

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติ

PROGRAMMABLE DOG FEEDING MACHINE



นายพนทวัฒน์ ไชยคำ
นายวิทยา สทานบุตร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62695**
วัน,เดือน,ปี..... **21 ส.ค. 2549**

b. 11 b2856x
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAMMABLE DOG FEEDING MACHINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้
PROGRAMMABLE DOG FEEDING MACHINE
นักศึกษาผู้จัดทำ นายณนทวัฒน์ ไชยคำ รหัสประจำตัว 46015442
นายวิทยา สทานบุตร รหัสประจำตัว 46015455
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
ผศ. วิสรุต ศรีรัตนะ	

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบเซอร์โฮงด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้ PROGRAMMABLE DOG FEEDING MACHINE		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายณนทวัฒน์ ไชยคำ	รหัสประจำตัว	46015442
	นายวิทยา สทานบุตร	รหัสประจำตัว	46015455
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.วิสรุต ศรีรัตนะ		
ปีการศึกษา	2548		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบเครื่องให้อาหารสำเร็จรูปสำหรับสุนัขแบบอัตโนมัติ โดยสามารถโปรแกรม เพื่อเลือกช่วงเวลาการให้อาหารและปริมาณของอาหารให้เหมาะสมกับสุนัขแต่ละขนาดและอายุ โดยเน้นการออกแบบให้ง่ายต่อการที่จะใช้งาน ซึ่งในที่นี้จะใช้โพลีคาร์บอเนตเป็นทรานสดิวเซอร์ สำหรับตรวจวัดปริมาณน้ำหนักของอาหารที่ให้ในแต่ละมื้อและส่งสัญญาณในรูปของแรงดันทางไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับวงจรจัดระดับและเงื่อนไขของสัญญาณ เพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ 18F458 ทำการประมวลผลและควบคุมสตีปปีงมอเตอร์สำหรับปล่อยอาหารจากไซโลให้ได้ตามปริมาณที่กำหนด

Thesis Title	Programmable dog feeding machine
Authors	Mr. Nonthawat Chaikham Mr. Wittaya Satanboot
Thesis Advisor	Asst.Prof. Witsarut Sriratana
Year	2005

ABSTRACT

This thesis presents the design of Automatic dog feeding machine that can select time interval and quantity of the pet food to suit the size and the age of the dogs. It is designed by considering various conditions to make it easy to use and inexpensive. Hereby, Load cell, a transducer accessory, is applied to measure the weight of the pet food and then transfer the signal to conditioner circuit. This information will process to the microcontroller via PIC 18F458 and then the program in microcontroller will transfer a signal to stepping motor for controlling the food fed.

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิศรุต ศรีรัตนะ ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ให้คำแนะนำเนื้อหาอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจ และความพยายามให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี



คณะผู้จัดทำ

III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบ.....	3
2.1 อุปกรณ์ทรานส์คิวเซอร์.....	3
2.1.1 เกจความเครียด.....	3
2.1.2 บริดจ์ของเกจความเครียด.....	5
2.1.3 การจัดวางเกจความเครียด.....	11
2.1.4 การสมดุลของบริดจ์.....	13
2.1.5 ส่วนประกอบยึดหยุ่นที่ใช้ในการวัดแรง.....	17
2.1.6 ชนิดของโพลีเมอร์แบบต่างๆ.....	17
2.2 การแปลงสัญญาณนอกดิจิตอลแบบซีกเซตซีพแอปพลิเคชัน.....	24
2.3 สเต็ปป์มอเตอร์.....	27
2.3.1 โครงสร้างและการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์.....	28
2.3.2 การกระตุ้นเฟสสเต็ปป์มอเตอร์.....	30

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ PC BUS.....	34
2.4.1 การเชื่อมต่อบัสแบบ PC BUS.....	34
2.4.2 การรับส่งข้อมูลของ PC BUS	35
2.4.3 ข้อกำหนดในการเริ่มต้นและสิ้นสุด.....	37
2.4.4 การแจ้งสถานะรับทราบในบัส.....	39
2.4.5 คุณสมบัติของ PCF8583.....	39
2.4.6 การจัดหาสัญญาณของ PCF8583.....	41
2.5 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2).....	42
2.5.1 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD.....	44
2.5.2 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD.....	47
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	47
2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์แบบพื้นฐาน	50
บทที่ 3 หลักการทำงานของระบบ.....	52
3.1 หลักการทำงานของเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้.....	52
3.2 Block Diagram ของระบบ.....	53
3.3 ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องให้อาหารสุนัข.....	54
3.4 คู่มือการใช้เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบ โปรแกรมได้.....	56
บทที่ 4 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบระบบ.....	61
4.1 การทดสอบหาค่าอัตราขยายที่ให้เอาต์พุตของ Op –Amp มีค่าที่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด.....	61
4.2 การทดสอบเพื่อดูผลการชั่งน้ำหนักเมื่อใช้อัตราขยาย 3000 เท่า ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	70
4.3 ผลการทดสอบเมื่อทำการแก้ไขความเร็วรอบของมอเตอร์ในการเปิดปิดถังพัก.....	73
4.4 ผลการทดสอบการแก้ไขด้วยการหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ได้จากโหลดเซลล์.....	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุห่อหุ้มแกนชนิดเส้นลวดและสารยึดติด.....	5
2.2 แสดงค่าของแฟลทโทลด์เซลล์.....	24
2.3 แสดงชื่อและหน้าที่ของขาสัญญานของ LCD.....	43
4.1 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	62
4.2 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 1000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	63
4.3 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 1500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	63
4.4 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 2000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	64
4.5 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 2500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	65
4.6 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 3000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	65
4.7 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 3500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	67
4.8 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 4000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	67
4.9 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 4500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	68
4.10 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 5000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	69
4.11 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 7500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	70
4.12 ผลการชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 10000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	70
4.13 ตารางการทดลองโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	71
4.14 ตารางการทดลองโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	72
4.15 ตารางการทดลองโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	73
4.16 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	74
4.17 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	75
4.18 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	76
4.19 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	77
4.20 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	78
4.21 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	79
4.22 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 400 กรัม.....	80
4.23 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 500 กรัม.....	81

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.24 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 700 กรัม.....	81
4.25 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 800 กรัม.....	82
4.26 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 960 กรัม.....	84
5.1 ตารางปริมาณการให้อาหารสุนัขต่อวัน.....	85



VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เกจความเครียดชนิดไม่ขีดตัด.....	4
2.2 ชนิดของเกจความเครียด.....	4
2.3 การติดเกจความเครียด.....	4
2.4 สมดุลบริดจ์ของเกจความเครียด	6
2.5 ไม่สมดุลบริดจ์ของเกจความเครียด.....	6
2.6 พล็อตของ EO'/EO และ $RG/R1$	7
2.7 คีซีบริดจ์.....	8
2.8 เอซีบริดจ์.....	9
2.9 การชดเชยอุณหภูมิด้วยคัมมิเกจ.....	10
2.10 การจัดวางเกจความเครียดโดยใช้เกจ 4 ตัว.....	10
2.11 รูปแบบการจัดวางที่เป็นไปได้สำหรับการวัดแรง P.....	11
2.12 การจัดวางเกจความเครียดเพื่อการวัดแรง P.....	12
2.13 การจัดวางในอีกลักษณะหนึ่ง.....	13
2.14 การใช้ Apex resistor เพื่อการสมดุลและการสอบเทียบ.....	14
2.15 การจัดวางสมดุลแบบขนาด.....	14
2.16 การสอบเทียบโดยการขนานตัวต้านทาน.....	15
2.17 การสอบเทียบเกจความเครียดทางไดนามิกโดยใช้ลูกเบียร์.....	16
2.18 การสอบเทียบทางไดนามิกโดยใช้ตัวสั่นสะเทือน.....	16
2.19 โหลดเซลล์แบบลิ่งค์.....	17
2.20 โหลดเซลล์แบบคาน.....	19
2.21 โหลดเซลล์แบบวงแหวน.....	21
2.22 โหลดเซลล์แบบแรงเฉือน.....	23
2.23 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจร ADC แบบซัคเซสซีฟแอปปร็อกซิเมชัน.....	25
2.24 ไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของวงจร ADC แบบซัคเซสซีฟแอปปร็อกซิเมชัน.....	26
2.25 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	28
2.26 เส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด.....	29

IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 แสดงการเคลื่อนที่ทีละสเต็ป เมื่อกระตุ้นเฟส 1 เฟส 2.....	29
2.28 แสดงการกระตุ้น แบบเดินหน้าและถอยหลัง.....	30
2.29 แสดงการทำงานของสเต็ปมอเตอร์.....	30
2.30 การกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวของสเต็ปมอเตอร์แบบ 3-เฟส และ 4-เฟส.....	31
2.31 การกระตุ้นแบบสองเฟสของสเต็ปมอเตอร์ 3-เฟส และ 4-เฟส.....	32
2.32 การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ปมอเตอร์แบบ 3-เฟส หรือ 4-เฟส.....	33
2.33 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อขับแบบ 2 เฟส.....	33
2.34 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กแบบสองเฟส.....	34
2.35 แสดงลักษณะโครงสร้างการต่อบัสแบบ I ² C Bus.....	35
2.36 แสดงลักษณะของ Control Byte ของ I ² C Bus.....	35
2.37 ตัวอย่างรูปแบบของการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ I/O แบบ I ² C Bus ตัวหนึ่ง.....	37
2.38 ตัวอย่างรูปแบบของการเขียนข้อมูลจากอุปกรณ์ I/O แบบ I ² C Bus ตัวหนึ่ง.....	37
2.39 แสดงลักษณะการสรางสถานะเริ่มต้นและสภาวะสิ้นสุดของ I ² C.....	38
2.40 แสดงลักษณะการรับส่งบิตข้อมูลของ I ² C.....	38
2.41 รูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร.....	43
2.42 แสดงการเชื่อมต่อ LCD แบบ 4 Bit Data.....	44
2.43 ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458.....	48
2.44 วงจรขยายความแตกต่าง.....	51
2.45 วงจรขยายแบบอินตริเมนต์แบบพื้นฐาน.....	51
2.46 วงจรขยายแบบอินตริเมนต์.....	52
3.1 Flowchart แสดงการทำงานของระบบ.....	54
3.2 โครงสร้างภายนอกของเครื่องให้อาหารสุนัข.....	55
3.3 โครงสร้างภายในของเครื่องให้อาหารสุนัข.....	55
3.4 แสดงลักษณะการติดตั้งส่วนสำรองอาหาร.....	56
3.5 แสดงลักษณะการติดตั้งแผงวงจร.....	56
3.6 แสดงลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจและส่วนชั่งน้ำหนัก.....	56

X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 แสดงลักษณะการติดตั้งช่องทางเดินของอาหาร.....	57
3.8 หน้าจอแสดงผลและเป็นพิมพ์.....	57
3.9 หน้าจอแสดงผลก่อนทำการตั้งค่า.....	57
3.10 แสดงเมนูการเลือกจำนวนครั้งที่จะให้อาหารสุนัขต่อวัน.....	58
3.11 แสดงเมนูก่อนการตั้งค่าเวลา.....	58
3.12 แสดงค่าที่ทำการตั้งเวลาให้อาหารสุนัข.....	58
3.13 แสดงการยืนยันการตั้งค่าเวลา.....	59
3.14 แสดงรายการเพื่อเลือกปริมาณอาหารสุนัข.....	59
3.15 แสดงรายละเอียดของการกดแป้นต่างๆ.....	59
3.16 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหาร.....	59
3.17 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดเล็ก 300 กรัม.....	60
3.18 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดกลาง 600 กรัม.....	60
3.19 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดใหญ่ 960 กรัม.....	60
3.20 ยืนยันสำหรับเพื่อให้ผู้ใช้เลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขเอง ตั้งแต่ 300 - 960 กรัม.....	60
3.21 ทำการเลือกปริมาณอาหารตามต้องการของผู้ใช้ให้แก่สุนัข.....	61
3.22 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขตามที่ผู้ใช้ได้กำหนด.....	61
4.1 กราฟผลการทดลองการชั่งน้ำหนักด้วยอัตราขยาย 1500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	64
4.2 กราฟผลการทดลองการชั่งน้ำหนักด้วยอัตราขยาย 3000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	66
4.3 กราฟผลการทดลองการชั่งน้ำหนักด้วยอัตราขยาย 4500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ.....	69
4.4 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	72
4.5 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	73
4.6 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	74
4.7 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	75
4.8 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	76
4.9 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	77
4.10 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม.....	78

XI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 กราฟที่ได้จากตารางทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม.....	79
4.12 กราฟที่ได้จากตารางทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม.....	80



XII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ในปัจจุบันตามบ้านพักและที่อยู่อาศัยของคนส่วนใหญ่มักจะนิยมเลี้ยงสัตว์เลี้ยงไว้เพื่อ เป็นเพื่อนคลายเหงา ซึ่งมีชนิดที่แตกต่างกันออกไป เช่น แมว ปลา และ ชนิดอื่นๆ ที่ขาดไม่ได้คือ สุนัข ซึ่งเป็นเพื่อนที่ซื่อสัตย์มากและโดยส่วนมากในปัจจุบันนี้ การเลี้ยงสุนัขนั้นจะมีการเลี้ยงในสถานที่ที่แตกต่างกันออกไป และการให้อาหารสำหรับสุนัขเองก็ให้แบบไม่เป็นเวลาและให้ในปริมาณที่ไม่ตรงตามความต้องการของตัวสุนัขเองที่ต้องการปริมาณอาหารไม่เท่ากันตามอายุ ซึ่งการให้อาหารสุนัขส่วนใหญ่จะเป็นการให้ตามใจของผู้เลี้ยงซึ่งให้แบบขาดบ้างเกินบ้างและที่สำคัญคือเวลาในการให้อาหารนั้นจะให้แบบไม่เป็นเวลา

ซึ่งเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติจะออกแบบมาเพื่อความสะดวกสบายของผู้เลี้ยงเองซึ่งไม่ต้องกังวลเรื่องเวลาในการให้อาหาร และไม่ต้องกังวลเรื่องปริมาณอาหารที่ให้อาหารเพียงพอสอดคล้องกับสุนัขหรือไม่ และที่สำคัญเป็นอย่างมากคือ ในเวลาที่เจ้าของสุนัขเองนั้นต้องออกไปทำธุระนอกบ้านเป็นเวลานานๆ หลายวันไม่อาจจะนำสุนัขไปเลี้ยงด้วยได้หรืออาจจะมีธุระเร่งด่วนในวันนั้นๆ ทำให้กลับมาบ้านช้ากว่าปกติทำให้สุนัขไม่มีคนให้อาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์นี้ จะเป็นการศึกษาออกแบบสร้างเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติสามารถโปรแกรมได้ เพื่อนำไปใช้อำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เลี้ยงสุนัขที่ไม่ค่อยมีเวลาหรือต้องการที่จะลดความยุ่งยากในการให้อาหารซึ่งวัตถุประสงค์หลักของโครงการมีดังนี้

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์
2. เพื่อเพิ่มทักษะในด้านต่างๆทางด้านเครื่องมือวัด
3. เพื่อศึกษาและใช้งาน โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
4. เพื่อให้ได้เครื่องให้อาหารสุนัขที่สามารถทำงานได้จริง
5. เพื่อศึกษาหลักการควบคุมมอเตอร์สเต็ปป์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
6. เพื่อนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

ปริญญาโทเต็มนี้ กล่าวถึงการพัฒนาและออกแบบเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้ ซึ่งขั้นตอนในการทำงานที่สำคัญของเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัตินี้คือ การตั้งเวลาในการให้อาหารที่ตรงตามเวลา และให้อาหารได้ในปริมาณที่กำหนดทั้งนี้สามารถกำหนดค่าน้ำหนักและเวลาตามความต้องการของผู้ใช้ได้ โดยแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD แบบ 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด โดยแสดงผลในหน่วยกรัม ซึ่งรายละเอียดของขอบเขตมีดังนี้

1. ออกแบบสร้างวงจรชุดควบคุมสแต็ปมอเตอร์ แบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม
2. ออกแบบสร้างชุดวงจรสัญญาณนาฬิกาดิจิตอล
3. สามารถแสดงผลการตั้งน้ำหนักและเวลาเป็นตัวเลขบนจอแสดงผล LCD
4. สามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 10 กิโลกรัม
5. สามารถรองรับการทำงานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
6. ออกแบบโปรแกรมเพื่อควบคุมปริมาณน้ำหนักจากสัญญาณของอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์
7. ออกแบบโปรแกรมเพื่อแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอลแสดงผลผ่านจอ LCD

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การจัดทำโครงการในปริญญาโทฉบับนี้ ได้มีขั้นตอนการศึกษาที่เริ่มมาจากการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ และการนำมาประยุกต์ใช้งานซึ่งขั้นตอนมีดังนี้

1. ศึกษาหลักการนำเอาอุปกรณ์ Sensor Transducer มาติดตั้งและประยุกต์ใช้งาน
2. ศึกษาการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีความจำเป็นต้องใช้ในการจัดทำ
3. ออกแบบโครงสร้างของตัวโครงการในส่วนฮาร์ดแวร์
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรม
5. ออกแบบวงจรในการควบคุมการทำงาน
6. จัดทำชิ้นงานในส่วนฮาร์ดแวร์ตามที่ออกแบบไว้
7. เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อระบบควบคุม
8. ติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบการทำงานของโครงการ
9. หาข้อผิดพลาดและแนวทางการแก้ไข
10. สรุปผลการทดลองและหาแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับระบบ

2.1 อุปกรณ์ทรานส์ดิวเซอร์

2.1.1 เกจความเครียด (Strain Gages)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้อยู่บนพื้นฐานที่ไว้ว่าถ้าตัวนำไฟฟ้าอันหนึ่งถูกขึงให้ตึงหรือถูกอัดตัว ค่าความต้านทานของมันจะเปลี่ยนแปลง อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในความยาวพื้นที่หรือพิคัดความต้านทาน (Resistivity) ของมัน โดยค่าความต้านทาน R ของตัวนำไฟฟ้าอันหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A ความยาว L และพิคัดความต้านทานของวัสดุ ρ คือ

$$R = \frac{\rho l}{\mu A} \quad (2.1)$$

เกจแฟกเตอร์ F ของตัวนำไฟฟ้าถูกนิยามเหมือนกับ

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.2)$$

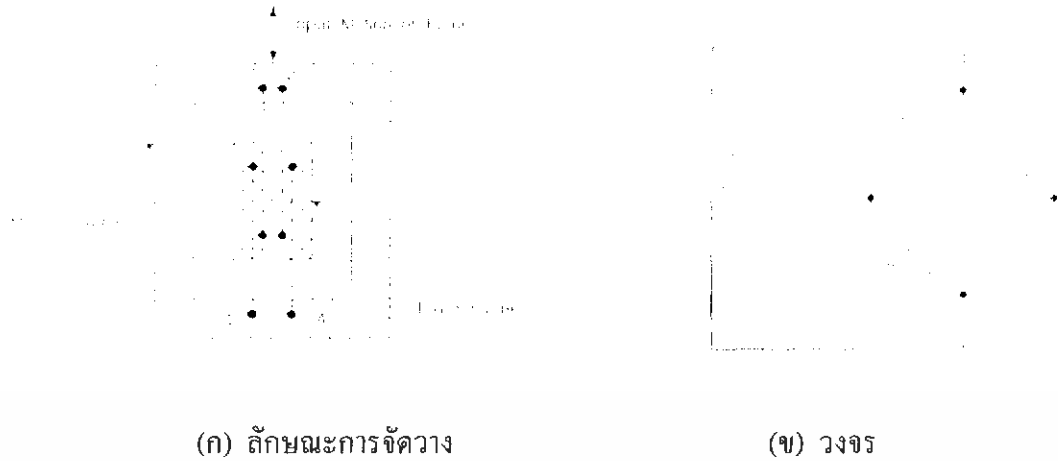
เมื่อ ΔR เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน R เนื่องจากเกจความเครียด ϵ ซึ่งในทางปฏิบัติ ตัวนำไฟฟ้าที่ใช้มักอยู่ในรูปของเส้นลวดเล็กๆ หรือโลหะแผ่นบาง ทรานส์ดิวเซอร์เกจความเครียดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. เกจความเครียดชนิดไม่ยึดติด
2. เกจความเครียดชนิดยึดติด

2.1.1.1 เกจความเครียดชนิดไม่ยึดติด เกจความเครียดชนิดนี้ในส่วนของลวดจะมีค่าความต้านทานเส้นหนึ่งจะถูกขึงให้ตึงระหว่าง 2 เฟรม เฟรมที่หนึ่งเป็นเฟรมเคลื่อนที่ในขณะที่อีกเฟรมหนึ่งอยู่กับที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (ก) ขนาดของเส้นลวดตามปกติแล้วมีความยาว 25 mm. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 μ m. เฟลทที่บิดงอได้จะทำหน้าที่เช่นเดียวกันกับสปริงระหว่างเฟรมทั้งสองเส้นลวดจะอยู่ภายใต้การป้อนโหลดอันใหญ่ ซึ่งมากกว่าโหลดที่มีการอัดตัวที่ดึงเอาไว้ในตอนแรกการเคลื่อนที่ของอินพุทที่แดงในภาพที่ 2.1 จะขึงเส้นลวดเส้นที่ 1 และ 3 ให้ตึงขณะเดียวกันก็จะลดความตึงในลวดเส้นที่ 2 และ 4 การเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันก็จะให้ผลที่ตรงกันข้าม

เส้นลวดจะถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรวิเททโทนบริดจ์ แสดงดังในภาพที่ 2.1 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



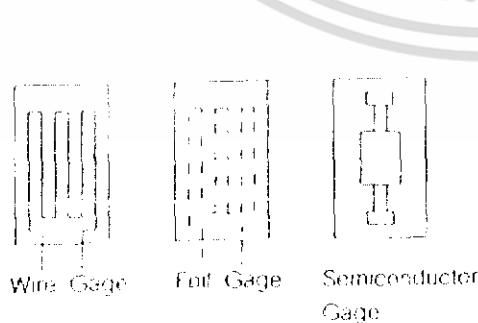
(ก) ลักษณะการจัดวาง

(ข) วงจร

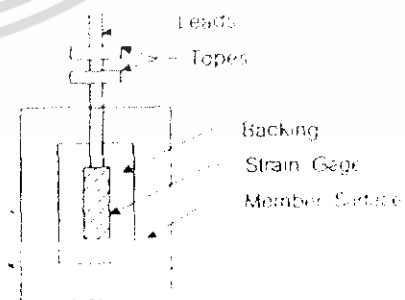
ภาพที่ 2.1 เกจความเครียดชนิดไม่ยึดติด

โดยทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้สามารถวัดการเคลื่อนที่ที่มีขนาดเล็กมากๆ ถึง $50 \mu\text{m}$. และแรงที่มีขนาดเล็กมากๆ อีกด้วยทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ อาจนำไปใช้เพื่อการวัดแรงความดัน และความเร่งได้

2.1.1.2 เกจความเครียดชนิดยึดติด ทรานส์ดิวเซอร์เกจความเครียดชนิดที่ยึดติด ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อวัดสิ่งที่แปรเปลี่ยนไปทางกายภาพหลายๆ อย่าง เช่น ความเครียด แรง แรงบิด ความดัน และการสั่นสะเทือน เป็นต้น เกจเหล่านี้มักจะทำด้วยวัสดุจำพวกโลหะหรือที่เป็นสารกึ่งตัวนำและอยู่ในรูปของเกจเส้นลวด (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 μm) หรือโลหะแผ่นบางๆ หรือแท่งเล็กๆ (ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เกจเหล่านี้มีกระดาษหรือวัสดุชนิดอื่นห่อหุ้ม เพื่อใช้ยึดติดกับพื้นผิวที่ต้องการวัดความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เมื่อยึดติดแล้วเกจจะได้รับความเครียดเหมือนกับความเครียดที่มีอยู่ในพื้นผิวนั้น เกจเหล่านี้มีความไวสูงมากและเมื่อนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความเครียดที่ต่ำประมาณ 10^{-7} อาจวัดได้



ภาพที่ 2.2 ชนิดของเกจความเครียด



ภาพที่ 2.3 การติดเกจความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกจที่ทำด้วยโลหะผสมทองแดง – นิกเกิล มีเกจแฟคเตอร์ 2 ถึง 3 ขณะที่เซมิคอนดักเตอร์เกจจะมี เกจแฟคเตอร์ 100 ถึง 200 ตารางที่ 2.1 จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุห่อหุ้มเกจชนิดเส้นลวดและสารยึดติด

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุห่อหุ้มเกจ, ชนิดเส้นลวดและสารยึดติด

วัสดุห่อหุ้มเกจ	สารยึดติด	ชนิดเส้นลวด	หมายเหตุ
กระดาษหรือไหม	Nitrocellulose	โลหะผสม Cu ,Ni	ใช้ได้สูงถึง 60 องศา
เบคาไลต์	Epoxy	โลหะผสม Cu ,Ni	ใช้ได้สูงถึง 200 องศา
Glass Weave	Ceramic cement	โลหะผสม Cr ,Ni	ใช้ได้สูงถึง 400 องศา

กระแสที่ไหลผ่านเกจปรกติถูกจำกัดอยู่ที่ 10 ถึง 30 mA ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการทดสอบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเส้นลวด เกจที่ห่อหุ้มด้วยเบคาไลต์สามารถต้านทานกระแสที่มีค่าค่อนข้างสูงได้

เราจะต้องให้ความระมัดระวัง ขณะทำการติดเกจ พื้นผิวที่ต้องการที่จะติดตั้งเกจต้องทำให้สะอาดตลอดเวลา ต่อมาจึงใส่สารยึดติดตามคำแนะนำของโรงงานผู้ผลิต แล้วนำมาเชื่อมต่อขาของเกจและยึดติดอย่างหนาแน่นเข้ากับส่วนที่ต้องการทดสอบ จากนั้นตรวจสอบการเชื่อมต่อเกจและฉนวนเป็นลำดับสุดท้าย

2.1.2 บริดจ์ของเกจความเครียด

เกจความเครียด โดยปกติแล้วจะถูกต่อเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวิทซ์ โตนบริดจ์ เพื่อที่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในค่าความต้านทานของมัน อันเนื่องจากความเครียดจะ ได้วัด ได้หรือให้ค่าเอาต์พุทที่สามารถนำไปแสดงผลหรือบันทึกผลได้ มีการจัดวางบริดจ์อยู่สองรูปแบบ นั่นคือ

1. สมดุลบริดจ์ (Balanced bridge)
2. ไม่สมดุลบริดจ์ (Unbalanced bridge)

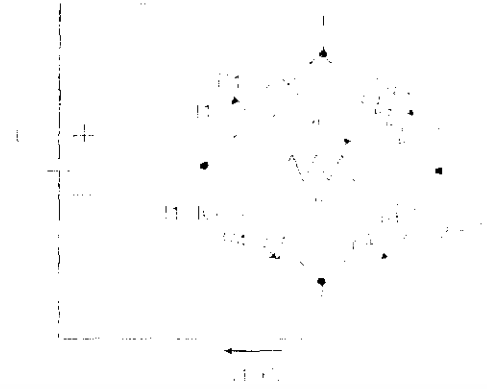
ในการจัดวางเกจแบบสมดุลบริดจ์ ดังภาพที่ 2.4 ค่าความต้านทานของเกจความเครียด R_1 เป็นแขนข้างหนึ่งของวิทซ์ โตนบริดจ์ ขณะที่แขนที่เหลือมีค่าความต้านทาน R_2 , R_3 และ R_4 บริดจ์จะถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายดิซีโวลท์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า E และ R_G เป็นค่าความต้านทานของกัลป์วาโนมิเตอร์ บริดจ์กล่าวได้ว่าสมดุล เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านกัลป์วาโนมิเตอร์เงื่อนไขของการสมดุลซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีคือ

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 สมดุลบริดจ์ของเกจความเครียด



ภาพที่ 2.5 ไม่สมดุลบริดจ์ของเกจความเครียด

ถ้า R_1 มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเครียดบริดจ์ ซึ่งจะสมดุลในตอนต้นก็จะไม่สมดุล อันนี้ อาจจะทำให้เกจสมดุลได้อีกครั้งโดยการเปลี่ยนแปลงค่า R_4 หรือ R_2 การเปลี่ยนแปลงอันนี้ สามารถวัดได้และถูกใช้เพื่อการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ R_1 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความเครียด เทคนิคอันนี้สามารถนำมาใช้เพื่อวัดความเครียดทางสถิติ เพียงอย่างเดียว

