกรณ์รับและส่งข้อมูล TRW-24 GHz

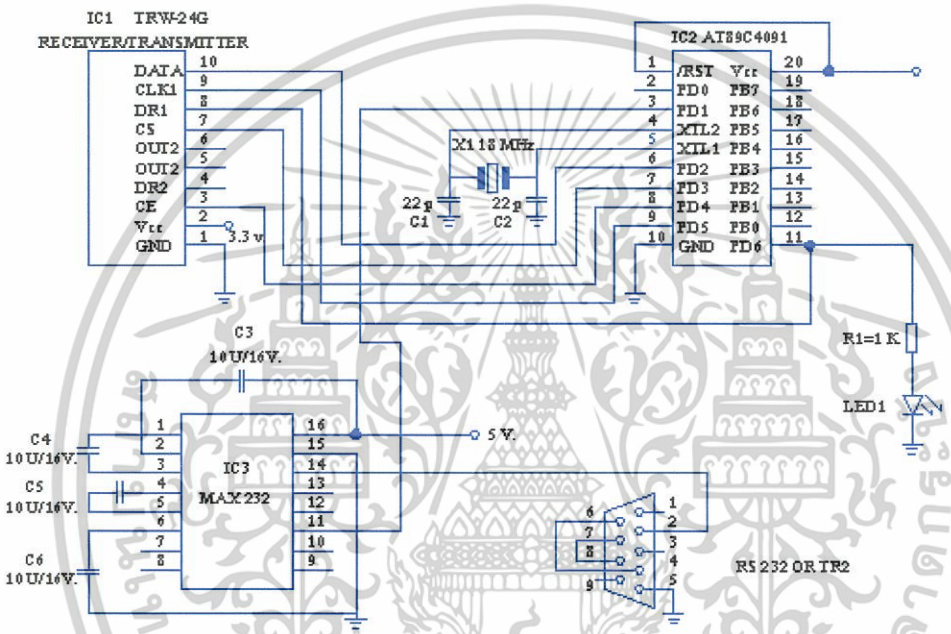
ส่วนของวงจรการรับส่งข้อมูลดังรูปที่ 4.3 ข้อมูลจะถูกส่งจากคอมพิวเตอร์โดยผ่าน MCS-51 ไปยังอุปกรณ์รับส่งข้อมูล TRW-24 GHz ซึ่งในขณะนี้จะถูกทำให้อยู่ในสถานะเป็นตัวส่ง เมื่อข้อมูลทำการส่งเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการเปลี่ยนสถานะอุปกรณ์รับส่งข้อมูล TRW-24 GHz เป็นตัวรับทันที เพื่อจะทำการรับรหัสจากกระบวนการที่ส่งมา รหัสจากกระบวนการที่ส่งมาเป็นการบอกว่ากระบวนการได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว หากกระบวนการยังไม่ได้รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์ก็จะทำการส่งค่าไปใหม่อีกครั้งในลักษณะวนลูป ซึ่งในที่นี้ MCS-51 จะเป็นตัวเลือกที่จะเปลี่ยนแปลงสถานะของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลว่าจะเปลี่ยนเป็นตัวรับหรือตัวส่ง

วงจรที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ตัวควบคุมและตัวประมวลผลส่วนกลางจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 เบอร์ AT-89C4051 ซึ่งมีหน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์ทำงานที่ความถี่ 11.059 MHz ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านทางบัสข้อมูลอนุกรม อุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้ได้แก่ อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรมและการติดต่อผ่านบัส I^2C



รูปที่ 4.3 วงจรการรับข้อมูลและสั่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการติดต่อคอมพิวเตอร์กับ MCS – 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วงจรการวัดและควบคุมกระบวนการ

การติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆที่กล่าวมานั้นจะใช้รูปแบบการติดต่อแบบบัสข้อมูลอนุกรมเพื่อลดจำนวนของสายสัญญาณในระบบ เนื่องจากต้องการให้บอร์ดมีขนาดเล็กกระทัดรัด เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้การรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมเหล่านี้ นอกจากจะมีข้อดีในเรื่องของขนาดอุปกรณ์ที่เล็กแล้ว ในปัจจุบันยังได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถในด้านการประหยัดพลังงาน คือ ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำอีกด้วย

วงจรรับส่งข้อมูลทางด้านการวัดและควบคุมกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยทำหน้าที่รับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังกระบวนการ ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลรับส่งสัญญาณเบอร์ TRW-24 GHz มี LED เพื่อแสดงผลการทำงานว่าขณะนี้เป็นตัวรับหรือตัวส่งข้อมูล ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP 42C เป็นทรานซิสเตอร์กำลัง (power transister) ช่วยในการขับมอเตอร์ ตัวควบคุมและตัวประมวลผลส่วนกลางจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 เบอร์ AT-89C4051 ซึ่งมีหน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์ทำงานที่ความถี่ 11.059 MHz ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆได้แก่ อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ ในการรับส่งข้อมูล และการติดต่อผ่านบัส I^2C วงจรควบคุมสเตปมอเตอร์ และเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ

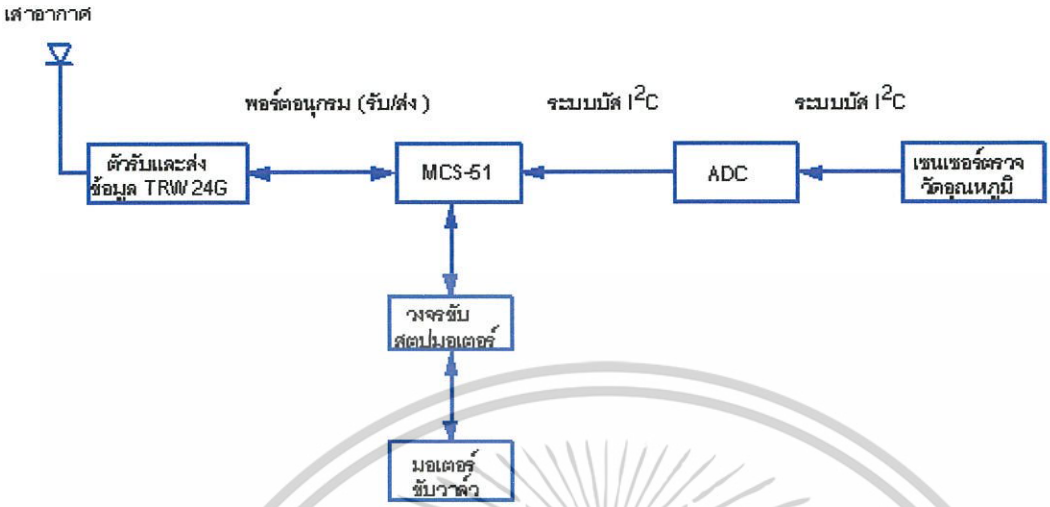
การต่อวงจรควบคุมสเตปมอเตอร์ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์ต่างๆกับไมโครคอนโทรเลอร์ทางด้านการวัดและควบคุมกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ใช้ไอซีเบอร์ DS 1820 ซึ่งมีขาต่อใช้งานเพียง 3 ขา ได้แก่ ขาเชื่อมต่อกับระบบบัส ขาต่อไฟเลี้ยงภายนอก และขากราวด์ หัวใจสำคัญของ DS 1820 อยู่ที่ตัววัดอุณหภูมิและหน่วยความจำความเร็วสูงที่เรียกว่า สแครตช์แพด (scratchpad) ซึ่งมีขนาด 9 ไบต์ เมื่อวัดอุณหภูมิก็จะนำค่าที่วัดได้มาเก็บไว้ในสแครตช์ที่ไบต์ 0 และ 1 ทั้งนี้ไอซี DS 1820 สามารถให้ข้อมูลของอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 16 บิต เมื่อนำมาแปลงเป็นข้อมูลเลขฐาน 10 จึงสามารถแสดงความละเอียดของค่าอุณหภูมิได้ถึง 0.5°C หรือ 0.9°F โดยมีย่านวัดอุณหภูมิ –55°C ถึง +125°C หรือ –67°F ถึง +257°F

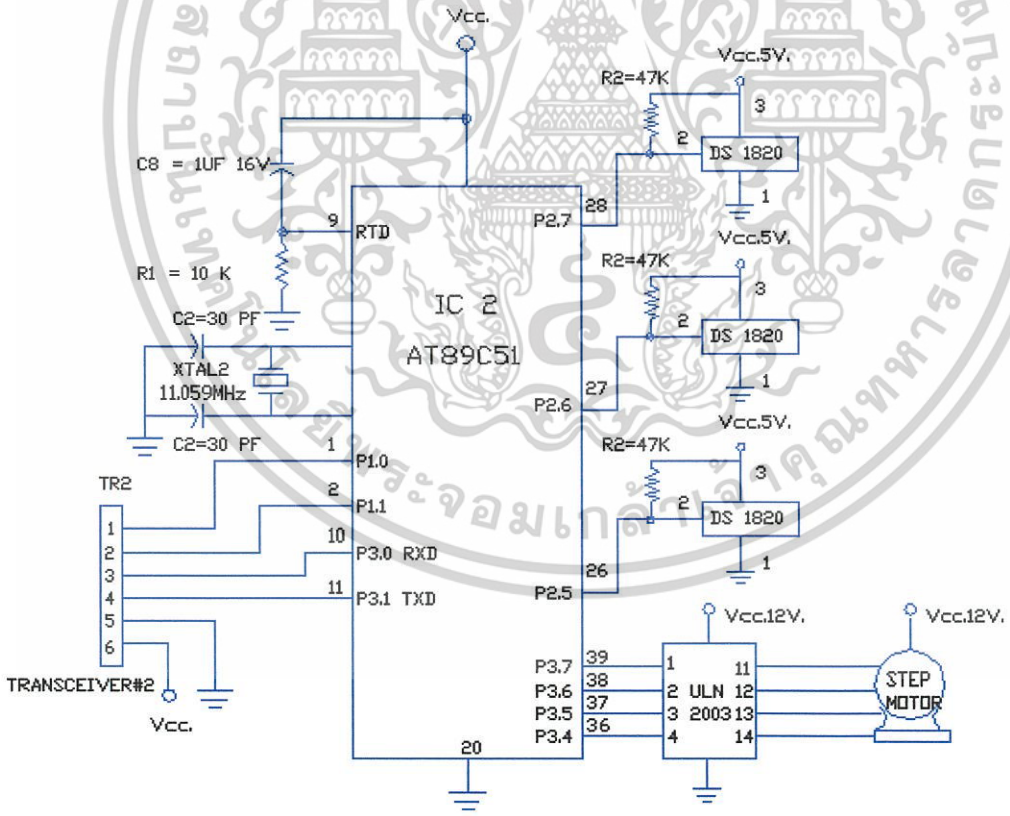
ไฟเลี้ยงวงจร +5V ดังรูปที่ 4.7 จะใช้จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์รับส่งข้อมูลทางวิทยุโดยจะใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ 78L05 เป็นตัวสร้างแรงดันไฟเลี้ยง +5V ให้กับวงจร

ไฟเลี้ยงวงจร ±12V ดังรูปที่ 4.7 จะใช้จ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับเตปมอเตอร์ซึ่งวงจรดังกล่าวจะใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ 78L12 เป็นตัวรักษาระดับแรงดันไฟเลี้ยงวงจร ±12 V ให้กับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

