สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล

Remotely Operated Vehicle (ROV)

T055673

โดย

นายนพพงษ์ เมธาประสิทธิ์

นายนรุตม์ วิศิษฏ์วุฒิพงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 55673
วัน,เดือน,ปี 24 พ.ค. 2548
b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล

Remotely Operated Vehicle (ROV)

โดย

นายนพพงษ์ เมธาประสิทธิ์ 43010201

นายนรุตม์ วิศิษฏ์วุฒิพงศ์ 43010207

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ถาวร เบญจนราสุทธิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล

ผู้จัดทำ

1. นายนพพงษ์ เมธาประสิทธิ์
2. นายนรุตม์ วิศิษฏ์วุฒิพงศ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.ถาวร เบญจนราสุทธิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล

นายนพพงษ์ เมธาประสิทธิ์
นายนรุตม์ วิศิษฏ์วุฒิพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.ถาวร เบญจนราสุทธิ์

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเรือดำน้ำขนาดเล็ก หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล จุดประสงค์เพื่อศึกษาทฤษฎีการลอยตัวของวัตถุในน้ำ ตลอดจนการควบคุมการลอยตัวและการจมของวัตถุ แนวความคิดในการควบคุมการลอยตัวและการจมของเรือดำน้ำ อาศัยแรงขับจากมอเตอร์ส่งผลให้แรงที่กระทำกับตัวเรือเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถควบคุมการลอยและการจมของเรือดำน้ำได้ และใช้กล้อง CCD ติดตั้งตรงด้านหน้าของตัวเรือเพื่อเก็บภาพใต้น้ำ เรือดำน้ำที่สร้างขึ้นมาได้ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ทั้งแนวดิ่ง แนวราบ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และความสามารถในการแสดงทัศนวิสัยใต้น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Remotely Operated Vehicle (ROV)

Noppong Methaprasit

Naruth Visitwuttipong

Advisor

Tawom Benjanarasuth

Academic Year 2003

Abstract

This thesis presents the theory, design and construction of the small submarines called the remotely operate vehicle (ROV). The objective is to learn the buoyancy theory and to control the floating and diving of the object. The control for floating and diving of the ROV is based on the forces generated by motors that affect to the moving direction of ROV. Also the CCD camera is used as a view finder of the ROV. All the testing and controlling procedure shows the good performance of the constructed ROV in moving direction, moving speed and viewing under water.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

สารบัญ

สารบัญรูปภาพ

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 3

2.1 หลักการทำงานของเรือดำน้ำ 3

2.2 สสาร 5

2.3 ความดันและความลึก 7

2.4 การลอยตัว 10

2.5 เสถียรภาพของการลอยตัว 13

2.6 หลักการและทฤษฎีของมอเตอร์ดีซี 14

2.7 หลักการทำงานของวงจร H-Bridge Switching 24

2.8 การควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor โดยการ สร้างวงจร H-Bridge Switching จาก Transistor 26

2.9 การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์กับพอร์ตอนุกรม 27

2.10 รูปคลื่น สัญญาณ RS-232 32

2.11 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS – 232 และการเชื่อมต่อ 34

2.12 หน้าที่การทำงานแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS-232 36

2.13 UART 37

2.14 วงจรภายในและรีจีสเตอร์ของพอร์ตอนุกรม RS-232 38

2.15 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของพอร์ต RS-232 46

2.16 แอดเดรสของพอร์ตอนุกรม 46

2.17 การเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมกับระบบบัส I^2C 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การสร้างและออกแบบ	62
3.1 การออกแบบ	62
3.2 ขนาดตัวเรือ	64
3.3 วงจรขับมอเตอร์	65
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุป	69
4.1 ทดลองการลอยตัวในน้ำของตัวเรือ	69
4.2 ทดลองการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์	69
4.3 ทดลองการเคลื่อนที่ใต้ผิวน้ำ	70
4.4 ทดลองวัดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่	71
4.5 ทดลองหาค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM	73
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	77
5.1 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข	77
5.2 แนวทางในการค้นคว้าและพัฒนา	77
ภาคผนวก	
โปรแกรมรับคำสั่งควบคุมเรือดำน้ำ	I
โปรแกรมรับคำสั่ง I²C	V
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการลอยและการจมของเรือ	3
รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของถังอับเฉาขณะที่กำลังจม	4
รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของถังอับเฉาขณะที่กำลังลอย	4
รูปที่ 2.4 ความดันและความลึก	8
รูปที่ 2.5 การลอยตัว	11
รูปที่ 2.6 การลอยตัว และเสถียรภาพ	13
รูปที่ 2.7 มอเตอร์คอมปาวด์แบบคิวมูเลทีฟ	15
รูปที่ 2.8 มอเตอร์คอมปาวด์แบบดิฟเฟอเรนเชียล	16
รูปที่ 2.9 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ	16
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับในวงจรอาเมเจอร์	18
รูปที่ 2.11 โมเมนต์ซึ่งลวดตัวนำอาเมเจอร์กระทำรอบจุดศูนย์กลาง	20
รูปที่ 2.12 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge	24
รูปที่ 2.13 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge เมื่อOn สวิทช์ S1 และ S3	24
รูปที่ 2.14 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge เมื่อOn สวิทช์ S2 และ S4	25
รูปที่ 2.15 การใช้ทรานซิสเตอร์ควบคุมมอเตอร์	26
รูปที่ 2.16 รูปคลื่นของสัญญาณที่ส่ง	32
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างภายในและตำแหน่งขาต่างๆของ Max232	33
รูปที่ 2.18 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบDB-9 & DB-25	34
รูปที่ 2.19 แสดงการต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ	35
รูปที่ 2.20 โครงสร้างวงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อบนระบบบัส I^2C	49
รูปที่ 2.21 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์บนระบบบัส	49
รูปที่ 2.22 การต่อตัวต้านทานเพื่อป้องกันแรงดันกระชากที่อาจปะปนเข้ามาในไฟเลี้ยงของอุปกรณ์ในระบบบัส I^2C	50
รูปที่ 2.23 ไดอะแกรมเวลาแสดงสภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนระบบบัส I^2C	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.24 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C 53

รูปที่ 2.25 รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C แบบ 7 บิต 53

รูปที่ 2.26 รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C แบบ 10 บิต 54

รูปที่ 2.27 วงจรสร้างสายสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อกับระบบบัส I^2C ของพอร์ตอนุกรม 55

รูปที่ 3.1 ด้านข้างของตัวเรือ 62

รูปที่ 3.2 ภาพภายในของการกันน้ำมอเตอร์ 63

รูปที่ 3.3 กล้องวิดีโอ 63

รูปที่ 3.4 วงจร PCF 8591 65

รูปที่ 3.5 วงจร TL 494 (PWM) 66

รูปที่ 3.6 วงจรขับมอเตอร์ 67

รูปที่ 3.7 แผงควบคุมผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ 68

รูปที่ 3.8 การสั่งงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ 68

รูปที่ 4.1 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 0 V. 73

รูปที่ 4.2 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 1.64 V. 73

รูปที่ 4.3 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 2.27 V. 74

รูปที่ 4.4 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 2.95 V. 74

รูปที่ 4.5 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 3.59 V. 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่าง	6
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงถึงหน้าที่ของขาต่าง ๆ	28
ตารางที่ 2.3 แสดงสัญญาณต่างๆที่ส่งในรูปแบบอนุกรม	29
ตารางที่ 2.4 แสดงการเชื่อมต่อของสายสัญญาณ	31
ตารางที่ 2.5 แสดงตำแหน่งขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS-232 แบบ DB9 และ DB25	36
ตารางที่ 2.6 แสดงข้อมูลในแอดเดรส 0000:041IH ที่ใช้แจ้งจำนวนพอร์ตอนุกรม	47
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานและค่า V_{out} ที่วัดได้	70
ตารางที่ 4.2 ความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อจ่ายไฟผ่านวงจรขับมอเตอร์และทำการปรับ Duty Cycle ของ Pulse ที่จ่ายให้วงจรขับ	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ความต้องการที่จะทำการสำรวจพื้นที่ใต้ทะเล หรือ แม่น้ำมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในด้านต่าง ๆ ทั้งในปัจจุบันและอนาคต เช่น การสำรวจค้นหาแหล่งพลังงานธรรมชาติ การสำรวจและซ่อมบำรุงแนวท่อก๊าซธรรมชาติและสายเคเบิลใยแก้วนำแสง การสำรวจทางโบราณคดี การสำรวจทางธรณีวิทยา เป็นต้น ซึ่งกรณีศึกษาเหล่านี้จะต้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง จึงจำเป็นที่จะต้องใช้หุ่นยนต์หรือยานพาหนะอื่นปฏิบัติการแทนมนุษย์ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ยานพาหนะในการปฏิบัติภารกิจต่าง ๆ เหล่านี้ คือ เรือดำน้ำ และ ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล (Remotely Operated Vehicle: ROV) ซึ่งในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึง ROV เป็นหลัก

ยานสำรวจใต้น้ำควบคุมด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล (Remotely Operated Vehicle : ROV) เป็นเรือดำน้ำที่มีขนาดเล็ก ซึ่งควบคุมการทำงานผ่านทางสายเคเบิล โดยผู้ควบคุมจะอยู่บนผิวน้ำหรือพื้นดิน อุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับ ROV ได้แก่ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ใต้น้ำขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ กล้องวีดีโอขนาดเล็ก แหล่งจ่ายพลังงาน(Power Supply) ซึ่งอาจอยู่ภายในตัว ROV หรือรับพลังงานผ่านทางสายเคเบิลจากระบบควบคุมบนผิวน้ำ สัญญาณควบคุมและข้อมูลจาก Sensor ต่าง ๆ จะถูกส่งผ่านทางสายเคเบิลเช่นเดียวกัน ROV อาจมีขนาดเล็กเท่าโทรทัศน์สำหรับงานที่ไม่ยุ่งยากมากนัก ไปจนถึงมีขนาดใหญ่หลายเมตรสำหรับงานที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งจะต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความชำนาญสูงเป็นพิเศษ

ภารกิจหลักของ ROV คือ การให้การสนับสนุนการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำมัน การวางแนวท่อหรือแนวเส้นเคเบิลใยแก้วนำแสงใต้น้ำ ที่มีความลึกและความยุ่งยากซับซ้อนมาก ๆ

ประวัติความเป็นมาของโครงงาน

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้งาน ROV เป็นจำนวนมากแต่ไม่สามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศยังจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูงมาก และจากการที่ต้องนำเข้า ROV จากต่างประเทศทำให้ในบางกรณีการทำงานของ ROV อาจไม่เหมาะสมกับภูมิประเทศของประเทศไทย และบุคลากรอาจไม่มีความรู้ความเข้าใจในการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความจำเป็นดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลอง ROV ขึ้น เพื่อศึกษาการทำงาน ตลอดจนการทดลองใช้งานจริงในสภาวะแวดล้อมที่จำลองขึ้น ซึ่งโครงงานนี้ได้แนวทางมาจากโครงงาน ROV รุ่นก่อน ซึ่งใช้ระบบขับเคลื่อนในแนวดิ่งด้วยวิธีใช้ถังอับเฉา แต่สำหรับโครงงานนี้จะใช้วิธีขับเคลื่อนในแนวดิ่งโดยใช้แรงกดจากใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

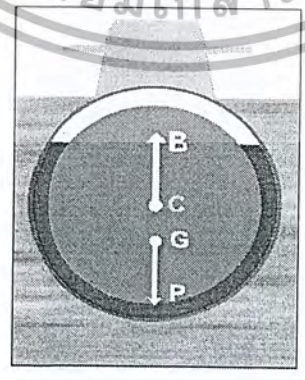
2.1 หลักการทำงานของเรือดำน้ำ

เรือดำน้ำ คือเรือที่สามารถลอยอยู่บนผิวน้ำหรือจมลงสู่ใต้น้ำได้ โดยเราจะอาศัยคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือแรงกดที่กระทำกับตัวเรือ

ซึ่งสำหรับโครงงานนี้ โดยปกติแล้วตัวเรือจะลอยอยู่ที่ระดับผิวน้ำ สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งนั้น ถ้าต้องการจะให้ตัวเรือดำลงสู่ใต้น้ำ ก็ทำการสั่งให้มอเตอร์ส่วนบนตัวเรือทั้ง 2 ตัว ทำงานเพื่อให้ใบพัดสร้างแรงกดให้แก่ตัวเรือ เรือก็จะดำลงสู่ใต้ผิวน้ำซึ่งจะดำลงไปลึกเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับระดับความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ และเมื่อต้องการจะให้ตัวเรือลอยขึ้นสู่ผิวน้ำก็ทำได้โดยการสั่งการให้มอเตอร์หยุดทำงาน แรงกดที่ตัวเรือก็จะหมดไป ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวระนาบนั้น ก็จะใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ 2 ตัวที่อยู่ทางด้านท้ายเรือ เมื่อต้องการจะให้เรือเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตรงๆก็สั่งการให้มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวทำงานพร้อมกัน ใบพัดที่ติดอยู่กับมอเตอร์ก็จะสร้างแรงดันตัวเรือให้เคลื่อนที่ไป ถ้าต้องการจะให้เรือเลี้ยวซ้ายก็สั่งให้มอเตอร์ตัวซ้ายหยุดทำงานหรือทำงานช้าลงและให้มอเตอร์ตัวขวาทำงาน แรงกระทำรวมที่กระทำกับตัวเรือก็จะทำให้ตัวเรือเคลื่อนที่เลี้ยวซ้าย ในทางกลับกันถ้าต้องการจะให้เรือเลี้ยวขวาก็สั่งให้มอเตอร์ตัวขวาหยุดทำงานหรือทำงานช้าลงและให้มอเตอร์ตัวซ้ายทำงาน

ในส่วนของหลักการแบบถังอับเฉาจะได้กล่าวคร่าวๆดังนี้

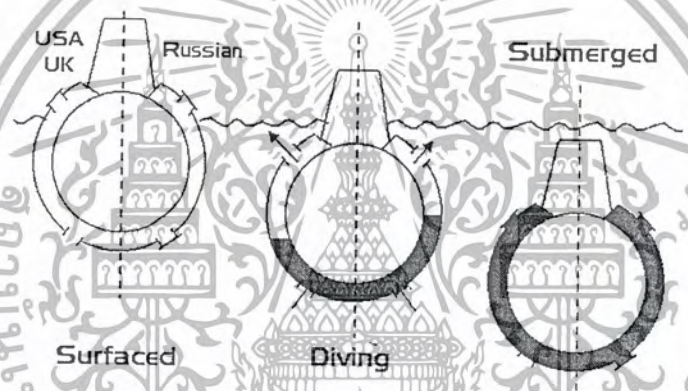
ถังอับเฉาคือ พื้นที่ภายในตัวถังเรือดำน้ำหรือยานสำรวจใต้น้ำซึ่งจะถูกจัดไว้เป็นพื้นที่ว่างๆ เพื่อเป็นที่ที่เราใช้สูบน้ำเข้าและออกเพื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเรือให้ตัวเรือสามารถจมหรือลอยได้