การจัดวางแบบไม่สมดุลบริดจ์ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.5 กระแสที่ไหลผ่านกัลป์วาโนมิเตอร์ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมกัลป์วาโนมิเตอร์จะถูกใช้ เพื่อแสดงค่าความเครียดในเกจความเครียด วิธีนี้สามารถใช้เพื่อวัดความเครียด เพื่อที่จะแสดงถึงการได้มาของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาท์พุท ที่ไม่สมดุลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในค่าความต้านทานของเกจ R_1 ซึ่งจะสามารถเขียนเป็นสมการกฎของ Kirchhoff ได้ดังนี้

$$I_1 R_1 + R_4 (I_1 - I_G) = E \quad (2.3)$$

$$I_1 R_1 + I_G R_G - I_2 R_2 = 0 \quad (2.4)$$

$$I_G R_G + (I_2 + I_G) R_3 - (R_1 - R_G) R_4 = 0 \quad (2.5)$$

แก้สมการที่ (2.3) (2.4) และ (2.5) เพื่อหาค่า I_G เราจะได้

$$I_G = \frac{E(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{[R_2(R_1 + R_4)(R_G + R_4 + R_3) + R_1 R_3 R_4 - R_2 R_4 + R_G R_3(R_1 + R_4)]} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) จะพบว่า $I_G = 0$ เมื่อ $R_2 R_4 = R_1 R_3$ อันนี้สอดคล้องกับสมการที่ (2.3)

จากสมการที่ 2.6 ค่ากระแสที่ไม่สมดุล I_G สามารถคำนวณได้สำหรับการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในค่าความต้านทานของเกจความเครียด R_1 สิ่งที่ได้เมื่อ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ และถ้า R_1 เกิดมีการเปลี่ยนแปลงเป็นค่า $R_1 + \Delta R_1$ เราจะพบว่าสมการที่ (2.6) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_G = \frac{-E\Delta R_1}{4R_1(R_1 + R_G)} \quad (2.7)$$

$$= \frac{EF_{S1}}{(R_1 + R_G)} \quad (2.8)$$

เมื่อ เป็นความเครียดที่เกิดจาก R_1 และ

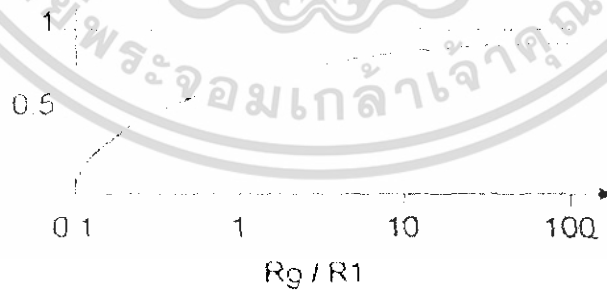
$$S_1 = \frac{\Delta R_1}{R_1 F}$$

F เป็นแกนแฟกเตอร์ของแกนความเครียด

$$\begin{aligned} \text{แรงคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทรวม } R_G (E_0) &= I_G R_G \\ &= \frac{-E_{S1} R_G F}{4(R_1 + R_G)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\text{แรงคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทที่เปิดวงจร } (E'_0) = \frac{-EF1}{4} \quad (2.10)$$

อันนี้เกิดขึ้นได้โดยการกำหนดให้ $R_G \rightarrow \infty$ ในสมการที่ (2.9) อัตราส่วนของ E'_0/E_0 จะถูกพล็อตเทียบกับ R_G/R_1 ในภาพที่ (2.6) เราจะพบว่า R_G จะต้องมีค่าอย่างน้อยเป็นร้อยละ ของค่าความต้านทานของแกนความเครียด R_1 เพื่อจะได้ให้เอาท์พุท E_0 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



ภาพที่ 2.6 พล็อตของ E'_0/E_0 และ R_G/R_1

เมื่อแกนของวิทซ์โดนบริดจ์มากกว่าหนึ่งแกน บรรจุด้วยความเครียดและค่าความต้านทานของมันเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเครียด เอาท์พุทที่ได้รับก็คือผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ นั่นคือรูปที่ R_2 เปลี่ยนแปลงเป็น $R_2 + \Delta R_2$ และในตอนต้นกำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.7) จะกลายเป็น

$$I_G = \frac{-E\Delta R_2}{4R_2(R_1 + R_G)}$$

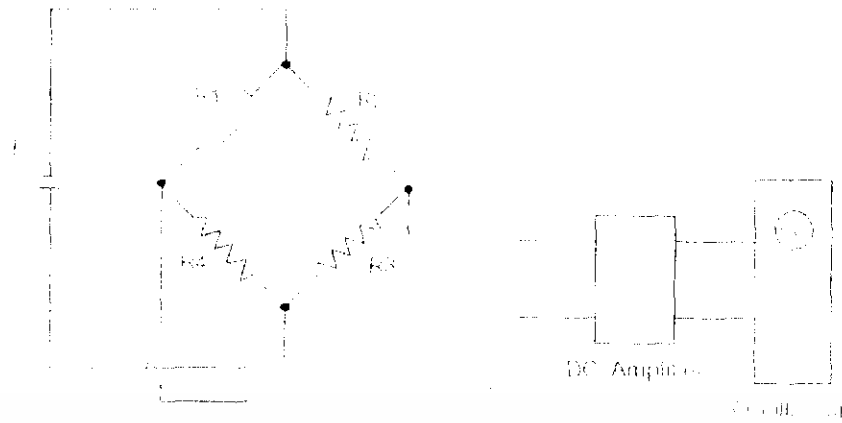
ดังนั้นถ้า R_1 เปลี่ยนแปลงเป็น $R_1 + \Delta R_1$ และ R_2 เปลี่ยนเป็น $R_2 + \Delta R_2$ ผลรวมของค่าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือ

$$I_G = \frac{-E}{4(R_1 + R_G)} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right] \quad (2.11)$$

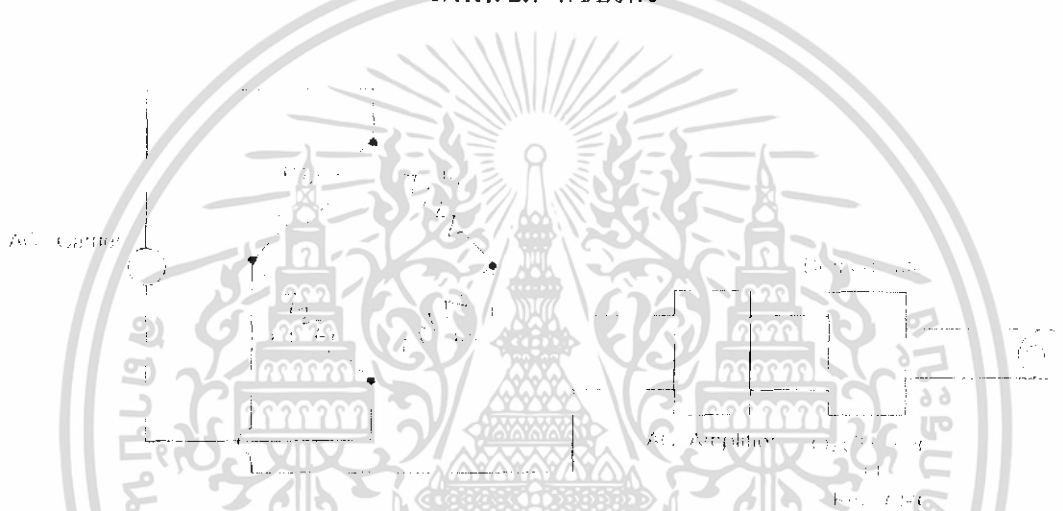
ในทำนองเดียวกัน ถ้าแชนท์สี่ของบริดจ์มีเกจความเครียดติดอยู่ ซึ่งค่าความต้านทานของมันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเครียด เราจะพบว่า

$$I_G = \frac{E}{4(R_2 + R_G)} \left[-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (2.12)$$

ด้วยเหตุนี้เราจะพบว่ากระแสเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ΔR_2 และ ΔR_4 และมีธรรมชาติที่เหมือนกันกับ ΔR_3 ดังนั้นแชนท์ที่อยู่ใกล้ชิดกันของบริดจ์จะต้องมีค่าของความเครียดในธรรมชาติที่ตรงกันข้ามกัน เพื่อให้เอาท์พุทมีขนาดใหญ่เหมือนเพิ่มความไวของบริดจ์อันนี้จะต้องให้ความสนใจ ขณะจัดวางเกจความเครียดบนพื้นที่ที่ต้องการวัดในลักษณะที่ว่าถ้า R_1 เป็นค่าความดึงเครียด R_2 ควรจะเป็นค่าความอัดเครียด R_3 เป็นค่าความดึงเครียด และ R_4 ควรจะเป็นความอัดเครียด ดังนั้น มันเป็นไปได้ที่จะให้คำนิยามของคำว่า “แฟกเตอร์สนับสนุนสัญญาณ (Signal enhancement factor) ของบริดจ์” เหมือนกับค่าอัตราส่วนของค่าเอาท์พุทที่สูงสุดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าในเกจความเครียดหลายๆ ตัวต่อเอาท์พุทสูงสุดที่ได้รับมากกว่าหนึ่งตัว (ภายใต้ความเครียด) ถูกจัดวางไว้อย่างเหมาะสมสามารถทำให้ความไวเพิ่มมากขึ้นหรืออาจจะทำให้สัญญาณเพิ่มมากสูงขึ้น



ภาพที่ 2.7 คีซีบริดจ์



ภาพที่ 2.8 เอซีบริดจ์

การกระตุ้นบริดจ์อาจจะทำด้วยแหล่งจ่ายไฟคลื่นหรือเอซี ดังวงจรที่ให้ไว้ในภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.8 ในทั้งสองกรณีตัวขยายเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อการค้นปลิงในกรณีของเอซีบริดจ์สัญญาณเป็นแอมพลิจูดมอดูเลทเหมือนดังแสดงในภาพที่ 2.8 ดังนั้นคีมอดูเลเตอร์จึงเป็นสิ่งที่เราต้องการเพื่อการกรองความถี่พาหะเอาท์พุทที่ได้จะเหมือนกับค่าความเครียดที่กำลังถูกวัด ในจำพวกของบริดจ์ทั้งสองชนิดเอซีบริดจ์จะไม่มีเปลี่ยนแปลงที่เอาท์พุทเนื่องจากอุณหภูมิและไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งตามปกติแล้วมักจะพบในวงจรคีซีบริดจ์ อย่างไรก็ตามเอซีบริดจ์มีราคาแพงและการตอบสนองต่อความถี่สูงของมันถูกจำกัดที่ประมาณ 1 ใน 5 ของความถี่พาหะที่ใช้

การชดเชยอุณหภูมิ นอกจากความเครียดแล้วการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในเกจความเครียดขึ้นด้วย แต่มันไม่สะดวกที่จะนำมาใช้คำนวณเพื่อแก้ไขอุณหภูมิ การแก้ไขและการชดเชยอุณหภูมิที่ทำได้ขึ้นมาโดยตัวของมันเองจะสะดวกกว่า อันนี้ทำได้โดย

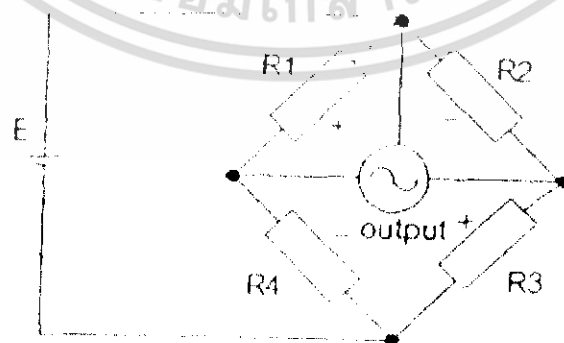
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้ดัมมิเกจ (Dummy gage)
2. ใช้เกจมากกว่าหนึ่งตัวที่มีการจัดวางไว้เหมาะสม

การใช้ดัมมิเกจ (Dummy gage) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 เกจค่าความต้านทาน R_2 เท่ากับ R_1 ที่ถูกยึดติดบนแท่งของวัสดุชนิดเดียวกันกับแท่งวัสดุทดสอบ (Test Specimen) ซึ่งกำลังได้รับโหลด อย่างไรก็ตามแท่งของวัสดุที่มีเกจ R_2 จะไม่ได้รับความเครียด แต่จะอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอันเดียวกันเหมือนกับแท่งวัสดุทดสอบ ดังนั้นเกจ R_1 ก็คือเกจที่จะนำมาใช้งานอยู่ภายใต้ค่าความเครียดและอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆ กัน ขณะที่เกจ R_2 คือดัมมิเกจภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอันเดียวกันด้วยเหตุที่เกจ R_1 และ R_2 เป็นแขนที่ใกล้ชิดกันของบริดจ์เอ้าท์พุทเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจึงเป็นศูนย์ เพราะ R_1 และ R_2 มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิเป็นจำนวนเท่ากัน



ภาพที่ 2.9 การชดเชยอุณหภูมิด้วยดัมมิเกจ



ภาพที่ 2.10 การจัดวางเกจความเครียดโดยใช้เกจ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงามากกว่าหนึ่งตัวที่มีการจัดวางไว้อย่างเหมาะสม เงา R_1 ไม่ได้เป็นคัมมิเงาแต่ถูกวางไว้ได้อย่างเหมาะสมบนแท่งวัสดุทดสอบ เพื่อว่ามันจะได้มีความเครียดในธรรมชาติที่ตรงกันข้ามกันกับค่าของความเครียดใน R_1 ในกรณีเช่นนี้จะทำให้ระบบมีความไว และมีการชดเชยอุณหภูมิไปพร้อมๆ กัน แท้จริงแล้วถ้าแขนทั้ง 4 ของบริดจ์เป็นเงาใช้งานเหมือนแสดงในภาพที่ 2.10 โดยแขนที่ใกล้ชิดกันของบริดจ์มีความเครียดในธรรมชาติที่ตรงกันข้ามสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าสูงสุดและจะมีการชดเชยอุณหภูมิด้วยและเป็นเรื่องปกติที่ค่าความต้านทานเริ่มต้นของทุกๆ แขนของบริดจ์ที่ต้องมีค่าเท่ากัน การชดเชยอุณหภูมิเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อต้องการวัดความเครียดทางสถิติ เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สัญญาณเอาต์พุต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะน้อยมากสำหรับการวัดความเครียดทางไดนามิก ดังนั้นการวัดความเครียดทางไดนามิกจึงไม่จำเป็นจะต้องมีการชดเชยอุณหภูมิ

2.1.3 การจัดวางเงาความเครียด (Strain gage arrangement)

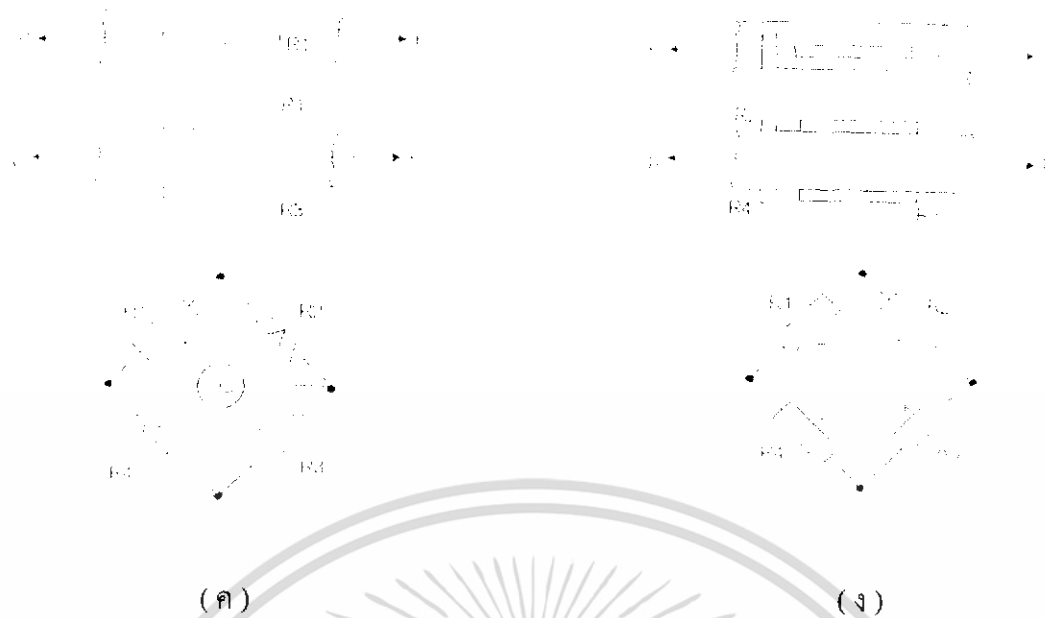
ขณะตัดสินใจวางเงาความเครียดบนส่วนยืดหยุ่นเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพคือ

1. ความไวสูง
2. การชดเชยอุณหภูมิ

การจัดวางที่แสดงในภาพที่ 2.10 เป็นสิ่งที่สอดคล้องกับการพิจารณาทั้งสองประการข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

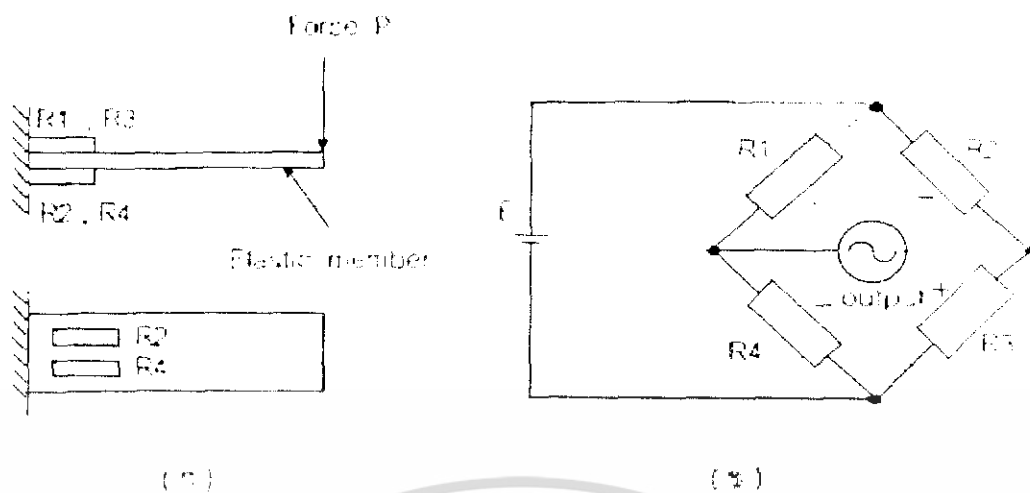


ภาพที่ 2.11 รูปแบบการจัดวางที่เป็นไปได้สำหรับการวัดแรง P

รูปแบบของการจัดวางที่เป็นไปได้ของการวัดแรงดัน P ที่ป้อนเข้าไปที่ชิ้นส่วนยึดหยุ่น แสดงดังภาพที่ 2.11 (ก) (ข) (ค) และ (ง) โดยเกจความเครียดแสดงด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในภาพที่ เกจ R_1 ถูกยึดติดอยู่บนชิ้นส่วนยึดหยุ่นเพื่อวัดความเครียดตามแนวแกนในชิ้นส่วนยึดหยุ่นแต่ระบบ ไม่มีการชดเชยอุณหภูมิและเอาท์พุทจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของ R_1 เพียงอย่างเดียว

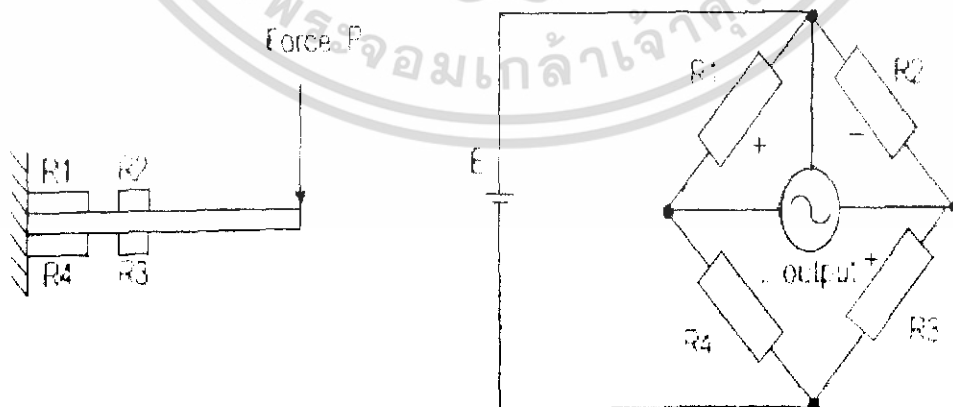
ในการจัดวางตามภาพที่ 2.11(ข) เกจสองตัว R_1 และ R_2 ถูกวางไว้เป็นมุมฉาก หรือเรียกว่า “การจัดวางแบบพอยสัน (Poisson’s arrangement)” ดังนั้น เกจ R_1 จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความ ตึงเครียด ตามแนวแกน ขณะที่ R_2 เปลี่ยนเนื่องจากความอัดเครียดตามแนวขวางในชิ้นส่วนยึดหยุ่น โดยค่าความเครียดอันหลังจะเป็น ν เท่าของค่าความเครียดอันแรก เมื่อ ν หมายถึงอัตราส่วนของ พอยสัน (Poisson’s ratio) แฟคเตอร์สนับสนุนสัญญาณจะเป็น $(1+\nu)$ เพราะค่าความอุณหภูมิ ด้วยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อ R_1 และ R_2 เท่าๆ กัน จึงไม่มีผลต่อ เอาท์พุท การจัดวางของภาพที่ 2.11 (ก) ซึ่งทั้ง R_1 และ R_3 จะอยู่ภายใต้ความตึงเครียดตามแนวแกน ด้วยจำนวนที่เท่ากันและ R_1 และ R_3 ถูกติดไว้บนแกนของบริดจ์ด้านตรงข้ามกัน จึงให้แฟคเตอร์ สนับสนุนสัญญาณเป็น 2 เท่า แต่จะไม่มีการชดเชยอุณหภูมิ

การจัดวางของภาพที่ 2.11 (ง) ซึ่งใช้เกจสี่ตัวโดย R_2 และ R_4 ถูกจัดวางไว้เป็นมุมฉากกับ R_1 และ R_3 จะให้แฟคเตอร์สนับสนุนสัญญาณเป็น $2(1+\nu)$ และมีการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่า อุณหภูมิ



ภาพที่ 2.12 การจัดวางเกจความเครียดเพื่อการวัดแรง P

อีกตัวอย่างหนึ่งแรง P สามารถวัดได้โดยใช้คานยึดหยุ่น (Elastic cantilever) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ก) เกจความเครียดถูกยึดติดอยู่ที่โคนของคานตรงที่ความเครียดของการโค้งมากที่สุด R_1 และ R_3 มีความตึงเครียด ขณะที่ R_2 และ R_4 มีความอัดเครียด การจัดวางบริดจ์ดังแสดงในภาพที่ 2.12(ข) จะให้แฟกเตอร์สนับสนุนสัญญาณเป็น 4 และจะมีการชดเชยอุณหภูมิด้วยการจัดวางในลักษณะอื่นๆ ดังแสดงในภาพ 2.13(ก) ซึ่ง R_1 และ R_2 ถูกยึดติดตามการจัดวางของพอยสันและอันนี้ก็ใช้กับ R_3 และ R_4 ด้วย การจัดวางของบริดจ์ดังภาพที่ 2.13(ข) แขนที่ติดกันจะมีความเครียดในธรรมชาติที่ตรงกันข้ามกัน แม้ว่าจะมีขนาดไม่เท่ากันก็ตามการจัดวางของภาพที่ 2.13(ข) จะให้แฟกเตอร์สนับสนุนสัญญาณเป็น $2(1 + \nu)$ เมื่อ ν เป็นอัตราส่วนของพอยสันและอุณหภูมิก็จะถูกชดเชยไปด้วย



ภาพที่ 2.13 การจัดวางในอีกลักษณะหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

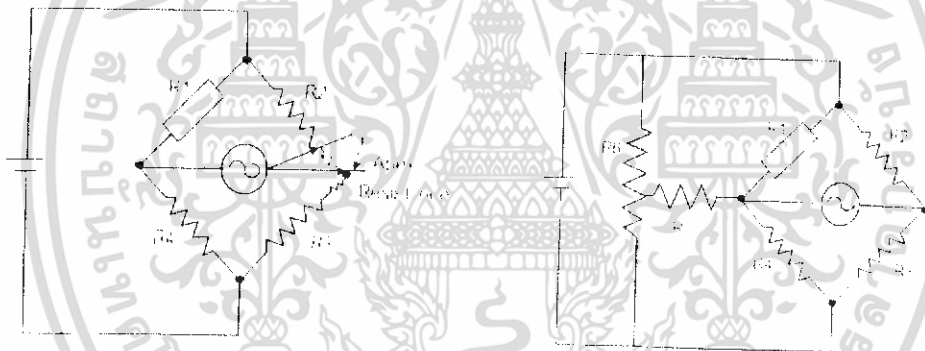
2.1.4 การสมดุลของบริดจ์ (Balancing of Bridges)

บริดจ์ต้องทำให้สมดุลก่อนในตอนเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทานที่แขนทั้งสองอาจจะไม่เท่ากัน วิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้จะถูกนำมาเพื่อใช้ในการสมดุลบริดจ์

1. วิธีการสมดุลแบบอนุกรม (Series balancing method) โดยใช้ Apex resistor แสดงในภาพที่ 2.14 เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัสของ Apex resistance ถ้า R_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $r R_2$ ก็จะลดลงเป็น r ด้วย
2. วิธีการสมดุลแบบขนาน (Parallel balancing method) บริดจ์สามารถทำให้สมดุลได้โดยการเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัส P

การสอบเทียบ

การสอบเทียบกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการจัดวางวงจรบริดจ์แบบไม่สมดุลซึ่งเอาต์พุทของบริดจ์ได้จากความเครียดของเกจความเครียด การสอบเทียบอาจทำได้ทั้งทางไฟฟ้าและทางกล วิธีการทางไฟฟ้าโดยปกติจะสร้างขึ้นในวงจรของบริดจ์ความเครียด สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไป



ภาพที่ 2.14 การใช้ Apex resistor เพื่อการสมดุลและการสอบเทียบ

ภาพที่ 2.15 การจัดวางสมดุลแบบขนาน

วิธีการทางไฟฟ้า

วิธีแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่แขนจะสามารถเขียนแบบโดยการเลือกใช้ Apex resistance ดังแสดงในภาพที่ 2.14 มันเป็นไปได้ที่จะสอบเทียบ Apex Resistance ในเทอมของความเครียด (ϵ) ในเกจตัวเดียว (สมมุติว่าเป็น R_1) ความสามารถอันนี้แสดงดังนี้

จากภาพที่ 2.14 ถ้าบริดจ์ถูกทำให้สมดุลในตอนแรกนั้นคือ

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = 1 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น Apex resistance เปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ R_2 เพิ่มขึ้นเป็น $R_2 + r$ และ R_3 ลดลงเป็น $R_3 - r$ บริดจ์เปลี่ยนเป็นไม่สมดุล แต่ค่าของ $\Delta R_1 / R_1$ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงข้างต้น

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_4} = \frac{R_2 + r}{R_3 - r} \tag{2.14}$$

กำหนดให้ $x = r / R_3$ เราจะพบว่า

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{2x}{1-x} \tag{2.15}$$

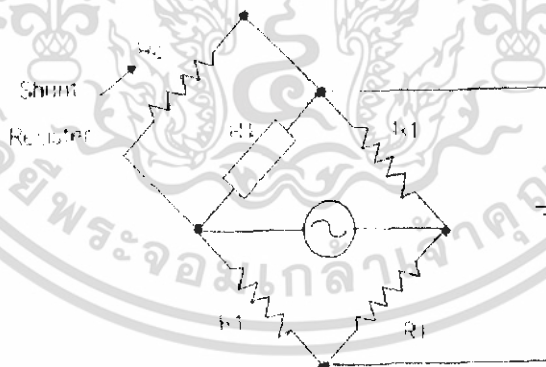
ดังนั้น Apex resistance จะสามารถสอบเทียบได้ในเทอมของ $\Delta R_1 / R_1$ หรือความเครียด ϵ ถ้ารู้ค่า เกจแฟกเตอร์

การสอบเทียบทางวงจรไฟฟ้าในวิธีที่สอง โดยการใช้ค่าของความต้านทาน (Shunt resistor) ดังแสดงในภาพที่ 2.16 ถ้าตัวต้านทานขนาน R_c ถูกต่อขนาดกับความเครียด R_1 การเปลี่ยนแปลง ΔR_1 คือ

$$\Delta R_1 = R_1 - R_1 // R_c \tag{2.16}$$

หรือเราอาจเขียนสมการใหม่เป็น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_1}{R_1 + R_c} \approx \frac{R_1}{R_c} \quad \text{ถ้า } R_c \gg R_1 \tag{2.17}$$