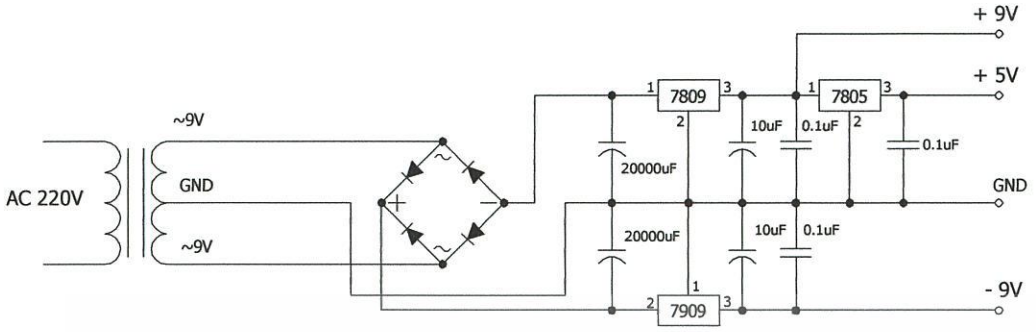


รูปที่ 4.5 วงจรการวัดและควบคุมกระบวนการ



รูปที่ 4.6 วงจรการต่อไมโครโทรลเลอร์ร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง + 5V และ± 12V

4.4 ผลการทดลอง

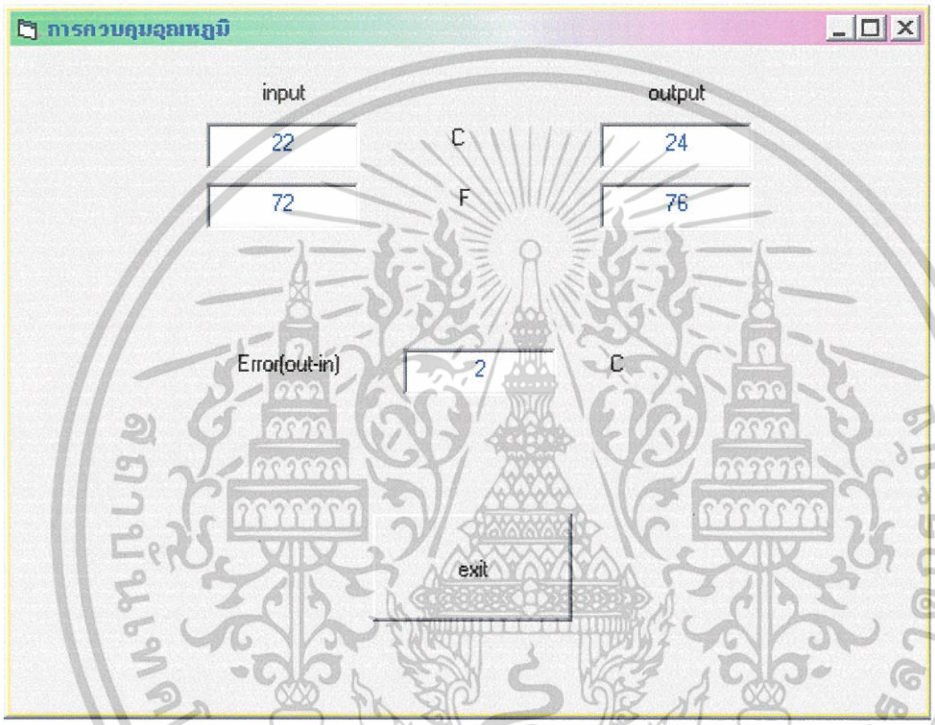
วงจรที่ใช้ควบคุมการทำงานจะใช้ MCS-51ในการควบคุมและติดต่อกับคอมพิวเตอร์โดยที่ส่วนของตัวควบคุมกระบวนการ จะใช้การติดต่อระหว่างอุปกรณ์ด้วยกันด้วยระบบบัส I²C และจะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 เพื่อลดจำนวนสายและขนาดของบอร์ดให้มีขนาดเล็กกระทัดรัดเพื่อความสะดวกในการใช้งานอีกทั้งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีความสามารถในด้านการประหยัดพลัง คือใช้กระแสไฟฟ้าต่ำอีกด้วย

ในการควบคุมวาล์วขยายในระบบทำความเย็นแบบอัดสองขั้นและการส่งค่าข้อมูลการทำงานมาแสดงผลการทำงานยังคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรมควบคุมจะกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 9600 bit/ sec โดยสามารถเลือกการรับส่งข้อมูลผ่านได้ทั้ง COM1 และ COM2 และจะรับส่งข้อมูลครั้งละ 8 bit

การแสดงผลการวัดค่าอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทางเข้าและออกหอระเหยแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 เมื่อเริ่มต้นการทำงานเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทำการตรวจวัดอุณหภูมิ ส่งสัญญาณมายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการแสดงผล ส่งค่ามายังอุปกรณ์รับและส่งข้อมูล TRW-24 GHz ส่งสัญญาณผ่านคลื่นความถี่วิทยุ แสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ได้วัดค่าอุณหภูมิจากทางเข้าและทางออกหอระเหยในเวลาพร้อมกัน การบันทึกผลการทดลองกระทำการบันทึกทุกๆ 5 นาที ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง คือหนึ่งรอบการทดลอง การทดลองในรอบครั้งต่อๆไปจะทิ้งเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง เพื่อให้ห้องทำความเย็นอยู่ในสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิปกติ จึงทำการทดลองรอบใหม่ หน่วยของอุณหภูมิที่ได้บันทึกเป็นองศาเซนเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 หน้าต่างแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.1 ค่าอุณหภูมิจากการวัด

	ครั้งที่1		ครั้งที่2		ครั้งที่3		ครั้งที่4		ครั้งที่5	
	ทางเข้า	ทางออก	ทางเข้า	ทางออก	ทางเข้า	ทางออก	ทางเข้า	ทางออก	ทางเข้า	ทางออก
เวลา(นาที)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)
0	32	32	20	20	22	21	33	33	33	33
5	4	9	4	8	3	6	3	8	4	7
10	-2	4	-6	-4	-6	-4	-6	-3	-6	-3
15	-10	-8	-10	-8	-11	-9	-10	-7	-10	-8
20	-14	-13	-13	-9	-14	-13	-13	-12	-14	-13
25	-18	-17	-18	-16	-18	-16	-17	-15	-17	-15
30	-19	-18	-20	-19	-21	-20	-20	-17	-22	-21
35	-23	-21	-24	-23	-24	-22	-25	-23	-24	-22
40	-26	-24	-26	-24	-27	-25	-28	-27	-26	-24
45	-26	-25	-27	-25	-28	-27	-28	-28	-28	-25
50	-28	-26	-27	-25	-28	-27	-28	-27	-30	-28
55	-29	-29	-28	-27	-28	-27	-28	-28	-31	-29
60	-31	-30	-28	-27	-28	-28	-28	-29	-31	-29

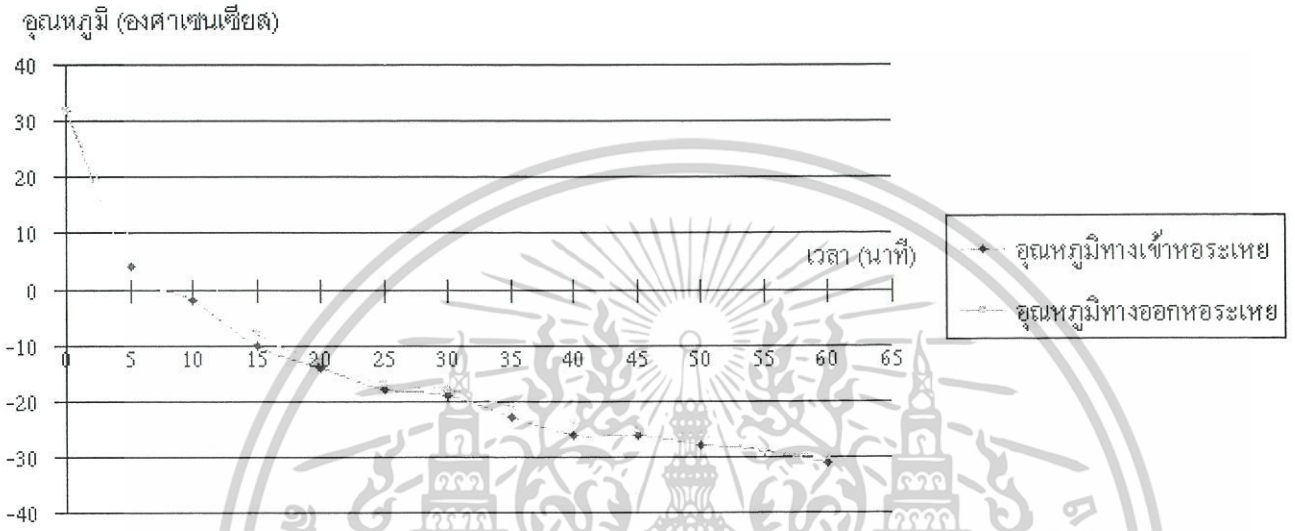
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.1 (ต่อ)

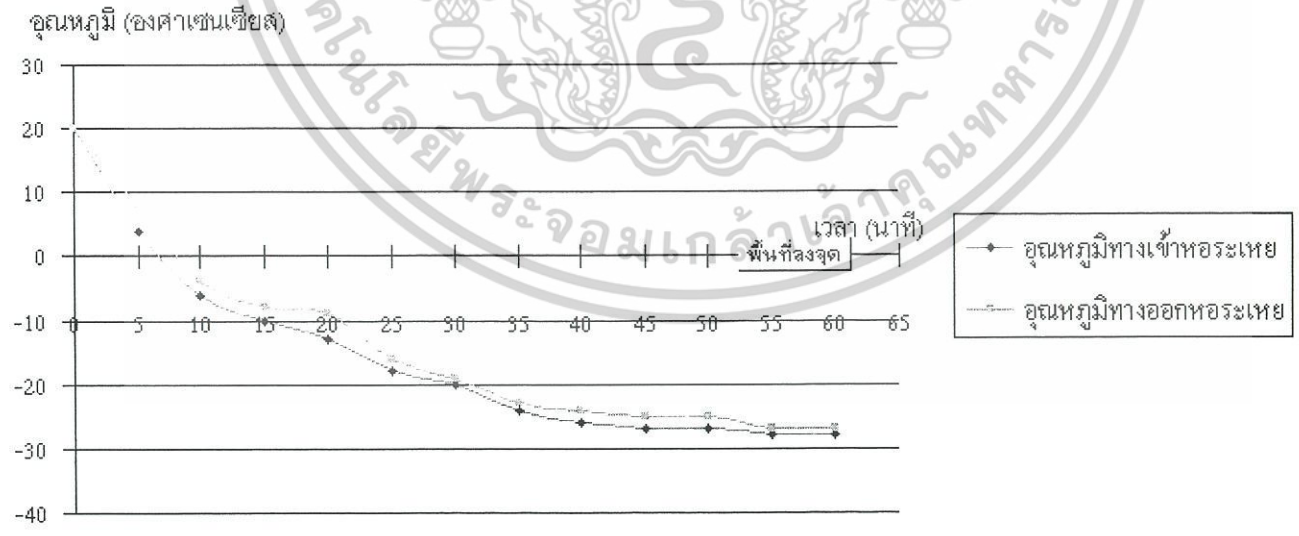
	ครั้งที่6		ครั้งที่7		ครั้งที่8		ครั้งที่9		ครั้งที่10	
เวลา(นาที)	ทางเข้า (°C)	ทางออก (°C)	ทางเข้า (°C)	ทางออก (°C)	ทางเข้า (°C)	ทางออก (°C)	ทางเข้า (°C)	ทางออก (°C)	ทางเข้า (°C)	ทางออก (°C)
0	26	26	26	26	34	34	23	23	23	24
5	3	9	3	6	5	10	3	6	3	6
10	-3	2	-5	-1	-1	6	-4	-1	-4	-1
15	-8	-5	-10	-6	-4	0	-9	-6	-10	-8
20	-11	-9	-14	-12	-9	-6	-12	-9	-12	-9
25	-16	-14	-18	-16	-13	-10	-17	-15	-18	-15
30	-19	-17	-21	-19	-16	-14	-21	-19	-22	-20
35	-22	-19	-24	-23	-20	-18	-26	-23	-26	-24
40	-26	-24	-26	-25	-25	-23	-28	-26	-28	-26
45	-26	-25	-26	-26	-28	-26	-29	-27	-29	-27
50	-27	-26	-27	-26	-29	-27	-30	-28	-29	-27
55	-28	-27	-27	-26	-29	-27	-31	-29	-29	-28
60	-28	-27	-28	-27	-30	-28	-31	-29	-29	-28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 1