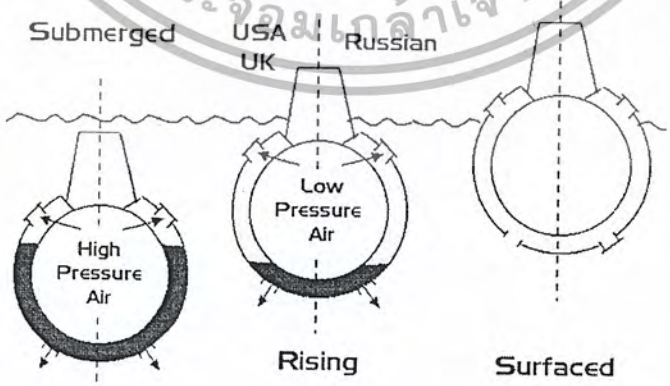
รูปที่ 2.1 แสดงการลอยและการจมของเรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อเรือ ณ จุด G (center of gravity) โดยแรงดึงดูดของโลก ในทิศทางตรงข้ามกันจะมีแรง B โดยแรง B เป็นแรงยกของของเหลว (buoyancy) กระทำ ณ จุด C เมื่อแรง B มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความลึกและสัมประสิทธิ์ของของเหลว เราสามารถเปลี่ยนแปลงแรง P ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นได้โดยการเพิ่มน้ำหนักให้กับตัวเรือ นั่นคือ การให้น้ำไหลเข้าไปในบางส่วนของตัวเรือ ซึ่งจะทำให้น้ำหนักของตัวเรือเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรง P เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เรือสามารถจมลงสู่ใต้น้ำได้ และในทางตรงกันข้ามเมื่อเราต้องการให้เรือลอยขึ้นเราก็จะทำการลดน้ำหนักของตัวเรือโดยการสูบน้ำออกจากตัวเรือซึ่งจะทำให้น้ำหนักของตัวเรือลดลงส่งผลให้แรง P มีค่าลดลง โดยที่พื้นที่ที่เราทำการปล่อยน้ำเข้าหรือสูบน้ำออกซึ่งอยู่ภายในตัวถังเรือนี้เราเรียกว่า ถังอับเฉา (Ballast tank)



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของถังอับเฉาขณะที่กำลังจม



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของถังอับเฉาขณะที่กำลังลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สสาร

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงสมบัติของสสาร โดยจะเน้นถึงสมบัติที่จะเป็นประโยชน์แก่การพิจารณางานโครงงานชิ้นนี้ ความดันและแรงกระทำกับวัตถุเป็นปริมาณที่เรากล่าวถึงมากที่สุด จึงควรทำความเข้าใจให้ถ่องแท้ สิ่งสำคัญของสาระในบทนี้คือ การพิจารณาสมบัติของสสารในสภาวะนิ่งและสภาวะเคลื่อนที่

สสาร(Matter) เป็นสิ่งหนึ่งที่ถือได้ว่าเป็นรูปหนึ่งของพลังงาน (energy) โดยมีมวล (mass) และต้องการที่อยู่ในปริภูมิ (space) โดยทั่วไปเรามักกล่าวกันว่าสสารมี 3 สถานะคือ ของแข็ง (solid) ของเหลว (liquid) และก๊าซ (gas) โดยเรียกของเหลวและก๊าซรวมกันว่าของไหล (fluid)

อนึ่ง เราพบว่าสารบางชนิดจะมีโอกาสเป็นไปได้ทั้ง 3 สถานะ กล่าวคือ ของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ ภายใต้อุณหภูมิและค่าความดันที่เหมาะสม และจะปรากฏว่า ของแข็งส่วนมากเมื่อหลอมละลายเป็นของเหลว ก็จะมีความหนาแน่นลดลง และเมื่อของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซก็ยิ่งจะมีความหนาแน่นลดลงมากด้วย แสดงว่า ระยะระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและระยะดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อของเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นกลาง สำหรับความหนาแน่นจำนวนโมเลกุล (molecular number-density) ของสารต่างๆ ก็จะมีความสอดคล้องกับสถานะของสสารดังกล่าวนั้น เช่น ทองคำ น้ำและอากาศ มีความหนาแน่นจำนวนโมเลกุลประมาณ 0.6×10^{29} , 3.3×10^{28} และ 2.7×10^{26} โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

ความหนาแน่นและความดัน

โดยทั่วไปเรากล่าวถึงความหนาแน่น (Density "ρ") ของสารว่าคือ อัตราส่วนระหว่างมวล (mass "m") กับปริมาตร (volume "v") ของสารนั้น

กล่าวคือ $$\rho = \frac{m}{v} \qquad (2.1)$$

ความหนาแน่นของสารจะมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องอย่างสมบูรณ์เราน่าจะเรียกความหนาแน่นของสารนี้ว่า ความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร (volume mass density) ทั้งนี้เพราะยังปรากฏว่ามีความหนาแน่นมวลในลักษณะอื่นๆ อีก เช่น ความหนาแน่นเชิงผิว (surface mass density "σ") เป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร และความหนาแน่นเชิงเส้น (linear mass density "μ") เป็นกิโลกรัมต่อเมตรอีก อย่างไรก็ตามในกรณีนี้เราจะกล่าวเพียงแต่ว่า ความหนาแน่น นั่นคือเราจะหมายถึงความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตรเสมอ ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของสารกับค่าความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นขณะที่น้ำมีความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เราจะเรียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำดังกล่าวนี้ว่า ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity "s") ของสารนั้น ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียมและปรอทมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.7×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 13.6×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น จึงมีค่าความถ่วงจำเพาะเป็น 2.7 และ 13.6 ตามลำดับ โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะของสารต่างๆ จะทำให้เกิดมโนภาพเกี่ยวกับสภาวะการลอยหรือจมของสารต่างๆ เหล่านั้นในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งโดยทั่วไปของแข็งจะมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวและของเหลวจะมีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ

สาร	ρ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
น้ำแข็ง	0.92×10^3
อะลูมิเนียม	2.70×10^3
เหล็ก	7.86×10^3
ทองแดง	8.92×10^3
เงิน	10.05×10^3
ทองคำ	19.3×10^3
น้ำ	1.0×10^3
ปรอท	13.6×10^3
อากาศ	1.29
ออกซิเจน	1.43

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

นอกจากความหนาแน่นตามที่กล่าวมาแล้ว ความดัน (Pressure "P") ก็เป็นปริมาณหลักที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของสสาร โดยหมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงดัน (force of pressure "F") และพื้นที่ตั้งฉาก (normal area "A") กับแรงดันนั้น ดังสมการ

$$P = \frac{F}{A} \qquad (2.2)$$

สังเกตได้ว่าแรงดัน (F) เป็นเวกเตอร์ ความดัน (P) จึงต้องเป็นเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกันจะต่างกันเฉพาะขนาดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เพื่อความถูกต้องจึงควรกล่าวถึงความดันในลักษณะเวกเตอร์ ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการบอกแต่เพียงขนาดที่สื่อความหมายเพียงเชิงสเกลาร์ก็ควรกล่าวว่า "ขนาดความดัน" ถ้าคุ้นเคยกับการกล่าวถึงคำว่า "ความดัน" ที่มีความหมายเชิงสเกลาร์ ก็อาจใช้เวกเตอร์ความดัน (vector of pressure) เพื่อแสดงความหมายเชิงเวกเตอร์

เนื่องจากในระบบเอสไอ แรงมีหน่วยเป็นนิวตัน และพื้นที่มีหน่วยเป็นตารางเมตร ความดันของเราจึงมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร นอกจากนี้ก็ยังมีหน่วยเป็นอย่างอื่นอีก เช่น พาสคัล (Pascal : Pa) บาร์ (bar) และบรรยากาศ (Atmosphere : Atm) โดยมีความสัมพันธ์กับหน่วยนิวตันต่อตารางเมตรดังนี้

1 พาสคัล	เท่ากับ	1 นิวตันต่อตารางเมตร
1 บาร์	เท่ากับ	10^5 นิวตันต่อตารางเมตร
1 บรรยากาศ	เท่ากับ	1.013×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร

เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลหรือจมอยู่ในของเหลว ของเหลวจะออกแรงกดตั้งฉากกับผิววัตถุ เราจึงสามารถใช้สมการ (2.2) เพื่อหาค่าความดันที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุได้โดยตรง อย่างไรก็ตามยังมีความสำคัญประการหนึ่งที่ต้องระวังคือ ค่าความดันในของเหลวหรือในของไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ กันไม่จำเป็นต้องเท่ากัน การกำหนดค่าความดัน ณ ตำแหน่งหนึ่งในของเหลวจึงต้องพิจารณาโดยใช้กฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ประกอบ กล่าวคือใช้ขีดจำกัดมีค่าเข้าสู่ศูนย์ของชิ้นประกอบผิว (surface element) ของพื้นที่ ΔA ที่มีแรงขนาด ΔF กระทำตั้งฉากทั่วพื้นที่ของชิ้นประกอบผิวนั้นจะได้

$$P = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \qquad (2.3)$$

จากการศึกษาต่อไปเราพบว่าค่าความดันในของเหลวจะเพิ่มขึ้นตามความลึก

2.3 ความดันและความลึก

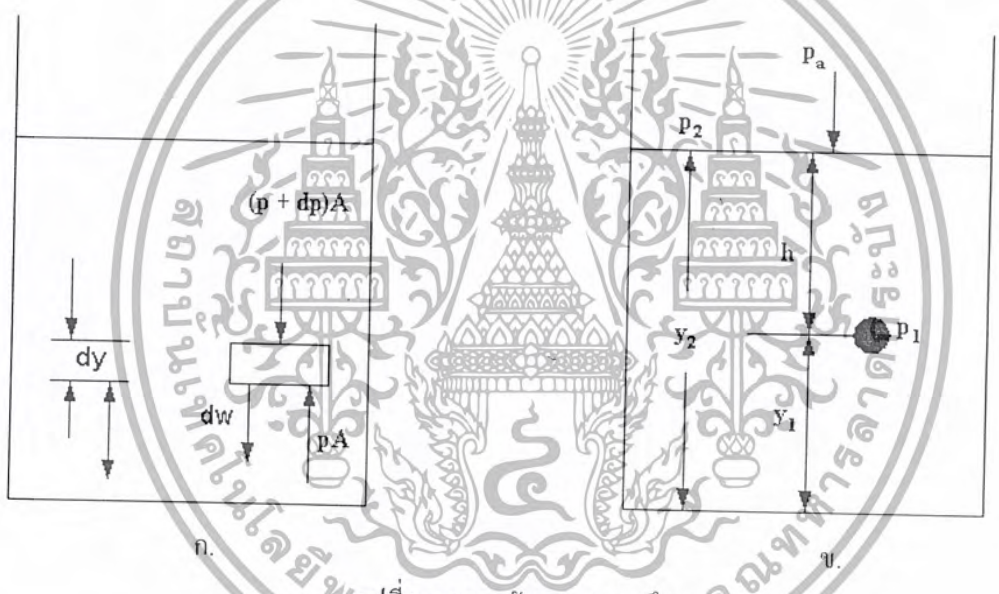
โลกมีบรรยากาศห่อหุ้ม บรรยากาศจึงห่อหุ้มตัวเราอยู่ตลอดเวลา ในขณะเดียวกันอากาศก็มีแรงกดหรือมีความดันต่อเราอยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากความเคยชิน เราจึงไม่รู้สึกต่อความดันของอากาศที่กดเรา ตรงกันข้ามถ้าความดันที่บรรยากาศกระทำต่อเราเปลี่ยนแปลง เช่น เมื่อเราอยู่ ณ สถานที่สูงจากระดับน้ำทะเลมากๆ หรือเมื่อเราอยู่ในสภาวะที่เปลี่ยนความสูงโดยฉับพลัน เราย่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับรู้ต่อการเปลี่ยนแปลงนั้น เราเรียกค่าความดันของบรรยากาศซึ่งมีผลต่อทุกสิ่งบนโลก ไม่เพียงแต่ตัวเราเท่านั้น ว่า ค่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure)

ในหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาค่าความดันของของเหลว หรือค่าความดันเกจ (Gauge pressure "Pg") ตำแหน่งหนึ่ง ที่สมพันธ์กับความลึก (depth "h") ของของเหลวที่ตำแหน่งนั้น ตลอดจนค่าความดันสมบูรณ์ (absolute pressure "p") ของของเหลว ซึ่งคือ ผลรวมระหว่างค่าความดันบรรยากาศและค่าความดันเกจของของเหลว ณ ตำแหน่งความลึก (h) นั้น
กล่าวคือ

$$P = P_a + P_g \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.4 ความดันและความลึก

สมมติพิจารนาชิ้นประกอบของเหลวชิ้นหนึ่ง ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A สูง dy อยู่สูงจากระดับเทียบ y มีแรงกระทำขึ้นที่ผิวล่าง และแรงกระทำลงที่ผิวบนเป็น pA กับ (p+dp)A ตามลำดับ

ให้ dV = A(dy) แทนปริมาตรของชิ้นประกอบของเหลวชิ้นนี้

ρ แทนความหนาแน่นของของเหลว

g แทนค่าความโน้มถ่วงของโลก

และ dw = ρ g(dV) = ρ gA(dy) แทนค่าน้ำหนักของชิ้นประกอบของเหลว

ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.4 ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากชิ้นประกอบของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุล

จะได้ $pA - (p+dp)A - dw = 0$

หรือ $pA - (p+dp)A - \rho gA(dy) = 0$

ดังนั้น $\frac{dp}{dy} = -\rho g h$ (2.5)

จามสมการ ข้างต้น เนื่องจากทั้ง ρ และ g เป็นบวก ถ้า dy เป็นบวก dp จะเป็นลบ แสดงว่าค่าความดันในของเหลวจะลดลง ขณะที่ตำแหน่งในของเหลวจะสูงขึ้น

รูปที่ 2.4 ข สมมติตำแหน่งที่อยู่สูงจากระดับเทียบ y_1 หรืออยู่ลึก h ของเหลวมีค่าความดัน (p) คือ p_1 ส่วนตำแหน่งที่ผิวหน้าของเหลวพอดี ซึ่งอยู่สูงจากระดับเทียบ y_2 มีค่าความดัน p_2 ซึ่งก็คือความดันบรรยากาศ (p_a)

พิจารณาการหาปริพันธ์ของสมการดังนี้

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\rho g \int_{y_1}^{y_2} dy$$

จะได้ $p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1) = -\rho gh$

หรือ $p = p_a + \rho gh$ (2.6)

กล่าวคือ ค่าความดันสมบูรณ์ (p) ของของเหลวในที่เปิด ณ ตำแหน่งลึก h เท่ากับผลรวมของค่าความดันบรรยากาศ (p_a) และค่าความดันเนื่องจากของเหลวลึก h นั้น

อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.6) กับความจริงตามสมการ (2.4)แสดงว่าค่าความดันเนื่องจากของเหลวลึก h ก็คือความดันเกจ (p_a) ของของเหลวซึ่งมีขนาดน้ำหนัก w นั้นเอง

กล่าวคือ $pa = \rho gh$ (2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรสังเกต

1. $p_g = \rho gh$ มีหน่วยเป็น นิวตันต่อ(เมตร)^{2}ตรงตามหน่วยของความดันในระบบเอสไอ

2. ณ ที่หนึ่งซึ่ง g มีค่าคงตัว จะได้ $p_g \propto \rho h$

3. สำหรับของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งทีค่า ρ คงตัว อยู่ในบริเวณหนึ่งที่มีค่า g คงตัว จะได้ $p_g \propto h$ กล่าวคือ ค่าความดันเกจเพิ่มขึ้นตามความลึกของของเหลว หรือกล่าวโดยกลับกันได้ว่า ณ ระดับความลึกเดียวกันในของเหลวชนิดหนึ่ง ค่าความดันเกจ (p_g) ตลอดจนค่าความดันสมบูรณ์ (p) ของของเหลว ย่อมเป็นค่าคงตัว

4. หน่วยของ $\frac{pg}{\rho g}$ คือ เมตร ซึ่งเป็นหน่วยของระยะทางที่สวดคล้องกับหน่วยของความลึกของเหลว h

ด้วยเหตุนี้ ในบางกรณีโดยเฉพาะเมื่อต้องการบอกค่าความดันบรรยากาศ จะนิยมบอกเป็นค่าความลึกหรือส่วนสูงของของเหลวแทน กล่าวคือ $h = \frac{pg}{\rho g}$ นั้นเอง เช่น ความดันบรรยากาศปกติมีค่าเท่ากับ 0.76 เมตรของปรอท โดยมีความหมายว่า บรรยากาศปกติจะมีความกันที่มีค่าเท่ากับค่าความดันเนื่องจากปรอทสูง (h) เท่ากับ 0.76 เมตร