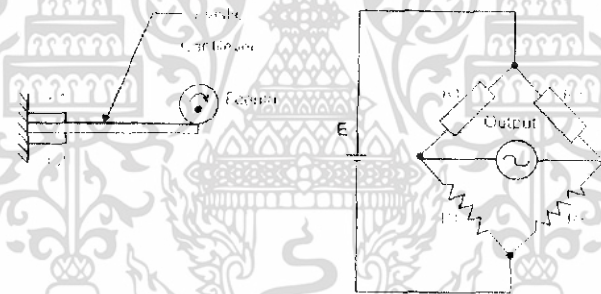


ภาพที่ 2.16 การสอบเทียบโดยการขนานตัวต้านทาน

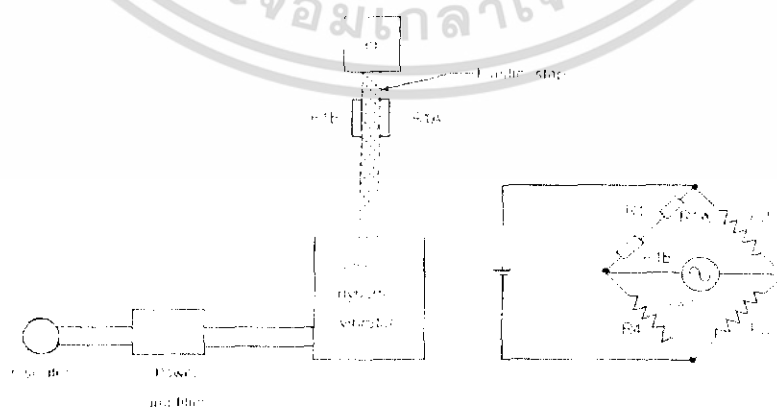
ซึ่งโดยทั่วๆ ไป สำหรับ $\Delta R_1 / R_1$ มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้น ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เอาท์พุทซึ่งเป็นผลมาจากการต่อ R_c ขนานกับค่าความต้านทาน R_1 สามารถที่จะวัดได้หรือมีความสัมพันธ์กับ $\Delta R_1 / R_1$ หรือค่าความเครียด ในการทดสอบทางกลสำหรับการสอบเทียบทาง Static dead weights สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงและความเครียดสามารถคำนวณได้และมีความสัมพันธ์กับเอาท์พุท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทางไดนามิกส์

การสอบเทียบทางไดนามิกส์ก็มีสองวิธี วิธีแรกจะใช้หลักการหมุนของลูกเบี้ยว (Rotating eccentric) ในภาพที่ 2.17 และวิธีที่สองจะใช้ตัวสั่นสะเทือน (Vibration) ในภาพที่ 2.18 ลานยึดหยุ่นถูกใช้เหมือนกับอุปกรณ์ยึดหยุ่น ค่าความเครียดที่แท้จริงสามารถที่จะคำนวณได้และแพ็คเกจของการสอบเทียบซึ่งมีความสัมพันธ์กับเอาท์พุทและค่าความเครียดสามารถคำนวณหาได้ดังภาพที่ 2.18 ความถี่แอมพลิจูดของตัวสั่นสะเทือนสามารถคำนวณได้ เพราะว่าแรงอย่าง Sinusoidal โดยมีมวล m ถูกป้อนไปที่แท่งยึดหยุ่น (Elastic strip) เป็น $m\omega^2 x_0$ เมื่อ ω เป็น Circular frequency ของการสั่น และ x_0 เป็นแอมพลิจูดของมวลที่เคลื่อนที่ซึ่งจำเป็นที่จะต้องถูกวัดโดยทรานส์ดิวเซอร์เคลื่อนที่ใดๆ ที่อธิบายไปแล้ว ตรงข้ามกันกับอันนี้ เอาท์พุทของบริดจ์สามารถวัดได้ ในภาพที่ 2.18 ทั้ง R_{1A} และ R_{1B} ถูกจัดวางเป็นแขนข้างหนึ่งของวิทซ์ ไทนบริดจ์ การกระทำเช่นนี้เพื่อการจัดผลของการโค้งงอใดๆ ของแท่งยึดหยุ่น ซึ่งการโค้งงอในแท่งยึดหยุ่นการโค้งงอจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันแต่ในธรรมชาติที่ตรงกันข้ามของ R_{1A} และ R_{1B} ทำให้ค่าความต้านทานรวมของแขนไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเกจจะต้องสนองความเครียด อันเนื่องจากแรงทาง ไดนามิกส์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของมวล m เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 2.17 การสอบเทียบเกจความเครียดทางไดนามิกโดยใช้ลูกเบี้ยว



ภาพที่ 2.18 การสอบเทียบทางไดนามิกโดยใช้ตัวสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานส์ดิวเซอร์แบบหลักการของแรง (Force Transducers) ทรานส์ดิวเซอร์นี้ใช้สำหรับเปลี่ยนแรงทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแรงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ

1. แรงจลน์ เป็นแรงที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำบนข้อมือหุ่นยนต์เนื่องจากความเร่งของมวลของวัตถุในระหว่างการบังคับให้เคลื่อนที่
 2. แรงสถิต เป็นแรงที่เกิดการกระทำบนวัตถุโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุเช่นแรงที่กระทำโดยคริปเปอร์ (Qripper) ของหุ่นยนต์บนผิวของวัตถุในระหว่างการจัดการกับวัตถุ
- การวัดแรงทั่ว ๆ ไป ทรานส์ดิวเซอร์จะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพของทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งแรงเป็นตัวการทำให้เกิดขึ้น

2.1.5 ส่วนประกอบยืดหยุ่นที่ใช้ในการวัดแรง (Elastic Element Force Measurement)

ส่วนยืดหยุ่นที่นิยมใช้สำหรับการแสดงขนาดของแรงที่กระทำโดยผ่านการวัดการกระจัด

เช่น

1. สปริง ในกรณีแรงจะหาได้จาก

$$P = ky \tag{2.18}$$

เมื่อ k = ค่าคงตัวของสปริง
 y = ระยะกระจัดจากจุดสมดุล

2. แท่งวัสดุ แรงที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการ

$$P = (AE / L) * y \tag{2.19}$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัด
 E = ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ
 L = ความยาว

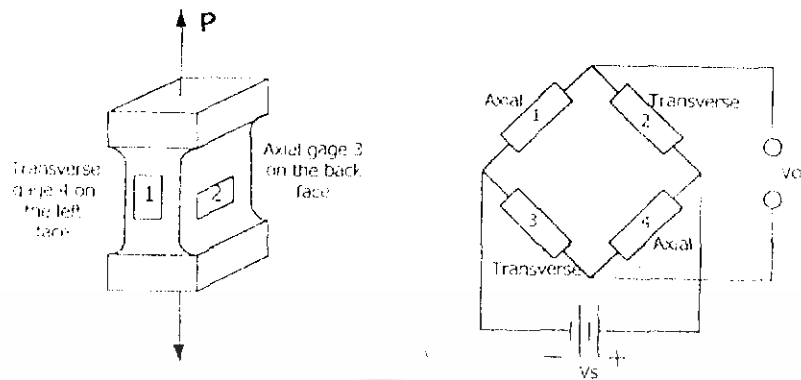
3. คานยื่น (Cantilever Beam) การเบนไปของปลายคาน สัมพันธ์กับแรง P ที่กระทำโดย

$$P = (3EI / L^3) * y \tag{2.20}$$

เมื่อ I = โมเมนต์ของค่าความเฉื่อยของคานรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางในทิศทางของการเบนนอกจากนี้ยังมี ริงค์ (Ring) และเว็บ (Webs) ซึ่งเป็นส่วนยืดหยุ่นที่ใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ และได้มีการทดลองเซลล์เป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

2.1.6 ชนิดของโหลดเซลล์แบบต่างๆ

(ก) โหลดเซลล์แบบลิงค์ (Link-Type Load Cell)



ภาพที่ 2.19 โหลดเซลล์แบบลิงค์

โหลดเซลล์แบบลิงค์อย่างง่าย ประกอบด้วยเกจลิงค์และเกจความเครียด 4 อัน ดังจัดแสดงในภาพที่ 2.19 ภาวะ P เป็นได้ทั้งภาวะแรงดึง (Tensile Load) หรือภาวะแรงอัด (Compressive Load) เกจความเครียด 2 อัน ยึดติดกับลิงค์ในแนวแกน และอีก 2 อัน ในแนวขวางกับแกน

เกจความเครียดทั้ง 4 จะต่อแบบวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) โดยเกจที่อยู่ในแกนต่ออยู่ในแกน 1 และ 3 เกจที่อยู่ขวางต่ออยู่ในแกน 2 และ 4 ดังภาพที่ 2.19 เมื่อภาวะ P กระทำต่อลิงค์ ความเครียดตามแนวแกน และตามแนวขวางแกนจะเกิดขึ้นในลิงค์และสัมพันธ์กับภาวะตามสมการ

$$\varepsilon_a = P / AE$$

$$\varepsilon_t = -\nu P / AE$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของลิงค์

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่นำมาทำเป็นลิงค์

ν = อัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่ใช้ลิงค์

การตอบสนองของเกจต่อโหลด P ที่กระทำเป็นไปตามสมการ

$$\Delta R_1 / R_1 = \Delta R_3 / R_3 = S_g \varepsilon_a = S_g P / AE$$

$$\Delta R_2 / R_2 = \Delta R_4 / R_4 = S_g \varepsilon_t = -\nu S_g P / AE$$

ถ้าสมมติว่าเกจความเครียดทั้ง 4 ตัวบนลิงค์เหมือนกันทุกประการดังนั้นแรงดันออกจากวิทสโตนบริดจ์ หาได้จากการแทนค่าสมการ (b) ลงในสมการ

$$V_o = r / (1+r)^2 (\Delta R_1 / R_1 - \Delta R_2 / R_2 + \Delta R_3 / R_3 - \Delta R_4 / R_4) V_s$$

จะได้

$$V_o = [S_g P (1+\nu) / 2AE] V_s \quad (4-4)$$

หรือ

$$P = 2AE / S_g (1+\nu) V_s = C V_o \quad (4-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (4-2) แสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดันออก V และค่าคงตัวสัดส่วนหรือค่าคงตัวเปรียบเทียบคือ

$$C = 2AE/Sg(1 + \nu)V_s \quad (4-6)$$

เมื่อ $C =$ ค่าคงตัวเปรียบเทียบ

ความไวของวิทสโตนบริดจ์คอมบิเนชัน (Load Cell-Wheatstone Bridge Combination) คือ

$$S = V_o/P = 1/C = [S_g (1 + \nu)/2AE]V_s \quad (4-7)$$

จากสมการ (4-7) ข้างบนแสดงว่าความไวของโหลดเซลล์ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของลิ่งค์ (A) โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิ่งค์ (E) เกจแฟกเตอร์ (Gage Factor) (S) และแรงดันที่จ่ายให้กับบริดจ์ (ν) ช่วง (Range) ของแรงที่ให้กับโหลดเซลล์แบบลิ่งค์หาได้จาก พื้นที่หน้าตัดของลิ่งค์และความล้า ของวัสดุที่ใช้ทำลิ่งค์ โดย

$$P_{\max} = S_g A$$

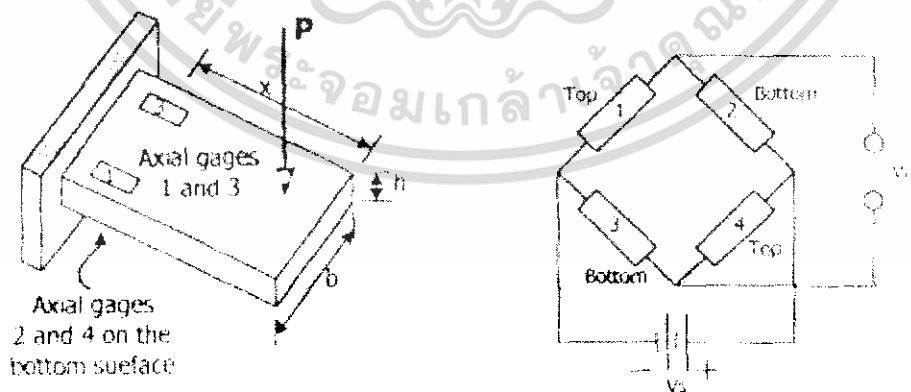
อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด (Maximum Load) $(V_o/V_s)_{\max}$ สำหรับโหลดเซลล์แบบลิ่งค์หาได้จากการแทนสมการข้างบนลงใน (2-1) จะได้

$$[V_o/V_s]_{\max} = S_g S_t (1 + \nu) / 2E \quad (4-9)$$

โหลดเซลล์แบบลิ่งค์เกือบทั้งหมดจะต้องมีการกำหนดค่าเต็มสเกลของภาระ ($P = P_{\max}$) ที่ $(V_o/V_s) = 3mV/V$ ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะของอัตราส่วนแรงดัน (ν/v) นี้การ P บนโหลดเซลล์จะหาได้จาก

$$P = [(V_o/V_s)(V_o/V_s)^*] P_{\max} \quad (4-10)$$

(ข.) โหลดเซลล์แบบคาน (Beam - Type Load Cell)



ภาพที่ 2.20 โหลดเซลล์แบบคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดเซลล์แบบคาน ใช้วัดระยะในกรณีที่ใช้โหลดเซลล์แบบลิงค์ไม่ได้ ภาพที่ 2.20 จะเป็นแบบคานยื่น (Cantilever Beam) ซึ่งมีเกจความเครียด 2 อันติดอยู่ด้านล่าง (ทั้งหมดติดในแนวขนานกับแกนของคาน) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยึดหยุ่นและเซนเซอร์ สำหรับเซลล์ชนิดนี้คือ เกจที่ต่อกันเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.20

ภาระ P ทำให้เกิดโมเมนต์ $M = PX$ ที่ตำแหน่ง X ทำให้ผลลัพธ์

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \sigma M / Ebh^2 = \sigma P_x / Ebh^2 \quad (a)$$

เมื่อ b คือความกว้างของหน้าตัดของคาน

H คือความหนาของหน้าตัดของคาน

การตอบสนองของเกจความเครียดหาได้จาก $\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon$ และสมการ (a) ดังนั้น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\sigma S_g P_x}{Ebh^2} \quad (b)$$

แรงดันออก v_o จากวีทสโตนบริดจ์ซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของภาระ P หาได้โดยแทนสมการ (b) ลงในสมการ

$$v_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] v_s$$

และสมมุติว่าเกจความเครียดทั้ง 4 เหมือนกันทุกประการ จะได้

$$v_o = \frac{\sigma S_g P_x v_s}{Ebh} \quad (4-11)$$

หรือ

$$P = \frac{Ebh^2}{\sigma S_g X v_s} v_o = C v_o \quad (4-12)$$

จากสมการด้านบนแสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนกับแรงดันออก v_o และค่าคงตัดสัดส่วนและค่าคงตัวเปรียบเทียบ (Calibration constant) C คือ

$$C = \frac{Ebh^2}{\sigma S_g X v_s} \quad (4.13)$$

ความไวของการรวมระหว่างโหลดเซลล์กับวีทสโตนบริดจ์จะกำหนดโดยสมการ $S = v/P$

ดังนั้น

$$S = \frac{v_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{\sigma S_g P_x v_s}{Ebh^2} \quad (4-14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4-14) แสดงว่าความไวของโหลดเซลล์แบบคานขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตาของคาน (b,h) โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคาน (E) ที่ตำแหน่งของภาระเทียบกับเกจ (x) เกจแฟกเตอร์ (S) และแรงดันที่ป้อนไว้กับวงจรบริดจ์ (v) ช่วงของโหลดที่ใช้กับโหลดเซลล์แบบคานขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตาของคานตำแหน่งที่ภาระกระทำ และความถี่ของวัสดุที่ใช้ทำเป็นคาน ถ้าสมมุติว่าเกจติดอยู่ที่ตำแหน่งใกล้กับตัวรองรับ (Beam support) จะได้

$$M_{gauge} = M_{max} \text{ และ } P_{max} = \frac{S_f b h^2}{\sigma X} \quad (4-15)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด $(v/v)_{max}$ ได้จากการแทนสมการ P_{max} ลงในสมการ (4-11) ดังนั้น

$$\left(\frac{v_O}{v_S} \right)_{max} = \frac{S_g S_f}{E} \quad (4-16)$$

โหลดเซลล์แบบคาน ที่มีขายในท้องตลาดจะมีอัตราส่วนแรงดัน (v/v) ที่ภาระเต็มสเกล ระหว่าง 4 ถึง 5 mV/V

(ก.) โหลดเซลล์แบบวงแหวน (Ring-type Load Cell)



ภาพที่ 2.21 โหลดเซลล์แบบวงแหวน

ส่วนประกอบของโหลดเซลล์แบบวงแหวนพิสูจน์ริงคิงค์ (Proving Ring) เป็นส่วนยืดหยุ่น และมีเซ็นเซอร์ที่ใช้ได้ทั้งเกจความเครียดและ LVDT

ถ้าใช้ LVDT วัดระยะการกระจัดอันเนื่องมาจากการอัด หรือ ดึงในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับภาระ P จะเป็นไปตามสมการ (4-17) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = 1.79 \frac{PR^3}{Ewt^3} \quad (4-17)$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสที่ใช้ทำวงแหวน

W = ความหนา

t = ความหนาของวงแหวน

แรงดันออก V_o ของ LVDT สามารถแสดงได้โดยสมการ

$$v_o = S\delta v_s \quad (4-18)$$

เมื่อ S = ความไวของ LVDT

v_s = แรงดันที่ป้อนเข้ากับขดลวดปฐมภูมิของ LVDT

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก v_o และภาระ P หาได้จากแทนสมการ (4-17) ลงในสมการ (4-18) จะได้

$$v_o = 1.79 \frac{SPR^3}{Ewt^3} v_s \quad (4-19)$$

หรือ

$$P = 0.56 \frac{Ewt^3}{SR^3 v_s} v_o = C v_o \quad (4-20)$$

โดย

$$C = 0.56 \frac{Ewt^3}{SR^3 v_s} \quad (4-21)$$

เมื่อ C คือ ค่าปรับเทียบ

ความไวของแอลวีดีทีคอมบิเนชัน (Ring-LVDT Combination) S_r คือ

$$S_r = \frac{v_o}{P} = \frac{1}{C} = 1.79 \frac{SPR^3}{Ewt^3} v_s \quad (4-22)$$

ช่วงภาระของโพลีแซตต์แบบวงแหวนจะถูกควบคุมด้วย ความแข็งแรงของวัสดุ นั้น ๆ ถ้าโพลีแซตต์ใช้วัดโพลีที่กระทำเป็นจังหวะ (Cyclic Load) ความล้า (Fatigue) S เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาความเค้นสูงสุดในชิ้นส่วนวงแหวน อยู่ที่ผิวด้านในของวงแหวนตรงที่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งฉากกับแนวโพลีค่าประมาณของความเค้นที่ตำแหน่งนี้ คือ

$$\sigma_o = 1.09 \frac{PR}{Wt^3} \quad (4-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4-23) สำหรับการวัดโหลดที่กระทำเป็นจังหวะจะได้

$$P_{max} = 0.92 \frac{SR^2}{Et} S_f \quad (4-24)$$

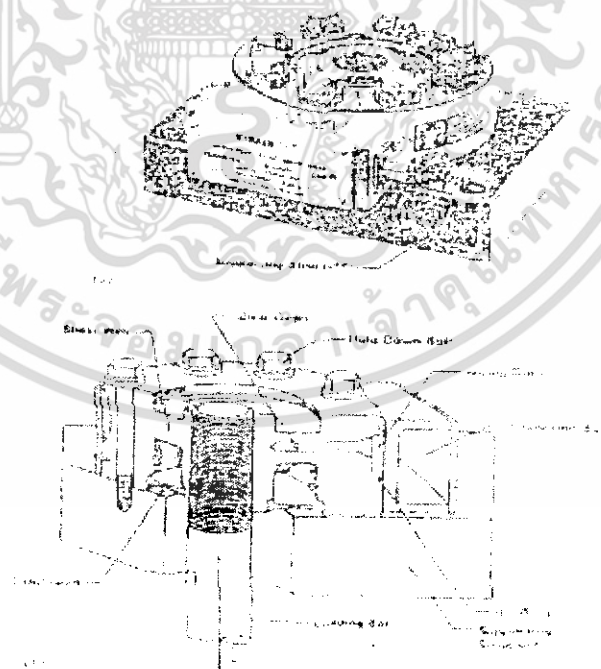
อัตราส่วนแรงดันที่โหลดสูงสุด $(V_o/V_s)_{max}$ จะเป็น

$$\left(\frac{v_o}{v_s} \right)_{max} = 1.64 \frac{SR^2}{Et} S_f \quad (4-25)$$

ถ้ารู้อัตราส่วนแรงดันเต็มสเกล $(V_o/V_s)_*$ และภาระสูงสุด P_{max} สำหรับโหลดเซลล์เฉพาะ สามารถกำหนดโหลดที่สอดคล้องกับ V ที่ถูกวัดโดยสมการ

$$P = \frac{\left(\frac{v_o}{v_s} \right)}{\left(\frac{v_o}{v_s} \right)_*} P_{max} \quad (4-26)$$

(จ.) โหลดเซลล์แบบแรงเฉือน (Shear-Web Type Load Cell)



ภาพที่ 2.22 โหลดเซลล์แบบแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดเซลล์ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “แฟลท โหลดเซลล์ (Flat Load Cell)” มีประโยชน์ในการใช้งานเมื่อที่วางแนวโหลดกระทำมีจำกัด

โหลดเซลล์แบบแรงเฉือนประกอบด้วยอินเนอร์โหลดคิงค์ฮับ (Inner Loading Hub) แบบเอ็นเตอร์ซัพพอร์ตคิงค์แฟรงค์ (Outer Supporting Flange) ซึ่งต่อกันด้วยเชียร์เว็บ (Shear Web) ดังแสดงในภาพที่ 2.22 เกจความเครียดแบบเชียร์ติดตั้งอยู่ในรูเล็กๆ ที่ถูกเจาะเข้าไปในเชียร์เว็บแฟลทโหลดเซลล์ที่มีขนาดกะทัดรัดสามารถใช้ได้กับการประยุกต์แบบเคลื่อนที่ (Dynamics Application) โดยเฉพาะเมื่อเราต้องการจะวัดโหลดในขณะที่มีการสั่นที่มีความถี่สูงพอสถาปนาขีด (Force Capacity) ที่วัดได้จากแฟลทโหลดเซลล์หาได้จากการวัดความถี่ธรรมชาติของโหลดเซลล์

$$f_n = 3.13 \sqrt{\left(\frac{k}{(W_e + W_x)} \right)}$$

เมื่อ f_n คือ ความถี่ธรรมชาติของทรานส์ดิวเซอร์ (Hz)

k คือ ค่าคงตัวของสปริง หรือ สติฟเนส (Stiffness) ของโหลดเซลล์ (lb / in)

W_e คือ น้ำหนักประสิทธิผลของส่วนแยกที่พอง โหลดเซลล์ (lb)

W_x คือ น้ำหนักภายนอกที่ติดกับฮับ (lb)

เมื่อได้ค่า f_n แล้วนำมาเทียบในตารางของแฟลทโหลดเซลล์ (Mechanical Properties Of Flat Load Cells)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าของแฟลทโหลดเซลล์

ความจุแรง (P) (lb)	k (lb/in)	W_e (lb)	f_n (kHz)
250	920,000	0.028	18.0
1,000	1,200,000	0.023	22.8
5,000	6,600,000	0.135	22.0
10,000	8,500,000	0.340	15.7

ความถี่ธรรมชาติที่แสดงในตาราง คำนวณได้สมมุติฐานว่า ไม่มีน้ำหนัก (W_x) ติดกับโหลดเซลล์

2.2 การแปลงสัญญาณอนาลอกดิจิตอลแบบซักระลอกต่อเนื่อง (Successive Approximation ADC)

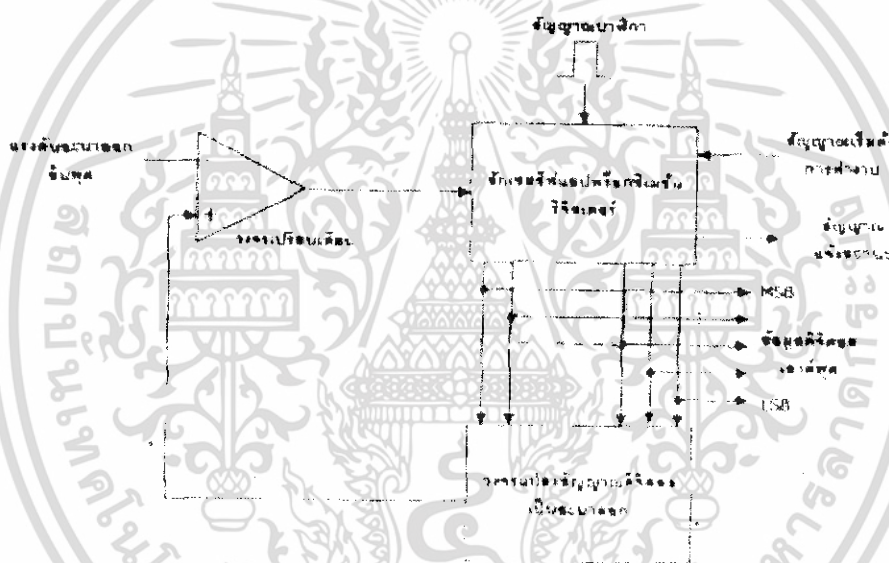
การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) ที่ได้รับความนิยมสูงและมีประสิทธิภาพดีคือการแปลงแบบซักระลอกต่อเนื่อง ไอซี ADC ที่เลือกทำการทดลองนี้ก็ใช้วงจร ADC แบบเดียวกันนี้ ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจพื้นฐานหลักการทำงานของวงจร ADC แบบนี้ก่อนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจะแปลเป็นไทยก็อาจจะเรียกกระบวนการ ADC แบบ ซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชันนี้ว่าเป็นการแปลงแบบประมาณค่าใกล้เคียงไดอะแกรมการทำงานของกระบวนการ ADC นี้แสดงในภาพที่ 2.22 ส่วนสำคัญหลักคือ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก หรือ DAC สัญญาณนาฬิกา และส่วนควบคุมลอจิก

วงจร ADC แบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชันนี้สามารถใช้รีจิสเตอร์เลขฐานสองหรือแบบไบนารีรีจิสเตอร์ในการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลของวงจร ADC ภายในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์จะเซตและรีเซตโดยการควบคุมจากวงจรควบคุมต่อไปนี้จะอธิบายการทำงานของ ADC แบบนี้ไปที่ละขั้น ขอให้พิจารณาไดอะแกรมเวลาในรูปประกอบด้วย

กำหนดให้แรงดันอนาล็อกอินพุต (V_{in}) มีค่าเท่ากับ 13.5V



ภาพที่ 2.23 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจร ADC แบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชัน