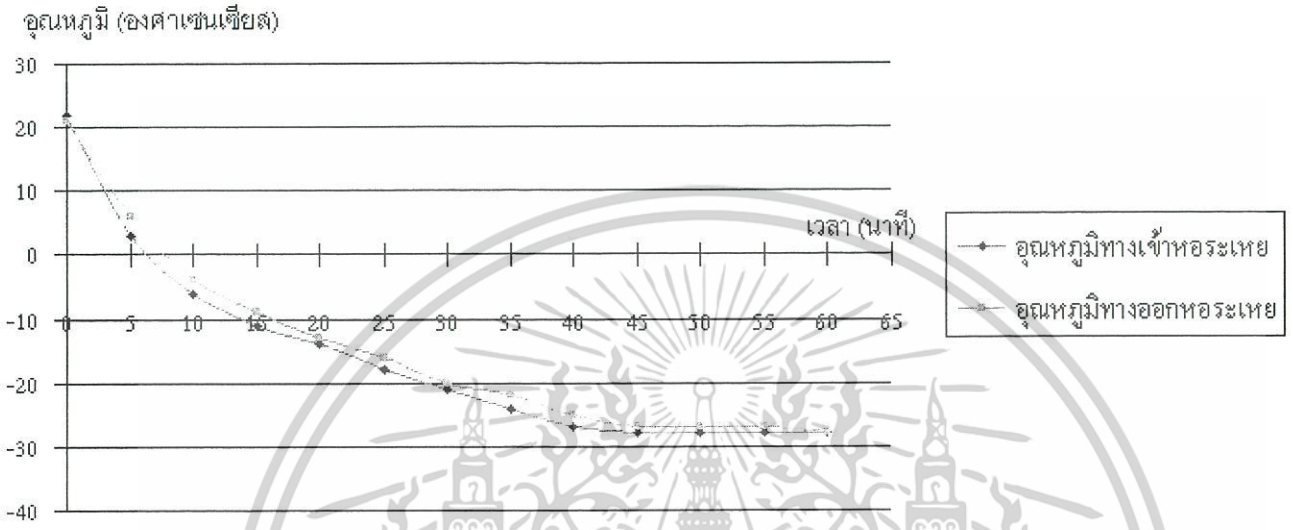
ครั้งที่ 2



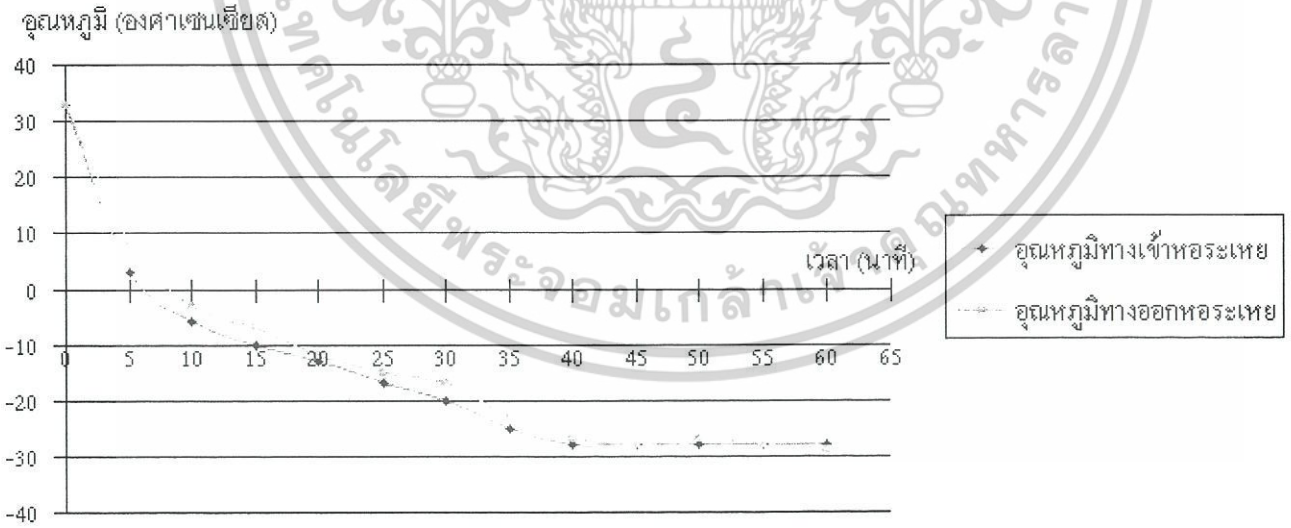
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิทางเข้าและทางออกหอระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3



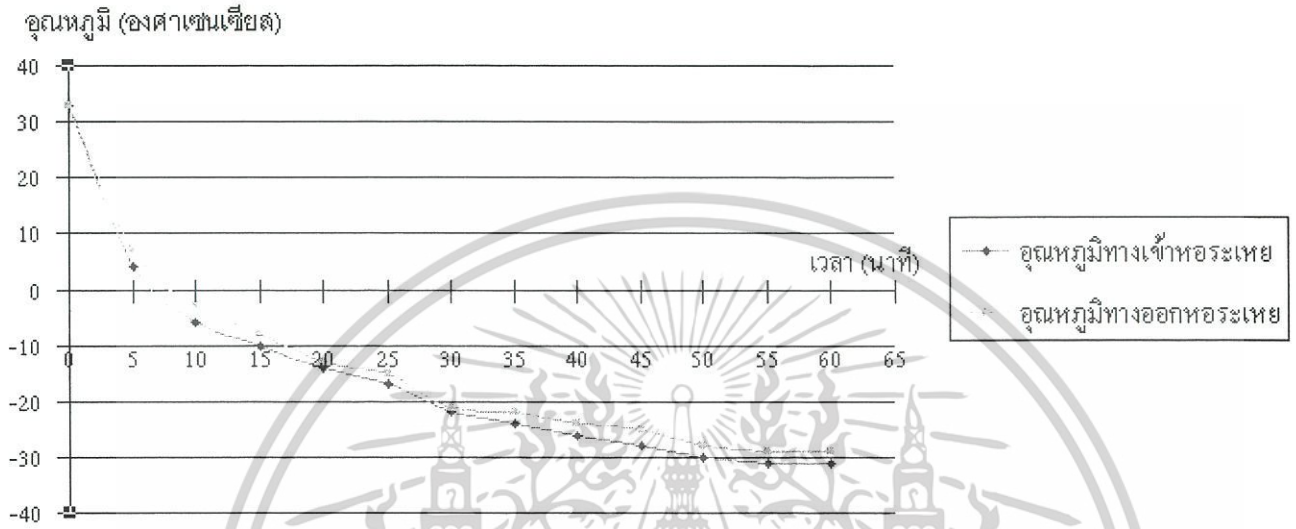
ครั้งที่ 4



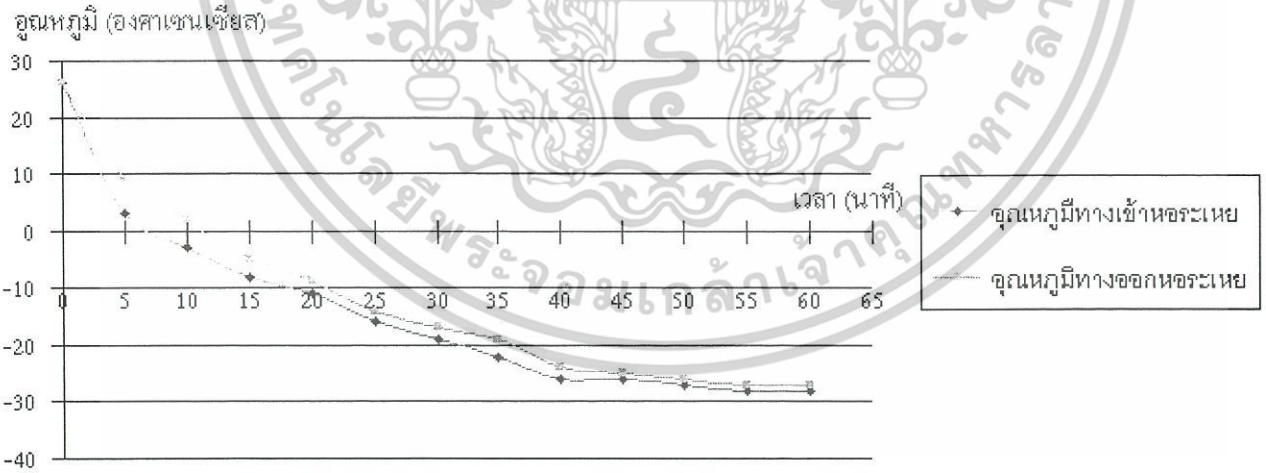
รูปที่ 4.10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 5