อนึ่ง ความดันเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่มีสมบัติพิเศษอย่างหนึ่ง โดย แบลส์ ปาสกาล (Blaise Pascal "พ.ศ. 2166-2205) เป็นผู้พบความจริงนี้ และรู้จักกันในนามกฎของพาสคัล (pascal's law) ดังนี้

"ถ้าเพิ่มความดันเกจให้แก่ของไหลในภาชนะใบหนึ่ง จะมีความดันส่งต่อกันในของไหลโดยทำให้ทุกจุดในของไหล และผนังของภาชนะใบนั้น มีค่าความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าความดันที่ให้นั้น"

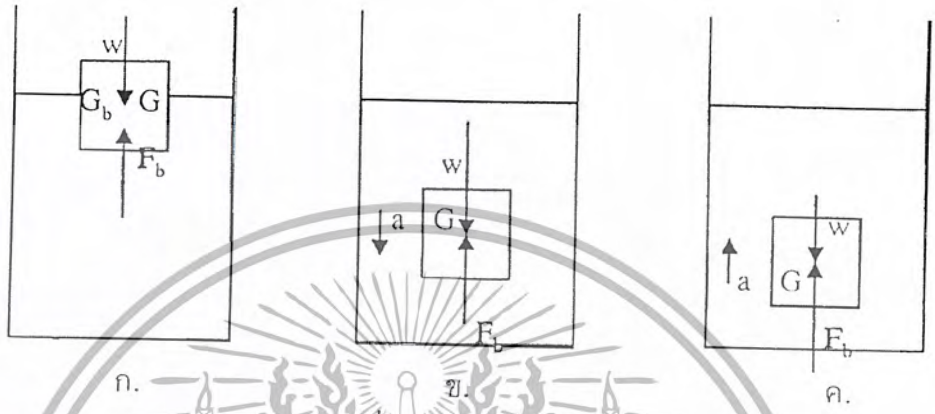
2.4 การลอยตัว

ขณะที่วัตถุก้อนหนึ่งอยู่ในของเหลว จะเห็นว่า มีทั้งแบบที่ มีส่วนลอยและส่วนที่จม ลอยปริ่มในของเหลว หรือจมในของเหลว ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่สัมพันธ์กับสมบัติของของเหลว เราเรียกลักษณะที่วัตถุปรากฏอยู่ในของเหลวดังกล่าวเหล่านี้ว่า การ ลอยตัว (Buoyancy)

สมมติว่า วัตถุก้อนหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่น ρ_o มีปริมาตร V_o มวล m และมีน้ำหนัก w มีการลอยตัวในของเหลวชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความหนาแน่น ρ_f และมีแรงลอยตัว (buoyant force) ขนาด F_b ซึ่งคือแรงที่ของเหลวพยุงวัตถุ ในขณะที่ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในของเหลวเท่ากับ V และอยู่ในบริเวณที่มีค่าความโน้มถ่วงของโลกคือ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนึ่ง พึงสังเกตว่า เวคเตอร์เนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ (w) กระทำ ณ จุดศูนย์ (center of gravity) ของก้อนวัตถุ ส่วนเวคเตอร์ของแรงลอยตัว (F_b) กระทำ ณ จุดศูนย์ถ่วงของวัตถุเฉพาะส่วนที่จมอยู่ในของเหลว และเรามีนิยามของแรงลอยตัวดังนี้



รูปที่ 2.5 การลอยตัว

แรงลอยตัวมีขนาดเท่ากับขนาดน้ำหนักของของเหลว ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับส่วนที่วัตถุจมในของเหลวนั้น ณ ที่นี้ จะพิจารณาตามกรณีต่างๆ ดังนี้

2.4.1 เมื่อวัตถุจมในของเหลว

ในสภาวะดังกล่าวนี้ แสดงว่า แรงภายนอกสุทธิที่กระทำกับวัตถุเท่ากับศูนย์ หรือกล่าวได้ว่า แรงลอยตัว (F_b) ของของเหลวย่อมมีขนาดเท่ากับขนาดของน้ำหนักวัตถุ (w) แต่มีทิศทางตรงกันข้ามในแนวเดียวกัน

กล่าวคือ $F_b = -w$ หรือ $F_b = w$ (2.8)

โดยที่ $w = mg = \rho_o V_o g$ (2.9)

จากรูป 2.5 ก วัตถุก้อนนั้นอยู่สมดุลในของเหลว โดยมีส่วนที่จมอยู่ในของเหลว (V) น้อยกว่าปริมาตรของวัตถุ (V_o) กล่าวคือ $V < V_o$

ตามกรณีนี้ $F_b = \rho V g = \rho_o V_o g$ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$\frac{\rho_o}{\rho_f} = \frac{V}{V_o} \quad (2.11)$$

เนื่องจาก $V < V_o$ จะได้ $\rho_o < \rho_f$ แสดงว่า วัตถุก้อนหนึ่งซึ่งมีค่าความหนาแน่น (ρ_o) น้อยกว่าค่าความหนาแน่นของของเหลว (ρ_f) ก็จะจมในของเหลว

2.4.2 เมื่อวัตถุกำลังเคลื่อนที่ในของเหลว

การเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวตามที่กล่าวถึงนี้ เป็นการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า เป็นการที่วัตถุกำลังจมลงในของเหลว ดังรูป 2.5 ข หรือกำลังลอยตัวขึ้นในของเหลวดังรูป 2.5 ค โดยลักษณะดังกล่าวนี้ วัตถุย่อมไม่อยู่ในสภาวะสมดุล หรือ กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งมีขนาดเป็น a นั่นเอง ด้วยเหตุนี้ แสดงว่า $F_b \neq w$ โดยที่ทั้ง F_b และ w กระทำ ณ จุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ

จากรูป 2.5 ข $w > F_b$

จะได้ $$W - F_b = ma \quad (2.12)$$

$$\rho_o V_o g - \rho_f V_o g = \rho_o V_o a \quad (2.13)$$

หรือ $$a = \left(\frac{\rho_o - \rho_f}{\rho_o}\right) g$$

$$a = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_o}\right) g \quad (2.14)$$

ผลที่ได้ตามสมการ นี้ แสดงว่า $\rho_f < \rho_o$ ซึ่งก็สอดคล้องกับประสบการณ์ทางธรรมชาติของกรณีที่วัตถุจมลงในของเหลว เช่น ก้อนหินที่จมลงในน้ำ ก้องหินย่อมมีความหนาแน่นมากกว่าค่าความหนาแน่นของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกลับกัน จากรูป 2.5 ค แสดงว่า $\rho_f > \rho_o$ แต่จะมีพฤติกรรมตามรูป 2.13 ค ที่สมมติได้ ต้องคิดว่า เรากดวัตถุก้อนหนึ่งให้เจลงในของเหลวก่อน แล้วปล่อย วัตถุก้อนนี้จึงกำลังเคลื่อนที่ลอยขึ้นในของเหลวดังกล่าวนั้น

ตามกรณีนี้ $F_b > w$

จะได้

$$F_b - w = ma \tag{2.15}$$

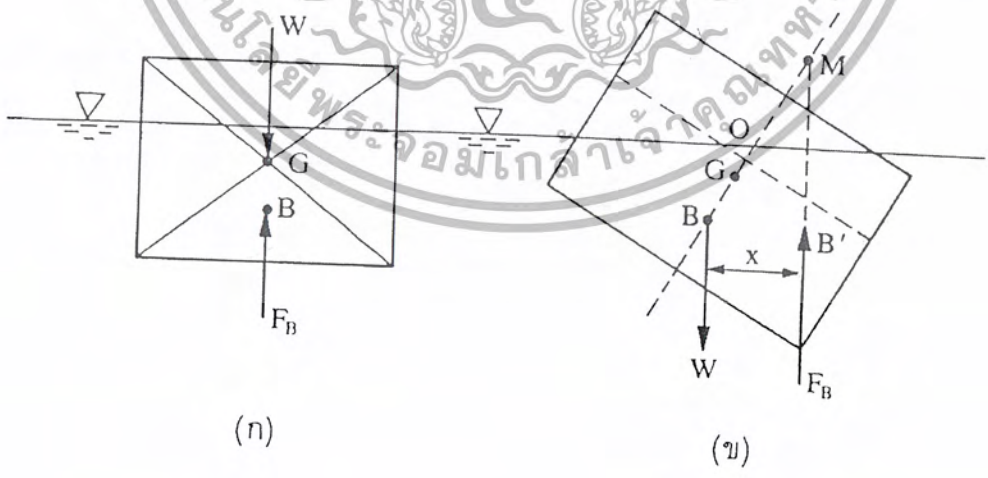
$$\rho_f V_o g - \rho_o V_o g = \rho_o V_o a \tag{2.16}$$

หรือ

$$a = \left(\frac{\rho_f}{\rho_o} - 1 \right) g \tag{2.17}$$

โดยที่ $\rho_f > \rho_o$ สอดคล้องกับที่กล่าวมาแล้วเป็นอย่างดี

2.5 เสถียรภาพของการลอยตัว



รูปที่ 2.6 การลอยตัว และเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป 2.6 (ก) G เป็นจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ B เป็นจุดศูนย์กลางของการลอยตัว (จุดเซนทรอยด์ของปริมาตรส่วนที่จม) ถ้ามีการโคลงตัวรอบแกนในแนวระดับที่ผ่านจุด O ในรูป 2.6 (ข) ทำให้แนวแรง F_B เลื่อนไปจากเดิมเป็นระยะ x ทำให้เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบขนาด W_x และพบว่า แนวของ F_B นั้นตัดแนวแกนเดิมของวัตถุที่จุด M ซึ่งเรียกว่าจุดศูนย์กลางเบต้า ตำแหน่งจุด G และ M ใช้กำหนดเสถียรภาพของการลอยตัวดังนี้

1 สมดุลเสถียร เมื่อจุด M อยู่เหนือจุด G

2 สมดุลสะเทิน เมื่อจุด M ซ้อนทับจุด G

3 สมดุลไม่เสถียร เมื่อจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G

ระยะ GM หาได้จาก GM = BM $\pm$ GB

ดังนั้น

$$GM = \frac{I}{V_{DWL}} \pm GB \qquad (2.18)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ระนาบตัดของวัตถุขนานกับผิวของเหลวรอบแกนแนวระดับที่ผ่านจุด O ถ้าจุด G อยู่เหนือจุด B ใช้เครื่องหมายลบ ถ้า G อยู่ต่ำกว่า B ใช้เครื่องหมายบวก V_{DWL} คือ ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ

2.6 หลักการและทฤษฎีของมอเตอร์ดีซี

มอเตอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และมอเตอร์ซึ่งขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าดีซีนี้ เรียกว่า มอเตอร์ดีซี (DC Motor) และที่ขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟเอซี เรียกว่า มอเตอร์เอซี (AC Motor) นอกจากนั้นยังมีมอเตอร์ขนาดเล็กซึ่งอาจขับเคลื่อนได้ทั้งกระแสไฟดีซีหรือเอซี ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดีซีจะตรงข้ามกับกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีโดยสิ้นเชิง แต่สำหรับโครงสร้างแล้วจะเหมือนกันทุกประการ จึงสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีมาใช้ทำหน้าที่ของมอเตอร์ดีซีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ชนิดของมอเตอร์ดีซีแบ่งตามลักษณะการกระตุ้น

การแบ่งชนิดของมอเตอร์ดีซีตามลักษณะการกระตุ้นจะเหมือนกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยก
2. มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นตัวเอง
   - มอเตอร์ดีซีแบบชันต์
   - มอเตอร์ดีซีแบบซีรี
   - มอเตอร์ดีซีแบบคอมปาวด์

มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกนั้น กระแสที่ป้อนให้ขดขดลวดสนามและขดลวดอาร์มจะมาจากแหล่งจ่ายไฟดีซีซึ่งแยกชุดกัน ส่วนแบบกระตุ้นตัวเองนั้นจะมาจากแหล่งจ่ายไฟดีซีชุดเดียวกัน กรณีที่ต้องการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซี โดยการปรับระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะใช้มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกเป็นกรณีพิเศษเท่านั้น แต่โดยทั่วไปจะใช้แบบกระตุ้นตัวเองเป็นส่วนมาก สำหรับลักษณะการต่อวงจรของมอเตอร์ดีซีแบบซีรี แบบชันต์ และแบบคอมปาวด์นั้น จะเหมือนกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี

(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 มอเตอร์คอมปาวด์แบบคิวมูเลทีฟ

อนึ่งสำหรับการต่อวงจรภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีแบบคอมปาวด์นั้นจะมี 2 ลักษณะด้วยกันคือ ต่อในลักษณะที่ให้แอมแปร์เทอร์จากขดลวดสนามแบบชันต์เสริมหรือหักล้างกับขดลวดสนามแบบซีรี มอเตอร์ซึ่งต่อในลักษณะแรกนี้เรียกว่า มอเตอร์คอมปาวด์แบบคิวมูเลทีฟ และแบบหลังเรียกว่าแบบดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 มอเตอร์คอมปาวด์แบบดิฟเฟอเรนเชียล

รูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) แสดงทิศทางของ MMF จากขดลวดสนามแบบชันต์และขดลวดสนามแบบซีรีของมอเตอร์คอมปาวด์แบบดิวมูเลทีฟ ส่วนรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) แสดงทิศทางของกรณีดิฟเฟอเรนเชียล

2.6.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

เมื่อมอเตอร์ดีซีหมุน ลวดตัวนำแต่ละเส้นซึ่งมีกระแสไหลผ่านจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมาจำนวนหนึ่งในทิศทางที่สวนกับทิศทางของกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ลองพิจารณาทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับดังรูปที่ 2.9

(ก) ทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของอาเมเจอร์ (ข) ทิศทางกระแสของอาเมเจอร์

รูปที่ 2.9 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

สมมติให้เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ และการหมุนของขดลวดมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ขณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในขดลวดตัวนำ C_1 และ C_2 จะมีทิศพุ่งเข้า (x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

และพุ่งออก (o) ตามลำดับ แต่การที่ลวดตัวนำจะยังคงหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาได้นั้น จากกฎมือซ้าย กระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ C_1 และ C_2 จะต้องมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) เท่านั้น นั่นคือมีทิศทางของกระแสที่ตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในรูปที่ 2.9 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในรูปที่ 2.9 (ก) สำหรับกรณีมอเตอร์เท่านั้นที่เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ เกิดจากการที่ลวดตัวนำหมุนตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ ในทำนองเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี จึงมีสมการเหมือนกับกรณีหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนี้

$$E_b = p\phi \times \frac{n}{60} \times \frac{z_c}{a} \qquad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับแปรผันโดยตรงกับจำนวนรอบหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นในกรณีที่มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน (n=0) แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย กำหนดมอเตอร์ดีซีขนาด 4 kW 200 V ความต้านทานภายในของอาเมเจอร์ 0.5 Ω ถ้าป้อนไฟดีซีจากแหล่งจ่ายขนาด 200 V ให้กับมอเตอร์ในสภาพที่หยุดหมุน จะเห็นว่ากระแสจะไหลในขดอาเมเจอร์ทันทีถึง 400 A (200/0.5) แต่เนื่องจากกระแสที่ไหลในขดอาเมเจอร์ แม้ที่ตำแหน่งโหลดเต็มที่จะมีขนาดน้อยกว่านี้มากประมาณ 25 A เป็นอย่างสูง การที่กระแสซึ่งไหลในขดอาเมเจอร์ขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยขนาดของกระแสเพียง 25 A ได้นั้น เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับทิศที่เกิดขึ้นนี้พยายามต้านการจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟดีซี

2.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับและกระแส

เมื่อกำหนดให้

V คือ แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟดีซี ระหว่างคู่แปรงถ่าน