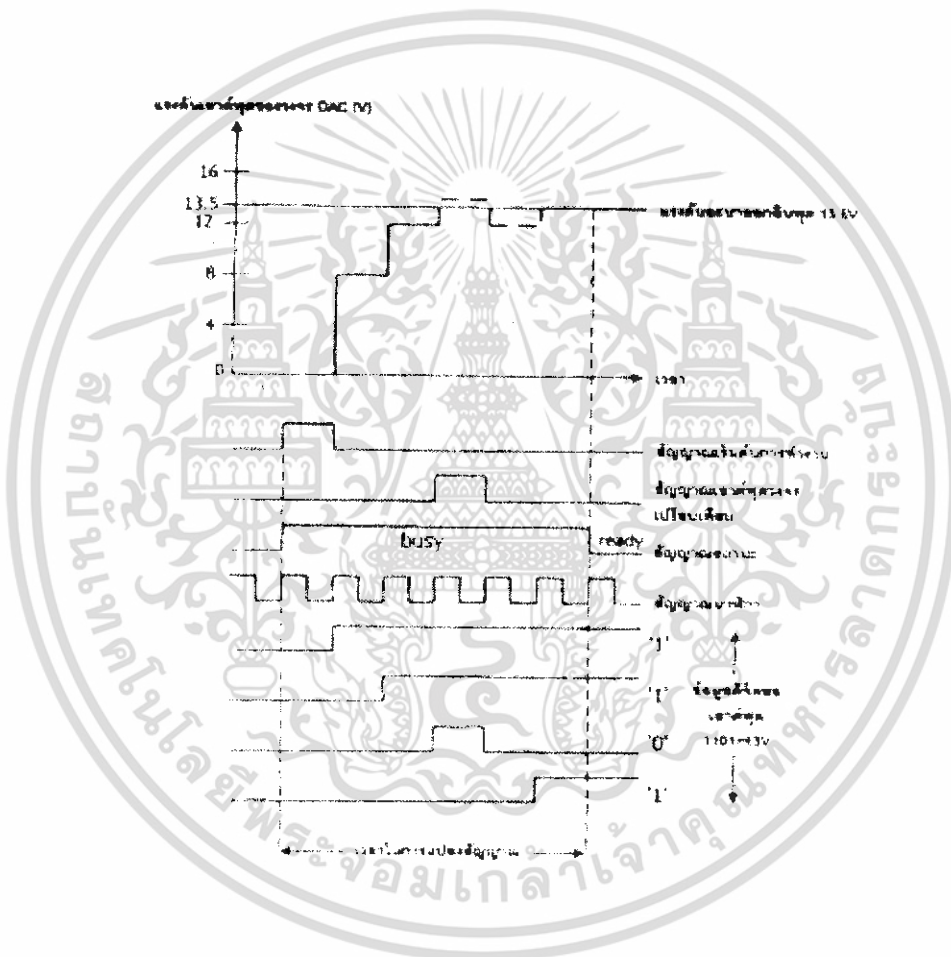
1. ส่งสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Start converter) มายังซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชันรีจิสเตอร์ (Successive approximation register)
2. ขณะนี้สถานะรีจิสเตอร์ไม่ว่าง(busy)สัญญาณนาฬิกาถูกแรกถูกส่งเข้ามาเพื่อกำหนดให้ค่าของรีจิสเตอร์เท่ากับ 0000
3. เอาท์พุต DAC จะเป็น 0 V ส่งไปในวงจรเปรียบเทียบเพื่อเปรียบเทียบกับ V_{in} ในขณะนี้จะได้เอาท์พุตเท่ากับ -5 V กำหนดเป็นลอจิก 0
4. เมื่อสัญญาณนาฬิกาถูกส่งไปเข้ามา จะทำการเซตบิต MSB ของรีจิสเตอร์เป็น "1"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในกรณีนี้เป็น DAC ขนาด 4 บิต ดังนั้นการที่บิต MSB เซต จะทำให้วงจรถ้า DAC แปลงค่าเป็นแรงดัน 8 V จะนำไปเปรียบเทียบกับที่วงจรเปรียบเทียบแรงดันแต่ก็ยังน้อยกว่า V_{in} ดังนั้น เอาท์พุทของวงจรเปรียบเทียบยังคงเป็น “0” ทำให้รีจิสเตอร์ยังคงค่าบิต MSB ให้เป็น “1” ต่อไป

6. ต่อมาบิต B2 (ถัดจากบิต MSB 1 บิต เนื่องจากมี 4 บิต กำหนดบิต MSB = B3) จะเซตซึ่งมีค่าเท่ากับ 4V จะนำไปรวมกับค่าของบิต MSB ที่มีอยู่ 8V เช่น 12V นำไปเปรียบเทียบกับค่า V_{in} ก็ยังมีค่าที่น้อยกว่า รีจิสเตอร์จึงยังคงค่า B2 ไว้ที่ “1” เช่นกัน

7. ต่อมาบิต B1 จะเซตทำให้แรงดันเอาท์พุทมา DAC กลายเป็น $8+4+2 = 14V$ ซึ่งมากกว่า V_{in} ทำให้วงจรเปรียบเทียบเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็น “1” ซึ่งส่งสัญญาณมาควบคุมให้ B1 เป็น “0”



ภาพที่ 2.24 ไคอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของวงจร ADC แบบซิกเซสแอปพร้อมซีเมชั่น

8. เมื่อบิต LSB ถูกเซต จะมีค่าแรงดันเท่ากับ 1V เข้ามารวมกับค่าของ B3, B2 และ B1 เป็น $8+4+0+1 = 13V$ นำไปเปรียบเทียบกับค่า V_{in} ปรากฏว่าน้อยกว่า V_{in} ที่ทำให้ที่บิต B0 หรือ LSB มีค่าเป็น “1”

9. ขณะนี้ทุกบิตในรีจิสเตอร์ถูกนำมาแปลงค่าเรียบร้อยแล้วจะทำให้สถานะของรีจิสเตอร์กลับมาเป็น พร้อมทำงาน (ready)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการ ADC แบบนี้จะมามีค่า 1101 หรือ 13 V ซึ่งจะใกล้เคียงกับ V_{in} 13.5 มากที่สุด ถ้าหากรีจิสเตอร์มีจำนวนบิตมากกว่านี้ ความละเอียดของข้อมูลที่แปลงได้จะมีความใกล้เคียงมากขึ้น ช่วงเวลาการแปลงสัญญาณจะเริ่มสั้นขึ้นตั้งแต่สัญญาณนาฬิกาถูกส่งเข้าไปเตรียมระบบ ไปจนถึงเมื่อสถานะของรีจิสเตอร์กลับมาเป็น “พร้อมทำงาน” อีกครั้งหนึ่งซึ่งจะต้องใช้จำนวนสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ $n+1$ พัลส์ โดย n เท่ากับจำนวนบิตของรีจิสเตอร์

ดังนั้นถ้าหาก ADC แบบซัคเซสแอฟพรีอ็อกซิเมชันขนาด 4 บิต ตามตัวอย่างที่อธิบายมานี้ใช้ค่าของสัญญาณนาฬิกาอัตราเท่ากับความถี่ 50 KHz ซึ่งค่าเวลาทั้งหมดนำมาใช้ในการแปลงสัญญาณจะคำนวณได้ดังนี้

(1) คำนวณคาบเวลาของสัญญาณ

$$f_{clk} = 50 \text{ kHz} = 50 * 10^3$$

$$T = 1 / (50 * 10^3) = 20 \text{ มิลลิวินาที}$$

(2) จำนวนสัญญาณนาฬิกาทั้งหมดที่ใช้ในการแปลงเท่ากับ $n+1, n$ มีค่าเท่ากับ 4 เนื่องจากมีจำนวน 4 บิต ดังนั้นจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ทั้งหมดจึงเท่ากับ $4+1 = 5$

(3) เวลาทั้งหมดที่ใช้เท่ากับ $5 * 20 = 100$ มิลลิวินาที

จะเห็นว่าวงจร ADC แบบซัคเซสแอฟพรีอ็อกซิเมชันมีความเร็วในการทำงานสูงพอสมควร เหมาะอย่างยิ่งในการนำมาใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาดกลาง

3.1 ความเที่ยงตรงของวงจร ADC

เป็นการเปรียบเทียบแรงดันอนาล็อกของวงจร ADC กับแรงดันที่ควรเกิดขึ้นจริงในการยกตัวอย่างที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดของวงจร ADC ขนาด 8 บิต เมื่อเทียบเป็นแรงดันอนาล็อกควรมีค่าเท่ากับ 5.0000 V แต่จากการคำนวณในตัวอย่างก่อนหน้านี้ได้ค่าแรงดัน 4.9804 V นั่นคือเกิดความผิดพลาดไป 0.0195 V หรือ 19.5 mV แต่การบอกค่าความเที่ยงตรงของวงจร ADC มักระบุเป็นค่าจำนวนนี้เทียบกับ VLSB ดังนั้นในวงจร ADC ขนาด 8 บิตที่ยกเป็นตัวอย่างจึงมีค่าความเที่ยงตรง (หรือบางทีเรียกเป็นค่าความผิดพลาด) เป็น $+1/2\text{LSB}$

3.2 ค่าเวลาในการแปลงสัญญาณ (Conversion time)

เป็นค่าของเวลาทั้งหมดที่วงจร ADC แบบนับแรมปีและแบบซัคเซสซิฟแอฟพรีอ็อกซิเมชันใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลจนเสร็จสิ้น พารามิเตอร์ตัวนี้มักจะปรากฏในคุณสมบัติของไอซีที่ทำงานเป็นวงจร ADC เมื่อไอซีทำการแปลงสัญญาณเสร็จสิ้นลงจะส่งสัญญาณที่เรียกว่า EOC (End of conversion) ออกมา

ค่าเวลาในการแปลงสัญญาณของวงจร ADC จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของวงจร, ค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณและขนาดของสัญญาณอนาล็อกอินพุต

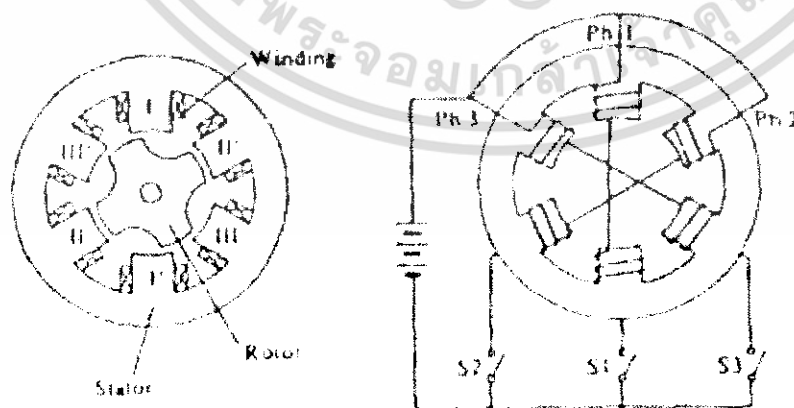
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping motor)

ในปัจจุบันนี้จะเป็นได้ว่าสเต็ปป์มอเตอร์มีใช้อยู่หลายๆ งาน เช่นในเครื่องพิมพ์ดีดเครื่องที่ x-y , ในแขนกล หรือในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ เพราะในสเต็ปป์มอเตอร์ที่มีการควบคุมแบบลููปเปิด (Open Loop) ทำให้งานต่อ การควบคุมและเรายังสามารถที่จะรู้ตำแหน่งที่แน่นอน จึงมักที่เลือกใช้ สเต็ปป์มอเตอร์การควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ ส่วนใหญ่จะใช้คอมพิวเตอร์ หรือซิงเกิลบอร์ดควบคุม โดยจะทำชุดต่อเชื่อม (interface) ระหว่างคอมพิวเตอร์กับสเต็ปป์มอเตอร์ และจะต้องมีซอฟต์แวร์ เพื่อควบคุม สเต็ปป์มอเตอร์ได้แน่นอนถูกต้องและมีความละเอียดสูงมาก

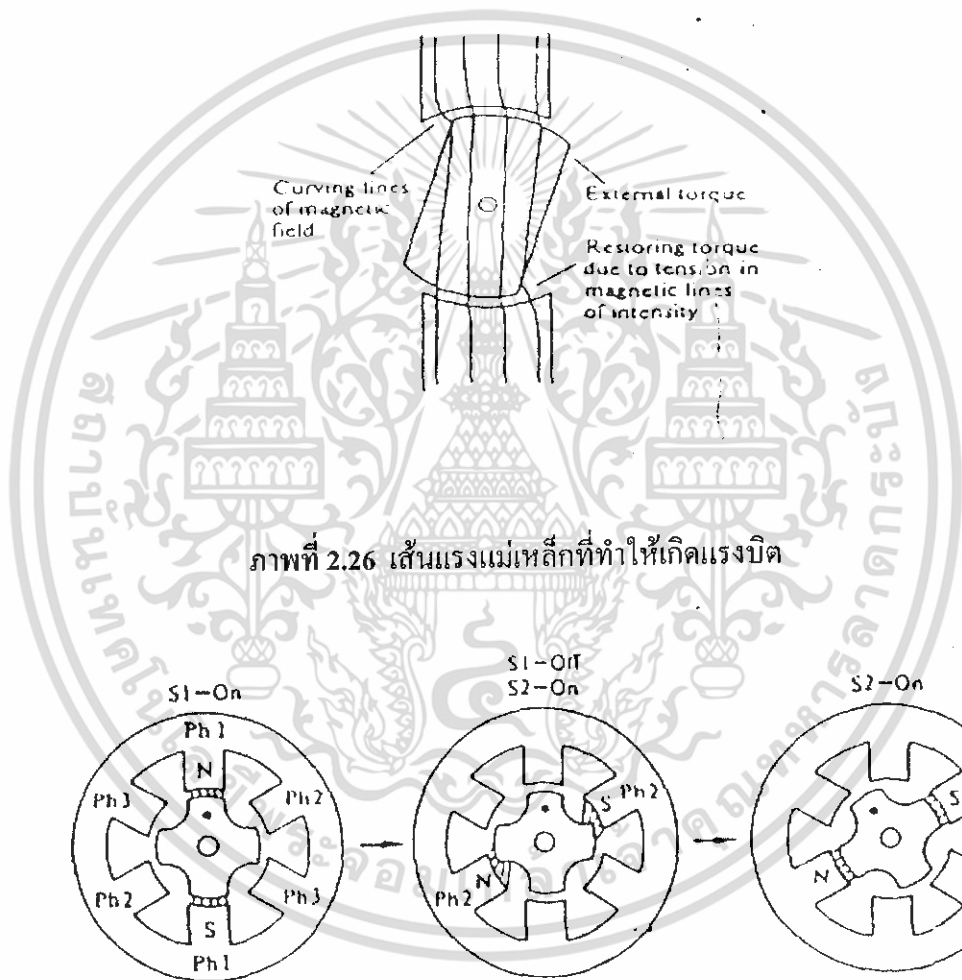
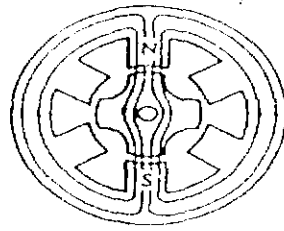
2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของ Stepping motor

ภายในสเต็ปป์มอเตอร์ประกอบด้วย สเตเตอร์ (Stator) , โรเตอร์ (Rotor) และขดลวด (Coil) ประกอบเข้าด้วยกันดังภาพที่ 2.25 เนื่องจากสเต็ปป์มอเตอร์โรเตอร์เป็นเหล็กอ่อนๆ ซึ่งจะมีค่าของ คุณสมบัติที่พยายามจะปรับตัวเองตามที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านมากที่สุด ดังแสดงภาพที่ 2.26 เมื่อเกิด เส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ตัวสเตเตอร์ผ่านตัวโรเตอร์ ตัวโรเตอร์ ก็จะปรับตัวเองให้เส้นแรงแม่เหล็กได้ ผ่านมากที่สุด โดยการหมุนตัวเองทำให้เคลื่อนที่ ไปเกิดมุมของการหมุน เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้ตัด ผ่านตัวมันถึงจุดมากที่สุดการทำให้สเต็ปป์มอเตอร์หมุนนั้นทำได้โดยจะอาศัยหลักการนี้แต่ต้องให้ เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้น โดยรับช่วงต่อกันกันไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.27 ก,ข และ ค ซึ่งแสดง ถึงการหมุนของมอเตอร์ โดยจะมีทิศทางขึ้นอยู่กับการที่ขั้วกระแสเข้าไปในขดลวดมอเตอร์ก็จะหยุด ณ ตำแหน่งสุดท้ายที่มีทิศทาง จะขึ้นอยู่กับการขั้วกระแสเข้าที่ขดลวดว่าจะให้ไปทางไหน และ เมื่อ ต้องการให้มอเตอร์หยุดก็ โดยการขั้วตัวโรเตอร์ มอเตอร์ก็จะหยุด ณ ตำแหน่งสุดท้ายที่มีการขั้วที่ ตัวสเตเตอร์ดังนั้นเราจึงสามารถรู้ตำแหน่งของมอเตอร์ ด้วยการนับจำนวนพัลส์ที่ได้ให้ป้อน โดยใช้ สูตรคือการนำเอาค่า มุมที่เปลี่ยนไป - ค่ามุมต่อสเต็ป + จำนวนพัลส์ที่ป้อนให้

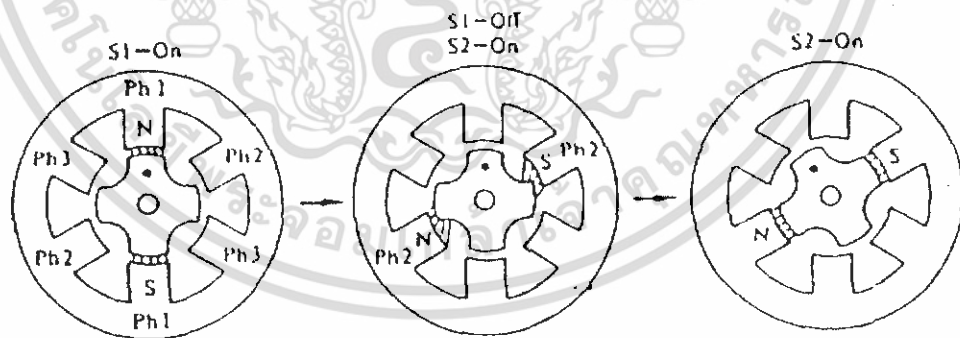


ภาพที่ 2.25 โครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.26 เส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด

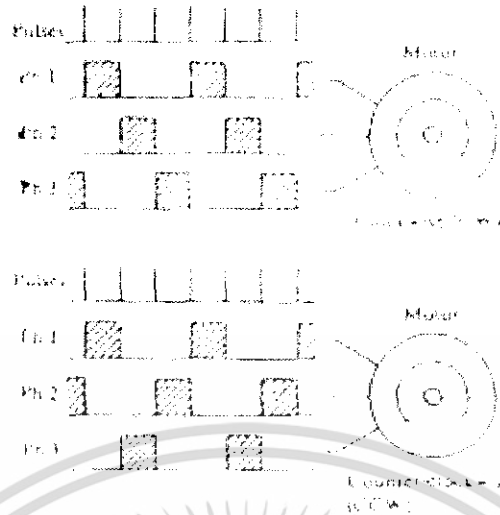


ภาพที่ 2.27 แสดงการเคลื่อนที่ที่ละสตีป เมื่อกระตุ้นเฟส 1 เฟส 2

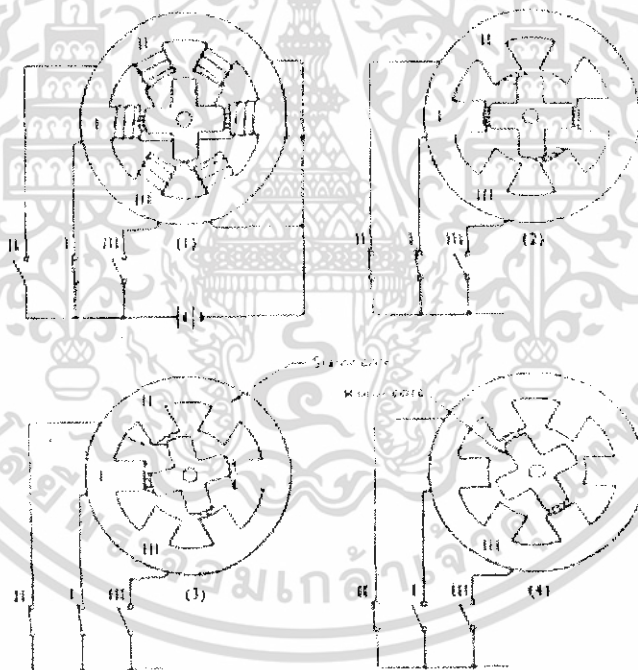
2.3.2 การกระตุ้นเฟสตีปึงมอเตอร์

ดังที่รู้แล้วว่าในการให้สตีปึงมอเตอร์หมุนได้นั้น จะต้องกระตุ้นเฟสของขดลวดสเตเตอร์ให้เรียงกันไปเรื่อยๆ ทางใดทางหนึ่ง ถ้าต้องการให้กลับ ก็กระตุ้นเฟสในทิศทางกลับกัน ดังแสดง

ในภาพที่ 2.28 และการทำงานของสตีปึงมอเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.29 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.28 แสดงการกระตุ้น แบบเดินหน้าและถอยหลัง



ภาพที่ 2.29 แสดงการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์

การกระตุ้นของสเตเตอร์มีอยู่ 3 แบบ

ก) การกระตุ้นเฟสเดียวแบบ Single phase excitation ดังแสดงในภาพที่ 2.30 ซึ่งการที่ทำการกระตุ้นแบบนี้ซึ่งมีแรงบิดน้อยกว่าการกระตุ้นแบบ 2 เฟสและการเข้าตำแหน่งจะช้ากว่าแบบ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การกระตุ้นสองเฟส แบบ two phase excitation ดังแสดงในภาพที่ 2.31 ซึ่งการกระตุ้นแบบสองเฟสนี้ มอเตอร์จะมีแรงบิดดีกว่าการกระตุ้นแบบเฟสเดียวและสามารถเข้าตำแหน่งได้เร็วกว่าแบบ 1-เฟส

ค) การกระตุ้นโดยการใช้แบบ 1 และ 2 เฟส สลับกลับกัน จะเรียกว่าแบบ one-two phase excitation หรือแบบ half step operation ดังแสดงในภาพที่ 2.32 ซึ่งจะการต่อแบบนี้จะให้ไคแรงบิดดีกว่า 1-เฟส และ 2-เฟส แต่การเข้าตำแหน่ง จะช้ากว่าแบบ 1-เฟส และ 2-เฟส

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									

แบบ 3-เฟส

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									
Phase 4									

แบบ 4-เฟส

ภาพที่ 2.30 การกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 3-เฟส และ 4-เฟส

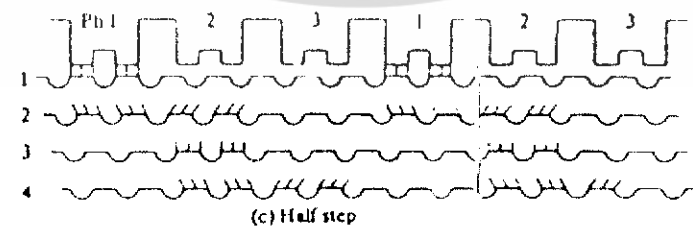
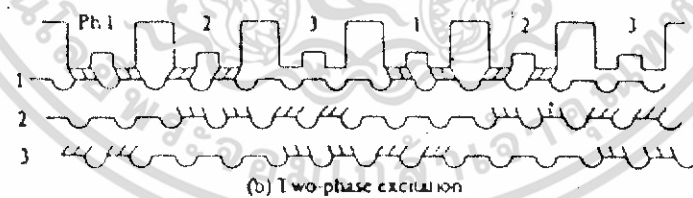
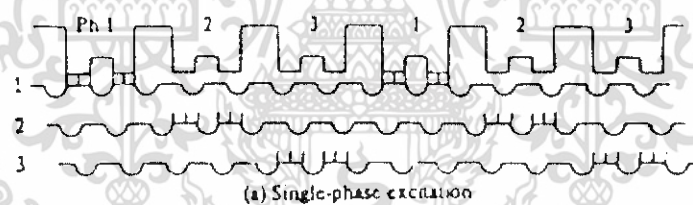
Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1				→					
Phase 2				→					
Phase 3									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									
Phase 4									

ภาพที่ 2.31 การกระตุ้นแบบสองเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ 3-เฟส และ 4-เฟส

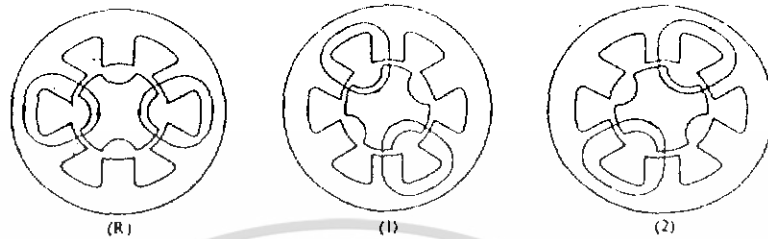
Clock state (A)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phase 1											
Phase 2											
Phase 3											



ภาพที่ 2.32 การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 3-เฟส หรือ 4-เฟส

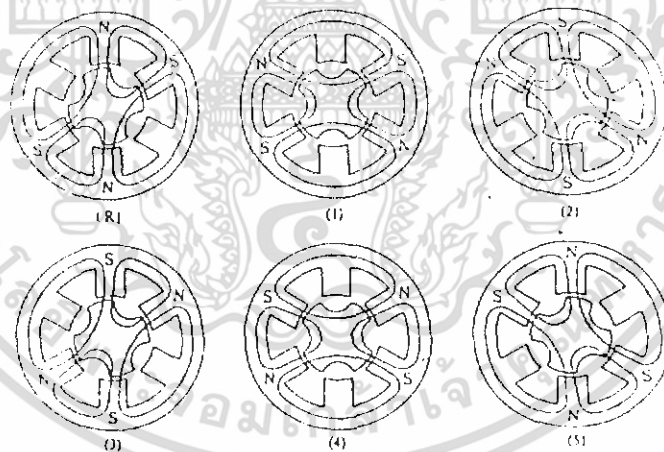
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจับแบบกระตุ้น 2 เฟส เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ผ่านแกนเหล็กเป็นเส้นตรงเลขที่เดียว จะเหมือนการกระตุ้น แบบเฟสเดียว แต่จะวกกลับมาทางด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.32 และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งมาจากแกนตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 2.33



ภาพที่ 2.33 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อจับแบบ 2 เฟส

การขับสแต็ปป์มอเตอร์แบบกระตุ้น 2 เฟสนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการขับแบบชนิดกระตุ้นเฟสเดียว ซึ่งแต่ละครั้งจะต้องกระตุ้นที่เดียวพร้อมกันทั้ง 2 เฟส จะต่างกันตรงที่การจับแบบ 2 เฟส เข้าตำแหน่งแต่ละสแต็ปได้เร็วกว่าแบบ เฟสเดียว และแรงบิด มากกว่าแบบเฟสเดียวด้วย



ภาพที่ 2.34 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กแบบสองเฟส

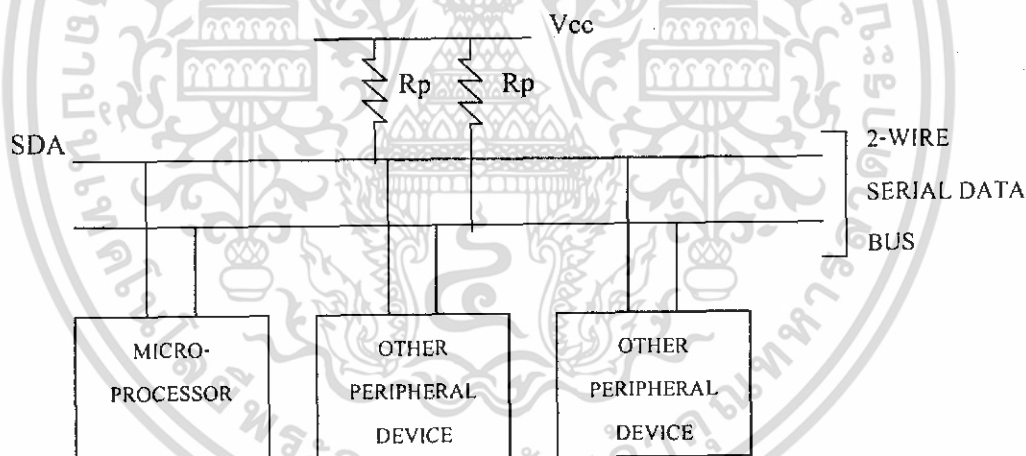
2.4 ระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ I²C Bus

ความรู้เรื่องการสื่อสารแบบ I²C Bus จะย่อมาจาก Inter Integrate Bus (IIC BUS) ซึ่งเรียกกันสั้นๆว่า "I²C Bus" ซึ่งเป็นชื่อของวิธีการติดต่อสื่อสารอนุกรมแบบหนึ่งซึ่งมีข้อดี คือ ใช้สัญญาณในการเชื่อมต่อเพียงสองเส้นคือ SCL และ SDA แต่สามารถที่จะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายๆ ตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมในบัสเดียวกันได้ ซึ่งถือว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กๆ เนื่องจากลักษณะการทำงานของวงจรต่างๆ จะมุ่งเน้นในการออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดสามารถที่ใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นอุปกรณ์จำพวก Chips Support ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นไอซีหน่วยความจำ ไอซี ADC ไอซีฐานเวลา (RTC) หรือ ไอซีจำพวก Port I/O ต่างๆ ก็เริ่มให้มีการออกแบบให้มีการเชื่อมต่อกับ CPU จะเป็นบัสแบบ I²C Bus กันมากขึ้น

2.4.1 การเชื่อมต่อบัสแบบ I²C Bus

ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ โดยใช้บัสแบบ I²C Bus จะใช้สัญญาณทั้งหมด 2 เส้น คือ SCL และ SDA โดยการติดต่อระหว่างตัวอุปกรณ์จะเป็นแบบ 2 ทิศทาง โดยสัญญาณทั้งสองเส้นจะต้องต่อกับตัวต้านทาน Pull-Up ไว้ เพื่อให้สถานะของบัสในขณะไม่ถูกใช้งานจะมีสถานะเป็นบัสสว่างหรือ “1” ทั้งคู่ โดยอุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกออกแบบมาเชื่อมต่อกับระบบบัสแบบนี้ จะต้องสร้างวงจรภาคเอาต์พุตให้เป็นแบบ Open Drain หรือ Open Collector เสมอ เพื่อให้สามารถต่ออุปกรณ์ร่วมกันในระบบบัสเดียวกันได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์