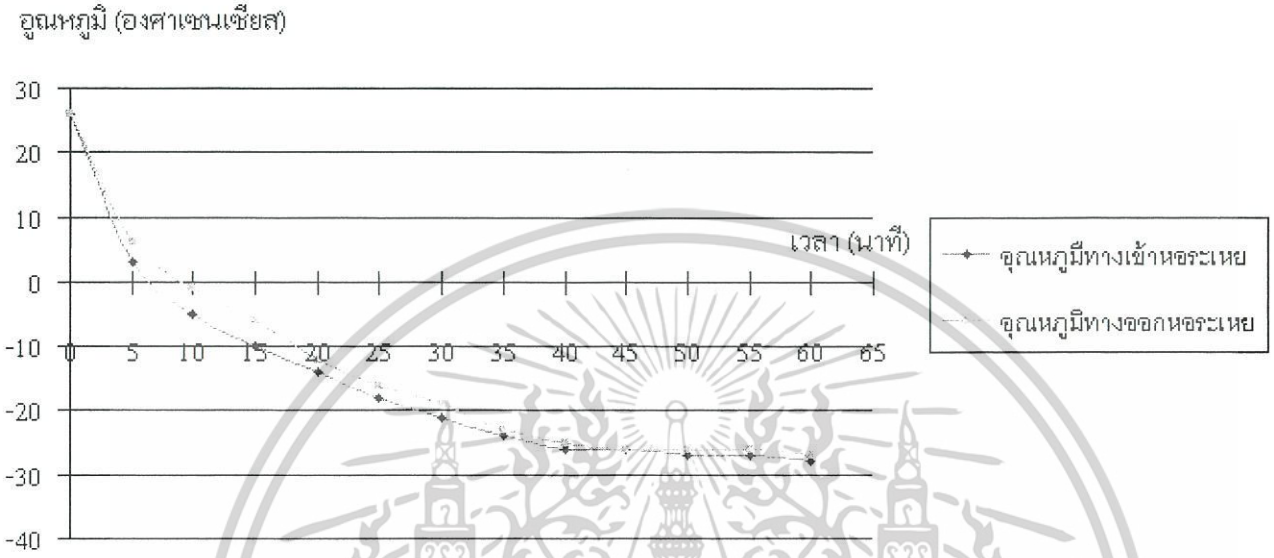
ครั้งที่ 6



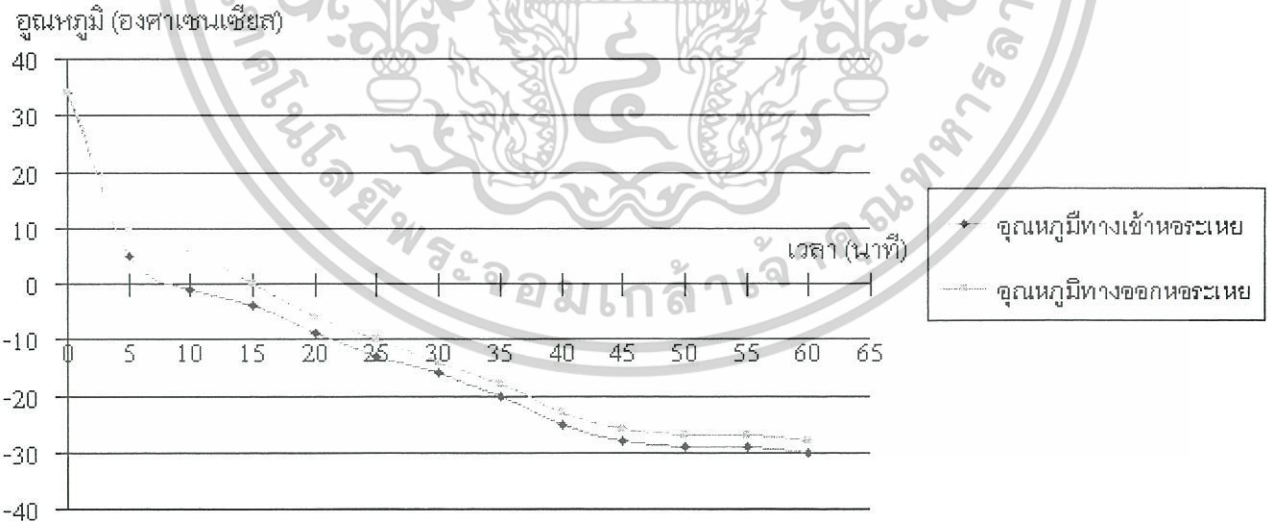
รูปที่ 4.10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 7



ครั้งที่ 8



รูปที่ 4.10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

5.1 บทวิจารณ์และสรุป

ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงถึงแนวทางการวัดและควบคุมอุณหภูมิที่สามารถบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งจะทำการส่งข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz มีการรับหรือส่งค่าและสามารถควบคุมอุณหภูมิโดยสั่งการจากคอมพิวเตอร์ได้

ในการสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ จะใช้พอร์ตอนุกรม RS-232 ติดต่อผ่าน MCS-51 อัตราการรับส่งข้อมูล 9600 บิตต่อวินาที จากนั้นข้อมูลการสั่งงานจะถูกส่งไปยัง โมดูลสร้างความถี่เพื่อส่งไปยังภาครับสัญญาณ ต่อจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตัดสินใจในการวัดและควบคุมต่อไป

เนื่องจากโมดูลสร้างความถี่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้มีราคาแพง เครื่องมือวัดและควบคุมไร้สายนี้ ถ้าหากต้องการความมีเสถียรภาพสูงจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลกลางที่มีเสถียร-ภาพสูงเพื่อป้องกันสิ่งรบกวนจากภายนอก ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเห็นว่ามีความยุ่งยากในการออกแบบและราคาจะสูงด้วย ดังนั้นในการออกแบบการทำงานจะต้องดูเสถียรภาพและความถูกต้องว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

5.2 ปัญหาในการทำงาน

1. เนื่องจากการส่งผ่านข้อมูลเป็นความถี่ อาจทำให้มีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบการรับส่งข้อมูลโดยสัญญาณรบกวนอาจเกิดขึ้นได้จากสภาวะแวดล้อม สภาพอากาศ
2. การวัดสัญญาณบางครั้งอาจมีความผิดพลาดของข้อมูล เนื่องจากตัวอุปกรณ์วัดเองหรือการแกว่งของสัญญาณที่จะวัด จึงทำให้ผลที่แสดงค่าทางคอมพิวเตอร์มีความผิดพลาดไปด้วย

5.3 สรุปผลการทำงาน

โครงงานการควบคุมไร้สายใช้การส่งค่าผ่านทางคลื่นถี่วิทยุ สามารถควบคุมกระบวนการได้หรือควบคุมให้ระบบมีการทำงานเป็นไปตามความต้องการได้ โดยไม่ต้องเดินสายสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุมและเครื่องมือวัดไปยังคอมพิวเตอร์ให้ยุ่งยาก เพราะจะใช้การติดต่อผ่านทางคลื่นวิทยุแทน จึงทำให้เกิดความคล่องตัว มีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น ซึ่งจากแนวความคิดนี้สามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์ในงานระบบควบคุมในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการสั่งงานทางผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการสั่งการ

```
Dim DATA(5)
Dim DATA1
Dim Datax, D As String
Dim Datay  As String
Dim Dataz As String
Dim Sp As String
Dim Qx, a33, se, se1, se2, se3, see1, see2 As Double
Dim Qy As Double
Private Sub Command1_Click()
If Timer1.Enabled Then
    Timer1.Enabled = False
    Command1.Caption = "&Stop"

 Else

Timer1.Enabled = True
Command1.Caption = "&Start"
 End If
 If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
    Else
    MSComm1.PortOpen = True
    End If

End Sub


Private Sub Command2_Click()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
  End If
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
se1 = 0
se3 = 0
 Timer1.Enabled = False
D = "0"
MSComm1.CommPort = 1
MSComm1Settings = "9600,n,8,1"
MSComm1.RThreshold = 1
Form1.Visible = True

MSChart1.ColumnCount = 2
MSChart1.RowCount = 200
MSChart1.chartType = VtChChartType2dLine
MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).ValueScale.Auto = False
MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).ValueScale.Minimum = -50
MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).ValueScale.Maximum = 50
MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).ValueScale.MajorDivision = 10

For i = 1 To MSChart1.RowCount - 1
MSChart1.Column = 1
MSChart1.Row = i + 1
MSChart1.DATA = "0"
MSChart1.Row = i

MSChart1.Column = 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

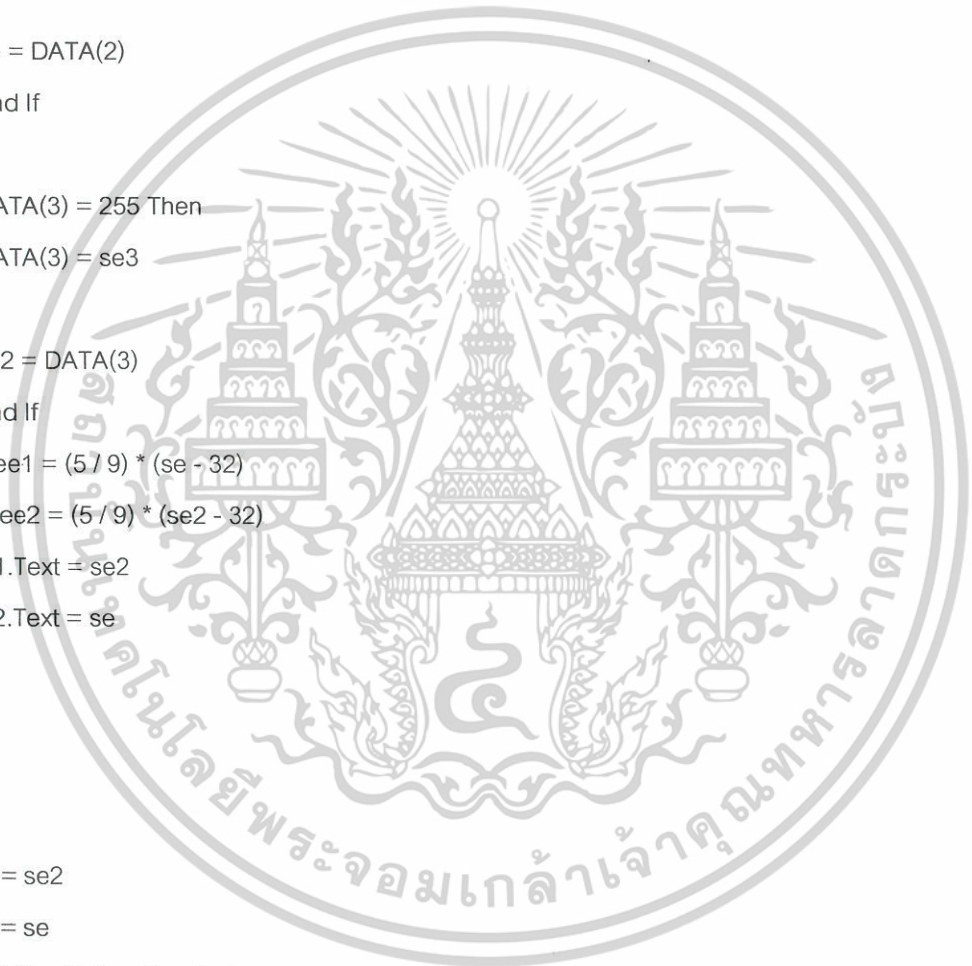
```
MSChart1.Row = i + 1
MSChart1.DATA = "0"
MSChart1.Row = i


Next i

MSChart1.Column = 2
MSChart1.Row = MSChart1.RowCount
MSChart1.DATA = "0"



End Sub

Private Sub mnuAbout_Click()
Form3.Show
End Sub

Private Sub mnuMSChart_Click()
Form2.Show
If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
    End If
End Sub

Private Sub mnuExit_Click()
If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
  End If
End
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Private Sub mnuStart_Click()

Timer1.Enabled = True
Command1.Caption = "&Start"

    MSComm1.PortOpen = True

End Sub

Private Sub mnuStop_Click()
Timer1.Enabled = False
Command1.Caption = "&Stop"
If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
  End If

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
Dim a, b As Integer
On Error Resume Next
MSComm1.DTREnable = False
MSComm1.DTREnable = True
MSComm1.InputLen = 1
start:

For n = 1 To 3
    Do
     DoEvents
     MSComm1.Output = D
      Loop Until MSComm1.InBufferCount > 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DATA(n) = Asc(MSComm1.Input)
Debug.Print DATA(n)
 If DATA(1) <> 255 Then GoTo start
    Next n
    If DATA(2) = 255 Then
       DATA(2) = se1

    Else
       se = DATA(2)
       End If

     If DATA(3) = 255 Then
       DATA(3) = se3
    Else
       se2 = DATA(3)
       End If
        see1 = (5 / 9) * (se - 32)
         see2 = (5 / 9) * (se2 - 32)
    Text1.Text = se2
    Text2.Text = se
```



```
ProgressBar1 = se2
ProgressBar2 = se
For i = 1 To MSChart1.RowCount - 1
MSChart1.Row = i + 1
b = MSChart1.DATA
MSChart1.Row = i
MSChart1.DATA = b
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Next i
MSChart1.Column = 1
MSChart1.Row = MSChart1.RowCount
MSChart1.DATA = see1

For i = 1 To MSChart1.RowCount - 1
MSChart1.Row = i + 1
c = MSChart1.DATA
MSChart1.Row = i
MSChart1.DATA = c

Next i
MSChart1.Column = 2
MSChart1.Row = MSChart1.RowCount
MSChart1.DATA = see2
        If Abs(see1 - see2) < 4 Then D = 0
         If Abs(see1 - see2) > 4 Then

          If see1 > see2 Then D = 1
          If see1 < see2 Then D = 2
          End If
    MSComm1.Output = D

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

คู่มือ ไอซี(Data sheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WENSHING

TRW -2.4GHz Radio Transeceiver

Conditions: VDD = +3V, VSS = 0V, T_A = - 40°C to + 85°C

Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
	Operating conditions					
VDD	Supply voltage		1.9	3.0	3.6	V
TEMP	Operating Temperature		-40	+27	+85	°C
	Digital input pin					
V_{IH}	HIGH level input voltage		VDD- 0.3		VDD	V
V_{IL}	LOW level input voltage		Vss		0.3	V
	Digital output pin					
V_{OH}	HIGH level output voltage (I_{OH}=-0.5mA)		VDD- 0.3		VDD	V
V_{OL}	LOW level output voltage (I_{OL}=0.5mA)		Vss		0.3	V
	General RF conditions					
f_{OP}	Operating frequency	1)	2400		2524	MHz
Δf	Frequency deviation			±156		kHz
R_{GFSK}	Data rate ShockBurst™		>0		1000	kbps
$F_{CHANNEL}$	Channel spacing			1		MHz
	Transmitter operation					
P_{RF}	Maximum Output Power	4)		0	+4	dBm
P_{RFC}	RF Power Control Range		16	20		dB
P_{RFCR}	RF Power Control Range Resolution				±3	dB
P_{BW}	20dB Bandwidth for Modulated Carrier				1000	kHz
P_{RF2}	2nd Adjacent Channel Transmit Power 2MHz				-20	dBm
P_{RF3}	3rd Adjacent Channel Transmit Power 3MHz				-40	dBm
I_{VDD}	Supply current @ 0dBm output power	5)		13		mA
I_{VDD}	Supply current @ -20dBm output power	5)		8.8		mA
I_{VDD}	Average Supply current @ -5dBm output power, ShockBurst™	6)		0.8		mA
I_{VDD}	Average Supply current in stand-by mode	7)		12		µA
I_{VDD}	Average Supply current in power down			1		µA
	Receiver operation					
I_{VDD}	Supply current one channel 250kbps			18		mA
I_{VDD}	Supply current one channel 1000kbps			19		mA
I_{VDD}	Supply current two channels 250kbps			23		mA
I_{VDD}	Supply current two channels 1000kbps			25		mA
RX_{SENS}	Sensitivity at 0.1%BER (@250kbps)			-90		dBm
RX_{SENS}	Sensitivity at 0.1%BER (@1000kbps)			-80		dBm
C/I_{CO}	C/I Co-channel			6		dB
C/I_{1ST}	1st Adjacent Channel Selectivity C/I 1MHz			-1		dB
C/I_{2ND}	2nd Adjacent Channel Selectivity C/I 2MHz			-16		dB
C/I_{3RD}	3rd Adjacent Channel Selectivity C/I 3MHz			-26		dB
RX_B	Blocking Data Channel 2			-41		dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ShockBurst™

The ShockBurst™ technology uses on-chip FIFO to clock in data at a low data rate and transmit at a very high rate thus enabling extremely power reduction.
When operating the TRW-2.4G in ShockBurst™, you gain access to the high data rates (1 Mbps) offered by the 2.4 GHz band without the need of a costly, high-speed micro controller (MCU) for data processing.
By putting all high speed signal processing related to RF protocol on-chip, the TRW-2.4G offers the following benefits:

- Highly reduced current consumption
- Lower system cost (facilitates use of less expensive micro controller)
- Greatly reduced risk of 'on-air' collisions due to short transmission time

The TRW-2.4G can be programmed using a simple 3-wire interface where the data rate is decided by the speed of the micro controller.
By allowing the digital part of the application to run at low speed while maximizing the data rate on the RF link, the nRF ShockBurst™ mode reduces the average current consumption in applications considerably.

ShockBurst™ principle

When the TRW-2.4G is configured in ShockBurst™, TX or RX operation is conducted in the following way (10 kbps for the example only).

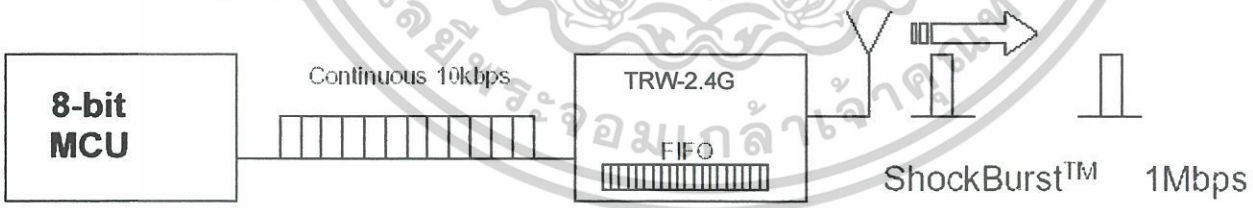
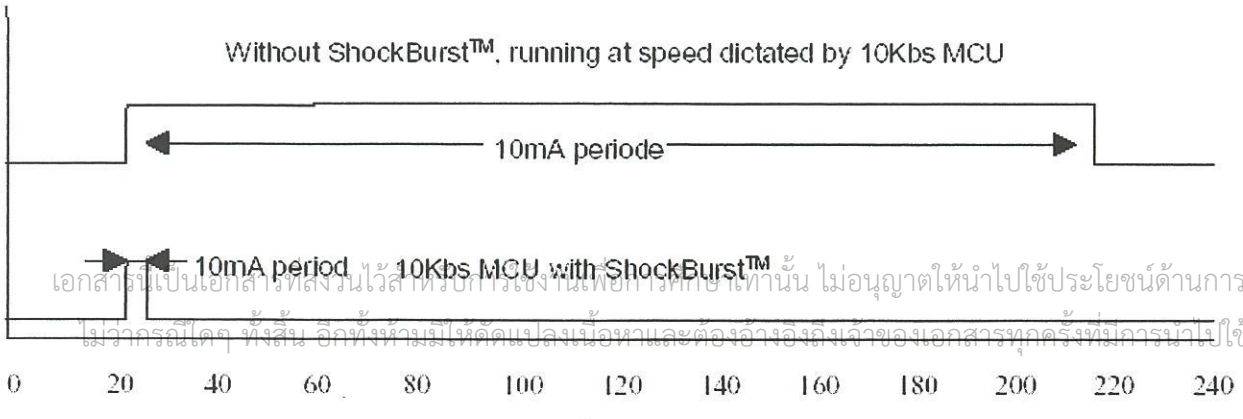


Figure 4 Clocking in data with MCU and sending with ShockBurst™ technology



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

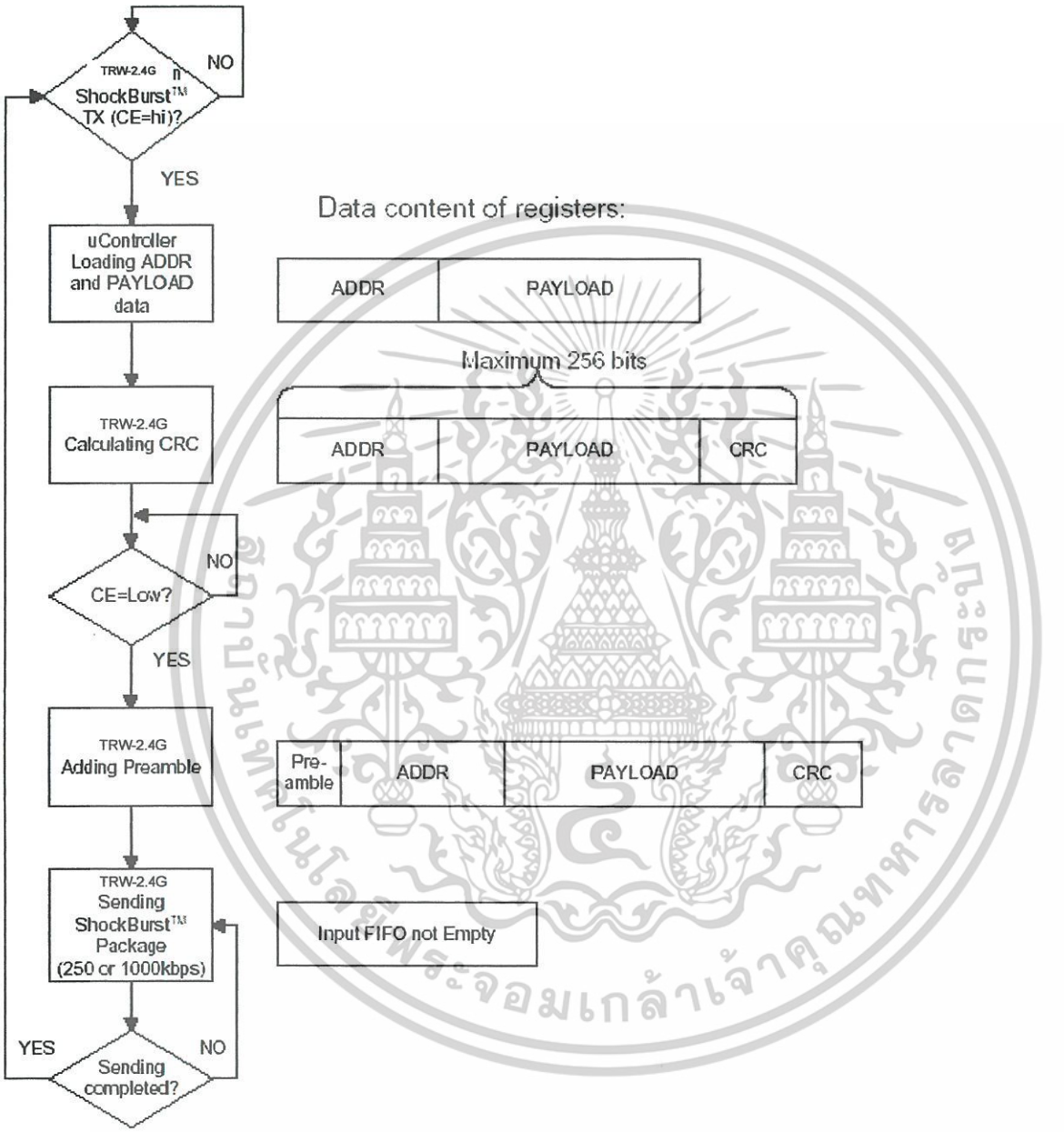


Figure 2 Flow Chart ShockBurst™ Transmit of TRW-2.4G

nRF2401 ShockBurst™ Transmit:

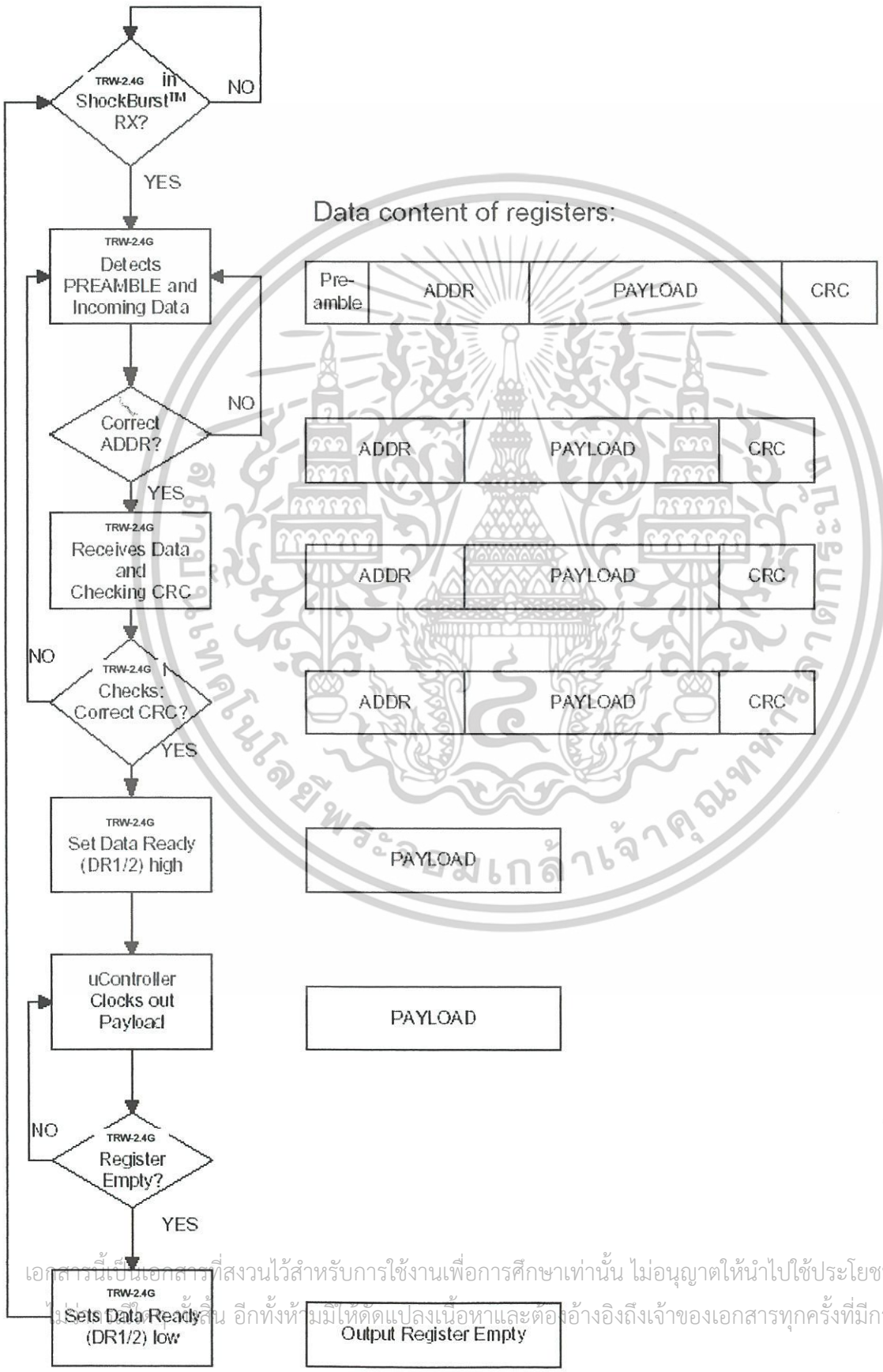
MCU interface pins: CE, CLK1, DATA

1. When the application MCU has data to send, set CE high. This activates TRW-2.4G on-board data processing.
2. The address of the receiving node (RX address) and payload data is clocked into the TRW-2.4G . The application protocol or MCU sets the speed ≤1Mbps (ex: 10kbps).
3. MCU sets CE low, this activates a TRW-2.4G ShockBurst™ transmission.
4. TRW-2.4G ShockBurst™:
   - RF front end is powered up

เอกสารนี้จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WENSHING

TRW -2.4GHz Radio Transeceiver



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRW-2.4G ShockBurst™ Receive:

MCU interface pins: CE, DR1, CLK1 and DATA (one RX channel receive)

1. Correct address and size of payload of incoming RF packages are set when TRW-2.4G is configured to ShockBurst™ RX.
2. To activate RX, set CE high.
3. After 200 µs settling, TRW-2.4G is monitoring the air for incoming communication.
4. When a valid package has been received (correct address and CRC found), TRW-2.4G removes the preamble, address and CRC bits.
5. TRW-2.4G then notifies (interrupts) the MCU by setting the DR1 pin high.
6. MCU may (or may not) set the CE low to disable the RF front end (low current mode).
7. The MCU will clock out just the payload data at a suitable rate (ex. 10 kbps).
8. When all payload data is retrieved TRW-2.4G sets DR1 low again, and is ready for new incoming data package if CE is kept high during data download. If the CE was set low, a new start up sequence can begin, see Figure 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DuoCeiver™ Simultaneous Two Channel Receive Mode

In both ShockBurst™ .. .. modes the TRW-2.4G can facilitate simultaneous reception of two parallel independent frequency channels at the maximum data rate. This means:

- TRW-2.4G can receive data from two 1 Mbps transmitters (ex: TRW-2.4G or TRW-2.4G_) 8 MHz (8 frequency channels) apart through one antenna interface.
- The output from the two data channels is fed to two separate MCU interfaces.
  - Data channel 1: CLK1, DATA, and DR1
  - Data channel 2: CLK2, DOUT2, and DR2
  - DR1 and DR2 are available only in ShockBurst™.

The TRW-2.4G DuoCeiver™ technology provides 2 separate dedicated data channels for RX and replaces the need for two, stand alone receiver systems.

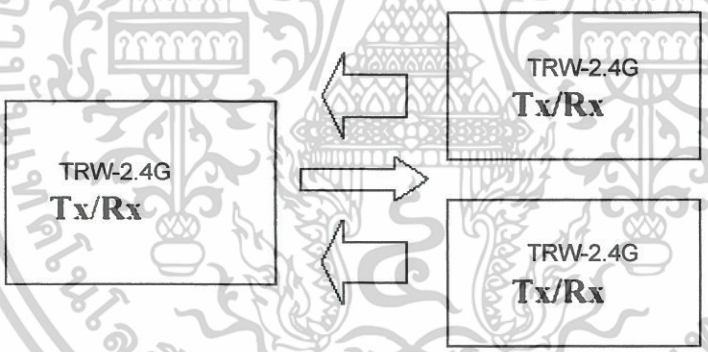
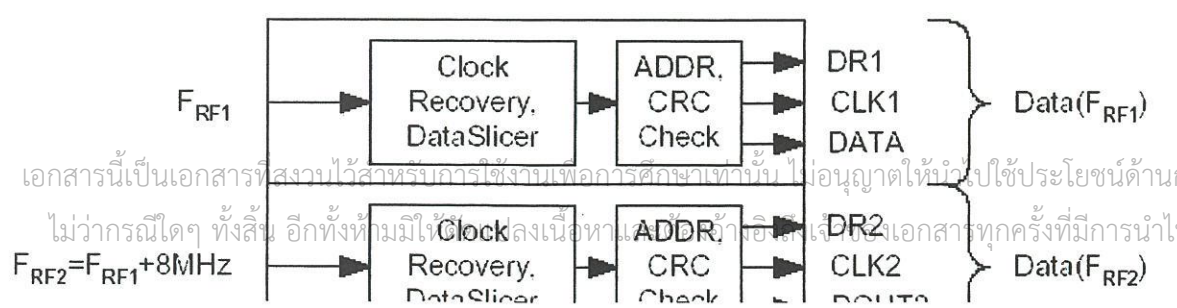


Figure 4 Simultaneous 2 channel receive on TRW-2.4G

There is one absolute requirement for using the second data channel. For the TRW-2.4G to be able to receive at the second data channel the frequency channel must be 8MHz higher than the frequency of data channel 1. The TRW-2.4G must be programmed to receive at the frequency of data channel 1. No time multiplexing is used in TRW-2.4G to fulfil this function. In direct mode the MCU must be able to handle two simultaneously incoming data packets if it is not multiplexing between the two data channels. In ShockBurst™ it is possible for the MCU to clock out one data channel at a time while data on the other data channel waits for MCU availability, without any lost data packets, and by doing so reduce the needed performance of the MCU.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVICE CONFIGURATION

All configuration of the TRW-2.4G is done via a 3-wire interface to a single configuration register. The configuration word can be up to 15 bytes long for ShockBurst™

Configuration for ShockBurst™ operation

The configuration word in ShockBurst™ enables the TRW-2.4G to handle the RF protocol. Once the protocol is completed and loaded into TRW-2.4G only one byte, bit[7:0], needs to be updated during actual operation.

The configuration blocks dedicated to ShockBurst™ is as follows:

- Payload section width: Specifies the number of payload bits in a RF package. This enables the TRW-2.4G to distinguish between payload data and the CRC bytes in a received package.
- Address width: Sets the number of bits used for address in the RF package. This enables the TRW-2.4G to distinguish between address and payload data.
- Address (RX Channel 1 and 2): Destination address for received data.
- CRC: Enables nRF2401 on-chip CRC generation and de-coding.

NOTE:
These configuration blocks, with the exception of the CRC, are dedicated for the packages that a TRW-2.4G is to receive.
In TX mode, the MCU must generate an address and a payload section that fits the configuration of the TRW-2.4G that is to receive the data.
When using the TRW-2.4G on-chip CRC feature ensure that CRC is enabled and uses the same length for both the TX and RX devices.

PRE-AMBLE	ADDRESS	PAYLOAD	CRC

Figure 10 Data packet set-up

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Configuration Word overview

	Bit position	Number of bits	Name	Function
ShockBurst™ configuration	143:120	24	TEST	Reserved for testing
	119:112	8	DATA2_W	Length of data payload section RX channel 2
	111:104	8	DATA1_W	Length of data payload section RX channel 1
	103:64	40	ADDR2	Up to 5 byte address for RX channel 2
	63:24	40	ADDR1	Up to 5 byte address for RX channel 1
	23:18	6	ADDR_W	Number of address bits (both RX channels).
	17	1	CRC_L	8 or 16 bit CRC
	16	1	CRC_EN	Enable on-chip CRC generation/checking.
General device configuration	15	1	RX2_EN	Enable two channel receive mode
	14	1	CM	Communication mode (Direct or ShockBurst™)
	13	1	RFDR_SB	RF data rate (1Mbps requires 16MHz crystal)
	12:10	3	XO_F	Crystal frequency
	9:8	2	RF_PWR	RF output power
	7:1	7	RF_CH#	Frequency channel
	0	1	RXEN	RX or TX operation

Table 1 Table of configuration words.