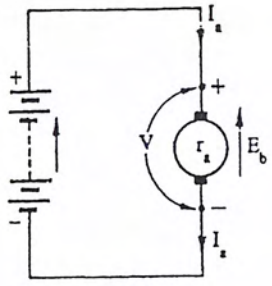
E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

r_a คือ ความต้านทานภายในทั้งหมดในวงจรของอาเมเจอร์

I_a คือ กระแสอาเมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55673



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับในวงจรอาเมเจอร์

จากรูปที่ 2.10 จะได้ว่า

$$I_a = \frac{V - E_b}{r_a} \qquad (2.20)$$

หรือ $V = E_b + I_a r_a$

$$E_b = V - I_a r_a \qquad (2.21)$$

กรณีที่มอเตอร์ทำงานที่โหลดเต็มที่ แรงดันตกคร่อม $I_a r_a$ จะมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของ V ขณะที่มอเตอร์หยุดหมุน เนื่องจาก $E_b = 0$ จะได้

$$I_s = \frac{V}{r_a} \qquad (2.22)$$

โดยที่ I_s คือ กระแส I_a ตอนเริ่มเดินเครื่องมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

จากสมการที่ (2.20) และ (2.22) สามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน เมื่อป้อนไฟดีซีจะมีกระแส $I_s = V / r_a$ จำนวนมากไหลในขดอาเมเจอร์ มอเตอร์จะหยุดหมุนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบสูงในทันที ทำให้ E_b มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสในอาเมเจอร์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด

2.6.4 สมการเอาต์พุตของอาเมเจอร์

จากสมการที่ (2.21) ได้ว่า

$$V = E_b + I_a r_a \quad \text{(V)}$$

หรือ $$E_b = V - I_a r_a \quad \text{(V)}$$

เมื่อคูณ I_a ตลอดจะได้

$$VI_a = E_b I_a + I_a^2 r_a \quad \text{(W)}$$

หรือ $$E_b I_a = VI_a + I_a^2 r_a \quad \text{(W)}$$

โดยที่ VI_a คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ป้อนให้กับอาเมเจอร์

$I_a^2 r_a$ คือ การสูญเสียจากลวดตัวนำในอาเมเจอร์

เมื่อหัก $I_a^2 r_a$ ออกจาก VI_a จะเหลือ $E_b I_a$ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังกลภายในอาเมเจอร์ กำหนดให้เป็น P_{ar} ดังนั้นจะได้

$$\boxed{P_{ar} = E_b I_a} \quad (2.23)$$

กำลังกล P_{ar} บางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของการสูญเสียทางกลและการสูญเสียในแกนเหล็ก จึงไม่สามารถปรากฏออกมาให้เห็นได้หมด จากสมการที่ (2.19)

$$E_b = \frac{p}{a} \times \frac{n}{60} \times Z_c \times \Phi \quad \text{(V)}$$

เนื่องจากมอเตอร์ซึ่งสร้างสำเร็จรูป นอกจาก n และ Φ แล้ว ค่าอื่นๆ คือ p/a , Z_c มีค่าคงที่หมด จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\boxed{E_b = Kn\Phi} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $$K = \frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60}$$

เมื่อคูณ I_a ตลอดจะได้

$$\boxed{E_b I_a = Kn\Phi I_a = P_{ar}} \qquad (2.25)$$

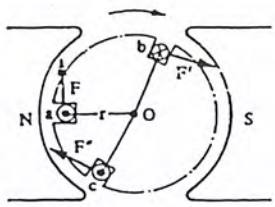
2.6.5 ทอร์ก(Torque)

รูปที่ 2.11 แสดงแรงที่กระทำบนลวดตัวนำ (a) ซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลาง (O) เป็นระยะ r (หน่วยเป็นเมตร) ในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวงของแกนเหล็กอาเมเจอร์ ที่ตำแหน่งนี้กำหนดให้มีค่าเป็น F นิวตัน ดังนั้นแรงที่กระทำบนลวดตัวนำนี้จะมีโมเมนต์เท่ากับ $F \times r$ ซึ่งจะพยายามขับเคลื่อนแกนเหล็กอาเมเจอร์ให้หมุนเคลื่อนที่ไป แต่เนื่องจากในแกนเหล็กอาเมเจอร์มีสล็อตเป็นจำนวนมาก แต่ละสล็อตก็มีลวดตัวนำจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นแรงที่กระทำบนลวดตัวนำทั้งหมดจะมีโมเมนต์ซึ่งพยายามขับเคลื่อนแกนเหล็กให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อรวมโมเมนต์ย่อยทั้งหมดนี้เข้าด้วยกัน จะได้ผลรวมของโมเมนต์ ดังนี้

$$T_a = (F_r + F'r + F'' + \ldots)$$

โดยที่ T_a คือ ทอร์กที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น m-N

ดังนั้น ทอร์ก คือ ผลรวมของโมเมนต์ของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำรอบจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 2.11 โมเมนต์ซึ่งลวดตัวนำอาเมเจอร์กระทำรอบจุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6 สมการของทอร์ก (Torque Equation)

จากรูปที่ 2.11 กำลังกล P_a ของลวดตัวนำ (a) ที่เกิดขึ้น จะเท่ากับผลคูณแรงระหว่าง (F) มีหน่วยเป็นนิวตันกับระยะทาง $(2\pi r)(n/60)$ มีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่ลวดตัวนำ (a) เคลื่อนที่ไปในแนวแรงในช่วงเวลา 1 วินาที ดังนั้นจะได้

$$P_a = 2\pi r \times \frac{n}{60} \times F$$

$$= 2\pi \times \frac{n}{60} \times F_r \quad \text{(W)}$$

แต่เนื่องจาก $2\pi n/60 = \omega$ ซึ่งเป็นความเร็วเชิงมุม (rad/sec) และ Fr คือ โมเมนต์ของแรง (F) รอบจุดศูนย์กลาง (O) จะได้

$$P_a = \omega Fr \quad \text{(W)}$$

ดังนั้นผลรวมของกำลังกลที่เกิดขึ้น P_{ar} ของลวดตัวนำทั้งหมดจะมีค่าดังสมการ คือ

$$P_{ar} = P_a + P_b + P_c + \ldots$$

$$= (\omega \times Fr) + (\omega \times F'r) + (\omega \times F''r) + \ldots$$

$$= \omega(Fr + F'r + F''r + \ldots)$$

ดังนั้น $P_{ar} = \omega T_a$ (W)

และจากสมการที่ (2.25) ได้ว่า

$$Kn\Phi I_a = P_{ar}$$

ดังนั้น $$Kn\Phi I_a = \omega T_a$$

เมื่อแทนค่า K และ ω $\left(K = \frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60}, \omega = 2\pi \frac{n}{60} \right)$

$$n\frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60} \times \Phi I_a = 2\pi\left(\frac{n}{60}\right) I_a$$

$$\boxed{T_a = \frac{1}{2\pi} \times \frac{p}{a} \times Z_c \times \Phi \times I_a} \quad \text{(m-n)} \qquad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= K'\Phi I_a = \text{(m-n)}$$

$$K' = \frac{1}{2\pi} \times \frac{p}{a} Z_c$$

นั่นคือ ทอร์กของมอเตอร์ดีซีจะแปรผันโดยตรงกับผลคูณระหว่างจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสอาเมเจอร์ ไม่เพียงแต่มอเตอร์ดีซีเท่านั้น ความสัมพันธ์นี้ยังสามารถใช้ได้กับมอเตอร์เอซีด้วย

2.6.7 สมการของความเร็วรอบ

จากสมการที่ (2.21) และ (2.25) จะได้

$$E_b = V - I_a r_a$$

และ $$E_b = K\Phi n$$

$$\therefore \quad n = \frac{E_b}{K\Phi} = \frac{V - I_a r_a}{K\Phi}$$

$$\boxed{n \approx \frac{V}{K\Phi}} \text{ (rpm)} \qquad (2.27)$$

$I_a r_a$ ในสมการนี้ประมาณว่ามีค่าน้อยมาก ซึ่งควรใช้เฉพาะกรณีที่มี I_a หรือกระแสโหลดไม่มากเท่านั้น จะเห็นว่าความเร็วรอบแปรผันโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ และแปรผกผันกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

2.6.8 ความสามารถในการปรับกระแสได้เองตามขนาดของโหลด

เมื่อป้อนแรงดัน V คงที่ให้กับมอเตอร์แบบซีรี และให้ทำงานที่โหลดต่ำๆ มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วรอบ (n) ค่าหนึ่ง และจะดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟดีซีด้วยค่า I_a ค่าหนึ่ง เนื่องจากกำลังที่ด้านเอาต์พุตของมอเตอร์ในขณะนี้มีน้อย VI_a จึงมีค่าน้อยด้วย นั่นคือกระแส I_a ที่แหล่งจ่ายไฟดีซีจ่ายออกจะต้องมีค่าต่ำด้วย เมื่อให้มอเตอร์ทำงานที่โหลดมากๆ VI_a จะต้องมีค่ามากขึ้น สำหรับกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ I_a จำเป็นต้องมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นคือเมื่อโหลดน้อยมอเตอร์จะดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟดีซีน้อย และเมื่อโหลดมากจะดึงกระแสมากขึ้นโดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.9 ความสามารถในการเร่งหรือหน่วงความเร็วรอบ

ลองพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโหลดทอร์กซึ่งเป็นทอร์กที่โหลดต้องการ กับมอเตอร์ทอร์กซึ่งเป็นทอร์กที่มอเตอร์จ่ายให้กับโหลด เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นจะยกตัวอย่างมอเตอร์ดีซีแบบชันต์ในการอธิบาย การหมุนของมอเตอร์ในขณะที่มีโหลดทางกลนั้น จะเท่ากับการใส่แรงเบรกกระทำต่อแกนของอาเมเจอร์ เมื่อโหลดทอร์กสูงขึ้น ก็เท่ากับแรงเบรกที่กระทำต่อแกนอาเมเจอร์มีค่ามากขึ้น นั่นคือขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนภายใต้โหลดค่าหนึ่งด้วยเสถียรภาพที่ดี ถ้าให้โหลดทอร์กมีค่าสูงขึ้น หรือแรงเบรกที่กระทำมีค่ามากขึ้น จะทำให้เกิดความหน่วงขึ้น ความเร็วรอบ n จะมีค่าลดลง สำหรับกรณีของมอเตอร์แบบชันต์ ตราบใดที่แรงดันระหว่างขั้วมีค่าคงที่ อาจถือได้ว่า Φ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง (แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากอาเมเจอร์รีแอกชัน ทำให้ Φ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปบ้าง) ดังนั้นถ้าความเร็วรอบน้อยลงแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ E_b จะมีค่าต่ำลง แต่เนื่องจาก $I_a = (V - E_b)/r_a$ และทอร์ก $(T) = K'\Phi I_a$ มอเตอร์ทอร์กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วรอบจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งทำให้ทอร์ก T เท่ากับโหลดทอร์กพอดี จากนั้นมอเตอร์จะเริ่มทำงานที่ตำแหน่งใหม่นี้

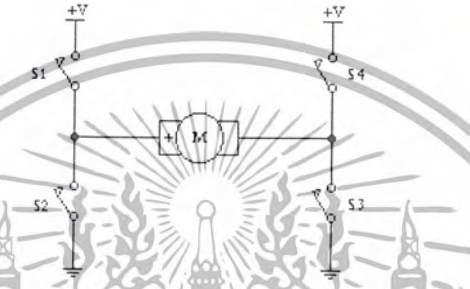
ในทางตรงกันข้ามถ้าโหลดทอร์กมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์ทอร์ก แรงที่หมุนแกนอาเมเจอร์จะมากกว่าแรงเบรก ทำให้เกิดความเร่งขึ้นและความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแส $(I_a) = (V - E_b)/r_a$ จะมีค่าน้อยลง ทอร์ก $(T) = K'\Phi I_a$ จะมีค่าลดลง ความเร่งจะน้อยลงจนเป็นศูนย์ เมื่อทอร์กจากมอเตอร์มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กพอดี จากนั้นมอเตอร์จะเริ่มทำงานที่ตำแหน่งใหม่นี้ ในการเริ่มเดินมอเตอร์จากสภาพที่หยุดนิ่งจนกระทั่งหมุนนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ E_b จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก $E_b = 0$ ในช่วงแรกสุดนั้นเนื่องจากมีกระแสสูงมาก ทอร์กจากมอเตอร์จะมีค่าสูงกว่าโหลดทอร์กมาก ทำให้เกิดความเร่งสูงมาก ความเร็วรอบจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโหลดทอร์กเท่ากับมอเตอร์ทอร์กและความเร็วรอบจะคงที่ โหลดทอร์กจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบ หรือมีค่าคงที่เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไปหรือไม่นั้นย่อมขึ้นกับคุณสมบัติของโหลด ตัวอย่างเช่น พัดลมนั้นยิ่งหมุนที่ความเร็วรอบสูงขึ้น โหลดทอร์กหรือทอร์กที่โหลดต้องการจะยิ่งมีค่ามากขึ้น ในขณะที่เครื่องกลึงไม่ว่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม โหลดจะต้องการทอร์กเกือบคงที่โดยตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 หลักการทำงานของวงจร H-Bridge Switching

เมื่อพูดถึงเรื่องของการสร้างยานสำรวจใต้น้ำแล้ว เรื่องของการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดีซี มีความจำเป็นอย่างแน่นอน

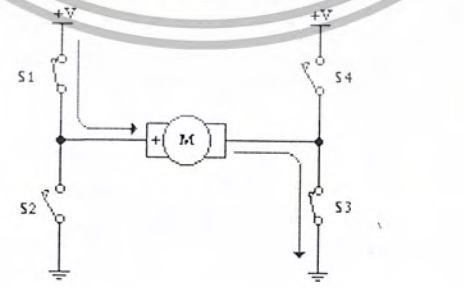
การนำหลักการของวงจรสวิทช์แบบ H-Bridge มาใช้



รูปที่ 2.12 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge

เริ่มจากหลักการของวงจรนั้น จะประกอบไปด้วย สวิทช์ 4 ตัว นั่นก็คือ S1, S2, S3 และ S4 นั่นเอง ซึ่งในรูปตัวอย่างจะใช้มอเตอร์ดีซีเป็นภาระของวงจรนั้นเอง

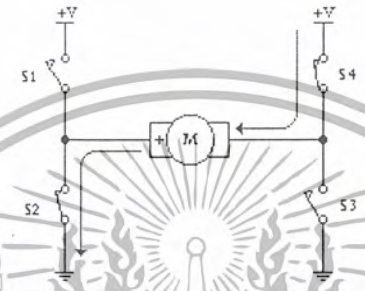
ในสภาวะเริ่มต้น สวิทช์ทุกตัว Off อยู่ ก็จะไม่มีอะไรเกิดขึ้นทั้งสิ้น เพราะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์ (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.13 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge เมื่อOn สวิทช์ S1 และ S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเราทำการ On สวิทช์ S1 และ S3 พร้อมกัน (รูปที่ 2.13) จะเป็นการเชื่อมวงจร ทำให้มีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วบวกของมอเตอร์ไปยังขั้วลบของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ในทิศทาง Forward (จะหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกานั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของการพันขดลวดภายในมอเตอร์)



รูปที่ 2.14 วงจรสวิทช์แบบ H-Bridge เมื่อOn สวิทช์ S2 และ S4

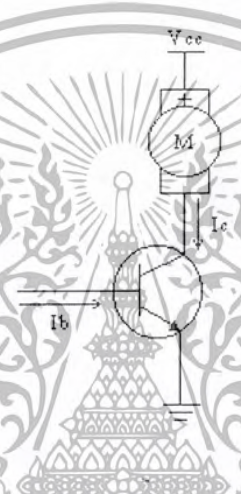
และในทางกลับกัน ถ้าหากเราทำการ On สวิทช์ S2 และ S4 พร้อมกัน (รูปที่ 2.14) ก็จะเป็นการเชื่อมวงจร และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วลบของมอเตอร์ไปยังขั้วบวกของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ และเป็นการหมุนในทิศทาง Reverse (กลับทิศทางกับกรณีแรก)

สรุปว่า วงจรนี้จะอาศัยสวิทช์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ เพื่อควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่เราต้องการ โดยการผลัดกัน On และ Off สวิทช์พร้อมกัน 2 ตัว นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor โดยการ สร้างวงจร H-Bridge Switching จาก Transistor

ทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor device) ที่เราสามารถนำคุณสมบัติของการ Cutoff และการ Saturation มาประยุกต์ใช้งานเป็นสวิทช์ได้ และที่สำคัญมันเป็นสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ ที่เราสามารถควบคุมการปิด-เปิดได้



รูปที่ 2.15 การใช้ทรานซิสเตอร์ควบคุมมอเตอร์

จากรูปที่ 2.15 เป็นวงจรสาธิตแบบง่ายๆ โดยการนำทรานซิสเตอร์มาเป็นสวิทช์ควบคุมมอเตอร์ หลักการคิดง่ายๆ ก็คือ เมื่อเราป้อนกระแส I_b ด้วยปริมาณที่มากพอ ก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน (On) จะทำให้กระแส I_c ไหล แปลว่ามีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ได้ (กระแส I_b จะต้องมากเพียงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวได้)

ในสภาวะอิ่มตัว (Saturation mode) นี้ ทรานซิสเตอร์จะทำงานเหมือนกับสวิทช์ปิดวงจร ค่าความต้านทานระหว่างขา C และขา E จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ กระแส I_c ที่ไหลจะมีค่าเข้าใกล้ I_c (max)

ในสภาวะคัตออฟ (Cut-off mode) นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อเราหยุดจ่ายกระแส I_b ($I_b = 0$) ทรานซิสเตอร์จะทำงานเหมือนกับสวิทช์เปิดวงจร ค่าความต้านทานระหว่างขา C และขา E จะมีค่าเป็นอนันต์ กระแส I_c จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการนำทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งานเป็นสวิทช์นั้น น่าจะเป็นส่วนของการควบคุมที่สามารถตอบสนองจังหวะของการเปิด-ปิด สวิทช์ได้นับล้านครั้งต่อวินาที (ความเร็วในการตอบสนองมีหน่วยเป็น(nS) และที่สำคัญคือไม่ทำให้เกิดปัญหารบกวนจากสนามแม่เหล็กอย่างรีเลย์

ถึงแม้ว่าการสร้างวงจร H-Bridge switching จาก Transistor นั้นจะไม่มีปัญหา การรบกวนจากอำนาจสนามแม่เหล็ก และยังสามารถตอบสนองการทำงานได้เร็วมาก (เร็วกว่ารีเลย์แสนเท่า) แต่ก็ยังมีอุปกรณ์หลายตัว ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ และวุ่นวาย

2.9 การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์กับพอร์ตอนุกรม

การติดต่อกับพอร์ตอนุกรมนั้นจะยากกว่าการ ติดต่อกับกับพอร์ตขนาน การสื่อสารของอุปกรณ์ที่ต่อกับพอร์ตอนุกรมจะถูกเปลี่ยน (Convert) เป็น สัญญาณแบบขนาน แล้วจึงนำไปประมวลผลต่อ ซึ่งจะใช้ Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (UART) เป็นตัวทำหน้าที่ ส่วนทางด้านโปรแกรม ก็มีรีจิสเตอร์ที่ต้องจัดการมากกว่า Standard Parallel Port (SPP) อีกหลายตัว

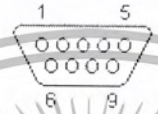
ข้อดีของพอร์ตอนุกรม

1. ระยะของสายอนุกรมสามารถมีความยาวได้มากกว่าสายของขนานมาก ทั้งนี้เพราะสัญญาณของพอร์ตอนุกรม ซึ่งส่วนใหญ่ใช้มาตรฐาน RS-232C จะมีค่า –3Volt ถึง –15Volt สำหรับ Logic "1" หรือ "Mark" และมีค่า +3Volt ถึง +15Volt สำหรับ Logic "0" หรือ "Space" (สำหรับช่วง +3Volt ถึงถึง -3Volt เป็นช่วง Undefined) ส่วนสัญญาณของสายขนานนั้น Logic "1" จะมีค่า +5Volt และ logic "0" จะมีค่า 0Volt ทำให้สัญญาณของสายอนุกรมสามารถรับการสูญเสียของสาย (Cable loss) ได้มากกว่าสัญญาณของสายขนาน ปรกติสายขนานจะไปได้เพียง 5 ฟุต ส่วนสาย RS-232 จะไปได้ถึง 50 ฟุตที่ความเร็วสูงสุดของมัน
2. สายอนุกรมจะใช้จำนวนสายไฟน้อยกว่าสายขนานถ้าต่อในลักษณะ Null Modem จะใช้สายเพียง 3 เส้น ขณะที่แบบขนาน จะต้องใช้สาย 19 ถึง 25 เส้น
3. การสื่อสารแบบไร้สายเช่นการใช้ Infra Red การส่งพร้อมกันทีละ 8บิท แบบขนาน จะทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้ว่า Bit ใดเป็น Bit0 หรือ Bit1 ... เป็นต้น ปัจจุบันอุปกรณ์ IrDA มีความเร็วไม่ต่ำกว่า 115.2K Baud แต่มี Pulse length เพียง 3/16 ของ RS-232 เพื่อประหยัดพลังงาน เพราะส่วนมากใช้ในอุปกรณ์แบบพกพาเช่น Laptop หรือ Palmtop

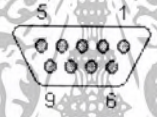
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ มักมีการผนวกพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรมไว้ด้วย เพราะใช้จำนวนขาน้อยกว่าแบบขนาน

RS-232C กำหนด Baud rate ไว้ไม่เกิน 20K Baud ปัจจุบันได้แก้ไขให้รองรับกับเทคโนโลยีใหม่ได้ จึงมีการปรับปรุงถึง RS-232E ซึ่งมีรายละเอียดอีกหลายอย่าง



(Male at the computer side)



(Female at the cable side)

Pin	Name	RS232	V.24	Dir	Description
1	CD	CF	109	←	Carrier Deteect
2	RXD	BB	104	←	Receive Data
3	TXD	BA	103	→	Transmit Data
4	DTR	CD	108.2	→	Data Terminal Ready
5	GND	AB	102	—	Signal Ground
6	DSR	CC	107	←	Data Set Ready
7	RTS	CA	105	→	Request to Send
8	CTS	CB	106	←	Clear to Send
9	RI	CE	125	←	Ring Indicator

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงถึงหน้าที่ของขาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abbreviation	Full Name	Originator	Function
TD	Transmit Data	DTE	Serial data output (TXD) from DTE.
RD	Receive Data	DCE	Serial data input (RXD) to DTE.
CTS	Clear To Send	DCE	Tell DTE that DCE is ready to exchange data.
(D)CD	(Data) Carrier Detect	DCE	Carrier from remote DCE is detected.
DSR	Data Set Ready	DCE	Tell DTE that DCE is ready to establish a link.
DTR	Data Terminal Ready	DTE	Tell DCE that DTE is ready to establish a link.
RTS	Ready To Send	DTE	Tell DCE that DTE is ready to exchange data.
RI	Ring Indicator	DCE	Ringing signal from the phone line is detected.

ตารางที่ 2.3 แสดงสัญญาณต่างๆที่ส่งในรูปแบบอนุกรม

หน้าที่ของสัญญาณต่าง ๆ มีดังนี้

Protective ground เป็นจุดที่ต่อกับตัวเปลือกของอุปกรณ์ และไม่ต่อกับสัญญาณใด ๆ ในระบบเพื่อใช้ต่อลงดิน เป็นการป้องกันอันตรายจากไฟลัดวงจร และใช้เป็น Shield ป้องกันการรบกวน

Signal ground หรือ Common return เป็นจุดสำคัญที่สุดที่ต้องมีในระบบ RS-232 เพราะเป็นจุดอ้างอิงของทุกสัญญาณ ยกเว้น Protective ground

Transmit data เป็นสัญญาณข้อมูลที่ส่งจาก DTE ไปยัง DCE ในขณะที่ไม่ได้ส่งข้อมูลมันจะมีสถานะเป็น Logic "1" หรือ "Mark" หรือ "Off" หรือ -5V ถึง -15V ที่ด้านส่ง (DTE) หรือ -3V ถึง -15V ที่ด้านรับ (DCE) การส่งข้อมูลจะเกิดขึ้นได้ต้องมีสัญญาณควบคุมที่เกี่ยวข้อง "On" ก่อนคือ สัญญาณ RTS, CTS, (D)CD, DTR และ DSR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Recieve data เป็นสัญญาณข้อมูลจาก DCE มายัง DTE ในขณะที่ไม่ได้ส่งข้อมูลมันจะมีสถานะเป็น Logic "1" หรือ "Mark" หรือ "Off" หรือ -5V ถึง -15V ที่ด้านส่งหรือ -3V ถึง -15V ที่ด้านรับ ในขณะที่ไม่ได้ส่งข้อมูลมันจะมีสถานะเป็น Logic "1" หรือ "Mark" หรือ "Off" หรือ -5V ถึง -15V ที่ด้านส่ง (DCE) หรือ -3V ถึง -15V ที่ด้านรับ (DTE) กรณีที่เป็นการสื่อสารแบบ Half-duplex สัญญาณ RD จะอยู่สถานะ "Off" ขณะที่สัญญาณ RTS อยู่ในสถานะ "On" และสัญญาณ RD จะยังคงอยู่ในสถานะ "Off" อีกชั่วระยะหนึ่งหลังจากที่สัญญาณ RTS เปลี่ยนจากสถานะ "On" มาเป็น "Off" แล้วเพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลเสร็จสมบูรณ์

Request to send เป็นสัญญาณจาก DTE ส่งไปให้ DCE เพื่อขอส่งข้อมูลไป ปรกติจะอยู่ในสถานะ "Off" เมื่อต้องการส่งข้อมูลจะเปลี่ยนเป็นสถานะ "On" จนกว่าการส่งเสร็จสิ้นจึงเปลี่ยนกลับมาที่สถานะ "Off" ตามเดิม ทั้งนี้ทาง DTE ต้องได้รับสัญญาณ CTS จึงจะสามารถส่งข้อมูล TD ไปยัง DCE ได้ และสัญญาณ RTS ที่กลับสู่สถานะ "Off" จะไม่สามารถเปลี่ยนเป็น "On" ใหม่ขณะที่สัญญาณ CTS อยู่ในสถานะ "On" ต้องรอจนกว่าสัญญาณ CTS เปลี่ยนมาอยู่ในสถานะ "Off" ก่อน เพื่อป้องกันการเกิด Overrun

Clear to send เป็นสัญญาณที่ DCE ส่งให้ DTE เพื่อแจ้งว่าพร้อมรับการส่งข้อมูลจาก DTE

Data set ready เป็นสัญญาณที่ DCE ส่งให้ DTE เพื่อแจ้งว่า DCE สามารถเชื่อมโยงไปยังปลายทางและพร้อมที่จะติดต่อแล้ว

Data Terminal ready เป็นสัญญาณที่ DTE ส่งให้ DCE เพื่อแจ้งว่า DTE พร้อมหรือต้องการจะติดต่อสื่อสาร ซึ่งสัญญาณ DTR นี้ต้องเกิดก่อนทาง DCE จึงจะทำการติดต่อไปยังปลายทางและเมื่อติดต่อได้แล้วจึงส่งสัญญาณ DSR มายัง DTE เพื่อแจ้งให้รู้ว่าพร้อมรับการสื่อสารแล้ว และถ้า DTR เปลี่ยนเป็น Off แปลว่า DTE ไม่ต้องการติดต่อสื่อสารแล้วทาง DCE ก็จะปิดช่องสื่อสารและเปลี่ยนสัญญาณ DSR เป็น Off ทันที คู่สัญญาณระหว่าง RTS กับ CTS เป็นเรื่องของความพร้อมเกี่ยวกับช่องสื่อสารระหว่าง DTE กับ DCE ส่วนคู่สัญญาณ DTR กับ DSR เป็นเรื่องของความพร้อมเกี่ยวกับตัวอุปกรณ์ DTE กับ DCE

Data carrier detect เป็นสัญญาณที่ DCE ส่งให้ DTE เพื่อแจ้งว่าได้รับสัญญาณพาหะจาก DCE ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของการสื่อสาร ซึ่งหมายความว่า ช่องการสื่อสารระหว่าง DCE ทั้ง 2 ไม่ขาดตอน พร้อมที่จะทำการสื่อสารได้ ซึ่งอุปกรณ์ DTE หรือโปรแกรมที่ควบคุมการสื่อสารมักจะตรวจสัญญาณนี้ ถ้าไม่อยู่ที่ On แสดงว่าช่องการสื่อสารขาด ก็จะไม่ทำการรับหรือส่งข้อมูล

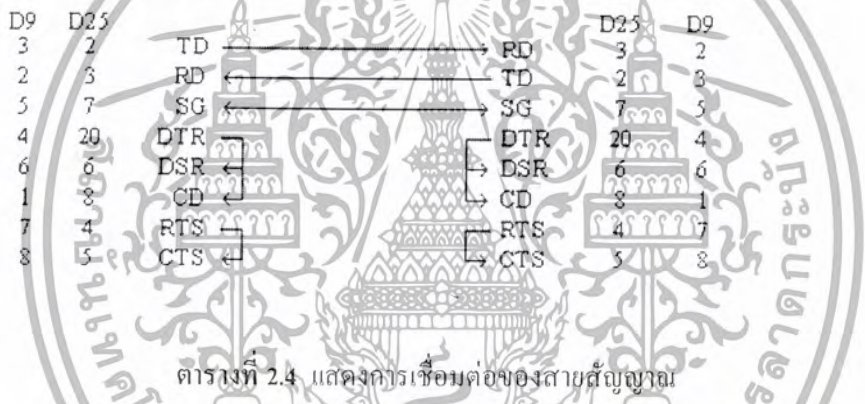
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ring Indicator เป็นสัญญาณจาก DCE แจ้งให้ DTE รู้ว่ามีการเรียกจาก DCE ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของการสื่อสาร ซึ่งมักจะใช้ในระบบ Automatic answering

อุปกรณ์ DCE บางรุ่นได้รับการออกแบบมาให้สามารถตรวจสอบระบบสื่อสารได้ด้วยการสั่งจาก DTE ให้ทำการ Loop back ทั้งจาก Local หรือ Remote ด้วยการใช้สัญญาณที่กล่าวมาทั้งหมดนี้

Null Modems

Null Modem ใช้สำหรับเชื่อมโยงระหว่าง DTE 2 ตัวเข้าด้วยกันโดยตรง ซึ่งโดยมากใช้ในการถ่ายข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ หรือใช้ในการพัฒนาระบบไมโครโปรเซสเซอร์



ตารางที่ 2.4 แสดงการเชื่อมต่อของสายสัญญาณ

Flow Control

การติดต่อระหว่าง DTE และ DCE จะมีการควบคุมการไหลของข้อมูล เพื่อไม่ให้เกิดการ Overflow ขึ้นได้ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ Hardware flow control และ Software flow control

สำหรับ Software flow control มักจะเรียกว่า Xon/Xoff flow control ซึ่งใช้รหัส ASCII 17 เป็นสัญญาณ Xon และใช้รหัส ASCII 19 เป็นสัญญาณ Xoff หลักการทำงานก็ง่าย ๆ คือ Modem จะมี Buffer อยู่ เมื่อ Modem รับข้อมูลจาก Computer จน Buffer ใกล้จะเต็ม มันก็จะส่งสัญญาณ Xoff ไปให้ Computer เพื่อให้ Computer หยุดส่งข้อมูลให้มันชั่วคราว และเมื่อ Buffer มีที่ว่างถึงระดับหนึ่ง Modem ก็จะส่งสัญญาณ Xon ไปให้ Computer เพื่อให้ Computer ส่งข้อมูลให้มันต่อ การ