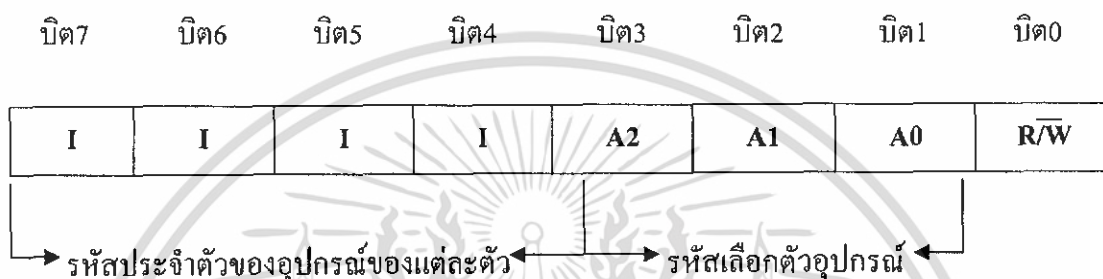


ภาพที่ 2.35 แสดงลักษณะโครงสร้างการต่อบัสแบบ I²C Bus

2.4.2 การรับส่งข้อมูลของ I²C Bus

การรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ I²C Bus จะเริ่มต้นด้วยการที่ตัวแม่สร้างสถานะเริ่มต้น (Start Condition) เพื่อขอใช้บัสจากนั้นจึงเริ่มการส่งรหัสควบคุม (Control Byte) เพื่อที่จะใช้ระบุตำแหน่งแอดเดรสของตัวลูกที่ต้องการจะติดต่อกับในระบบบัส โดยค่าตำแหน่งแอดเดรสนี้ อุปกรณ์แต่ละตัวจะมีรหัสแอดเดรสเฉพาะตัวที่จะแตกต่างกันออกไปและจะไม่มีการทำซ้ำในระบบบัสที่บัสเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคจรหัส Control Byte จะมีขนาดของบิต 8 บิต ซึ่ง 7 บิตแรก (เริ่มจาก MSB) จะเป็นค่าตัวตำแหน่งแอดเดรสของตัวลูกส่วนบิตที่ 8 (LSB)จะเป็นบิตสุดท้ายของ ไบท์ที่ใช้สำหรับระบุทิศทางของข้อมูลในการรับส่ง (R/W) โดยถ้าบิต LSB มีค่าเป็น “0” จะหมายถึงตัวแม่ (CPU) เขียนข้อมูลไปให้ตัวลูก (อุปกรณ์) แต่ถ้าบิต LSB มีค่าเป็น “1” ก็จะหมายถึงตัวแม่ (CPU) จะต้องการอ่านข้อมูลจากตัวลูก (อุปกรณ์) โดยจะทำการรับส่งกันทีละครั้งละหนึ่งไบท์ (8บิต) และปิดท้ายข้อมูลของแต่ละไบท์ด้วยบิตแสดงการตอบรับ (Acknowledge Bit) โดยที่จะมีลักษณะโครงสร้างของ Control Byte ของอุปกรณ์ I²C Bus มีดังนี้



ภาพที่ 2.36 แสดงลักษณะของ Control Byte ของ I²C Bus

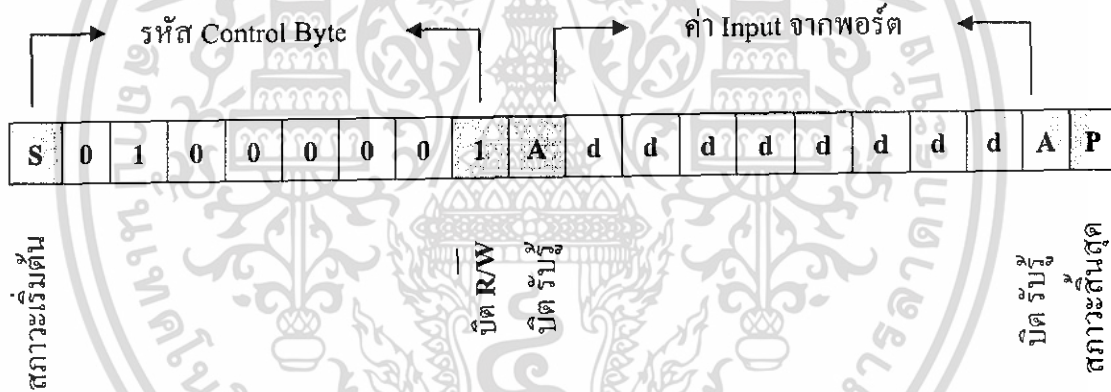
ซึ่งจะเห็นได้ว่ารหัส Control Byte ของตัวอุปกรณ์ I²C นั้นจะมีขนาด 8 บิต โดยที่ บิต 7-บิต 4 จะเป็นรหัสประจำตัวของอุปกรณ์แต่ละตัวที่ถูกกำหนดไว้ตายตัวจากโรงงาน ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องศึกษาจากคู่มือ Data Sheet ของอุปกรณ์นั้นๆ เองว่าอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งานมีรหัสประจำตัวเป็นเท่าใด ส่วนบิต 3-บิต 1 นั้นจะมีไว้สำหรับเลือกเบอร์อุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในบัสโดยค่าของทั้ง 3 บิตนี้จะต้องมีค่าตรงกับที่กำหนดสถานะทางลอจิกให้กับขาสัญญาณ A2, A1 และ A0 ของอุปกรณ์ด้วย ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ที่มีรหัสประจำตัวเป็น “0111” อาจจะถูกออกแบบให้สามารถต่อร่วมกันในบัสเดียวกันได้จำนวน 8 ตัวโดยการกำหนดสถานะทางลอจิกให้กับขาสัญญาณ A2, A1 และ A0 ของอุปกรณ์ให้มีความแตกต่างกันจากวงจรที่ต่ออยู่ ดังนั้นเมื่อตัวแม่ต้องการติดต่อกับอุปกรณ์ที่มีรหัสประจำตัว “0111” ตัวใดในระบบบัสก็จะส่งค่า Control Byte ด้วยค่าในบิต 3-บิต 1 ตรงสถานะที่ทางลอจิกของอุปกรณ์ตัวนั้นๆ ออกไป ตัวอย่างเช่น ถ้าตัวแม่ส่งรหัส Control Byte ด้วยค่า “01110000” ออกไปในบัสก็จะหมายถึงว่า ตัวแม่กำลังที่ต้องการจะเขียนข้อมูลไปยังตัวอุปกรณ์ที่มีรหัสประจำตัว “0111” ตัวที่ขาสัญญาณ A2,A1และA0 มีค่าเป็น “0” อยู่ส่วนตัวอุปกรณ์ที่มีรหัส “0111” แต่มีสถานะลอจิกของขาสัญญาณ A2,A1และA0 ไม่ตรงกับ “000” ก็จะไม่สนใจรหัสนั้น

แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ I²C บางตัวก็อาจจะถูกออกแบบให้ต่อได้ในแค่ระบบบัสเดียวกันเพียงตัวเดียว โดยที่จะไม่มีขาสัญญาณในการเลือกตำแหน่งของอุปกรณ์อยู่ด้วยค่าของ Control Byte ในตำแหน่ง บิต3-บิต1 ก็อาจถูกกำหนดไว้ตายตัวเป็น “000” เสมอก็เป็นได้ ส่วนค่า Control Byte ใน

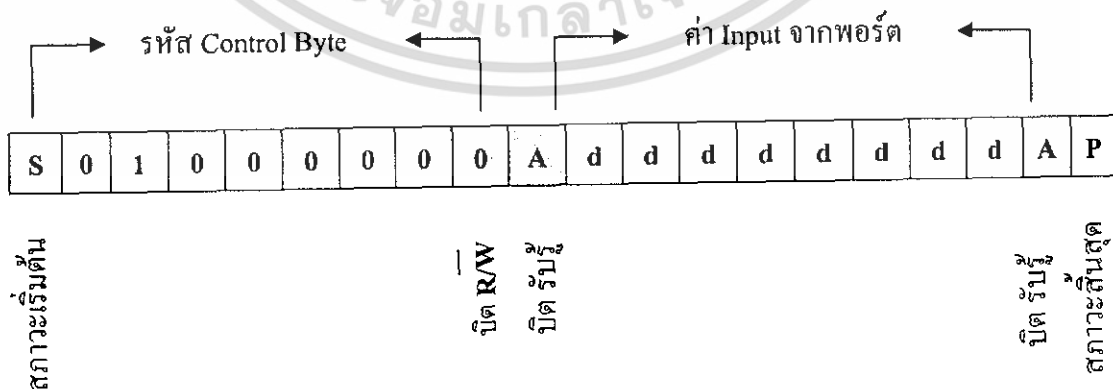
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของ บิต 0 นั้นจะใช้เป็นบิตกำหนดทิศทางของข้อมูล โดยถ้า บิต 0 มีค่าเป็น “0” จะหมายถึงตัวแม่ต้องการที่เขียนค่าไปยังตัวอุปกรณ์ แต่ถ้าค่าในบิต 0 มีค่าเป็น “1” ก็จะหมายถึงตัวแม่ต้องการอ่านค่าข้อมูลจากอุปกรณ์เป็นต้น

สำหรับจำนวน ไบท์ข้อมูลในการรับส่งกันนั้นไม่มีข้อกำหนดที่ใช้ตายตัวว่าจะส่งกันครั้งละกี่ไบท์ ขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างอุปกรณ์แต่ละชนิดที่จะกำหนดขึ้น โดยในการรับ-ส่งแต่ละครั้งนั้นตัวแม่จะเป็นตัวควบคุมการ รับ-ส่ง เองทั้งหมด ซึ่งในกรณีที่ตัวแม่ต้องการติดต่อกับอุปกรณ์หลายๆตัวนั้น หลังจากตัวแม่สร้างสถานะเริ่มต้น(Start Condition) ขึ้นมาและทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ตัวหนึ่งเสร็จแล้ว ก็จะไม่จำเป็นต้องสร้างสถานะสิ้นสุด (Stop Condition) เพื่อกลับไปเริ่มต้น รับ-ส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ตัวต่อไปอีกก็ได้ แต่ตัวแม่ก็สามารถที่จะสร้างสถานะการเริ่มต้น (Start Condition) ขึ้นมาซ้ำใหม่พร้อมกับส่งค่า Control Byte ซึ่งจะทำให้การระบุตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์ตัวต่อไปที่ต้องการติดต่อดูด้วยได้ทันที แต่เมื่อทำการติดต่อบริษัทส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ทุกตัวในบัสเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงสร้างสถานะสิ้นสุด (Stop Condition) เพื่อเป็นการเลิกใช้บัสและทำให้บัสอยู่ในสภาวะว่างในภายหลังก็ได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.37 ตัวอย่างรูปแบบของการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ I/O แบบ I²C Bus ตัวหนึ่ง

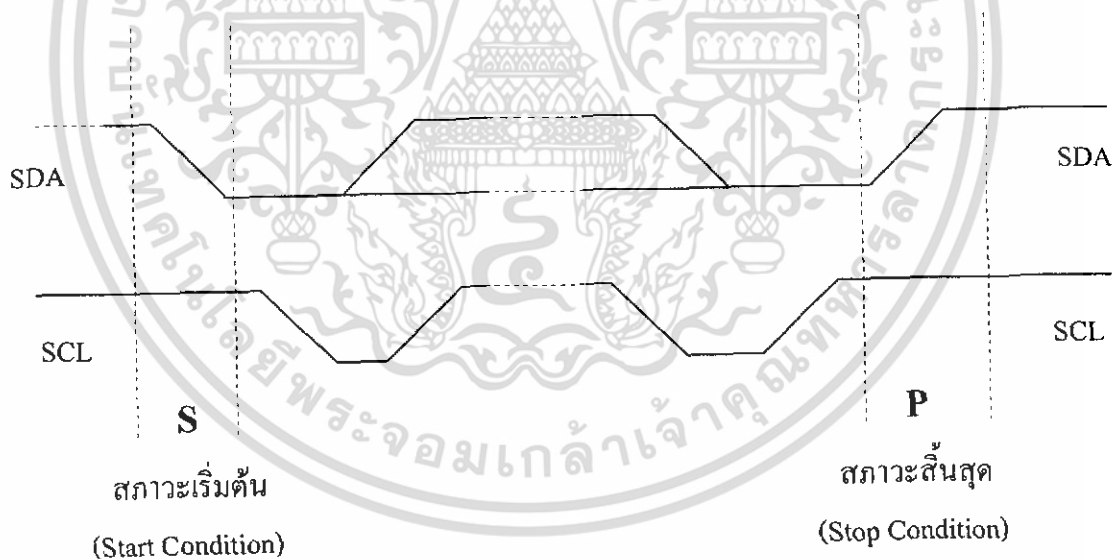


ภาพที่ 2.38 ตัวอย่างรูปแบบของการเขียนข้อมูลจากอุปกรณ์ I/O แบบ I²C Bus ตัวหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

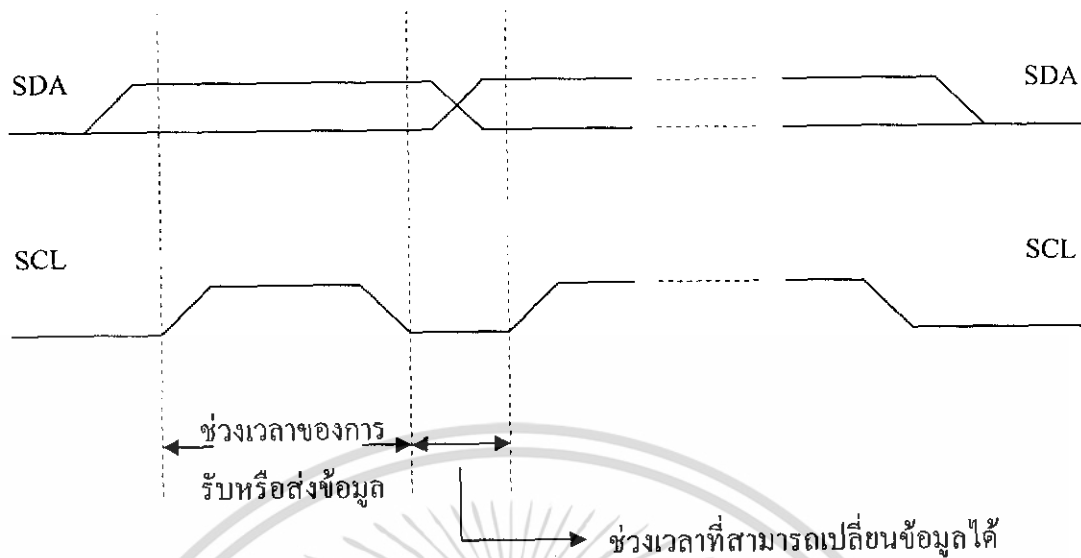
2.4.3 ข้อกำหนดในการเริ่มต้น (Start) และสิ้นสุด (Stop)

การกำหนดสถานะเริ่มต้น (Start Condition) สถานะสิ้นสุด (Stop Condition) จะถูกกำหนดโดยตัวแม่ (CPU) โดยขณะสถานะปกติของบัส หรือสถานะบัสว่างนั้น สัญญาณ SCL และ SDA จะมีสถานะที่เป็น “1” ทั้งคู่ แต่เมื่อต้องการเริ่มต้นการรับส่งข้อมูลในบัส ตัวแม่จะต้องสร้างสถานะเริ่มต้น โดยการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ SDA จาก “1” มาเป็น “0” ซึ่งในขณะที่สัญญาณ SCL ยังมีค่าเป็น “1” อยู่ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวลูกจะรอคอยตรวจสอบสถานะของการเปลี่ยนแปลงของบัสอยู่เสมอ เมื่อตรวจสอบพบสถานะเริ่มต้นจึงจะมีการเริ่มต้นรับส่งข้อมูลกัน โดยตัวแม่จะต้องส่งข้อมูลของตัว Control Byte เป็นไปท์เริ่มต้น เพื่อกำหนดตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการจะติดต่อกับ โดยตัวแม่ก็จะเป็นตัวสร้างสัญญาณ SCL เพื่อควบคุมการรับส่งข้อมูลในบัสตลอดการรับส่ง โดยสถานะของสัญญาณข้อมูล SDA ที่จะถูกเปลี่ยนแปลงในขณะที่สัญญาณนาฬิกา SCL จะมีค่าเป็น “0” โดยข้อมูลจะถูกรับส่งในขณะที่สัญญาณนาฬิกา SDA มีค่าเป็น “1” และเมื่อต้องการสิ้นสุดการใช้บัส ตัวแม่จะสร้างสถานะสิ้นสุด โดยการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ SDA จาก “0” กลับไปเป็น “1” ในขณะที่สัญญาณ SCL ยังมีค่าเป็น “1” อยู่



ภาพที่ 2.39 แสดงลักษณะการสร้างสถานะเริ่มต้นและสถานะสิ้นสุดของ I²C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.40 แสดงลักษณะการรับส่งบิตข้อมูลของ I²C

2.4.4 การแจ้งสถานะรับทราบในบัส (Acknowledge)

ซึ่งข้อบังคับอีกประการหนึ่งในการรับส่งข้อมูลในระบบบัสแบบ I²C BUS ก็คือ จะต้องมีการแจ้งรับทราบ (Acknowledge) เพื่อจะแจ้งให้ทราบว่าข้อมูลที่ส่งออกไปนั้นได้รับแล้วและมีความถูกต้องสมบูรณ์แบบซึ่งตัวแม่ใช้สัญญาณนาฬิกา SCL ในการควบคุมการรับส่งข้อมูลทางขา SDA เมื่อข้อมูลถูกส่งครบ 8 บิต ตัวลูกจะต้องมีการตอบรับให้ตัวแม่รับรู้ โดยที่ตัวแม่ส่งข้อมูลครบ 8 บิตแล้ว ตัวแม่ก็จะปล่อยสัญญาณข้อมูล SDA ให้อยู่ในสถานะว่าง ("1") และสร้างสัญญาณนาฬิกา SCL ออกมาในบัสอีกจำนวน 1 ลูกคลื่นซึ่งในสถานะนี้ตัวลูกจะต้องส่งสัญญาณ "0" ออกมาทางขา SDA ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา SCL มีค่าเป็น "0" เป็นเวลา 1 ลูกคลื่นของสัญญาณนาฬิกา SCL และตัวแม่ก็จะทำการตรวจสอบสัญญาณการรับรู้นี้ ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา SCL มีค่าเป็น "1" เสมอ

ในกรณีที่ตัวลูกไม่ยอมส่งสัญญาณการรับรู้มาให้ ตัวแม่ก็อาจจะต้องเริ่มต้นกระบวนการส่งข้อมูลใหม่ทั้งหมด หรืออาจยกเลิกหรือหยุดการติดต่อการรับส่งข้อมูลในครั้งนั้นก็ได้

สำหรับรายละเอียดที่กล่าวอธิบายมาแล้วนี้จะเป็นลักษณะข้อกำหนดโดยรวมของวิธีการสื่อสารอนุกรมแบบ I²C Bus เท่านั้น ซึ่งตามปกติแล้วอุปกรณ์ทุกตัวที่ออกแบบให้ใช้การติดต่อสื่อสารกันแบบอนุกรม I²C Bus นั้น มักจะใช้ข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้เป็นมาตรฐานเดียวกันแทบทั้งสิ้นทุกตัว ไม่ว่าจะเป็นลักษณะของสัญญาณในการสร้างสถานะเริ่มต้น (Start Condition) สถานะสิ้นสุด (Stop Condition) วิธีการแจ้งสถานะการรับทราบในบัส (Acknowledge) ช่วงเวลาของการรับข้อมูลต่างๆ และ ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณข้อมูล ช่วงเวลาของการส่งข้อมูล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการใช้อุปกรณ์ I²C ตัวใดผู้ใช้จำเป็นจะต้องศึกษาคู่มือ Data Sheet หรือรายละเอียดเพิ่มเติมเฉพาะของอุปกรณ์ตัวนั้นๆ ประกอบการใช้งานด้วย เช่น ข้อกำหนดในการรับส่งข้อมูลของแต่ละอุปกรณ์ เช่นในการเขียนข้อมูลให้กับอุปกรณ์แบบ I²C นั้น บางตัวอาจจะใช้วิธีการส่งรหัส Control Byte ที่ตำแหน่งแอดเดรสและไบต์ที่เป็นข้อมูลอย่างละ 1 ไบต์ แต่ที่อุปกรณ์บางตัวอาจต้องส่งจำนวนไบต์สำหรับใช้ระบุตำแหน่งแอดเดรสเพิ่มเป็น 2 ไบต์เป็นต้นหรืออุปกรณ์บางตัวก็อาจจะสามารถในการรับส่งสัญญาณนาฬิกาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีความเร็วได้ไม่เท่ากัน บางตัวสามารถทำงานกับสัญญาณที่มีความเร็วสูงๆ ได้ แต่บางก็ตัวอาจมีข้อจำกัดเรื่องความเร็วในการทำงานอยู่บ้าง ดังนั้นจึงจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ประกอบในการใช้งานด้วยเสมอ

2.4.5 คุณสมบัติของ PCF8583

PCF8583 เป็น Chips Support ประเภท Real Clock (RTC) แบบ Clock/Calendar ขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัฒนาและคิดค้นขึ้นมาได้โดย “ Philips Semiconductors ” ซึ่งจะใช้สำหรับทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบฐานเวลาในลักษณะของนาฬิกาเวลาและปฏิทินเป็นหลักโดยที่ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตัวนี้จะทำหน้าที่ในการนับเวลา โดยการให้หน่วยการนับแยกออกเป็นหลายๆ หน่วยไม่ว่าจะเป็นวินาที นาที ชั่วโมง วันที่ วันในสัปดาห์ เดือน และ ปี ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการทำงานของตัวอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีความคล่องตัวและสะดวกมากขึ้น เมื่อเราจำเป็นที่จะต้องประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ในลักษณะที่ต้องเกี่ยวข้องกับระบบเวลาต่างๆ ช่างต้น

โดยฐานเวลา RTC เบอร์ PCF8583 นั้นเป็นชิพฐานเวลาซึ่งใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบ PC-Bus โดยภายในตัวบรรจุวงจรนับของฐานเวลาให้ไว้ใช้งานอย่างครบถ้วนตั้งแต่ 1/100 วินาที/นาฬิกา/ชั่วโมง/วันที่/เดือน/วันในสัปดาห์ และ ปี แล้วยังมีความอ่อนตัวในการใช้งานค่อนข้างดีเกี่ยวกับระบบเวลา เช่น ค่าของชั่วโมงสามารถกำหนดได้จากโปรแกรมว่าจะให้เป็นระบบ 12 ชั่วโมง หรือ 24 ชั่วโมง และในส่วนของวันที่และวันในสัปดาห์ก็สามารถจะปรับเปลี่ยนได้เองว่าเดือนใดที่มี 28/29/30 วัน หรือ 31 วันอย่างอัตโนมัติ ซึ่งนอกจากจะที่ใช้งานเป็นฐานเวลา RTC แล้ว PCF8583 นี้ยังมีฟังก์ชันที่พิเศษในการตั้งเวลาสำหรับเปิดปิดการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ (ALARM FUNCTION) ได้อีกด้วย นอกจากนี้แล้วในตัวของ RTC เองยังมีหน่วยความจำ RAM ขนาด 8 บิต จำนวน 240 ไบต์ สำหรับให้ผู้ใช้นำไปใช้งานเก็บข้อมูลอย่างอิสระ เช่น อาจนำไปใช้ในการเก็บค่าการตั้งเวลาเพื่อใช้ตั้งเวลาเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติโดยรวมของ RTC เบอร์ PCF8583 มีดังนี้

- ใช้การเชื่อมต่ออนุกรมแบบ I²C Bus
- สามารถทำงานได้กับไฟเลี้ยงตั้งแต่ 1.0V – 6.0V
- มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 8 บิต จำนวน 240 Byte

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในการเก็บรักษาข้อมูล 1.0 – 6.0V
- กินกระแสไฟต่ำมากเพียง 50 μ A (50 ไมโครแอมป์)
- มีฟังก์ชันในการตั้งเวลาและมีสัญญาณ Output Interrupt
- สามารถที่จะเขียนโปรแกรมการทำงานของสัญญาณนาฬิกาเป็นแบบ 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงได้อย่างสมบูรณ์
- ใช้งานกับความถี่ 32.768KHz หรือ 50Hz
- มีวงจรสำหรับการเพิ่มค่าของตำแหน่งต่างๆ เมื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลเข้าไปในอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ
- สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งของการทำงานในบัสได้ 2 ตำแหน่ง โดยการกำหนดลอจิกให้กับขา A0
- สามารถใช้งานเป็น RTC หรือ Counter ได้

ซึ่งลักษณะของโครงสร้างภายในของ RTC เบอร์นี้ก็เป็นแบบ RAM ขนาด 8บิตมีจำนวน 256 ตำแหน่ง โดยจะจัดสรรเป็นส่วนของ RTC จำนวน 16 ตำแหน่ง และปล่อยว่างไว้สำหรับใช้งานเป็น RAM ทั่วไปอีก 240 ตำแหน่ง โดยการอ่านหรือเขียนข้อมูลที่ระหว่างตัว CPU กับตัว RTC นั้น จะใช้วิธีการสื่อสารอนุกรมแบบ I²C Bus ซึ่งเมื่อมีการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ RTC นั้น ค่าตำแหน่งแอดเดรสของตัว RTC จะถูกเพิ่มค่าขึ้นโดยอัตโนมัติ โดยที่ RTC เบอร์ PCF8583 นี้จะถูกออกแบบให้สามารถที่จะเชื่อมต่อยู่ภายในบัสเดียวกันได้ จำนวน 2 ตัว โดยการกำหนดสถานะทางลอจิกของขาสัญญาณ A0 ของ RTC ให้มีความแตกต่างกัน

นอกจากจะใช้งาน PCF8583 เป็น RTC แล้ว ยังสามารถประยุกต์เป็น Counter สำหรับนับค่าสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกได้อีกด้วย โดยทำการต่อสัญญาณ Pulse จากภายนอกให้กับขาสัญญาณ OSCI ของตัว RTC และโปรแกรมการทำงานของ RTC ใน Control Register ให้เป็น Event Counter Mode ซึ่งในกรณีนี้จะสามารถใช้งาน RTC ในการนับจำนวนของสัญญาณ Pulse ที่ป้อนให้ขา OSCI ได้ตามต้องการ

โดยตำแหน่งแอดเดรส 16 ตำแหน่งแรกของ RTC ซึ่งจัดสรรไว้ใช้งานในส่วนของฐานเวลา ตำแหน่งแรกจะเป็นตำแหน่งของรีจิสเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของตัว RTC (Control/Status Register) ส่วนอีก 7 ตำแหน่งที่ (01H-07H) นั้นจำเป็นตำแหน่งสำหรับเก็บค่าการนับเวลาของ RTC ในหน่วยต่างๆ เช่น ค่าของ วินาที นาที ชั่วโมง วัน เดือน ปี เป็นต้น ส่วน 8 ตำแหน่งหลัง(08H-0FH) จะใช้สำหรับ โปรแกรมการตั้งเวลาต่างๆ

จะเห็นได้ว่า PCF 8583 ประกอบขึ้นจากวงจรหลายๆ ส่วน เช่น Power-on Reset เป็นวงจรเชื่อมต่อแบบ I²C วงจรที่ถอดรหัสตำแหน่งแอดเดรสวงจรหารความถี่ และวงจรกำเนิดความถี่ขนาด

32.768 KHz โดยต้องต่อคริสตัลจากภายนอกให้กับขา OSCI และ OSCO ด้วยสำหรับหน่วยความจำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัว PCF8583 ก็จะมีโครงสร้างของหน่วยความจำที่ขนาด 8บิต จำนวน 256 ไบต์ โดยจัดสรรสำหรับแบ่งออกเป็นรีจิสเตอร์ของส่วนที่เป็นฐานเวลาจำนวน 16ไบต์ (00H-0FH) ใช้งานเป็นหน่วยความจำ RAM ทั่วไปได้อีก 240ไบต์ (10H-FFH) ซึ่งในการประยุกต์การใช้งานนั้นตามปกติแล้วจะสามารถใช้งานในหน้าที่ของตัว RTC (Clock Mode) หรือใช้งานเป็นอุปกรณ์ตัวนับCounter (Event Counter) สำหรับนับความถี่จากขาสัญญาณ OSCI ก็ได้

2.4.6 การจัดขาสัญญาณของ PCF8583

สำหรับลักษณะของตัว PCF8583นั้นจะมีขนาด 8 ขาโดยจะมีให้เลือกใช้ทั้งแบบที่เป็นตัวถังแบบตีนตะขาบมีขนาด 8 ขา หรือ DIP8 (Dual in-line package) และแบบที่เป็นตัวถังแบบอุปกรณ์พื้นผิว SOP8 (Small Outline package) โดยทั้ง 2 แบบจะมีลักษณะของการจัดเรียงของขาสัญญาณเหมือนกันดังนี้