The configuration word is shifted in MSB first on positive CLK1 edges. New configuration is enabled on the falling edge of CS.

NOTE.
On the falling edge of CS, the TRW-2.4G updates the number of bits actually shifted in during the last configuration.
Ex:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Configuration Word Detailed Description

The following describes the function of the 144 bits (bit 143 = MSB) that is used to configure the TRW-2.4G
General Device Configuration: bit[15:0]
ShockBurst™ Configuration: bit[119:0]
Test Configuration: bit[143:120]

MSB	TEST							
D143	D142	D141	D140	D139	D138	D137	D136	
Reserved for testing								
1	0	0	0	1	1	1	0	Default

MSB	TEST														
D135	D134	D133	D132	D131	D130	D129	D128	D127	D126	D125	D124	D123	D122	D121	D120
Reserved for testing														Close PLL in TX	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	Default

DATA2_W							
D119	D118	D117	D116	D115	D114	D113	D112
Data width channel#2 in # of bits excluding addr/crc							
0	0	1	0	0	0	0	0	Default

DATA1_W							
D111	D110	D109	D108	D107	D106	D105	D104
Data width channel#1 in # of bits excluding addr/crc							
0	0	1	0	0	0	0	0	Default

ADDR2												
D103	D102	D101	....	D71	D70	D69	D68	D67	D66	D65	D64	
Channel#2 Address RX (up to 40bit)												
0	0	0	...	1	1	1	0	0	1	1	1	Default

ADDR1												
D63	D62	D61	....	D31	D30	D29	D28	D27	D26	D25	D24	
Channel#1 Address RX (up to 40bit)												
0	0	0	...	1	1	1	0	0	1	1	1	Default

ADDR_W						
D23	D22	D21	D20	D19	D18	
Address width in # of bits (both channels)						
0	0	1	0	0	0	Default

CRC		
D17	D16	
CRC Mode 1 = 16bit, 0 = 8bit	CRC 1 = enable; 0 = disable	
0	1	Default

RF-Programming															LSB	
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Two Ch.	BUF	OD	XO	RF Power				Channel selection							RXEN	
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	Default

Table 2Configuration data word

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ShockBurst™ configuration:

The section B[119:16] contains the segments of the configuration register dedicated to ShockBurst™ operational protocol. After VDD is turned on ShockBurst™ configuration is done once and remains set whilst VDD is present. During operation only the first byte for frequency channel and RX/TX switching need to be changed.

PLL_CTRL

PLL_CTRL		
D121	**D120**	**PLL**
0	0	Open TX/Closed RX
0	1	Open TX/Open RX
1	0	Closed TX/Closed RX
1	1	Closed TX/Open RX

Table 10 PLL setting.

Bit 121-120:

PLL_CTRL: Controls the setting of the PLL for test purposes. With closed PLL in TX no deviation will be present.

DATAx_W

DATA2_W							
119	118	117	116	115	114	113	112

DATA1_W							
111	110	109	108	107	106	105	104

Table 4 Number of bits in payload.

Bit 119 – 112:

DATA2_W: Length of RF package payload section for receive-channel 2.

Bit 111 – 104:

DATA1_W: Length of RF package payload section for receive-channel 1.

NOTE:

The total number of bits in a ShockBurst™ RF package may not exceed 256! Maximum length of payload section is hence given by:

$$DATAx_W(bits) = 256 - ADDR_W - CRC$$

Where:

ADDR_W: length of RX address set in configuration word B[23:18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

General device configuration:

This section of the configuration word handles RF and device related parameters.

Modes:

RX2_EN	CM	RFDR_SB	XO_F			RF_PWR	
15	14	13	12	11	10	9	8

Table 7 RF operational settings.

Bit 15:

RX2_EN:

Logic 0: One channel receive
Logic 1: Two channels receive

NOTE:

In two channels receive, the TRW-2.4G receives on two, separate frequency channels simultaneously. The frequency of receive channel 1 is set in the configuration word B[7-1], receive channel 2 is always 8 channels (8 MHz) above receive channel 1.

Bit 14:

Communication Mode:

Logic 1: nRF2401 operates in ShockBurst™ mode

Bit 13:

RF Data Rate:

Logic 0: 250 kbps
Logic 1: 1 Mbps

NOTE:

Utilizing 250 kbps instead of 1Mbps will improve the receiver sensitivity by 10 dB. 1Mbps requires 16MHz crystal.

Bit 12-10:

D12	D11	D10
0	1	1

Table 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bit 9-8:

RF_PWR: Sets TRW-2.4G RF output power in transmit mode:

RF OUTPUT POWER		
D9	D8	P [dBm]
0	0	-20
0	1	-10
1	0	-5
1	1	0

Table 9 · RF output power setting.

RF channel & direction

RF_CH#							RXEN
7	6	5	4	3	2	1	0

Table 10 Frequency channel + RX / TX setting.

Bit 7 – 1:

RF_CH#: Sets the frequency channel the nRF2401 operates on.

The channel frequency in ***transmit*** is given by:

$$Channel_{TX} = 2400\,MHz + RF_CH\# \cdot 1.0\,MHz$$

RF_CH #: between 2400MHz and 2527MHz may be set.

The channel frequency in ***data channel 1*** is given by:

$$Channel_{RX} = 2400\,MHz + RF_CH\# \cdot 1.0\,MHz$$ (Receive at PIN#8)

RF_CH #: between 2400MHz and 2524MHz may be set.

NOTE:
The channels above 83 can only be utilized in certain territories (ex: Japan)

The channel frequency in ***data channel 2*** is given by:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Channel_{RX} = 2400\,MHz + RF_CH\# \cdot 1.0\,MHz + 8MHz$$ (Receive at PIN#4)

RF_CH #: between 2408MHz and 2524MHz may be set.

DATA PACKAGE DESCRIPTION

PRE-AMBLE	ADDRESS	PAYLOAD	CRC

Figure 7 Data Package Diagram

The data packet for both ShockBurst™ mode and direct mode communication is divided into 4 sections. These are:

1. PREAMBLE	· The preamble field is required in ShockBurst.
2. ADDRESS	· The address field is required in ShockBurst. mode. · 8 to 40 bits length. · Address automatically removed from received packet in ShockBurst.mode
3. PAYLOAD	· The data to be transmitted · In Shock-Burst mode payload size is 256 bits minus the following:(Address: 8 to 40 bits. + CRC 8 or 16 bits).
4. CRC	· 8 or 16 bits length · The CRC is stripped from the received output data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT TIMING DATA

The following timing applies for operation of nRF2401 TRW-2.4G

TRW-2.4G Timing Information

nRF2401 timing	Max.	Min.	Name
VDD OFF → ST_BY mode	3ms		Tpd2sby
VDD OFF → Active mode (RX/TX)	3ms		Tpd2a
ST_BY → TX ShockBurst™	195µs		Tsby2txSB
ST_BY → TX Direct Mode	202µs		Tsby2txDM
ST_BY → RX mode	202µs		Tsby2rx
Minimum delay from CS to data.		5µs	Tcs2data
Minimum delay from CE to data.		5µs	Tce2data
Minimum delay from DR1/2 to clk.		50ns	Tdr2clk
Maximum delay from clk to data.	50ns		Tclk2data
Delay between edges		50ns	Td
Setup time		500ns	Ts
Hold time		500ns	Th
Delay to finish internal GFSK data		1/data rate	Tfd
Minimum input clock high		500ns	Thmin
Set-up of data in Direct Mode	50ns		Tsdm
Minimum clock high in Direct Mode		300ns	Thdm
Minimum clock low in Direct Mode		230ns	Tldm

Table 11 Switching times for nRF2401 TRW-2.4G

When the nRF2401 TRW-2.4G is in power down it must always settle in stand-by (Tpd2sby) before it can enter configuration or one of the active modes.

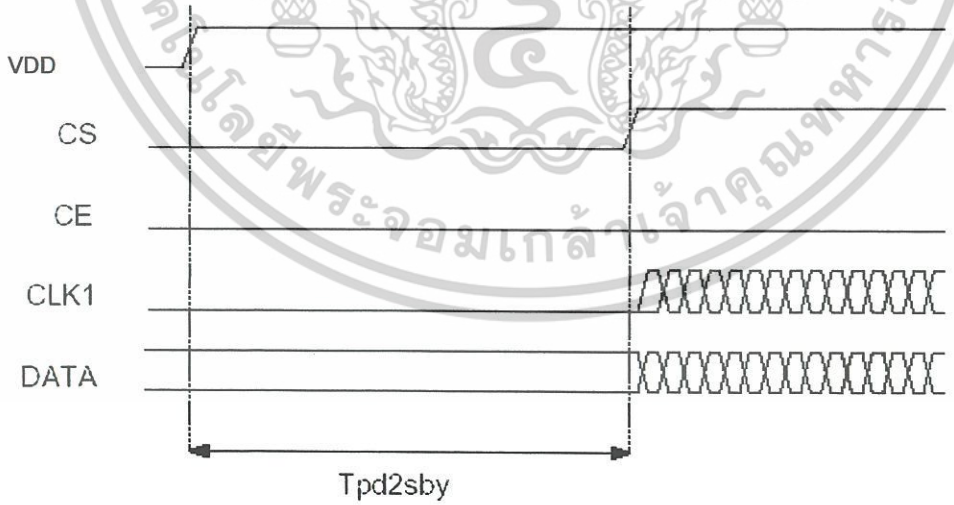


Figure 8 Timing diagram for power down (or VDD off) to stand by mode for TRW-2.4G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

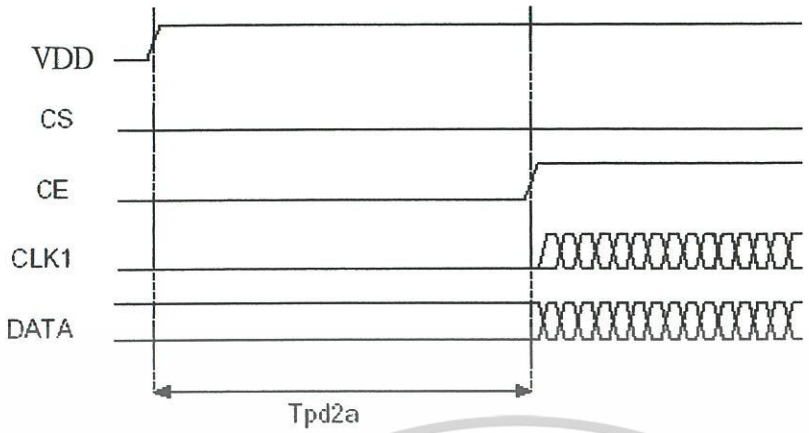


Figure 9 VDD off to active mode

Note that the configuration word will be lost when VDD is turned off and that the device then must be configured before going to one of the active modes. If the device is configured one can go directly from power down to the wanted active mode.

Note:

CE and CS may not be high at the same time. Setting one or the other decides whether configuration or active mode is entered.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Configuration mode timing

When one or more of the bits in the configuration word needs to be changed the following timing apply.