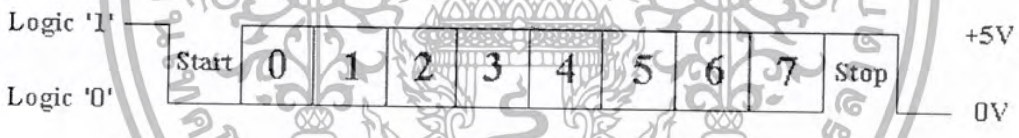
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมโดยวิธีนี้ประหยัดสายสัญญาณ เพราะรับ-ส่งผ่าน TD และ RD แต่อาจทำให้การสื่อสารช้าลง อย่างเห็นได้ชัดในกรณีที่ใช้กับการสื่อสารที่มี speed ต่ำ เพราะแต่ละตัวอักษร ASCII ที่รับ-ส่งจะมีขนาด 10 Bit

ส่วน Hardware flow control มักจะเรียกว่า RTS/CTS flow control จะใช้สายสัญญาณของ Serial Port ในการควบคุม ทำให้ไม่บั่นทอนความเร็วของข้อมูล หลักการทำงานคือ เมื่อ Modem มีที่ว่างเพื่อรับข้อมูล มันก็จะส่งสัญญาณ CTS ไปให้ Computer และเมื่อมันใกล้จะเต็ม มันก็จะหยุดส่งสัญญาณ CTS ไปให้ Computer

2.10 รูปคลื่น สัญญาณ RS-232

การสื่อสารโดย RS-232 เป็นการสื่อสารแบบ asynchronous หมายความว่าสัญญาณ clock ที่ใช้ควบคุมจังหวะไม่ได้ส่งไปพร้อมกับ Data แต่จะใช้ start bit เป็นตัว sync.ในแต่ละ word ของการสื่อสารและใช้สัญญาณ clock ภายในของแต่ละด้านเป็นตัวให้จังหวะเอง



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นของสัญญาณที่ส่ง

แสดงลักษณะของสัญญาณจาก UART เมื่อใช้ format แบบ 8N1 คือ 8 data bits ไม่มี parity bit และมี 1 stop bit ขณะที่ idle จะอยู่ในสถานะ "Mark" หรือ logic "1" การส่งจะเริ่มจากการส่ง start bit คือ logic "0" และตามด้วย LSB bit จนหมด data bits และถ้ามี parity bit ก็จะส่งที่จุดนี้แล้วลงท้ายด้วย stop bit ซึ่งมีค่าเป็น logic "1" ในรูปได้แสดง bit ที่ต่อถัดจาก stop bit ซึ่งมีค่าเป็น logic "0" หมายความว่าเป็น start bit ของ การส่ง word ถัดไป แต่ถ้ายังไม่มีการส่ง word ถัดไป ก็ต้องอยู่ในสถานะของ logic "1" ซึ่งเป็นสถานะของ idle และถ้าสายอยู่ในสถานะของ logic "0" นานกว่าเวลาของการส่ง 1 full word ระบบจะถือว่าเป็นสัญญาณ "Break" เพื่อหยุดการสื่อสาร ดังนั้นต้องไม่ลืมที่จะสั่งในสายกลับสู่สถานะ idle เมื่อสิ้นสุดการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

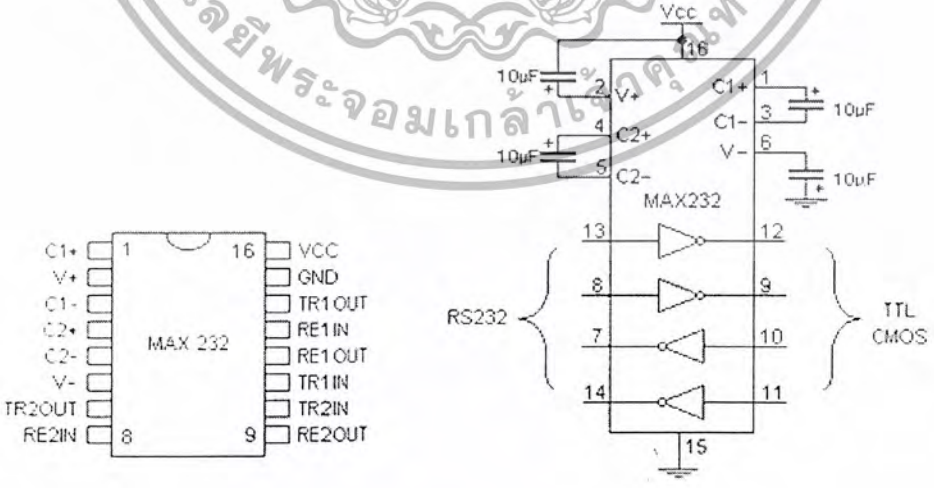
การรับ-ส่งข้อมูลในลักษณะนี้เรียกว่าแบบ frame คือมีกรอบปิดล้อมข้อมูลไว้ด้วย start bit และ stop bit

ตัวแปลงสัญญาณ RS-232

สัญญาณ RS-232 มีค่าแรงไฟต่างจากที่ใช้ใน UART ดังนั้นจึงต้องมีตัวแปลงสัญญาณ เพื่อแปลงระดับสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะเชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรม หรือ RS-232 port ของคอมพิวเตอร์

สัญญาณ RS-232 นั้น logic "0" จะมีค่า +3 V ถึง +25 V และ logic "1" จะมีค่า –3 V ถึง –25 V ส่วนค่าระหว่าง –3 V ถึง +3 V เป็นค่า undefined ระดับสัญญาณนี้ใช้กับทุกสัญญาณไม่ใช่เฉพาะสัญญาณรับ-ส่งข้อมูลเท่านั้นแต่ยังรวมถึงสัญญาณควบคุมต่าง ๆ เช่น DTR, RTS, CTS เป็นต้น

IC ที่ใช้มักจะเป็นเบอร์ 1488 (RS-232 Driver) และ 1489 (RS-232 Receiver) โดยภายในแต่ละตัวจะประกอบด้วย inverter 4 ตัวและต้องการไฟเลี้ยง 2 ชุดคือ +7.5 V ถึง +15 V และ –7.5 V ถึง –15 V ซึ่งอาจจะมีปัญหาในเครื่องที่มีไฟเลี้ยง +5 V เพียงชุดเดียว แต่ก็ยังมี IC อีกตัวหนึ่งคือเบอร์ MAX-232 ซึ่งมีวงจร charge pump สามารถสร้างไฟ +10 V และ –10 V จากไฟ +5 V ได้ พร้อมทั้งมี 2 Tx และ 2 Rx อยู่ใน package เดียวกัน และรองรับ baud rate ได้ถึง 120 Kbps จึงสะดวกมากเพราะใช้ IC เพียงตัวเดียว รูปข้างล่างคือ MAX-232



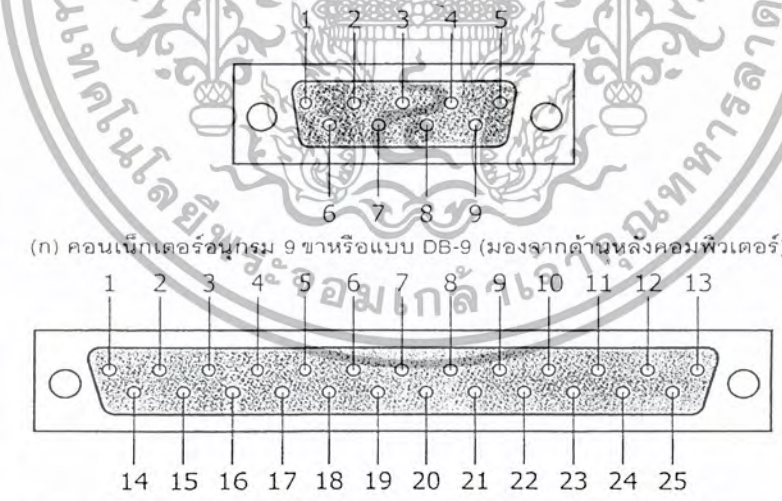
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างภายในและตำแหน่งขาต่างๆของ Max232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการที่เราจะนำข้อมูลมาใช้งานก็ต้องแปลงเป็น parallel ก่อนซึ่งเป็นหน้าที่ของ UART ซึ่งปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์มักจะมี serial communication interface (SCI) อยู่ในตัว แต่อาจจะมีงานบางอย่างที่ไม่ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และต้องการประมวลผลข้อมูลกับพอร์ตอนุกรม เช่น ต่อ ADC เข้ากับ UART หรือต่อ LCD display เข้ากับ Serial comm. ก็ต้องใช้ UART ช่วย เช่น เบอร์ 8250 หรือ 16550A หรือเบอร์อื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่มี UART อีกพวกหนึ่งที่แยก Tx bus กับ Rx bus ออกจากกัน ทำให้มีความคล่องตัวมากขึ้น

2.11 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS – 232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB- 25 ตัวผู้หรือ DB-9 ตัวผู้ ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้นเช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆที่เคยใช้งานในอดีต ปัจจุบันมีการใช้งานไม่มากนัก จึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาในรูปที่ 2.18



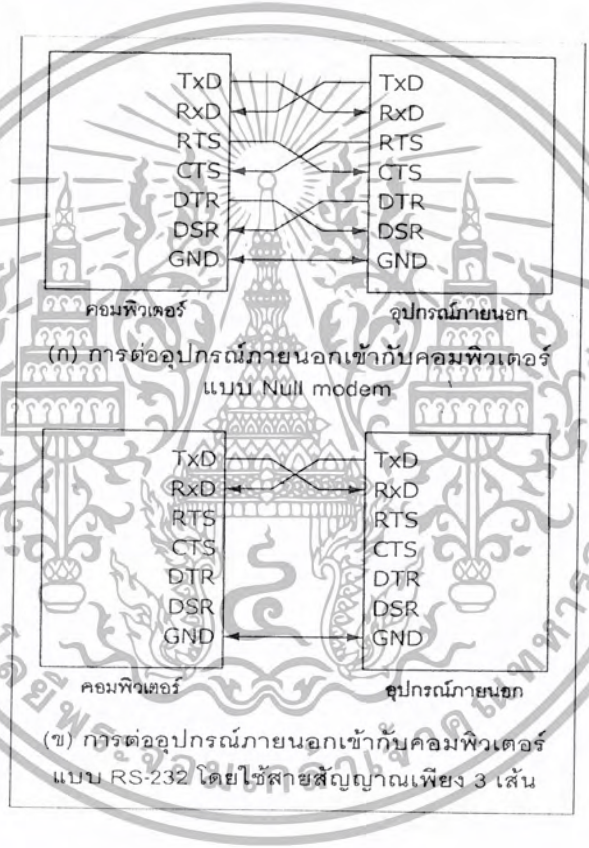
(ก) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)

(ข) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 25 ขาหรือแบบ DB-25 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)

รูปที่ 2.18 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบDB-9 & DB-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.19 ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางของข้อมูล ในรูปที่ 2.19 (ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem หรือการเชื่อมต่อโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านโมเด็ม โดยมีการตรวจสอบหรือแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบส่วนในรูปที่ 2.19 (ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้นโดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นหนึ่งสำหรับรับข้อมูล และเส้นสุดท้ายเป็นกราวด์



รูปที่ 2.19 แสดงการต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเน็กเตอร์ DB-9	คอนเน็กเตอร์ DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	ชนิดของสายสัญญาณ
1	8	Data Cattier Detect : DBD	อินพุต
2	3	Received Data : RxD	อินพุต
3	2	Trasmitted Data : TxD	เอาต์พุต
4	20	Data Terminal Ready : DTR	เอาต์พุต
5	7	Sinnal Ground : GND	-
6	6	Data Set Ready : DSR	อินพุต
7	4	Request To Send : RTS	เอาต์พุต
8	5	Clear To Send : CTS	อินพุต
9	22	Ring Indicator : RI	อินพุต

ตารางที่ 2.5 แสดงตำแหน่งขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS-232 แบบ DB9 และ DB25

2.12 หน้าที่การทำงานแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS-232

- Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขานี้จะแอกทีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาร์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลเช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก
- Receive Data : RD หรือ RXD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์โดยนำข้อมูลที่อ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์ บัฟเฟอร์
- Transmitted Data : TD หรือ TXD ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลออกไป
- Data Terminal Ready : DTR เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่า ต้องการติต่อด้วย โดย ขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ ถ้าใช้การเชื่อมต่อแบบ Null Modem ซึ่งใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 เส้น จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน และต้องต่อกับขา DCD ด้วย ในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์
- Signal Ground : GND ขากราวด์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Data Set Ready : DSR ขานี้จะใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรับข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR
- Request To Send : RTS เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RST ก็คือ ขา CTS ในกรณีที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ Null modem 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อขา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา
- Clear Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น

2.13 UART

UART มาจากคำว่า Universal Asynchronous Receiver Transmitted ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนั่นเอง สำหรับการสื่อสารอนุกรมบนคอมพิวเตอร์แล้ว UART ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการสื่อสารอนุกรม

หน้าที่หลักของ UART คือหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบขนานจากคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมแบบอะซิงโครนัส แล้วส่งออกไป และทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนุกรมแบบอะซิงโครนัสที่ป้อนเข้ามายัง UART ให้เป็นแบบขนานก่อนที่จะส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งนอกจาก UART จะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์แล้ว ยังแจ้งข้อมูลอื่นๆ ให้คอมพิวเตอร์รับทราบด้วย เช่น อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล (บอดเรต), รูปแบบการส่งข้อมูล, ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล (ผิดพลาดจากพาริตี้, เฟรมข้อมูล, โอเวอร์รัน) เป็นต้น

ภายใน UART จะมีส่วนของวงจรสร้างบอดเรตแบบโปรแกรมได้ (programmable buadrate generator) โดยการกำหนดค่าตัวหารให้กับสัญญาณนาฬิกาของ UART สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (half duplex) และฟูลดูเพล็กซ์ (full duplex) โดยการส่งแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์เป็นการส่งแบบทิศทางเดียว ส่วนการส่งแบบฟูลดูเพล็กซ์ นั้นสามารถรับและส่งได้ในคราวเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.1 ชนิดของ UART

ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปมี UART ที่ใช้งานกันอยู่ 2 เบอร์คือ 8250 ซึ่งเป็น UART มาตรฐานที่มีใช้กันมายาวนาน UART เบอร์นี้จะมีบัฟเฟอร์สำหลับรับและส่งข้อมูลตำแหน่งเดียวกัน ทำให้การรับและส่งข้อมูลถูกจำกัดความเร็วอยู่ที่ 5706 กิโลบิตต่อวินาทีเท่านั้น แต่ UART เบอร์นี้ก็ถือว่าเป็นต้นแบบของ UART ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์ทุก ๆ รุ่นจะต้องสนับสนุนการทำงานตามรูปแบบของ UART เบอร์นี้

UART อีกเบอร์หนึ่งคือ 16450 มีความสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ความเร็ว 115,200 บิตต่อวินาที และเพิ่มรีจีสเตอร์สำหรับพักข้อมูลสำหรับ UART นอกจากนั้นยังเพิ่มส่วนของชิฟต์รีจีสเตอร์แบบ FIFO (First In First Out) ขนาด 16 ไบต์เข้าไป ทำให้สามารถสนับสนุนความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 256 กิโลบิตต่อวินาทีได้ โดยคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันใช้ UART เบอร์นี้หรือใหม่กว่า เช่น เบอร์ TL16C750 ซึ่งมีรีจีสเตอร์แบบ FIFO ขนาด 64 ไบต์ ทำงานได้ที่ระดับแรงดัน +5V และ +3V มีโหมดประหยัดพลังงานสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาทีเมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz

อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการส่งข้อมูลที่มากมายของ UARTเบอร์ใหม่ ๆ ก็ไม่ได้ช่วยให้การรับส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์เร็วขึ้น เนื่องจากว่าคอมพิวเตอร์ยังใช้ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาในการแปลงข้อมูลเพียง 1.8432 MHz เท่านั้น

2.14 วงจรภายในและรีจีสเตอร์ของพอร์ตอนุกรม RS-232

เครื่องคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปสามารถต่อพอร์ตอนุกรม RS-232 สูงสุดได้ 4 พอร์ต ซึ่งจะมีชื่อเรียกเป็น COMI, COM2, COM3 และ COM4 ซึ่งพอร์ตอนุกรมแต่ละตัวต่างก็ใช้งาน UART ภายในคอมพิวเตอร์ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเช่นเดียวกัน