- OSCI เป็นขาสัญญาณ Input ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับตัวกำเนิดความถี่แบบ Crystalหรือเป็นสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

- OSCO เป็นขาสัญญาณนาฬิกา Output ที่ส่งออกมาจาก PCF8583 โดยถ้าป้อนสัญญาณของนาฬิกาจากภายนอกแบบ Pulse ให้กับ OSCO ขานี้จะเป็น Output ซึ่งปกติจะไม่ถูกใช้งาน แต่ถ้าเราต้องการป้อนสัญญาณนาฬิกาให้กับ RTC ด้วย Crystal จะต้องต่อ Crystal คร่อมที่ระหว่างขา OSCI และ OSCO ร่วมกัน

- A0 เป็นขาสัญญาณ Input ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่งแอดเดรสการทำงาน หรือ Control Byte ให้กับตัว RTC เอง โดย RTC เบอร์ PCF8583 นี้ ถูกออกแบบให้สามารถต่อร่วมกันภายในบัสเดียวกันได้ 2 ตัว โดยการกำหนดสถานะลอจิกให้กับขาสัญญาณ A0 นี้มีค่าต่างกัน

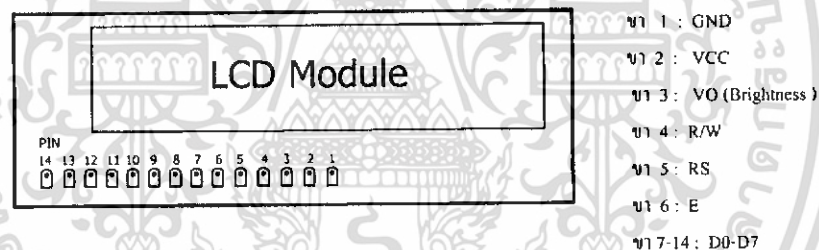
- VSS เป็นขาสัญญาณ อ้างอิง หรือ GND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- SDA เป็นขาข้อมูล แบบ 2 ทิศทาง ของ I²C ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างตัว RTC และตัวอุปกรณ์ภายนอกโดยจะทำหน้าที่เป็น Input ในการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกที่จัดส่งให้กับ RTC และในทางกลับกันจะทำตัวเป็น Output สำหรับส่งข้อมูลจากตัว RTC ให้กับอุปกรณ์ภายนอก
- SCL เป็นขาสัญญาณนาฬิกา Input ของ I²C ใช้สำหรับควบคุมการรับส่งหรืออ่านเขียนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภายนอก และ RTC
- INT เป็นขาสัญญาณ Output Interrupt จาก RTC โดยขาสัญญาณนี้จะมีคุณสมบัติเป็นแบบ Open-drain โดยเมื่อทำงานจะให้สถานะเป็นลอจิก “0” โดยเงื่อนไขการสร้างสัญญาณ Interrupt ของ RTC สามารถกำหนดได้จากโปรแกรม
- VDD เป็นขาสัญญาณไฟเลี้ยงวงจรของ RTC โดยทำงานได้กับไฟเลี้ยงตั้งแต่ 2.5-6.0V

2.5 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2)

โมดูล LCD ขนาด 16x2 จะมีขาที่ต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา มีการจัดขาแสดงในภาพที่ 2.41 สำหรับรายละเอียดการทำงานของแต่ละขามีดังนี้



ภาพที่ 2.41 รูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร

โมดูล LCD (Liquid Crystal Display)

จัดเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำไปใช้เป็นตัวแสดงผลข้อความ หรือตัวเลขมากกว่านำไปใช้เพื่อเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงสว่าง เนื่องจากมีความเข้มของแสงต่ำมาก และกินกำลังไฟฟ้าต่ำมากด้วยเช่นกัน จึงนิยมนำ LCD มาใช้ในเครื่องคิดเลขและนาฬิกาดิจิตอล

LCD เป็นจอแสดงผลที่ได้รับความนิยมอย่างสูงอยู่ในปัจจุบัน LCD ถูกนำมาใช้งานแทนที่ 7-Segment เป็นจำนวนมากเนื่องจาก LCD สามารถที่จะแสดงตัวอักษรและรายละเอียดได้มากกว่าตัว 7-Segment ทำให้มีการนำไปใช้งานอยู่ในเครื่องมือต่างๆ มากขึ้น เพราะเป็นการสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับเครื่องมือต่างๆ โดยผ่านตัว LCD นั้นมีความสะดวกมาก ซึ่งในการทำงานนี้จะนำเอาโมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด มาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LCD แบบตัวอักษร (Characteristic)แบบ16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด มีขาต่อใช้งาน 14 ขาดังแสดงรายละเอียดการจัดขา ดังรูป ส่วนหน้าที่ของขาที่ใช้งาน โมดูล LCD มีรายละเอียดดังตาราง

ตารางที่ 2.3 แสดงชื่อและหน้าที่ของขาสัญญาณของ LCD

ขาที่	ชื่อขา	หน้าที่ใช้งาน
1	GND	ต่อกับกราวด์ของวงจร
2	+VDD	ต่อกับไฟเลี้ยง +5V
3	Vo	เป็นขาสำหรับป้อนแรงดันเพื่อปรับความสว่างของจอแสดงผล LCD
4	Rs	เป็นขาเลือกการติดต่อกับรีจิสเตอร์คำสั่งหรือรีจิสเตอร์ข้อมูล 0 : จะติดต่อกับรีจิสเตอร์คำสั่ง 1 : จะติดต่อกับรีจิสเตอร์ข้อมูลเพื่อนำไปแสดงผล
5	R/W	เป็นขาเลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ โมดูล LCD
6	E	เป็นขาสำหรับป้อนสัญญาณพัลส์เอ็นเนเบิลให้โมดูล LCD ทำงาน
7-14	D0-D7	เป็นขาข้อมูล 8 บิต โดยให้ขา 7 คือ D0 ไล่ไปจนถึงขา 14 คือ D7

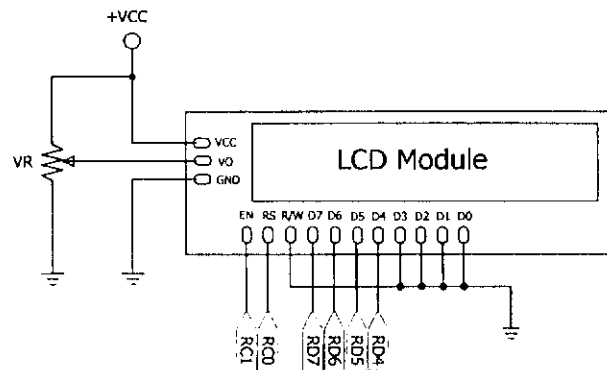
การติดต่อกับโมดูล LCD 16ตัวอักษร 2 บรรทัด

มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือแบบ 8 บิตและแบบ 4 บิต โดยปกติจะมีการใช้งานแบบ 8 บิตมากกว่า แต่หากมีข้อจำกัดเรื่องจำนวนพอร์ตควรจะใช้การติดต่อแบบ 4 บิต ซึ่งจะมีขั้นตอนเพิ่มเพียงเล็กน้อย แต่จะใช้ขาสัญญาณเพียง 6 เส้น ในขณะที่แบบ 8 บิต จะใช้ขาสัญญาณ 10 เส้น ซึ่งในการทำงานนี้จะใช้การติดต่อสัญญาณแบบ บิตนั้น

การติดต่อแบบ 4 บิต

มีลักษณะการต่อวงจรดังแสดงในภาพที่ 2.42 จะเห็นได้ว่าขาของข้อมูลที่ใช้นี้นั้นมีเพียง 4 เส้น คือ D4-D7 ซึ่งจะต่อเข้ากับ RD4-RD7 ของ CPU สำหรับขา D0-D3 ของโมดูล LCD ให้ต่อลงกราวด์ ส่วนขา RS ต่อเข้ากับ RC0 และ E ต่อเข้ากับ RA4 จุดที่ต่างจากการต่อแบบ 8 บิตการเขียนโปรแกรมคือ ต้องทำการส่งข้อมูล 2 ครั้งคือส่ง 4 บิตบนของข้อมูลก่อนจากนั้นจึงจะส่งข้อมูล 4 บิตล่างตามไป สำหรับการอินิเชียลนั้นจะมีสิ่งที่ต้องทำก่อนเสมอ คือ ต้องส่งข้อมูล 03h (0011) ออกไปให้แอลซีดีที่ขา D7-D4 แล้วทำการส่งสัญญาณ Enable จำนวน 2 ครั้ง เพื่อจะจัดสถานะการทำงานของแอลซีดี จากนั้นส่งข้อมูลคำสั่ง 02h ออกไปที่ขา D7-D4 แล้ว Enable อีกเช่นกันเพื่อกำหนดให้แอลซีดีทำงานในโหมด 4 บิต เพียงเท่านั้นแอลซีดีก็พร้อมที่จะทำงานในโหมด 4 บิตแล้ว ส่วนการกำหนดค่าอื่นๆ สามารถกำหนดต่อนี้ได้เลยแต่ต้องส่งข้อมูลในแบบ 4 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.42 แสดงการเชื่อมต่อ LCD แบบ 4 Bit Data

2.5.1 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม แน่ใจว่าต้องกำหนดให้ขา RS และ R/W เป็น “0” แล้วเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งควบคุมโมดูล LCD ที่สำคัญมี 8 คำสั่งดังนี้

1. คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (clear display)

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 10H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ space เข้าไปใน DDR RAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซีคิวต์คำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/D ให้เป็น “1”

2. คำสั่ง return home

ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูลเป็น “1” เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล แต่ข้อมูลบนจอแสดงผลจะไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ ข้อมูลที่คำสั่งของคำสั่งนี้จะเป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

3. คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล (Entry mode Set)

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	0	1	I/D	S

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากว่าบิต S เป็น “ 1 ” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล เคอร์เซอร์จะอยู่กับที่แต่ตัวอักษรข้อมูลจะถูกดันไปทางซ้าย หากบิตนี้เป็น “0” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ตัวเคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต I/D จะเป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว ทำให้แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็น “0” แอดเดรสจะลดลง

ดังนั้น ข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ได้แก่ 04H – 07H (4 ข้อมูลคำสั่ง) และที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึง กำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ และแอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้น

4. คำสั่งควบคุมการเปิดจอแสดงผล

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	1	D	C	B

บิต D ใช้ควบคุมการเปิดปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “1” จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะเป็นการปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนจอแสดงผล ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น “1” ถ้ากำหนดให้เป็น “0” จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์ หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกะพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น “1” เคอร์เซอร์จะกะพริบ ดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H – 0FH (8 รูปแบบคำสั่ง) ที่ใช้บ่อยคือ 0CH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์ และ 0FH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แสดงเคอร์เซอร์ และสั่งให้เคอร์เซอร์กะพริบ

5. คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับกำหนัดบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

S/C	R/L	ลักษณะการเลื่อน	ข้อมูลคำสั่ง
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย	10H-13H
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H-17H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H-1BH
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา	1C-1FH

6. คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	1	DL	N	F	*	*

บิต DL จะใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นแบบ 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น “1” จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลสามารถแสดงได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลมากกว่า 2 บรรทัด ก็กำหนดบิต N นี้ให้เป็น “1”

บิต F จะใช้เพื่อเลือกความละเอียดของตัวอักษรให้การแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x7 จุด และถ้าเป็น “1” จะแสดงผลเป็นแบบ 5x10 จุด

ข้อมูลคำสั่งที่ใช้บิตคือ 38H จะเป็นการกำหนดให้โมดูล LCD ทำงานในลักษณะแบบ 8 บิตแสดงผล 2 บรรทัด และเลือกความละเอียดเป็น 5x7 จุด

จุดที่น่าสังเกตคือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด แม้จะมีบรรทัดที่ใช้การแสดงผลเพียง 1 บรรทัด แต่จะต้องกำหนด N ให้เป็น “1” เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM แบ่งเป็น 2 ช่องคือ 00H และ 40H

7. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้บิต 7 เป็น “0” ให้บิต 6 เป็น “1” ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะให้แทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ก่อนที่อ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่างค่าของตัว 00H-3FH

8. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น “1” และข้อมูลอีก 7 บิต ที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของตัว DDRAM จะอยู่ระหว่าง 8CH-0FFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสวิ่งขึ้นอยู่กับการกำหนดสถานะที่บิต N ด้วย หากว่าบิต N เป็น “0” แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H-0CFH และถ้าบิต N เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วงคือ 8CH-87H และ 0C0H-0C7H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
BF	A	A	A	A	A	A	A

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านแฟล็ก BUSY (BF) โดยแฟล็กนี้จะใช้เป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมรับข้อมูลอยู่หรือไม่ถ้าหากบิต BF เป็น “0” แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น “ 1 ” แสดงว่าในขณะที่ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง

เมื่อต้องการอ่านแฟล็กจะต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “ 1 ” ด้วย แต่สัญญาณที่ RS ยังต้องเป็น “0” อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง

นอกจากนี้ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยที่ค่าของบิต 0- บิต 6 เป็นค่าข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

2.5.2 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

• การเขียนข้อมูลคำสั่งไปยังจอแอลซีดี

1. ทำให้ขา RS เป็น “0” เพื่อแจ้งให้โมดูล LCD ทราบว่าข้อความที่ขา Data เป็นข้อมูลคำสั่ง
2. ส่งข้อมูลคำสั่ง 4 บิตบน (บิต 7 => บิต 4) ที่ต้องการไปยังขา Data ทั้ง 4 เส้น
3. ส่งพัลส์ Enable ไปยังขา E
4. ส่งข้อมูลคำสั่ง 4 บิตล่าง (บิต 3 => บิต 0) ที่ต้องการไปยังขา Data ทั้ง 4 เส้น
5. ส่งพัลส์ Enable ไปยังขา E

• การเขียนข้อมูล (Data) เพื่อแสดงผลข้อมูล

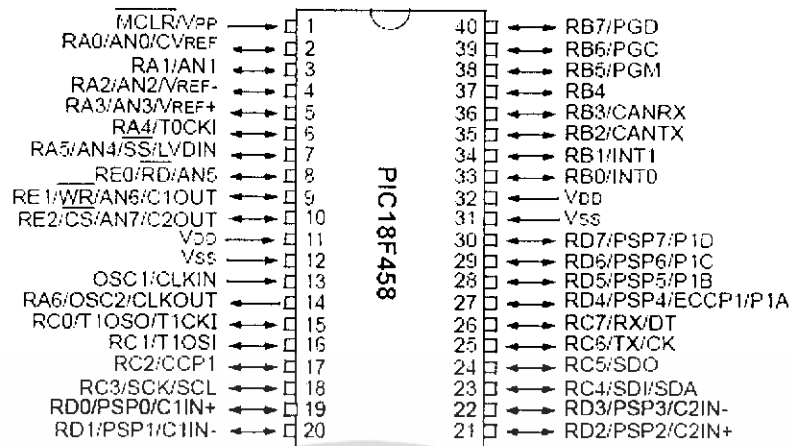
1. ทำให้ขา RS เป็น “ 1 ” เพื่อแจ้งให้โมดูล LCD ทราบว่าข้อความที่ขา Data เป็นข้อมูลในการแสดงผล

2. ส่งข้อมูลคำสั่ง 4 บิตบน (บิต 7 => บิต 4) ที่ต้องการไปยังขา Data ทั้ง 4 เส้น
3. ส่งพัลส์ Enable ไปยังขา E
4. ส่งข้อมูลคำสั่ง 4 บิตล่าง (บิต 3 => บิต 0) ที่ต้องการไปยังขา Data ทั้ง 4 เส้น
5. ส่งพัลส์ Enable ไปยังขา E

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458 ที่นำมาใช้งานเป็น I/O Port ที่มี I/O รวมทั้งสิ้น 34 เส้นประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.43 ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458

- RA0-RA6 จำนวน 7 เส้นสัญญาณ
- RB0-RB7 จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- RC0-RC7 จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- RD0-RD7 จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- RE0-RE2 จำนวน 3 เส้นสัญญาณ

ขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458 นั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

RA0-RA3 และ RA5 ขาสัญญาณเหล่านี้นอกจากจะใช้งานเป็น I/O ปกติได้แล้วยังทำหน้าที่เป็นขาอินพุตของสัญญาณอนาล็อก (AN0-AN4) อีกด้วย ดังนั้นเราจึงต่อสายสัญญาณเหล่านี้เข้ากับขั้วต่อ ADC/IO(CPU) เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน

RA4 จะใช้งานในส่วนของแอลซีดี ซึ่งจะต่อเข้ากับขา 6 ของคอนเนคเตอร์ CLCD โดยทำจะหน้าทำที่เป็นขา Enable ให้กับแอลซีดี

RA6/OSC2/CLKO เป็นขาสัญญาณที่ทำหน้าที่ในหลายส่วน คือ เป็นขา OSC2 และ CLKO จะนำมาใช้เป็นขาสัญญาณ I/O ได้ก็ต่อเมื่อเราใช้คริสตอลออสซิลเลเตอร์แบบที่เป็นโมดูลสำเร็จรูปสามารถต่อเข้ากับขา OSC1/CLKIN ได้เลย โดยที่ไม่ต้องต่อกับขา RA6/OSC2 ทำให้ขา RA6 วางและนำไปใช้เป็น I/O ได้ แต่ในบอร์ดจะออกแบบจะใช้งานขา RA6/OSC2 ร่วมกับ OSC1 ในการรับค่าสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ดังนั้น ขา RA6 นี้จึงไม่สามารถต่อออกไปใช้งานได้

RB0-RB7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถใช้งานเป็น I/O ได้ ปกติแต่ก็จะมีคุณสมบัติพิเศษคือจะมีวงจรมูลอัพ (Pull-Up) ภายในและยังเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัพท์ต่างๆ ดังนี้

- RB0/INT0 เป็นขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก 0
- RB1/INT1 เป็นขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- RB2/INT2 เป็นขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก 2
- RB3/INT3 เป็นขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก 3
- RB4-RB7 เป็นขาที่สามารถกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัพท์ได้หากเกิดการเปลี่ยนแปลงใน ส่วนของขาสัญญาณดังกล่าวและมีการ Enable อินเทอร์รัพท์ประเภทนี้ไว้เหมาะกับการนำไปใช้งาน ในส่วนของ สวิตช์คีย์บอร์ด เนื่องจากมีทั้งอินเทอร์รัพท์และวงจรถูล็อพในตัวจากคุณสมบัติดังกล่าว เราจึงจัดสรรการใช้งานดังนี้

RB0/INT0 จะเชื่อมต่อเข้ากับขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ของ RTC เบอร์ PCF8583 โดย จะทำการต่อผ่านจัมเปอร์จึงสามารถเลือกที่จะต่อหรือไม่ก็ได้ สามารถจะเลือกได้โดยการ Shot หรือ Open จัมเปอร์ INT0 ได้โดยตรง

RB1/INT1 จะเชื่อมต่อเข้ากับขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ของ PCF8574A และต่อเข้าที่ตัวของ ขาสัญญาณอินเทอร์รัพท์ ของMagnetic Card Reader (MCRB02TTL) ทั้งสองส่วนนี้จะผ่านจัมเปอร์ (INT1) จะทำให้สามารถเลือกที่จะติดต่อหรือไม่ก็ได้การใช้งานจะต้องเลือกใช้งานเพียงอย่างใด อย่างหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถใช้งานทั้งสองตัวพร้อมกันได้

RB2 จะใช้เป็นขาสัญญาณที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับ SPK/BUZZER เพื่อควบคุมการทำงานของ Speaker หรือ Buzzer

RB3 เป็นขาสัญญาณที่ต่อกับวงจรถวล็อพที่ควบคุมการทำงานของรีเลย์(Relay) โดยจะเชื่อมต่อให้ ผ่านจัมเปอร์ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้งานหรือไม่ก็ได้โดยการ Shot หรือ Open จัมเปอร์(RELAY)

RB4-RB7 จะต่อเข้ากับขั้วต่อ KBI/O สามารถนำไปต่อกับคีย์บอร์ดประเภท Matrix แบบ 4x4,4x3 หรือจะใช้เป็น I/O ธรรมดาก็ได้ ในขา RB6 และ RB7 นั้นนอกจากจะต่อกับขั้วต่อ KBI/O แล้วยังต่อกับสวิตช์ PROG/RUN เพื่อใช้เป็นสัญญาณในการโปรแกรมเมื่ออยู่ในโหมดของโปรแกรม แต่เมื่ออยู่ในโหมด RUN สามารถนำมาใช้งานเป็น I/O ได้ปกติ

RC0 ขาสัญญาณนี้ต่อเข้ากับขั้วต่อแอลซีดี (CLCD) โดยจะต่อเข้าที่ขา 4 ของคอนเนคเตอร์ เพื่อทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณ RS เพื่อควบคุมการทำงานของ LCD

RC1 เป็นขาสัญญาณที่ต่อเข้ากับขั้วต่อ OC1B เพื่อใช้งานในส่วนของขาสัญญาณอินพุตของ Timer 1 หรือใช้เป็นขาสัญญาณในส่วนของ Capture2 input /Compare2 Output/PWM2

RC2 เป็นขาสัญญาณที่ต่อเข้ากับขั้วต่อ OC1A เพื่อใช้เป็นขาสัญญาณในส่วนของ Capture 1 input/Compare1 Output/PWM1

RC3 สำหรับขาสัญญาณ RC3 จะใช้ทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณ SCL ในการติดต่อกับอุปกรณ์ I2C Bus และจะต่อเข้ากับขั้วต่อ I2C EXPAND เพื่อขยายพอร์ต I2C BUS

RC4 สำหรับขาสัญญาณ RC4 จะทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณ SDA ในการติดต่อกับอุปกรณ์ I2C Bus และจะต่อเข้ากับขั้วต่อ I2C EXPAND เพื่อขยายพอร์ต I2C BUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RC5 จะใช้เป็นสัญญาณในการควบคุมการรับส่งข้อมูลในการใช้งาน RS485 โดยจะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่เป็น Line Driver ก็คือ IC 75176

RC6 จะเป็นขาสัญญาณที่ทำการส่งข้อมูล (Tx) ในโหมดการสื่อสารอนุกรม RS232, RS422 และ RS485 โดยจะต่อเข้ากับ IC ที่เป็น Line Driver ก็คือ Max 232 และ 75176

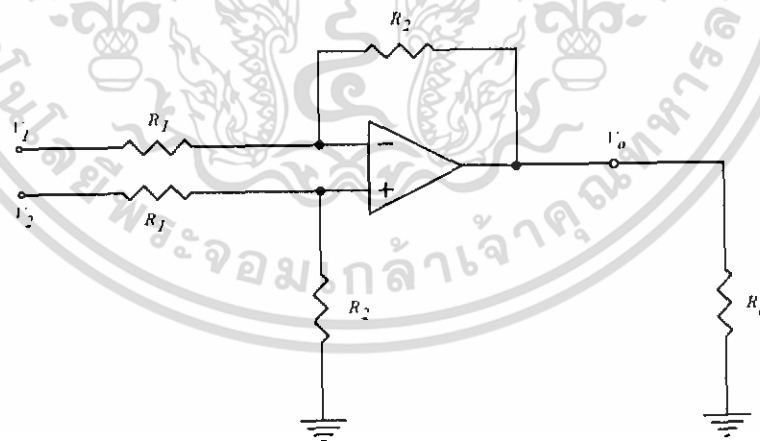
RC7 จะเป็นขาสัญญาณที่ทำการรับข้อมูล (Rx) ในโหมดการสื่อสารอนุกรม RS232, RS422 และ RS485 โดยจะต่อเข้ากับ IC ที่เป็น Line Driver ก็คือ Max 232 และ 75176

RD0-RD3 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับขั้วต่อ KBI/IO เพื่อใช้งานสำหรับการต่อคีย์สวิตช์ 4x4 หรือ 4x3 ซึ่งเมื่อใช้งานเป็นคีย์บอร์ดดังกล่าวจะทำงานร่วมกับพอร์ต RB4-RB7 หรือจะใช้งานเป็น I/O ก็ได้

RD4-RD7 ขาสัญญาณเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณ Data ที่ใช้ติดต่อกับ LCD โดยจะถูกต่อไปที่คอนเน็คเตอร์ CLCD ซึ่งมีขั้วต่อ LCD ที่ได้ออกแบบไว้จะเป็นแบบ 4 Bit Data ฉะนั้นในการรับส่งข้อมูลจะทำผ่านสายสัญญาณทั้ง 4 เส้น คือ RD4-RD7

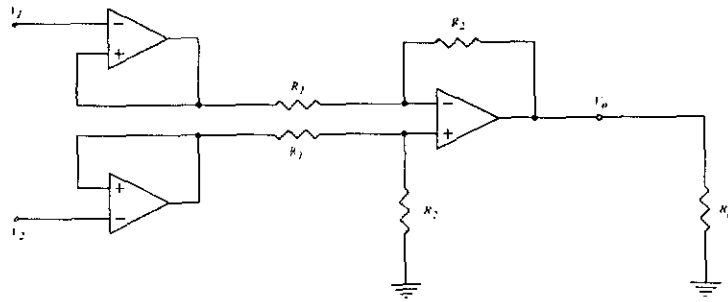
RE0-RE2 ขาสัญญาณเหล่านี้สามารถใช้งานเป็น I/O ได้ตามปกติ แต่จะมีคุณสมบัติพิเศษคือขาสัญญาณดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นขาอินพุตอนุลอก (AN5-AN7) เมื่ออยู่ในโหมดของ Analog to Digital โดยเราจะนำไปต่อกับขั้วต่อ ADC/IO(CPU) ทำให้สามารถต่อออกไปใช้งานได้สะดวก

2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์แบบพื้นฐาน



ภาพที่ 2.44 วงจรขยายความแตกต่าง

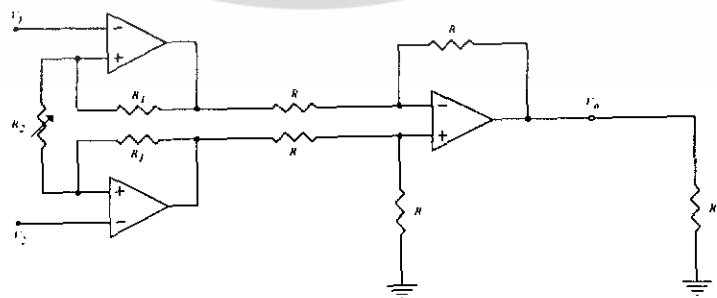
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.45 วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์พื้นฐาน

จากสมการ $v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$ จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_o จะขึ้นอยู่กับผลต่างของแรงดัน

อินพุต V_1 และ V_2 ถ้าแรงดันอินพุต V_1 และ V_2 มีค่าเท่ากันจะได้แรงดันเอาต์พุต V_o เท่ากับศูนย์และจะเรียกสัญญาณแรงดันอินพุต V_1 และ V_2 นี้ว่าสัญญาณรวม(Common Mode Voltage) ความต้านทาน R_1 และ R_2 แต่ละคู่ในวงจรจะมีค่าสมนัยกันมากเพื่อที่จะช่วยให้อัตราขยายของวงจรต่อสัญญาณรวมเท่ากับศูนย์ จากวงจรในภาพที่ 2.44 ความต้านทานอินพุตของวงจรมีค่าไม่สูงซึ่งเป็นผลให้สัญญาณที่ส่งมาจากตัวตรวจวัด (Sensor) จะผิดพลาดได้เนื่องจากตัวตรวจวัดจะมีความต้านทานเอาต์พุตที่สูง ในภาพที่ 2.45 จะเป็นวงจรขยายความแตกต่างที่เพิ่มวงจรตามศักดาหรือตามวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) เข้ามาบางส่วนหน้า ซึ่งวงจรนี้เรียกว่าเป็น วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์แบบพื้นฐาน (Basic Instrumentation Amplifier) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_1, V_2 และค่าแรงดันเอาต์พุต V_o จะเหมือนสมการ $v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$ แต่จะมีปัญหาในการปรับอัตราขยายของวงจรจะกระทำได้โดยการแปรค่าความต้านทาน R_2 ทั้ง 2 ตัวในวงจร ซึ่งการแปรค่าความต้านทาน R_2 ก็อาจจะมีผลให้อัตราการขยายรวมของวงจรมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากความไม่สมนัยกันของค่าความต้านทาน จึงได้มีการปรับปรุงวงจรขึ้นใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 2.46 การแปรค่าอัตราขยายของวงจรจะแปรค่าตามความต้านทาน R_2 เพียงค่าเดียวโดยที่อัตราขยายของวงจรมีค่า $v_o = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)(v_2 - v_1)$



ภาพที่ 2.46 วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการทำงานของระบบ