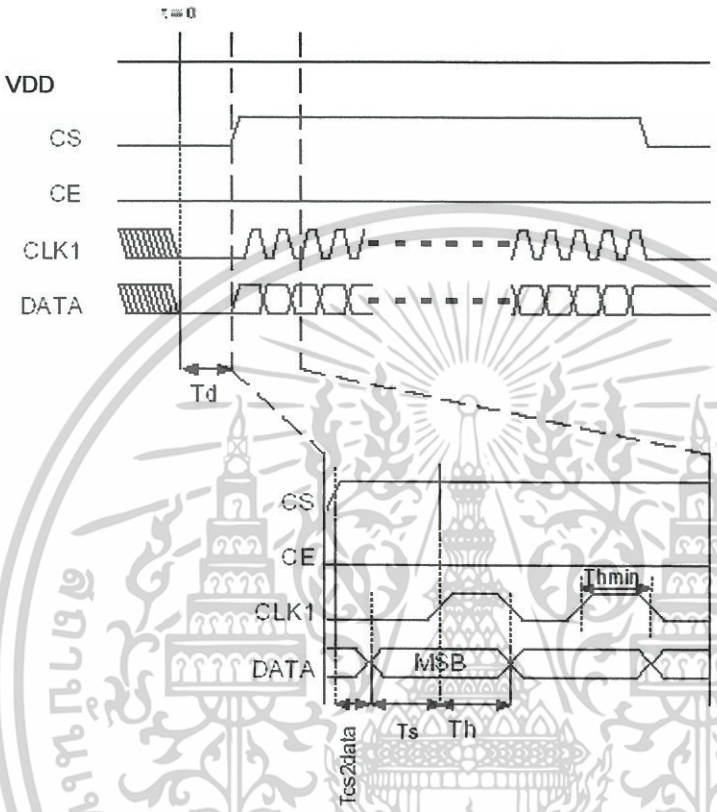


Figure 10 Timing diagram for configuration of TRW-2.4G

If configuration mode is entered from power down, CS can be set high after Tpd2sby as shown in Figure 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ShockBurst™ Mode timing

ShockBurst™ TX:

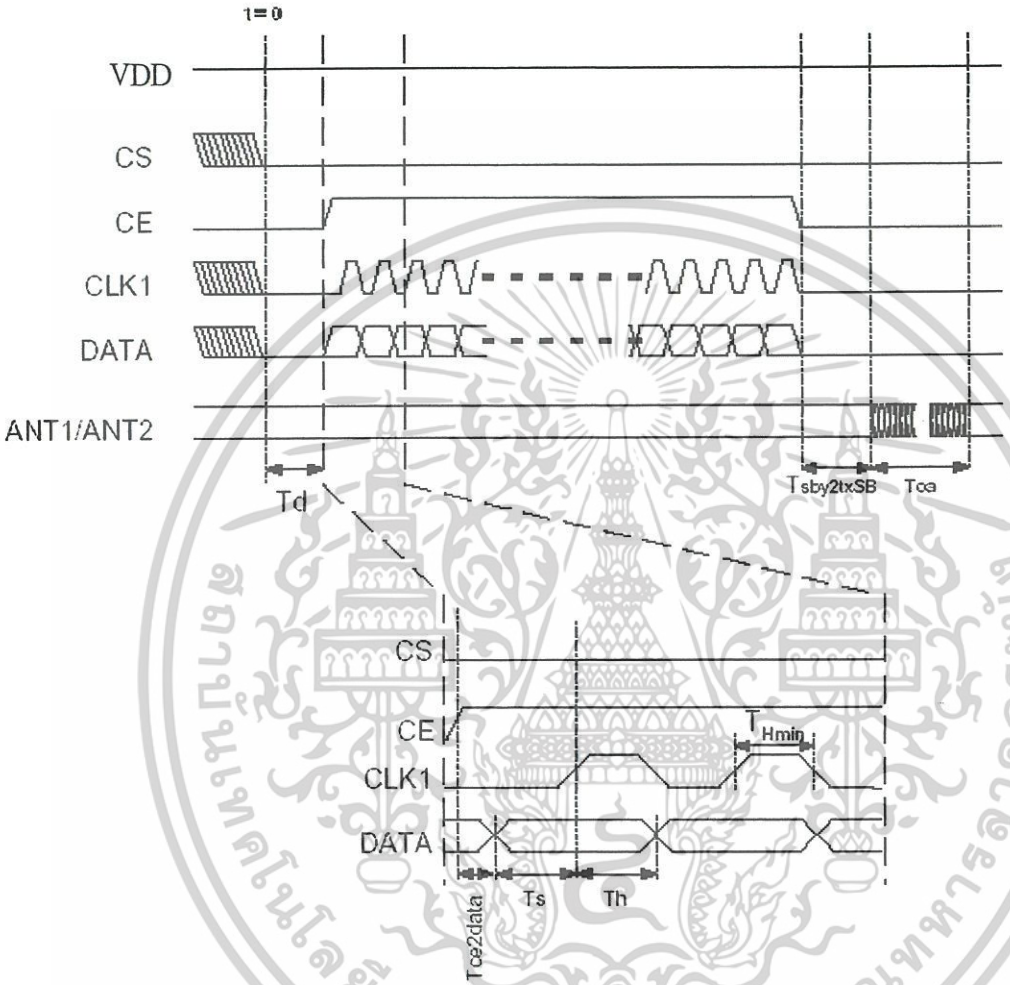


Figure 11 Timing of ShockBurst™ in TX

The package length and the data rate give the delay Toa (time on air), as shown in the equation.

$$T_{oa} = 1/datarate \cdot (\#databits + 1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ShockBurst™ RX:

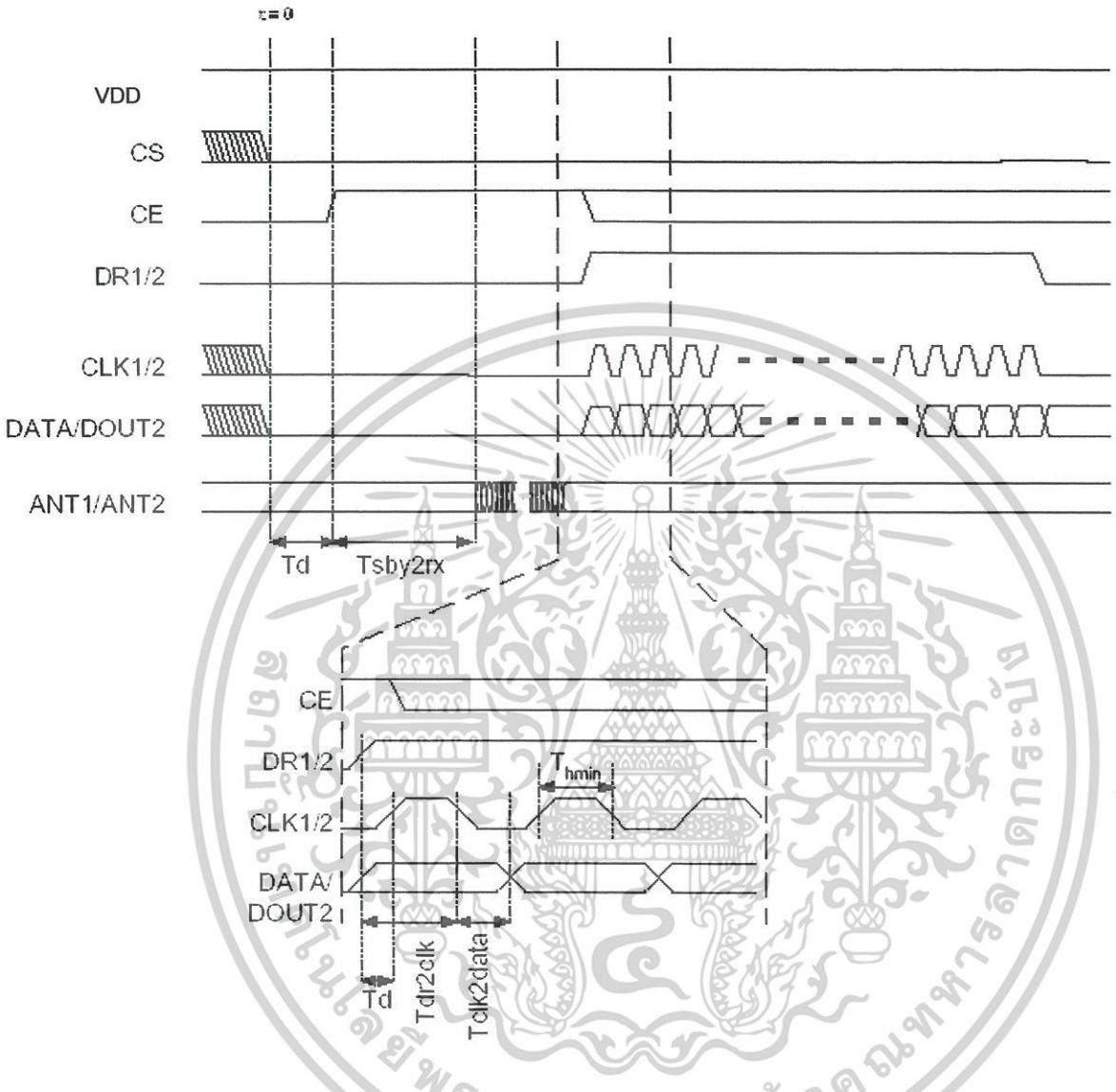


Figure 12 Timing of ShockBurst™ in RX

The CE may be kept high during downloading of data, but the cost is higher current consumption (18mA) and the benefit is no start-up time (200μs) after the DR1 goes low.

Output Power adjustment

Power setting bits of configuring word	RF output power	DC current consumption
11	0 dBm ±3dB	13.0 mA
10	-5 dBm ±3dB	10.5 mA
01	-10 dBm ±3dB	9.4 mA
00	-20 dBm ±3dB	8.8 mA

Conditions: VDD = 3.0V, VSS = 0V, T_A = 27°C, Load impedance = 400 Ω.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานระบบการวัดและควบคุมกระบวนการแบบไร้สายนี้ ได้พบอุปสรรคบ้างเช่นกันแต่สุดท้ายก็สำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้ก็เพราะได้รับคำปรึกษา คำเสนอแนะ และความช่วยเหลือต่าง ๆ จากท่านอาจารย์วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ ตลอดจนความรู้พื้นฐานต่าง ๆ ที่สำคัญที่นำมาใช้ในการใช้ในการทำโครงงานนี้จากท่านคณาจารย์ทั้งหลายที่ถ่ายทอดผ่านความรู้ในทางวิชาการต่าง ๆ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้ และกำลังใจจากเพื่อน ๆ ทุกคน ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย และจะนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงงานชิ้นนี้ไปประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ต่อไป

จรัญ แสนสุข
ชาญชัย วงษ์วิจารณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, "ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาลอก", บริษัท ว. เพชรสกุล จำกัด 278 หน้า, 2545
2 ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, "ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช", บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์, 399 หน้า, 2544
3 อภิชาต ภู่พลับ, "เริ่มต้นการเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วย Visual Basic", Infopress Developer Book, 226 หน้า, 2546
4 ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, "ระบบดาต้าแอกควิซิชั่น", บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์, 82 หน้า, 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้