การทำงานภายในของพอร์ตอนุกรม ประกอบไปด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต 8 ตัวที่ใช้งานร่วมกับ UART แอดเดรสของรีจิสเตอร์ภายในพอร์ตอนุกรมสามารถคำนวณได้จากค่ารีจิสเตอร์พื้นฐานของพอร์ตอนุกรม ยกตัวอย่าง พอร์ตอนุกรม COM1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 3F8H ตำแหน่งของรีจิสเตอร์ต่างๆ จะเป็นตำแหน่งที่บวกเข้าไปกับค่า 3F8H โดยรีจิสเตอร์ที่ใช้งานกับพอร์ตอนุกรมมีดังนี้

00H เป็นรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับเก็บข้อมูลที่รับเข้ามาหรือเตรียมข้อมูลก่อนที่จะส่งออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

01H รีจิสเตอร์อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์ ใช้ในการเซตโหมดการอินเตอร์รัพต์ของพอร์ตอนุกรม

02H รีจิสเตอร์แสดงโหมดการอินเตอร์รัพต์ ใช้เพื่อตรวจสอบโหมดของการอินเตอร์รัพต์เมื่อมีการอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้น

03H รีจิสเตอร์กำหนดรูปแบบของข้อมูล

04H รีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม ใช้ตรวจสอบิตสำหรับติดต่อกับโมเด็ม เช่น RTS หรือ DTR

05H รีจิสเตอร์แสดงสถานะการรับและการส่งข้อมูลแบบอนุกรม

06H รีจิสเตอร์แสดงสถานะของโมเด็ม ซึ่งจะแสดงสถานะของขา DCD, RI, DSR และ CTS

07H รีจิสเตอร์สำหรับการเก็บข้อมูลชั่วคราว

2.14.1 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 00H: รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์

เป็นรีจิสเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลที่รับเข้ามาและข้อมูลที่จะส่งออกไป โดยการติดต่อกับรีจิสเตอร์นี้เพื่อเก็บข้อมูลที่ต้องการจะส่งจะต้องกำหนดให้บิต DLAB ในรีจิสเตอร์กำหนดรูปแบบข้อมูล (03H) จะต้องมีสถานะเป็น 0 ซึ่งการเขียนข้อมูลมายังแอดเดรสนี้ เป็นการส่งข้อมูลไปยังรีจิสเตอร์ส่งข้อมูลและข้อมูลจะถูกส่งออกไปแบบอนุกรม สำหรับการรับข้อมูล เมื่อข้อมูลที่รับเข้ามาเรียบร้อยและแปลงเป็นแบบขนานแล้ว ข้อมูลจะถูกส่งมายังรีจิสเตอร์เก็บข้อมูล หลังจากมีการอ่านรีจิสเตอร์นี้ออกไปรีจิสเตอร์นี้จะถูกเคลียร์ และเตรียมพร้อมสำหรับการรับข้อมูลในไบต์ต่อไป

2.14.2 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 01H: รีจิสเตอร์อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์

เป็นรีจิสเตอร์สำหรับการอีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์ ซึ่งเป็นการกำหนดให้ UART สร้างสัญญาณอินเตอร์รัพต์ขึ้นมา ฟังก์ชันการทำงานในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์นี้มีดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	SINP	ERBK	TBE	RxRD

บิต 4-7 บิตเหล่านี้ไม่ถูกใช้งาน กำหนดให้เท่ากับ "0"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SINP อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสถานะที่ขาอินพุท (CTS , DSR , DCDหรือขา RI

"1" อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์

"0" ไม่มีการใช้อินเตอร์รัพต์รูปแบบนี้หรือดิสเอเบิล

ERBK อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์เนื่องจากเกิดความผิดพลาดขึ้นด้วยสาเหตุจากพาริตี้, โอเวอร์รัน, เฟรมข้อมูล หรือการเบรกข้อมูล

"1" อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์

"0" ไม่มีการใช้อินเตอร์รัพต์รูปแบบนี้หรือดิสเอเบิล

TBE อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์เมื่อรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลว่าง

"1" อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์

"0" ไม่มีการใช้อินเตอร์รัพต์รูปแบบนี้หรือดิสเอเบิล

RxED อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์เนื่องจากรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ได้รับข้อมูลเรียบร้อย

"1" อีนาเบิลการอินเตอร์รัพต์

"0" ไม่มีการใช้อินเตอร์รัพต์รูปแบบนี้หรือดิสเอเบิล

2.14.3 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 02H: รีจิสเตอร์แสดงโหมดและสถานการณ์อินเตอร์รัพต์

มีรายละเอียดของแต่ละบิตดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	0	ID1	ID0	PND

บิต 3-7 ไม่ได้ใช้งาน อ่านค่าได้เท่ากับ "0"

ID1, ID0 ใช้งานร่วมกันเพื่อแจ้งสาเหตุของการเกิดอินเตอร์รัปต์

"00" เกิดการอินเตอร์รัปต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขาอินพุตขึ้น *การอินเตอร์รัปต์แบบนี้มีนัยสำคัญเป็นอันดับ 4*

"01" เกิดการอินเตอร์รัปต์เนื่องจากรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ส่งข้อมูลว่างขึ้น *การอินเตอร์รัปต์แบบนี้มีนัยสำคัญเป็นอันดับ 3*

"10" เกิดการอินเตอร์รัปต์เนื่องจากข้อมูลถูกเก็บลงในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว การอินเตอร์รัปต์แบบนี้มีนัยสำคัญเป็นอันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"11" เกิดการอินเตอร์รัปต์เนื่องจากความผิดพลาดในการถ่ายทอดข้อมูลหรือเกิดการเบรก (break: เกิดการหยุดถ่ายทอดข้อมูลกะทันหัน) การอินเตอร์รัปต์แบบนี้มีนัยสำคัญเป็นอันดับ 1 หรือมีนัยสำคัญสูงสุด

PND ใช้แสดงสถานะของการเกิดอินเตอร์รัปต์

"1" แสดงว่าไม่มีการอินเตอร์รัปต์

"0" แสดงว่ามีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

เมื่อมีการสร้างสัญญาณอินเตอร์รัปต์ขึ้น จะต้องมีการเคลียร์ค่าก่อนที่จะให้เกิดอินเตอร์รัปต์ครั้งต่อไป โดยสามารถทำได้ดังนี้คือ

- ถ้าเกิดอินเตอร์รัปต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขาอินพุตจะต้องอ่านค่าจากรีจิสเตอร์แสดงสถานะของโมเด็ม (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 06H) เพื่อเคลียร์ค่าการอินเตอร์รัปต์
- ถ้าเกิดการอินเตอร์รัปต์เนื่องจากบัฟเฟอร์ส่งข้อมูลว่าง จะต้องเขียนข้อมูลไปยังรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ส่งข้อมูล (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 00H) หรืออ่านค่ารีจิสเตอร์แสดงสถานะอินเตอร์รัปต์ (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 02H) เพื่อเคลียร์ค่าการอินเตอร์รัปต์
- ถ้าเกิดอินเตอร์รัปต์เนื่องจากการเก็บข้อมูลลงในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูลเรียบร้อย จะต้องเคลียร์ค่าอินเตอร์รัปต์โดยการอ่านข้อมูลจากรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์
- ถ้าเกิดอินเตอร์รัปต์เนื่องจากความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลหรือเกิดการเบรก จะต้องเคลียร์ค่าอินเตอร์รัปต์ โดยการอ่านค่ารีจิสเตอร์แสดงสถานะการรับและส่งข้อมูลแบบอนุกรม

2.14.4 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 03H: รีจิสเตอร์กำหนดรูปแบบของข้อมูล

มีรายละเอียดหน้าที่ของแต่ละบิตดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
DLAB	BRK	PAR2	PAR1	PAR0	STOP	DAB1	DAB0

DLAB ใช้ในการกำหนดหน้าที่การทำงานของรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ (00H)

"1" เป็นการเข้าสู่โหมดการหาร่ค่าบอดเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"0" เป็นการเข้าถึงรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 00H) และรีจิสเตอร์สำหรับอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์ (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 01H)

เมื่อบิต DLAB เป็น "1" รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ (00H) และรีจิสเตอร์อีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์ (01H) จะใช้สำหรับโหลดค่าการหารความถี่สำหรับกำหนดค่าบอดเรต โดยรีจิสเตอร์ 00H เก็บค่าตัวหารไบต์ต่ำ ส่วนรีจิสเตอร์ 01H ใช้เก็บค่าตัวหารไบต์สูง การหาค่าบอดเรตสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

บอดเรต = 115200/ค่าตัวหาร 16 บิต

ค่าตัวเลข 115200 มาจากความถี่ของคริสตอลในวงจร UART ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยคริสตอลที่ใช้มีความถี่ 1.8432 MHz วงจรภายใน UART จะทำการหารค่าความถี่นี้ด้วย 16 ทำให้ได้ค่าความถี่ 115200 Hz ออกมา

ค่าตัวหาร 16 บิต = ข้อมูลในรีจิสเตอร์ 00H + (256 x ข้อมูลในรีจิสเตอร์ 01H)

สมมติว่าต้องการค่าบอดเรตเท่ากับ 9600 ค่าตัวหารที่ใช้จะต้องมีค่าเท่ากับ 12 ซึ่งค่านี้จะต้องถูกโหลดลงในรีจิสเตอร์ 00H และโหลดค่า 0 ลงไปในรีจิสเตอร์ 01H

ค่าตัวหารที่ทำให้เกิดค่าบอดเรตสูงสุดที่ 115200 บิตต่อวินาที คือค่า 0001 นั่นคือรีจิสเตอร์ 00H มีค่าเท่ากับ 1 และรีจิสเตอร์ 01H มีค่าเท่ากับ 0

BRK ใช้ควบคุมการหยุดถ่ายทอดข้อมูล

"1" สามารถหยุดหรือเบรกได้

"0" ไม่มีการหยุดหรือเบรกได้

PAR2, PAR1, PAR0 ใช้เพื่อกำหนดบิตพาริตี้

"000" ไม่ใช้พาริตี้

"001" กำหนดพาริตี้คี่

"011" กำหนดพาริตี้คู่

"101" มาร์ก (mark)

"111" ช่องว่าง (space)

STOP ใช้กำหนดจำนวนบิตปิดท้าย

"1" มีบิตปิดท้าย 2 บิต

"0" มีบิตปิดท้าย 1 บิต

DAB1, DAB0 ใช้ร่วมกันในการกำหนดจำนวนบิตของข้อมูลที่ต้องการถ่ายทอด

"00" จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 5 บิต

"01" จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 6 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"10" จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 7 บิต

"11" จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 8 บิต

2.14.5 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 04H: รีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม

มีรายละเอียดหน้าที่ของแต่ละบิตดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	LOOP	OUT2	OUT1	RTS	DTR

บิต 5-7 ไม่มีการใช้งาน อ่านค่าได้เท่ากับ 0

LOOP "1" อีนาเบิลการส่งค่ากลับ

"0" ดิสเอเบิล

OUT1, OUT2 "1" อีนาเบิลการใช้งานภายใน

"0" ดิสเอเบิล

RTS ใช้ควบคุมการทำงานของขา RTS (Ready To Send)

"1" อีนาเบิล

"0" ดิสเอเบิล

DTR ใช้ควบคุมการทำงานของขา DTR (Data Terminal Ready)

"1" อีนาเบิล

"0" ดิสเอเบิล

2.14.6 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 05H: รีจิสเตอร์แสดงสถานะการรับและส่งข้อมูลอนุกรมของ UART

ใช้งานร่วมกับรีจิสเตอร์แสดงโหมดและสถานะของการอินเตอร์รัปต์ (รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 02H) เพื่อแสดงสาเหตุของการเกิดอินเตอร์รัปต์ มีรายละเอียดหน้าที่ของแต่ละบิตดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	TXE	TBE	BREK	FRME	PARE	OVFE	RxRD

TXE (Transmitter Empty) "1" แสดงว่ารีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลว่าง
"0" แสดงว่ายังคงมีข้อมูล 1 ไบต์เก็บอยู่ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล

TBE (Transmitter Buffer Empty) "1" รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลว่าง
"0" ยังคงมีข้อมูล 1 ไบต์เก็บอยู่ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล

BREK (Break) "1" UART ตรวจพบการเบรก
"0" ไม่มีการเบรก

FRME (Frame Error) "1" UART ตรวจพบความผิดพลาดด้านเฟรมข้อมูล
"0" ไม่พบความผิดพลาดด้านเฟรมข้อมูล

PARE (Parity Error) "1" UART ตรวจพบความผิดพลาดทางพาริตี้
"0" ไม่พบความผิดพลาดทางพาริตี้

OVRE (Overrun Error) "1" UART ตรวจพบความผิดพลาดแบบโอเวอร์รัน
"0" ไม่พบความผิดพลาดแบบโอเวอร์รัน

RxRD (Received Data Ready) "1" มีการรับข้อมูลเข้ามาเก็บไว้ในบัฟเฟอร์
"0" ไม่มีข้อมูล

2.14.7 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 06H: รีจิสเตอร์แสดงสถานะของโมเด็ม

ใช้เพื่อกำหนดสถานะสัญญาณอินพุต ของพอร์ตอนุกรม RS-232 ซึ่งได้แก่ สัญญาณ DCD, DSR, CTS และ RI สำหรับการเชื่อมต่อใช้งานแบบอเนกประสงค์ ดังมีรายละเอียดหน้าที่ของแต่ละบิตต่อไปนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
DCD	RI	DSR	CTS	DDCD	DRI	DDSR	DCTS

DCD ใช้แสดงสภาวะของขา DCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"1" แสดงว่าที่ขา DCD เป็นลอจิก "1"

"0" แสดงว่าที่ขา DCD เป็นลอจิก "0"

RI ใช้แสดงสภาวะของขา RI

"1" แสดงว่าที่ขา RI เป็นลอจิก "1"

"0" แสดงว่าที่ขา RI เป็นลอจิก "0"

DSR ใช้แสดงสภาวะของขา DSR

"1" แสดงว่าที่ขา DSR เป็นลอจิก "1"

"0" แสดงว่าที่ขา DSR เป็นลอจิก "0"

DCTS (Delta Clear to Send) ใช้แจ้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของบิต CTS

"1" แสดงว่าบิต CTS (Clear To Send) เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบจากการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

"0" แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

DDSR (Delta Data Set Ready) ใช้แจ้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของบิต DSR

"1" แสดงว่าบิต DSR (Data Set Ready) เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบจากการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

"0" แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

DRI (Delta Ring Indicator) ใช้แจ้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของบิต RI

"1" แสดงว่าบิต RI (Ringing Indicator) เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบจากการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

"0" แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

DDCD (Delta Data Carrier Detect) ใช้แจ้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของบิต DDCD

"1" แสดงว่าบิต CTS (Clear to Send) เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบจากการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

"0" แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับการอ่านค่าครั้งที่แล้ว

DCTS (Delta Clear to Send) ใช้แสดงสภาวะของขา CTS

"1" แสดงว่าที่ขา CTS เป็นลอจิก "1"

"0" แสดงว่าที่ขา CTS เป็นลอจิก "0"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.8 รีจิสเตอร์ตำแหน่ง 07H: รีจิสเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลชั่วคราว

ทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำแรมขนาด 1 ไบต์ การอ่านและเขียนข้อมูลที่รีจิสเตอร์ตัวนี้ไม่ส่งผลใดๆ ต่อการใช้งาน UART