3.1 หลักการทำงานของเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้

การให้อาหารสุนัขนี้สามารถที่จะเลือกตั้งเวลาให้อาหารสุนัขได้มากถึง 3 ครั้งต่อวัน ซึ่งจะสามารถเลือกปริมาณอาหารที่จะให้อาหารสุนัขตามที่โปรแกรมที่ตั้งไว้แล้วแต่ขนาดของสุนัข หรือ จะทำการเลือกที่จะให้ปริมาณอาหารสุนัขตามความต้องการของเจ้าของสุนัขเองก็ได้

ซึ่งขั้นตอนแรกเครื่องจะทำการอ่านค่าเวลาจากไอซีฐานเวลาก่อน เพื่อนำเอาค่าเวลาที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าเวลาที่ติดตั้งไว้หากเวลาตรงกันก็จะทำการสั่งให้มอเตอร์ทำการเปิดเพื่อให้อาหาร โดยเปิดให้อาหารตกลงมาที่ถังพักถังที่ 2 ก่อนเพื่อชั่งน้ำหนักจนได้ค่าที่ต้องการซึ่งใช้การหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักอาหารที่ไหลลงมาเพื่อความแน่นอนและ เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้วจึงปิดถังที่ 1 ปล่อยให้ อาหารในถังที่ 2 ไหลลงถาดอาหารของสุนัขอีกที แล้วจึงปิดถังพักใบที่ 2 รอตรวจสอบเวลาที่จะให้ อาหารต่อไป แต่ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงการให้อาหารเราก็สามารถที่จะตั้งค่าเวลาของการให้อาหารและ ปริมาณอาหารได้ โดยจะมีขั้นตอนการตั้งค่าต่าง 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการตั้งเวลาให้อาหารสุนัข

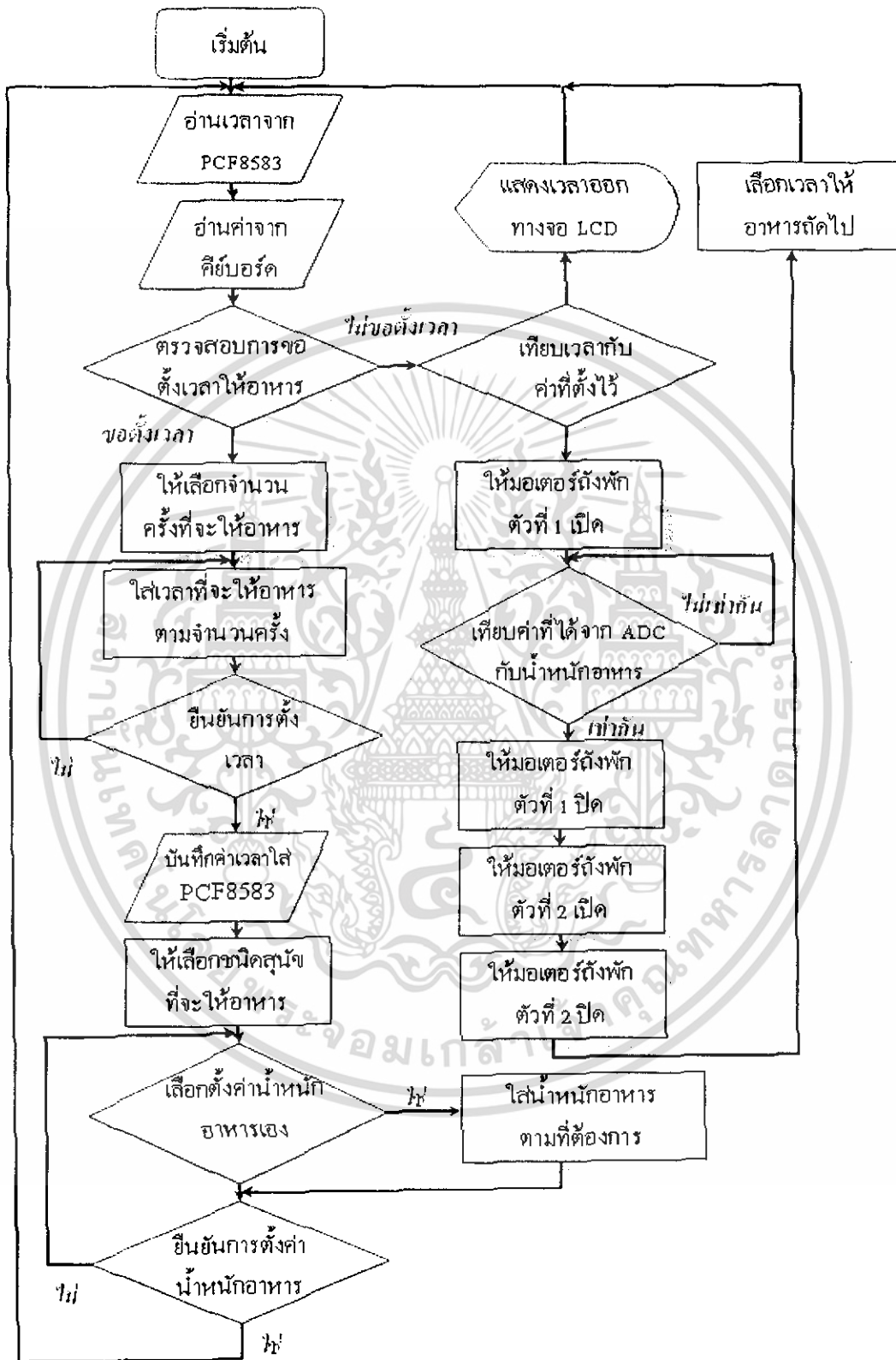
1.1 ในขั้นตอนแรกผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกจำนวนครั้งที่จะให้อาหารสุนัขในหนึ่งวันก่อน ซึ่งจะสามารถเลือก ให้อาหารได้มากที่สุด 3 ครั้งต่อวัน

1.2 เมื่อใส่จำนวนครั้งแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการใส่เวลาที่จะให้เครื่องให้อาหารสุนัข ทำงาน แล้วกด ปุ่ม # เพื่อยืนยันการตั้งเวลาแต่ละครั้งและเมื่อตั้งเวลาจนครบตามจำนวนครั้ง เครื่อง ก็จะเข้าสู่เมนูการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัขเป็นขั้นตอนต่อไป

2. ขั้นตอนการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัข

2.1 เมื่อเข้าสู่เมนูการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัขครบ เครื่องจะแสดงรายละเอียดให้ทราบถึงปริมาณของอาหารที่จะให้แก่สุนัข เพื่อให้ผู้ใช้เลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัข ตั้งแต่ 300 - 960 กรัม เมื่อกดปุ่มเลือกชนิดของสุนัขแล้ว เครื่องจะให้ ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารอีกครั้ง เมื่อทำการเลือกปริมาณอาหาร ตามแบบต่างๆ ค่าของน้ำหนักอาหารก็จะถูกเลือกทันทีโดยอัตโนมัติ หลังจากเลือกปริมาณอาหารที่กำหนดแล้ว เครื่องก็จะทำการให้อาหารสุนัขตามเวลาและจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ แล้วเครื่องก็จะทำการตรวจสอบค่าเวลาไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงเวลาที่ตั้งให้อาหารครั้งต่อไปจึงจะกลับมาทำงานเริ่มการให้อาหารสุนัขใหม่

3.2 Block Diagram ของระบบ



ภาพที่ 3.1 Flowchart แสดงการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องให้อาหารสุนัข

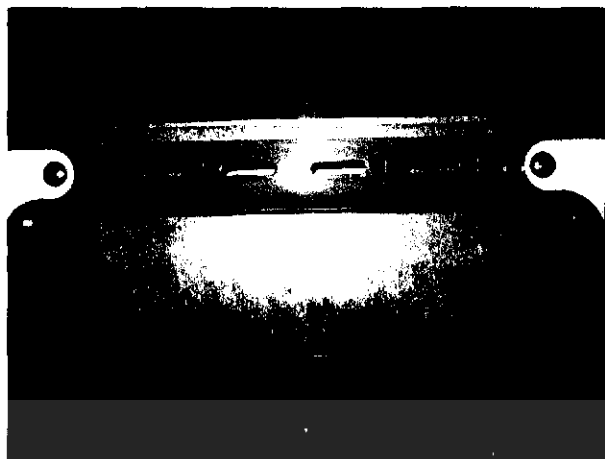


ภาพที่ 3.2 โครงสร้างภายนอกของเครื่องให้อาหารสุนัข



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างภายในของเครื่องให้อาหารสุนัข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 แสดงลักษณะการติดตั้งส่วนสำรองอาหาร

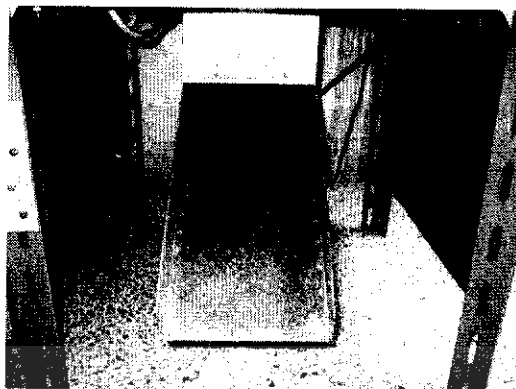


ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะการติดตั้งแผงวงจร



ภาพที่ 3.6 แสดงลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจและส่วนขั้วน้ำหนัก

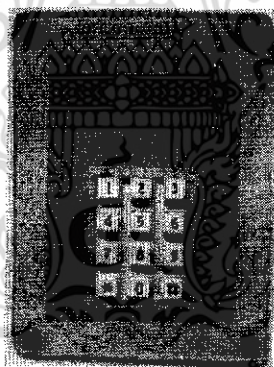
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



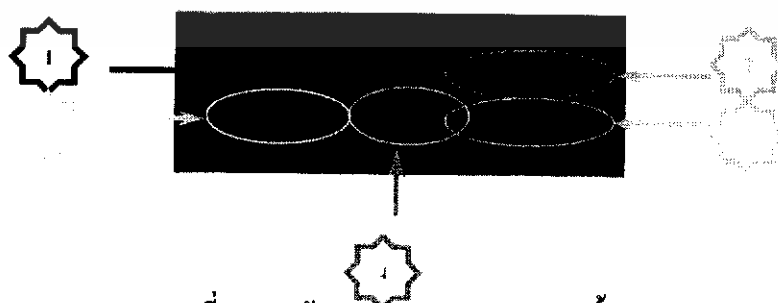
ภาพที่ 3.7 แสดงลักษณะการติดตั้งช่องทางเดินของอาหาร

3.4 คู่มือการใช้เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบโปรแกรมได้

การให้อาหารสุนัขสามารถที่จะเลือกตั้งเวลาให้อาหารสุนัขได้มากถึง 3 ครั้งต่อวัน ซึ่งจะ
สามารถเลือกปริมาณอาหารที่จะให้อาหารสุนัขตามที่โปรแกรมตั้งไว้แล้วแต่ขนาดของสุนัข หรือจะ
ทำการเลือกที่จะให้ปริมาณอาหารสุนัขตามความต้องการของเจ้าของสุนัขเองก็ได้ ซึ่งขั้นตอนแรก
ผู้ใช้ต้องทราบรายละเอียดที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลก่อน ดังภาพ



ภาพที่ 3.8 หน้าจอแสดงผลและเป็นพิมพ์



ภาพที่ 3.9 หน้าจอแสดงผลก่อนทำการตั้งค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 1 แสดง วันที่ / เดือน / ปี ให้ผู้ใช้ทราบ

หมายเลข 2 แสดงเวลา ชั่วโมง . นาที โดยจะแสดงเป็นรอบ 24 ชั่วโมง

หมายเลข 3 แสดงชนิดของสุนัข

หมายเลข 4 แสดงจำนวนครั้งที่ตั้งเวลาในหนึ่งวัน โดยตัวแรกจะแสดงครั้งถัดไปที่เครื่องถูกตั้งไว้ให้อาหาร – ตามด้วยจำนวนครั้งที่หมดที่ตั้งในหนึ่งวัน

หมายเลข 5 แสดงเวลาครั้งถัดไปที่จะให้อาหาร

โดยการตั้งค่าต่างจะมี 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการตั้งเวลาให้อาหารสุนัข

โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1.1 ในขั้นตอนแรกผู้ใช้จะต้องทำการเลือกจำนวนครั้งที่จะให้อาหารสุนัขในหนึ่งวันก่อน ซึ่งจะสามารถเลือก ให้อาหาร ได้มากที่สุด 3 ครั้งต่อวัน โดยการกด ปุ่ม * เพื่อเข้าเมนูเลือกจำนวนครั้งที่ จะให้อาหารสุนัข ซึ่งจะปรากฏรายการดังภาพที่ 3.10 ให้เลือกกดหมายเลข 1 – 3 ตามจำนวนครั้งที่ ต้องการ



ภาพที่ 3.10 แสดงเมนูการเลือกจำนวนครั้งที่ให้อาหารสุนัขต่อวัน

1.2 เมื่อใส่จำนวนครั้งแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการใส่เวลาที่จะให้เครื่องให้อาหารสุนัข ทำงาน แล้วกด ปุ่ม # เพื่อยืนยันการตั้งเวลาแต่ละครั้ง โดยที่จะใส่ตามจำนวนครั้งที่ได้เลือกไว้ก่อนหน้านี้ ดังภาพที่ (3.11-3.13)

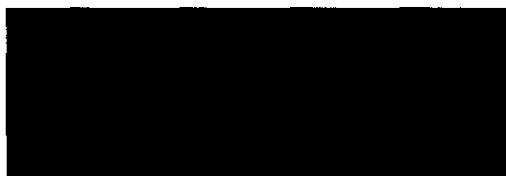


ภาพที่ 3.11 แสดงเมนูก่อนการตั้งค่าเวลา



ภาพที่ 3.12 แสดงค่าที่ทำการตั้งเวลาให้อาหารสุนัข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 แสดงการยืนยันการตั้งเวลา

เมื่อตั้งเวลาจนครบตามจำนวนครั้ง เครื่องก็จะเข้าสู่เมนูการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัขซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป

2. ขั้นตอนการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัข

2.1 เมื่อเข้าสู่เมนูการเลือกปริมาณอาหารที่จะให้แก่สุนัขเสร็จ เครื่องก็จะแสดงรายละเอียดให้ทราบถึงปริมาณของอาหารที่จะให้แก่สุนัข เพื่อให้เลือกด้วยการกดปุ่ม 1-4 จากแป้นพิมพ์



ภาพที่ 3.14 แสดงรายการเพื่อเลือกปริมาณอาหารสุนัข



ภาพที่ 3.15 แสดงรายละเอียดของการกดแป้นต่างๆ

จากภาพที่ (3.15) ได้แสดงรายละเอียดของการกดแป้นต่างๆ ดังนี้

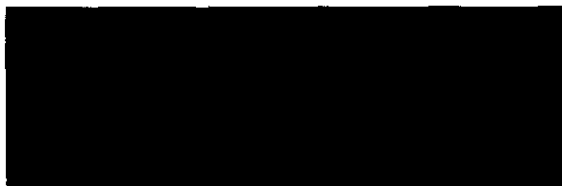
- กด 1. เพื่อเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดเล็ก 300 กรัม
- กด 2. เพื่อเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดกลาง 600 กรัม
- กด 3. เพื่อเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดใหญ่ 960 กรัม
- กด 4. เพื่อให้ผู้ใช้เลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขเอง ตั้งแต่ 300 - 960 กรัม



ภาพที่ 3.16 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกดปุ่มเลือกชนิดของสุนัขแล้วเครื่องให้กดปุ่ม # ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารอีกครั้ง โดยเครื่องจะแสดงผลการเลือกปริมาณอาหารให้ทราบอีกครั้งด้วย ดังภาพที่ (3.17-3.20)



ภาพที่ 3.17 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดเล็ก 300 กรัม



ภาพที่ 3.18 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดกลาง 600 กรัม



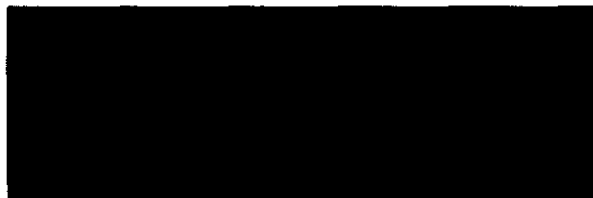
ภาพที่ 3.19 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขขนาดใหญ่ 960 กรัม



ภาพที่ 3.20 ยืนยันสำหรับเพื่อให้ผู้ใช้เลือกปริมาณอาหารสุนัขสำหรับสุนัขเอง ตั้งแต่ 300 - 960 กรัม

เมื่อทำการเลือกปริมาณอาหาร ตามแบบต่างๆ ค่าของน้ำหนักอาหารก็จะถูกเลือกทันทีโดยอัตโนมัติ แต่การเลือกแบบที่ 4 (การเลือกปริมาณอาหารเอง) นั้น จะต้องทำการเลือกค่าของปริมาณอาหารอีกครั้ง หลังจากกดปุ่ม # ยืนยันการเลือกอาหารแล้ว ดังภาพที่ (4.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.21 ทำการเลือกปริมาณอาหารตามต้องการของผู้ใช้ให้แก่สุนัข

การเลือกปริมาณอาหารทำได้โดยทำการกดปุ่มหมายเลข 3 และ หมายเลข 9 โดยการกดปุ่มหมายเลข 3 จะเป็นการลดค่าที่ละ 20 กรัม และการกดปุ่มหมายเลข 9 เป็นการเพิ่มค่าที่ละ 20 กรัมเช่นกัน ซึ่งเมื่อได้ค่าที่ต้องการให้กดปุ่ม # เพื่อยืนยันปริมาณอาหารที่ต้องการ



ภาพที่ 3.22 ยืนยันการเลือกปริมาณอาหารสุนัขตามที่ผู้ใช้ได้กำหนด

โดยยกตัวอย่างการเลือกปริมาณอาหารสุนัขที่ 400 กรัม หลังจากเลือกปริมาณอาหารที่ได้ลองกำหนดเครื่องก็จะทำการให้อาหารสุนัขตามเวลาและจำนวนครั้งที่กำหนดไว้

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบระบบ

4.1 การทดสอบหาค่าอัตราขยายที่ให้เอาต์พุตของ Op -Amp. มีค่าที่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด

ผลการทดสอบซึ่งนำหนักจากโพลดเชลล์ เพื่อดูค่าความเป็นเชิงเส้นของแต่ละอัตราขยาย ในช่วงการใช้งาน ตั้งแต่ 100 -1000 กรัม เพื่อนำมาเลือกใช้งาน แต่การทดสอบได้ทำการทดสอบ ในค่าหลายๆ ค่า เพื่อการหาช่วงของอัตราการเปลี่ยนแปลงในค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้งาน เพื่อให้ค่าที่ได้ที่ได้ออกมามีค่าที่ใกล้เคียงที่สุด นำมาใช้ในการทดสอบในขณะที่ทำการทดสอบก็ได้ ทำการทดสอบแบบการควบคุมน้ำหนักตามตารางข้างล่างที่กำหนดไว้และวัดค่าของแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากอินสตรูเมนต์ปริโอฟีเออร์เพื่อดูช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด แล้วนำช่วงที่ได้เป็นเชิงเส้นมากที่สุดมาใช้งานในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบซึ่งนำหนักที่อัตราขยาย 500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.101	17.0
100	0.106	18.5
200	0.110	20.5
300	0.114	22.0
400	0.120	22.0
500	0.125	24.0
600	0.129	24.0
700	0.133	25.0
800	0.138	26.0
900	0.143	26.0
1000	0.148	28.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

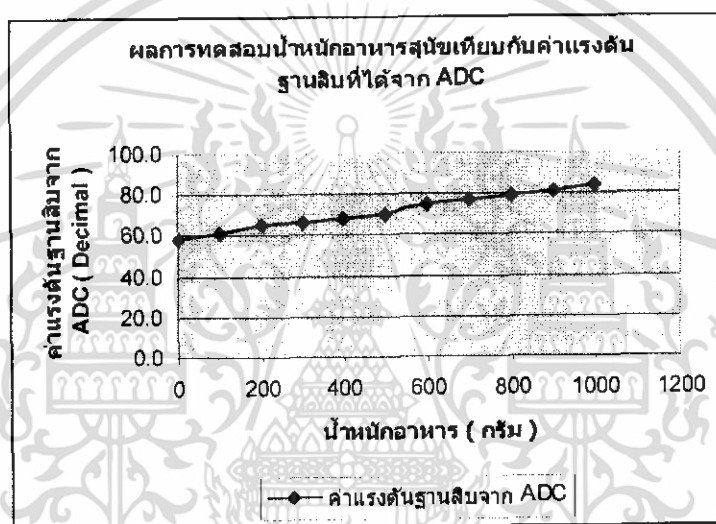
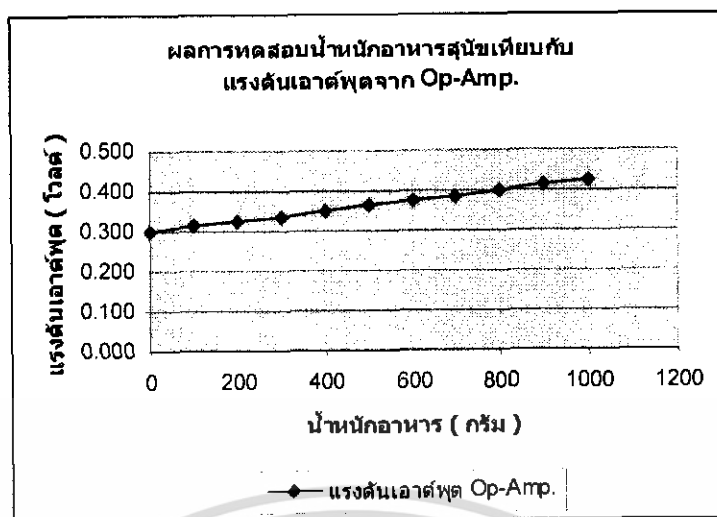
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 1000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.201	39.5
100	0.210	41.0
200	0.218	42.5
300	0.228	45.0
400	0.236	46.0
500	0.245	48.0
600	0.254	49.0
700	0.263	51.0
800	0.270	54.0
900	0.278	55.0
1000	0.288	57.0

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 1500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.300	58.0
100	0.314	61.0
200	0.326	65.0
300	0.336	66.5
400	0.352	68.0
500	0.365	70.5
600	0.377	75.0
700	0.387	77.0
800	0.401	79.0
900	0.413	81.0
1000	0.427	84.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 กราฟผลการทดสอบชั่งน้ำหนักจากโวลต์เมตรด้วยอัตราขยาย 1500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 2000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.402	79.5
100	0.420	82.5
200	0.436	87.0
300	0.449	90.0
400	0.470	93.5
500	0.488	97.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
600	0.504	99.0
700	0.517	103.5
800	0.535	106.0
900	0.551	111.0
1000	0.569	113.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 2500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

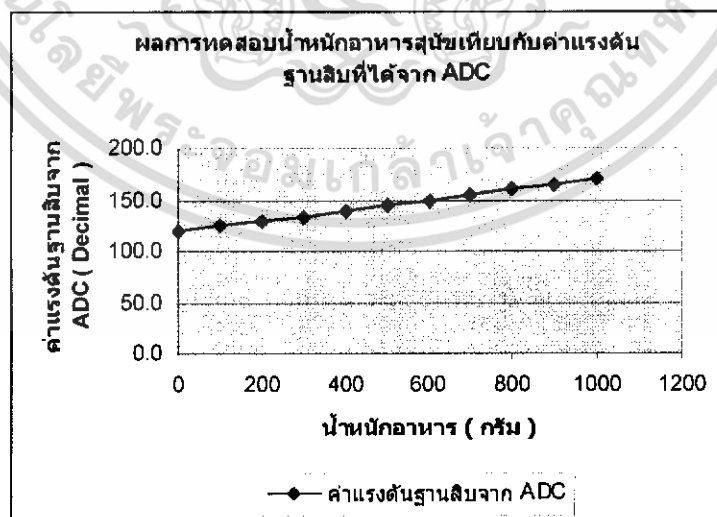
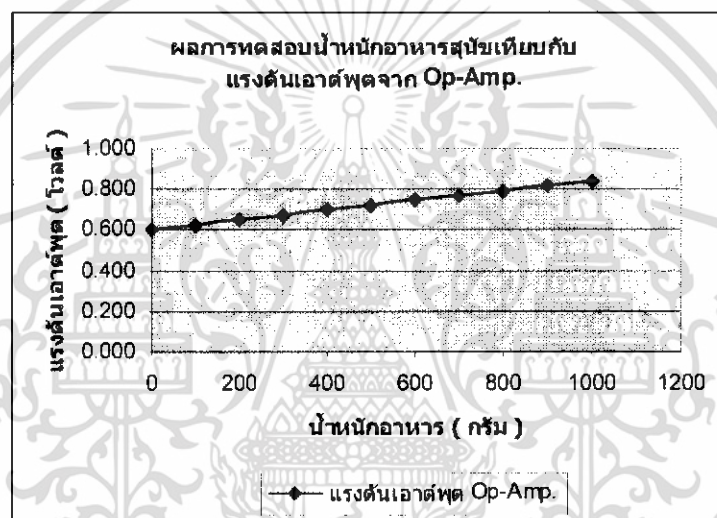
น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.501	99.0
100	0.523	104.5
200	0.543	106.5
300	0.559	111.5
400	0.584	117.0
500	0.606	120.5
600	0.626	124.0
700	0.642	128.0
800	0.664	133.0
900	0.684	138.5
1000	0.706	140.5

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 3000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.601	119.5
100	0.627	126.0
200	0.651	129.5
300	0.670	134.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
400	0.700	139.0
500	0.726	145.0
600	0.749	149.5
700	0.769	154.0
800	0.795	160.5
900	0.819	165.0
1000	0.846	170.0



ภาพที่ 4.2 กราฟผลการทดสอบซึ่งน้ำหนักจากโวลต์เซลล์ด้วยอัตราขยาย 3000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 3500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.702	140.5
100	0.733	148.0
200	0.760	150.5
300	0.782	157.0
400	0.817	163.5
500	0.848	169.5
600	0.875	176.0
700	0.898	180.0
800	0.928	187.0
900	0.956	193.0
1000	0.987	198.0

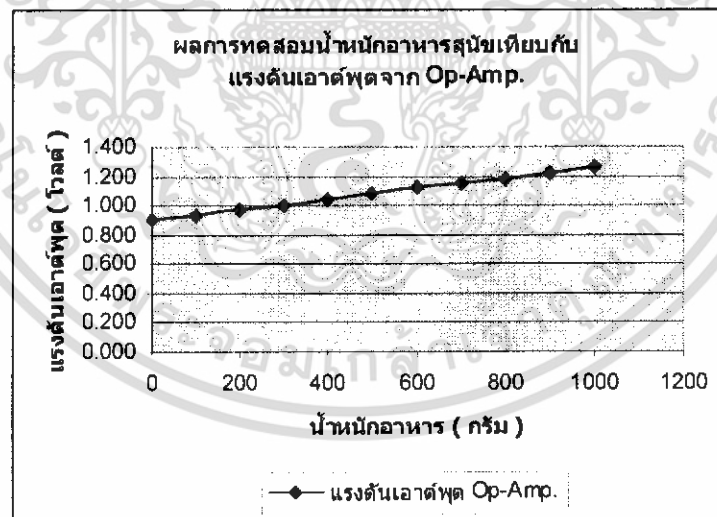
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 4000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.802	160.5
100	0.837	167.0
200	0.868	175.5
300	0.894	179.5
400	0.934	188.0
500	0.969	195.0
600	1.001	200.5
700	1.026	204.0
800	1.061	213.0
900	1.092	219.5
1000	1.130	227.5

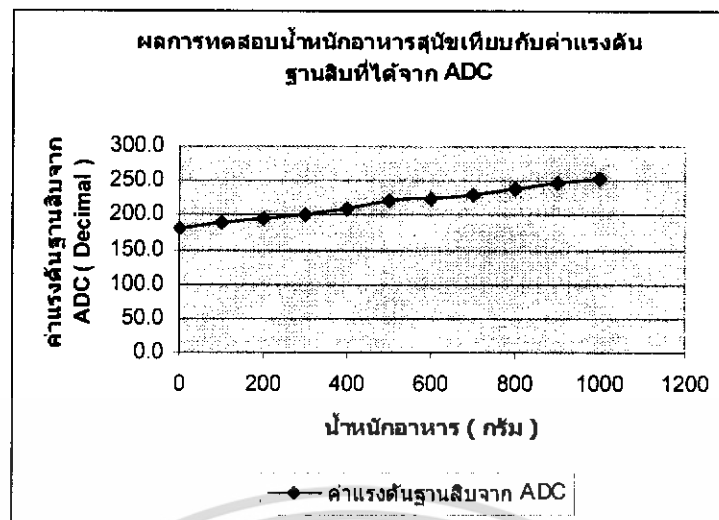
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 4500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	0.901	179.5
100	0.940	190.0
200	0.975	196.5
300	1.004	200.5
400	1.048	211.0
500	1.085	220.5
600	1.121	225.5
700	1.149	230.5
800	1.187	238.0
900	1.223	247.5
1000	1.262	254.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 กราฟผลการทดสอบชั่งน้ำหนักจากโพลด์เซลล์ด้วยอัตราขยาย 4500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

ตาราง 4.10 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 5000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	1.003	201.0
100	1.046	211.0
200	1.085	218.5
300	1.116	225.0
400	1.165	234.0
500	1.209	241.5
600	1.248	250.5
700	1.279	257.0
800	1.322	267.0
900	1.362	275.0
1000	1.406	284.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 7500 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	1.502	303.5
100	1.568	316.0
200	1.626	329.5
300	1.671	337.5
400	1.745	351.0
500	1.808	365.5
600	1.868	377.5
700	1.915	388.0
800	1.979	399.5
900	2.038	414.0
1000	2.102	425.5

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบชั่งน้ำหนักที่อัตราขยาย 10000 ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

น้ำหนัก (กรัม)	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)
0	2.003	404.0
100	2.088	422.0
200	2.165	440.0
300	2.230	451.0
400	2.327	471.0
500	2.413	490.0
600	2.490	503.5
700	2.551	516.5
800	2.636	531.5
900	2.716	549.0
1000	2.800	568.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายที่ทำให้เอาต์พุตที่ออกจาก Op-Amp. จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ออกมา เมื่อนำมาเขียนกราฟดูความเป็นเชิงเส้นจะมีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้สามารถเลือกใช้ค่าอัตราขยายที่ค่าใดก็ได้ จึงทำการเลือกใช้ค่าอัตราขยายที่มีผลทำให้ค่าเลขฐานสิบที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลมีค่าที่อ่านและตรวจสอบได้ง่ายที่สุด โดยการเลือกค่าที่อัตราขยาย 3000 เท่า ซึ่งค่าแรงดันที่ออกจากเอาต์พุตของ Op-Amp. เริ่มที่ 0.601 – 0.846 โวลต์ และค่าเลขฐานสิบที่อ่านได้จาก ADC มีค่าตั้งแต่ 119.5 - 170 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่เพิ่มจะมีอัตราส่วนการขยายที่ค่อนข้างแน่นอน เมื่อมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นทุกๆ 100 กรัม จะทำให้ค่าที่อ่านได้เลขฐานสิบจาก ADC เพิ่มขึ้น 5 ระดับและการเพิ่มค่าที่ได้เมื่อดูจากกราฟยังมีความเป็นเชิงเส้นอีกด้วย จึงได้นำค่าอัตราขยายนี้มาใช้เป็นอัตราขยายสำหรับการทดสอบเพื่อปรับแต่งการทำงานของเครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติต่อไป

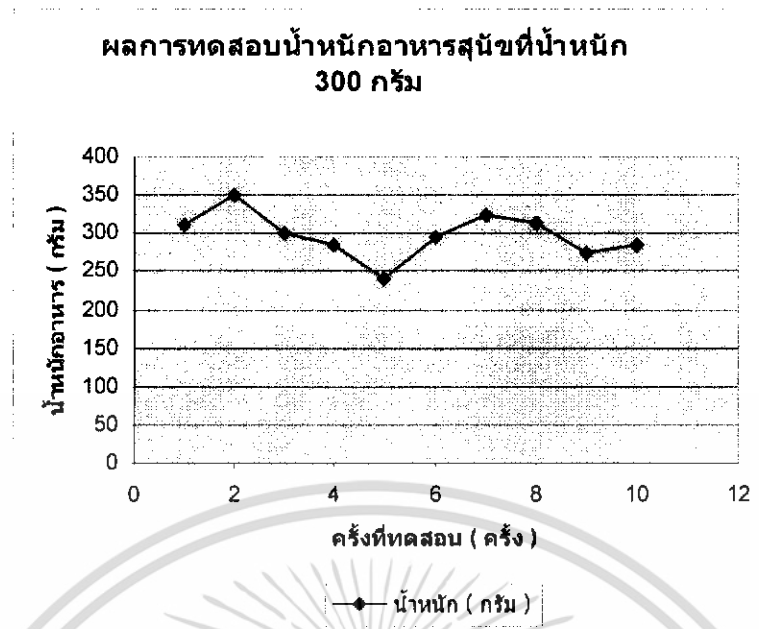
4.2 การทดสอบเพื่อดูผลการชั่งน้ำหนักเมื่อใช้อัตราขยาย 3000 เท่า ที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

ซึ่งการทดสอบจะใช้ค่าอัตราขยายที่ 3000 เท่า เพื่อให้ค่าเอาต์พุตที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด แล้วทำการทดสอบด้วยการที่ให้โปรแกรมการทำงานของเครื่องให้อาหารสุนัขทำงานเองโดยอัตโนมัติ แล้วทำการบันทึกผลการทดสอบเพื่อดูการทำงานของเครื่องให้อาหารว่าสามารถชั่งและให้อาหารสุนัขได้ตรงตามต้องการหรือไม่ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.13 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.672	135.5	310
2	0.682	137.5	350
3	0.670	135.0	300
4	0.666	134.0	285
5	0.656	132.0	240
6	0.669	134.5	295
7	0.676	136.0	325
8	0.673	136.0	315
9	0.664	133.5	275
10	0.666	134.0	285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



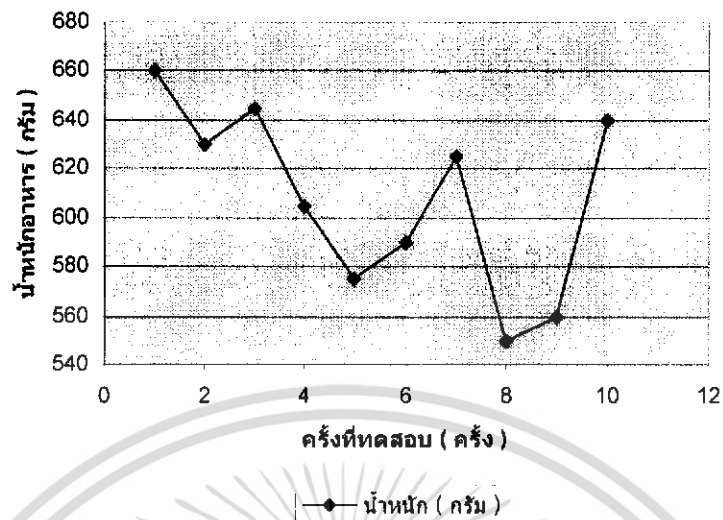
ภาพที่ 4.4 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

ตารางที่ 4.14 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.765	153.0	660
2	0.757	151.5	630
3	0.761	152.0	645
4	0.751	150.0	605
5	0.743	148.5	575
6	0.748	149.5	590
7	0.756	151.0	625
8	0.737	147.5	550
9	0.740	148.0	560
10	0.760	152.0	640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก 600 กรัม

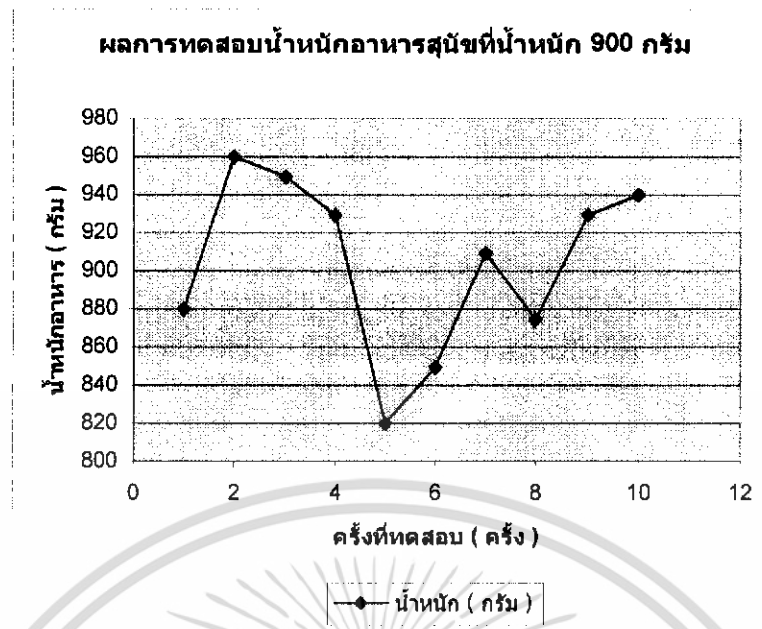


ภาพที่ 4.5 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม

ตารางที่ 4.15 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.815	164.0	880
2	0.834	168.0	960
3	0.832	167.5	950
4	0.827	166.5	930
5	0.800	161.0	820
6	0.807	162.5	850
7	0.822	165.5	910
8	0.814	163.5	875
9	0.827	166.5	930
10	0.830	167.0	940

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

4.3 ผลการทดสอบเมื่อทำการแก้ไขความเร็วรอบของมอเตอร์ในการเปิดปิดถังพัก

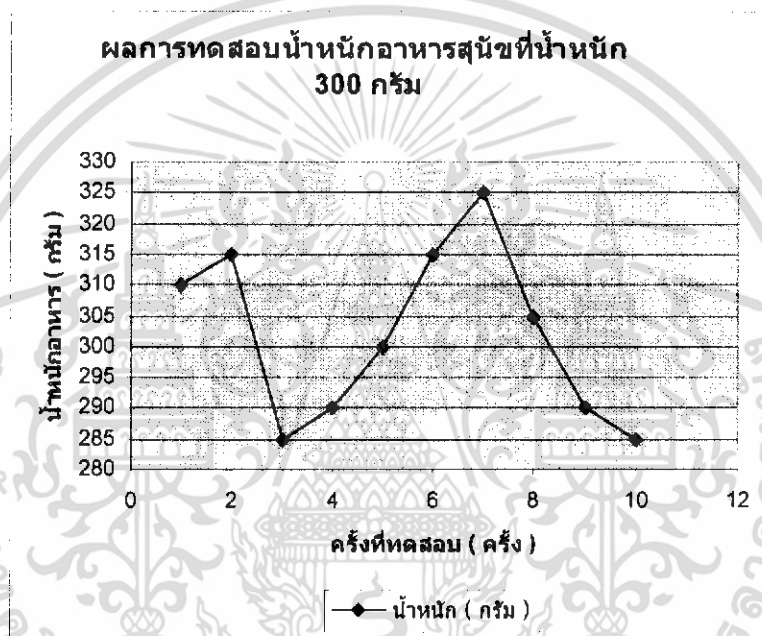
จากผลการทดสอบค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักอาหารสุนัข จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาค่าน้ำหนักมาเขียนกราฟจะเกิดค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 31.5 กรัม และมีค่าผิดพลาดสูงสุดถึง 90 กรัม ทำให้การชั่งน้ำหนักค่าที่ได้ออกมาไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงได้ทำการแก้ไขโดยการลดความเร็วของการเปิดถังพักอาหารให้อาหารตกลงมาอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้อาหารตกลงมากระแทกถึงดวงวัด น้ำหนักจนทำให้เกิดการแกว่งของตัวโวลต์เซลล์จนอ่านค่าผิดพลาดไปจากที่ได้ตั้งไว้ แล้วเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ในการปิดถังพักอาหาร เพื่อให้สามารถปิดถังพักอาหารได้ทัน ไม่ทำให้เม็ดอาหารตกลงมาเกินหลังจากที่วัดได้ตามค่าที่ต้องการแล้ว โดยเพิ่มจากเดิมที่ใช้ 5 รอบ/นาที เป็น 50 รอบ/นาที จะได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.16 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.683	134.5	310
2	0.700	138.5	315
3	0.638	128.0	285
4	0.651	130.0	290

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
5	0.669	134.5	300
6	0.690	140.0	315
7	0.715	135.0	325
8	0.672	134.5	305
9	0.650	131.0	290
10	0.644	130.5	285



ภาพที่ 4.7 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

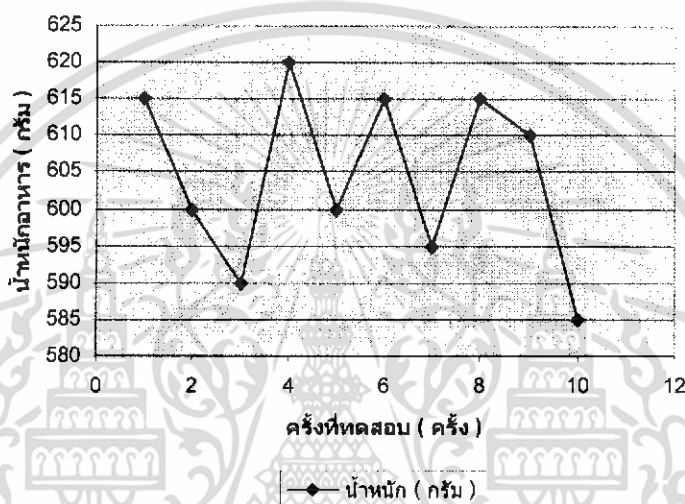
ตารางที่ 4.17 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.762	153.5	615
2	0.749	150.5	600
3	0.740	146.0	590
4	0.770	154.5	620
5	0.753	150.5	600
6	0.761	154.0	615

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
7	0.742	147.0	595
8	0.759	155.0	615
9	0.756	153.0	610
10	0.730	148.0	585

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก 600 กรัม

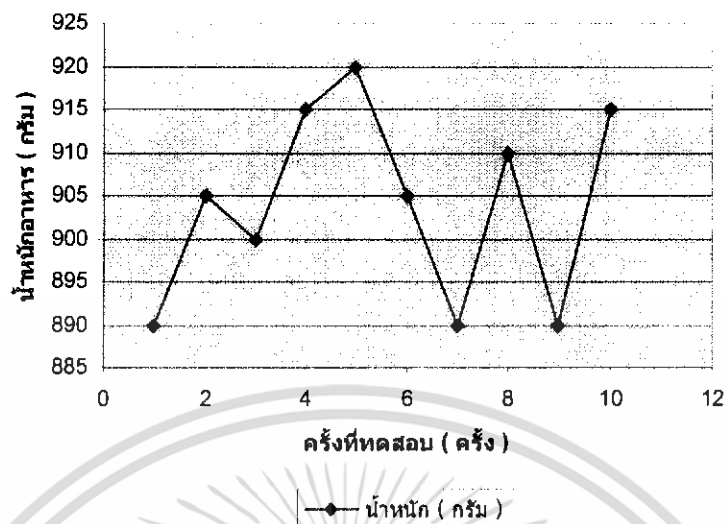


ภาพที่ 4.8 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม
ตารางที่ 4.18 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.810	162.0	890
2	0.823	165.0	905
3	0.820	165.0	900
4	0.829	168.0	915
5	0.831	168.5	920
6	0.825	167.0	905
7	0.811	161.0	890
8	0.823	166.5	910
9	0.812	163.0	890
10	0.832	167.5	915

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก 900 กรัม



ภาพที่ 4.9 กราฟที่ได้จากรายการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

4.4 ผลการทดสอบการแก้ไขด้วยการหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ได้จากโพลดเซลล์

จากการแก้ไขปรับปรุงด้วยการปรับเปลี่ยนค่าของความเร็วในการเปิดปิดถังพัก เพื่อไม่ให้ อาหารไหลลงมากระแทกตัวของโพลดเซลล์ จนทำให้การอ่านค่าความผิดพลาดและไม่สามารถหา ความแน่นอนในการอ่านน้ำหนักได้ ค่าที่ได้จากการปรับเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์ในหลายๆ ระดับ ความเร็ว ผลที่ได้ทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงเหลือแค่ ± 15 กรัม แต่ค่าที่ได้มีค่าที่ตรงกับเป้าหมาย น้อยมาก จึงทำการแก้ไขการแกว่งของโพลดเซลล์ที่เกิดจากการที่มีอาหารตกกระแทกจนทำให้ โพลดเซลล์แกว่งและอ่านค่าได้ไม่คงที่โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักที่ได้ออกมาจากโพลดเซลล์ เนื่องจากค่าเฉลี่ยที่ได้จากโพลดเซลล์ค่อนข้างจะมีค่าที่คงที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าไปตามการแกว่ง ของโพลดเซลล์ จึงทำให้การเปรียบเทียบค่ากับค่าเป้าหมายมีความแน่นอนและแม่นยำขึ้น ดังตาราง ผลการทดสอบต่อไปนี้

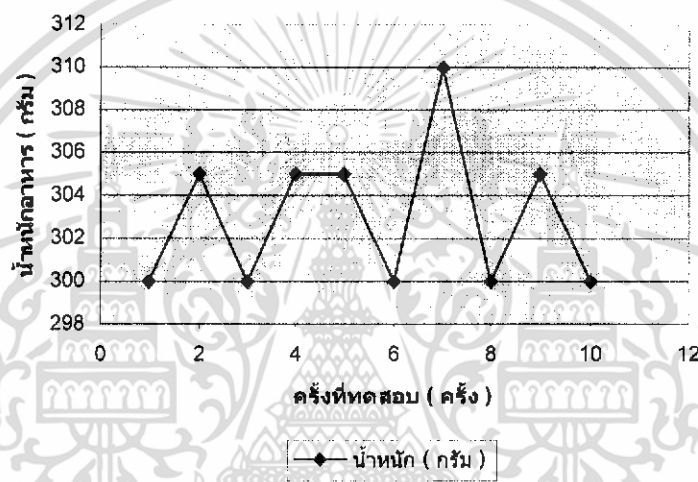
ตารางที่ 4.19 ตารางการทดสอบ โดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.670	135.0	300
2	0.671	135.0	305
3	0.670	135.0	300
4	0.671	135.0	305
5	0.671	135.0	305

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
6	0.670	135.0	300
7	0.672	135.5	310
8	0.670	135.0	300
9	0.671	135.0	305
10	0.670	135.0	300

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก
300 กรัม



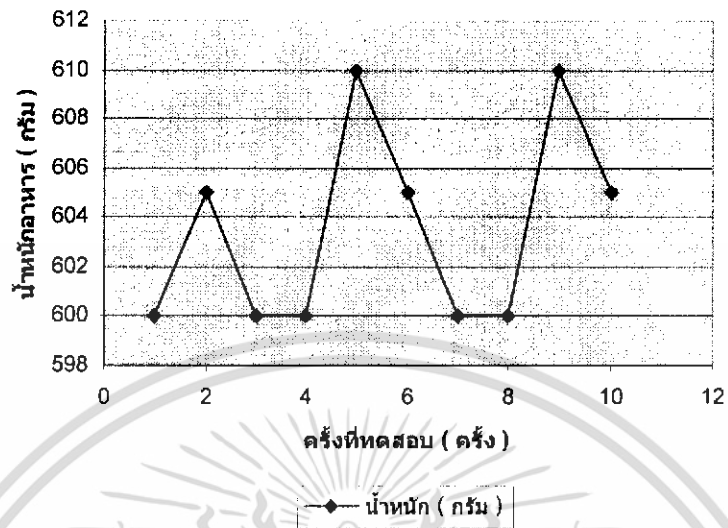
ภาพที่ 4.10 กราฟที่ได้จากการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 300 กรัม

ตารางที่ 4.20 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.749	150.0	600
2	0.750	150.0	605
3	0.749	150.0	600
4	0.749	150.0	600
5	0.751	150.5	610
6	0.750	150.0	605
7	0.749	150.0	600
8	0.749	150.0	600
9	0.751	150.5	610
10	0.750	150.0	605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก 600 กรัม



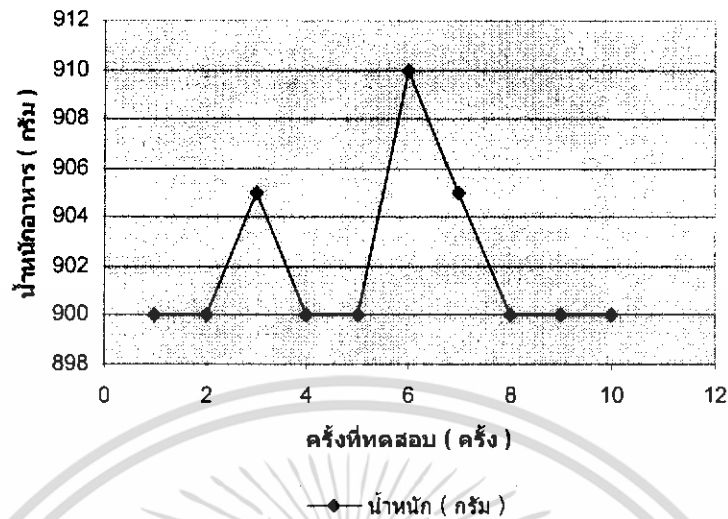
ภาพที่ 4.11 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 600 กรัม

ตารางที่ 4.21 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.820	165.0	900
2	0.820	165.0	900
3	0.821	165.0	905
4	0.820	165.0	900
5	0.820	165.0	900
6	0.822	165.5	910
7	0.821	165.0	905
8	0.820	165.0	900
9	0.820	165.0	900
10	0.820	165.0	900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบน้ำหนักอาหารสุนัขที่น้ำหนัก 900 กรัม



ภาพที่ 4.12 กราฟที่ได้จากตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 900 กรัม

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยมากไม่เกิน 10 กรัม และค่าที่ได้มีค่าที่ตรงตามเป้าหมายจำนวนหลายครั้ง ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้เป็นค่าที่ยอมรับได้ จึงได้ทำการทดสอบที่น้ำหนักค่าอื่นๆ เพื่อดูค่าน้ำหนักว่ามีค่าที่เที่ยงตรงหรือไม่เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่งน้ำหนัก ดังตารางบันทึกผล

ตารางที่ 4.22 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 400 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.700	140.0	400
2	0.700	140.0	400
3	0.701	140.0	405
4	0.702	140.5	410
5	0.700	140.0	400
6	0.700	140.0	400
7	0.701	140.0	405
8	0.700	140.0	400
9	0.700	140.0	400
10	0.700	140.0	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 500 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.727	145.0	505
2	0.726	145.0	500
3	0.726	145.0	500
4	0.726	145.0	500
5	0.728	145.5	510
6	0.727	145.0	505
7	0.726	145.0	500
8	0.726	145.0	500
9	0.726	145.0	500
10	0.726	145.0	500

ตารางที่ 4.24 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 700 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.769	155.0	700
2	0.771	155.5	710
3	0.769	155.0	700
4	0.769	155.0	700
5	0.770	155.0	705
6	0.769	155.0	700
7	0.771	155.5	710
8	0.770	155.0	705
9	0.769	155.0	700
10	0.769	155.0	700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 800 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.795	160.0	800
2	0.796	160.0	805
3	0.795	160.0	800
4	0.795	160.0	800
5	0.795	160.0	800
6	0.797	160.5	810
7	0.797	160.5	810
8	0.796	160.0	805
9	0.795	160.0	800
10	0.795	160.0	800

ตารางที่ 4.26 ตารางการทดสอบโดยอ้างอิงการวัดที่ค่าน้ำหนัก 960 กรัม

ครั้งที่	เอาต์พุต Op-Amp. (โวลต์)	ADC (Decimal)	น้ำหนัก (กรัม)
1	0.838	168.0	960
2	0.838	168.0	960
3	0.838	168.0	960
4	0.838	168.0	960
5	0.839	168.0	965
6	0.840	168.5	970
7	0.838	168.0	960
8	0.838	168.0	960
9	0.838	168.0	960
10	0.839	168.0	965

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

สรุปผลการทดสอบ ในการทดสอบผลการทำงานของเครื่องให้อาหารสุนัขแบบอัตโนมัติ สามารถโปรแกรมได้นี้ จะได้ค่าผลการทดสอบการวัดน้ำหนักจากเครื่องให้อาหารสุนัขโดยทำงานตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ดังแสดงในตารางและกราฟแสดงผล

ตารางที่ 5.1 ตารางปริมาณการให้อาหารสุนัขต่อวัน

ขนาดสุนัข	น้ำหนักสุนัข	การให้อาหารต่อวัน
เล็ก	5 - 10 kg.	300 g.
กลาง	10 - 25 kg.	600 g.
ใหญ่	25 - 50 kg.	960 g.

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

เครื่องให้อาหารสุนัขอัตโนมัติแบบ โปรแกรมได้นี้ มีแนวทางในการและข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไปเช่น

1. เนื่องจากค่าที่ได้จากเครื่องให้อาหารนั้นยังมีค่าที่คลาดเคลื่อน ไปอยู่มาก เนื่องจากขณะที่ชั่งน้ำหนักจนเมื่อได้ค่าน้ำหนักตามต้องการแล้ว มอเตอร์ไม่สามารถที่จะปิดถังพักอาหารให้ในส่วนของเม็ดอาหารหยุดหล่นลงมาทัน ดังนั้นจึงต้องปรับให้ความเร็วของมอเตอร์ทำการเปิดแบบช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดอาหารหล่นลงมาเร็วจนเกินไป ทำให้การชั่งน้ำหนักคลาดเคลื่อนไปจากที่ได้กำหนดไว้และทำการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ในขณะที่ปิดให้มีความไวมากขึ้น เพื่อที่จะปิดถังพักที่ใส่อาหารได้ทัน เมื่อค่าที่อ่านได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลวัดค่าได้ตามน้ำหนักที่กำหนด มอเตอร์ต้องทำการปิดทันทีเพื่อไม่ให้เม็ดอาหารหล่นเกินเพิ่มไปอีก

2. เนื่องจากโหลดเซลล์ที่ใช้มีย่านการใช้งานอยู่ที่ 1-10kg.ซึ่งน้ำหนักที่ต้องการใช้งานจริงๆ อยู่ที่ 300-960 g. จึงทำให้ค่าที่อ่านได้อยู่ในช่วงแค่ 1/10 ของย่านการใช้งานจึงทำให้ความผิดพลาดของการวัดน้ำหนักมีค่ามาก หากต้องการลดค่าความผิดพลาดลงก็ให้ลดย่านการวัดของโหลดเซลล์ให้แคบลงให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าใช้งานมากขึ้น โดยอาจจะใช้ย่านของโหลดเซลล์ที่ 0-1 kg. เพื่อให้ได้ใช้งาน ได้เต็มย่านการวัด จะทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าเดิมมากขึ้น

3. เนื่องจากค่าที่ได้จากโหลดเซลล์จะมีค่าต่ำมากเป็นมิลลิโวลต์ ต้องทำการขยายขนาดของสัญญาณก่อน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่มากขึ้นเป็นหน่วยโวลต์เพื่อให้สามารถส่งให้ตัวแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาลอกเป็นดิจิทัลสามารถอ่านค่าได้ถูกต้อง โดยทำการขยายด้วยตัวขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แอมป์ไฟเออร์ก่อนด้วยอัตราขยายที่มีค่ามากๆเป็น 1000 เท่า หากอินสตรูเมนต์แอมป์ไฟเออร์ขยายสัญญาณไม่ค่อยมีความเสถียรภาพหรือทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแทรกเข้าไป จะทำให้ค่าที่ได้ออกมาจากอินสตรูเมนต์แอมป์ไฟเออร์มีค่าที่ผิดพลาดไปจากเดิม ดังนั้นควรใช้ตัวขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แอมป์ไฟเออร์ที่มีความเสถียรภาพและอัตราขยายที่คงที่เพื่อให้ค่าแรงดันจากเอาต์พุตมีความแม่นยำ

4. ในส่วนของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลนั้น จะเป็นการแปลงสัญญาณแบบ Approximation หรือการแปลงแบบการประมาณค่า โดยจะได้ค่าดิจิทัลออกมา 10 บิต หากเราเพิ่มบิตของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลให้มีจำนวนบิตมากขึ้น ความละเอียดของค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิทัลจะมีค่ามากขึ้นทำให้สามารถที่จะบอกความละเอียดน้ำหนักที่ต้องการวัดได้ละเอียดยิ่งขึ้นและมีความแม่นยำมากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- เอกสารประกอบการสอน อุปกรณ์ตรวจจับ-ส่งสัญญาณและการปลงสภาวะสัญญาณ
ผศ.วิศรุต ศรีรัตน์นะ
- หลักการของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม ผศ.เกษตร ศรีสันติสัมฤทธิ์ พิมพ์ครั้งที่ 3
พฤษภาคม 2544
- ปฏิบัติการวิศวกรรมการวัดคุม1 ผศ. วิศรุต ศรีรัตน์นะ อ. อัมพวัน ใจกล้า อ. พิทยา ป่านนิล
พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤษภาคม 2546
- คู่มือนักอิเล็กทรอนิกส์ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล
- รู้จักและเข้าใจ Chips Support แบบ I²C BUS เอกชัย ณะการ พิมพ์ครั้งที่ 1 18
พฤศจิกายน 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้