2.15 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของพอร์ต RS-232

สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ควบคุม (RTS และDTR) และสัญญาณแสดงสถานะอินพุต (CTS , DSR และ DCD) ของพอร์ตอนุกรม RS-232 จะถูกกลับสถานะภายในตัว UART ส่วนสัญญาณข้อมูลทั้งภาคส่งและรับจะไม่ถูกกลับสถานะ UART จะให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นแบบทีทีแอลเท่านั้น ดังนั้นเมื่อสัญญาณถูกส่งออกมาจาก UART จึงต้องส่งเข้าสู่วงจรขับเพื่อปรับระดับแรงดันให้ได้ระดับสัญญาณเป็นไปตามมาตรฐาน RS-232 ก่อนส่งออกไปจากคอมพิวเตอร์ สำหรับอุปกรณ์ต่อเชื่อมปลายทางก็จะต้องมีวงจรขับในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน เพื่อให้ได้ระดับสัญญาณในระดับเดียวกัน แต่วงจรขับที่ใช้ทั้งภายในคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ต่อเชื่อมปลายทางนั้นจะถูกกลับสถานะ

2.16 แอดเดรสของพอร์ตอนุกรม

แอดเดรสพื้นฐานของพอร์ตอนุกรมมี 4 ตำแหน่งดังนี้คือ

COM1: 3F8H

COM2: 2F8H

COM3: 3E8H

COM4: 2E8H

เมื่อเริ่มเปิดเครื่องเพื่อใช้งานคอมพิวเตอร์ ไบออสภายในคอมพิวเตอร์จะทำการตรวจสอบแอดเดรสของพอร์ตอนุกรมทั้งหมด ถ้าไบออสตรวจพบแอดเดรสของพอร์ตอนุกรม ไบออสจะนำแอดเดรสที่ตรวจพบไปเก็บไว้ในหน่วยความจำขนาด 2 ไบต์ สำหรับพอร์ตอนุกรม COM1 จะเก็บไว้ที่แอดเดรส 0000:0400H และ 0000:0401H ส่วนตำแหน่งอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

COM2 = 0000:00402H – 0000:0403H

COM3 = 0000:0404H – 0000:0405H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COM4 = 0000:0406H – 0000:0407H

นอกจากนี้ที่หน่วยความจำแอดเดรส 0000: 0411H ยังใช้สำหรับแสดงจำนวนของพอร์ตอนุกรมที่มีใช้อยู่ในคอมพิวเตอร์อีกด้วย โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.6

บิต 3	บิต 2	บิต 1	จำนวนพอร์ต
0	0	0	ไม่มีพอร์ตอนุกรม
0	0	1	มีพอร์ตอนุกรม 1 พอร์ต
0	1	0	มีพอร์ตอนุกรม 2 พอร์ต
0	1	1	มีพอร์ตอนุกรม 3 พอร์ต
1	0	0	มีพอร์ตอนุกรม 4 พอร์ต

ตารางที่ 2.6 แสดงข้อมูลในแอดเดรส 0000:0411H ที่ใช้แจ้งจำนวนพอร์ตอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 การเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมกับระบบบัส I^2C

I^2C ย่อมาจาก Inter-IC Communication หมายถึง การติดต่อสื่อสารระหว่างไอซีโดยบัส I^2C ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยฟิลิปส์(Philips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อ สั่งงาน และควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น เส้นหนึ่งคือ สายข้อมูล อีกเส้นหนึ่งคือสายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I^2C ทำได้ง่ายมาก เพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัว จะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสภาวะลอจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว

สายข้อมูลบนบัส I^2C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สายข้อมูลอนุกรม หรือ SDA (Serial Data line) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกามีชื่อเรียกว่า สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรม หรือ SCL (Serial Clock line) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า สาย SDA และ SCL

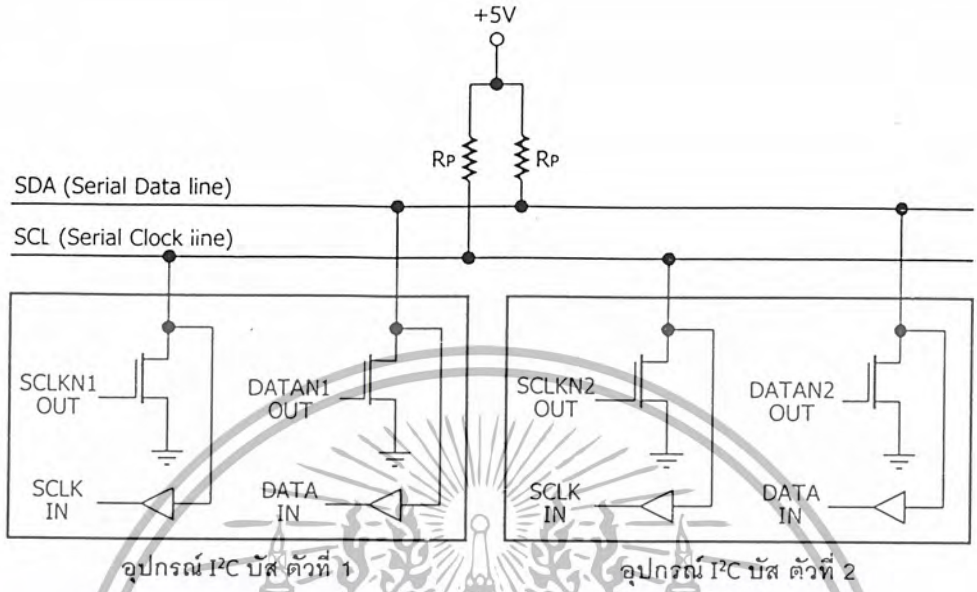
อุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อด้วยบัส I^2C มีหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นไอซีขยายพอร์ต (I/O Expander) ไอซีแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล(ADC) และแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอก(DAC) ไอซีรีลไทม์คล็อก(RTC) ไอซีขับโมดูล LCD หน่วยความจำอีอีพรอม และไมโครคอนโทรลเลอร์

คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C

สาย SDA และ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (bi-directional line) ต้องมีการต่อตัวต้านทานพูลอัพกับแรงดัน +5V ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงในขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน ทั้งยังช่วยในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสองวงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I^2C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรเดรนเปิด (open-drain) หรือคอลเล็กเตอร์เปิด (open-collector) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.20

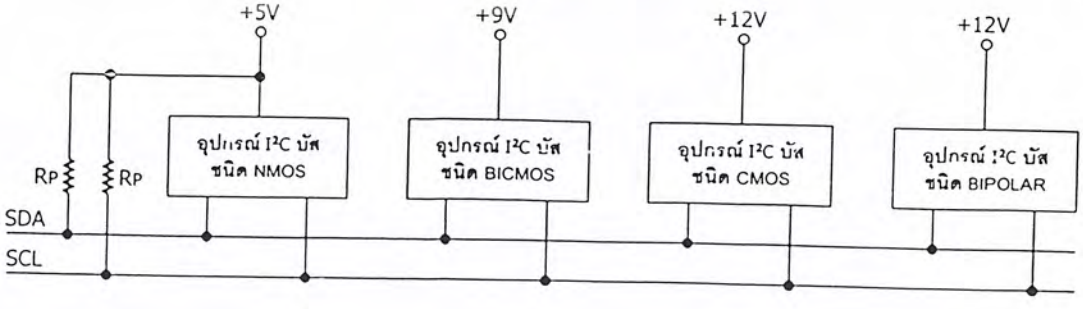
อัตราการถ่ายทอดข้อมูลบนบัส I^2C สูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปกติ และสูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง อุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่บนบัส I^2C จะต้องมีค่าความจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นระหว่างสาย SDA และ SDL ไม่เกิน 400 pF การเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C มี 2 แบบคือ แบบ 7 บิต หรือ 10 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 โครงสร้างวงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อบนระบบบัส I^2C

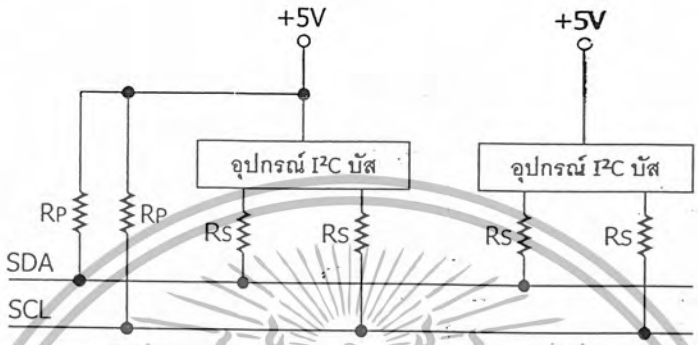
ข้อเด่นอีกประการหนึ่งของบัส I^2C คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยอุปกรณ์บนบัส I^2C ตัวหนึ่งอาจใช้ไฟเลี้ยง +5V ในขณะที่อีกตัวหนึ่งใช้ไฟเลี้ยง +12V การต่อร่วมกันบนบัส I^2C สามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกับกรณีที่อุปกรณ์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยงเท่ากัน กล่าวคือ ให้ต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน และต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ(R_p) เข้ากับแรงดัน +5V ไว้ด้วยเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์บนระบบบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อาจมีแรงดันไฟกระชากขนาดใหญ่ปะปนเข้ามาในบัส I²C ที่ขา SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวต้องต่อตัวต้านทานอนุกรมกับขา SDA และ SCL เรียกว่า R_s ก่อนต่อเข้าสู่บัส I²C ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การต่อตัวต้านทานเพื่อป้องกันแรงดันกระชากที่อาจปะปนเข้ามาในไฟเลี้ยงของอุปกรณ์ในระบบบัส I²C

หลักการของบัส I²C

บัส I²C ประกอบด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ SDA และ SCL อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงบนบัสสามารถมีได้มากมาย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบของการติดต่อบนบัส หรือเรียกว่าโปรโตคอล(Protocal) เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่า ขณะนี้อุปกรณ์ใดติดต่อกันอยู่ และอุปกรณ์ตัวใดเป็นตัวรับหรือตัวส่ง ต่อไปนี้จะขออธิบายลักษณะ หน้าที่ และนิยามของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I²C เพื่อเป็นข้อตกลงพื้นฐานก่อนที่จะอธิบายการทำงานของบัส I²C ต่อไป

อุปกรณ์ที่เป็นผู้สร้างข้อมูลหรือส่งข้อมูล เรียกว่า ตัวส่ง (transmitter)

อุปกรณ์ที่เป็นผู้รับข้อมูล เรียกว่า ตัวรับ (receiver)

ในอุปกรณ์บนบัส I²C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง บางอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวรับเพียงอย่างเดียว จะไม่มีอุปกรณ์ใดบนบัส I²C ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งเพียงอย่างเดียว

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการทำงานหรือการติดต่อบนบัส I²C เรียกว่า มาสเตอร์ (Master)

อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I²C เรียกว่า (Slave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนด 2 ประการสำคัญของการติดต่อบนบัส I^2C คือ

1. การถ่ายทอดข้อมูลจะเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น

2. ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูง สายข้อมูลต้องรักษาข้อมูลเอาไว้ อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเด็ดขาด มิฉะนั้น สัญญาณที่เกิดขึ้นจะได้รับการแปลความหมายเป็นสัญญาณควบคุมแทน

สภาวะที่เกิดขึ้นบนบัส I^2C

มีด้วยกัน 5 สภาวะ ดังนี้

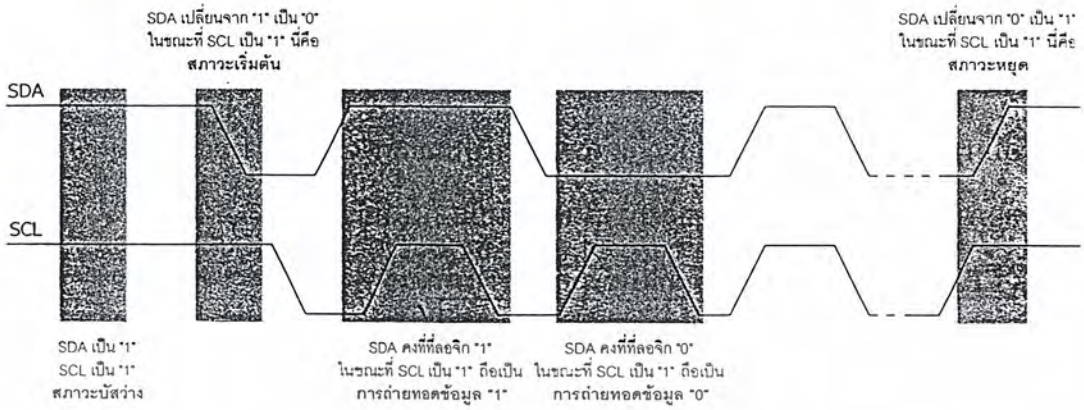
1. บัสว่าง (Bus not busy) สภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่อสถานะลอจิกบนสาย SDA และ SCL เป็นลอจิกสูงทั้งคู่ นั่นหมายความว่า การถ่ายทอดข้อมูลสามารถเริ่มต้นขึ้นได้

2. เริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูล (start data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA เปลี่ยนระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาวะเริ่มต้น (start)

3. ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส (data valid) สภาวะนี้เกิดขึ้นถัดจากสภาวะเริ่มต้น โดยสถานะลอจิกที่เกิดขึ้นบนสาย SDA ก็คือข้อมูลที่ทำการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ข้อมูลในขณะนั้นว่า เป็น "0" หรือ "1" ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการให้เกิดการถ่ายทอดข้อมูลอย่างสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่บน SDA ต้องคงที่ตลอดช่วงเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะลอจิกในขณะที่สาย SCL มีลอจิกสูงอยู่นั้น อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ทำการถ่ายทอดข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสภาวะหยุดหรือสภาวะเริ่มต้นก็ได้ ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้น

4. รับข้อมูล (acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากที่การถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิตเรียกว่า บิตรับรู้(acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์มาสเตอร์จะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา อุปกรณ์สเลฟที่ถูกอ้างถึงในการติดต่อหรือกำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำเนิดบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำ เพื่อตอบสนองให้ทราบว่าได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ไดอะแกรมเวลาแสดงสภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนระบบบัส I^2C

5. หยุดการถ่ายทอดข้อมูล (stop data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากต่ำไปสูง ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาวะหยุด(stop)

การทำงานบนบัส I^2C

ก่อนที่จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่บนบัส ต้องมีการอ้างถึงอุปกรณ์เสียก่อน โดยการอ้างถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C นั้นจะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตหรือ 10 บิต ในกรณีที่มีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสไม่มาก ใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอ แต่ถ้ามีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสมากกว่า 127 แอดเดรส จำเป็นต้องใช้การอ้างถึงแบบ 10 บิต หลังจากที่ติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้เรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลกันต่อไป

ดังนั้นหัวใจสำคัญอันดับแรกของการทำงานบนบัส I^2C คือการอ้างถึงอุปกรณ์แต่ละตัว ซึ่งในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของการอ้างถึงทั้ง 2 รูปแบบ

การอ้างถึงแบบ 7 บิต (7-bit addressing)

ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังจากสภาวะเริ่มต้นคือ ข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ โดยมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 2.24 ใน 7 บิตบนรวมทั้งบิต MSB ด้วย จะเป็นข้อมูลแอดเดรสของอุปกรณ์สเลฟที่ต้องการติดต่อ โดยแบ่งเป็น บิตกำหนดแอดเดรสคงที่ (fixed address bit) จำนวน 4 บิต ซึ่งข้อมูลนี้อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิต เป็นบิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (progeammable address

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้แก่ขา A0-A2 ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I^2C ส่วนในบิต LSB เป็นบิตที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวนั้นๆ หากบิต LSB เป็น "0" หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น "1" จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ

รูปที่ 2.24 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C

รูปที่ 2.25 รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C แบบ 7 บิต

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลควบคุม (control byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวมีการกำหนดข้อมูลควบคุมที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่าง ไอซีขยายพอร์ตมีข้อมูลควบคุมที่ใช้กำหนดว่า บิตใดเป็นอินพุต บิตใดเป็นเอาต์พุต ในขณะที่ไอซี ADC/DAC ต้องการข้อมูลควบคุมเพื่อกำหนดให้ทำงานเป็นวงจร ADC หรือ DAC เป็นต้น

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดจริง (data)

หลังจากที่มีการถ่ายทอดข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณรับรู้ตอบกลับมาด้วยทุกครั้ง เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้

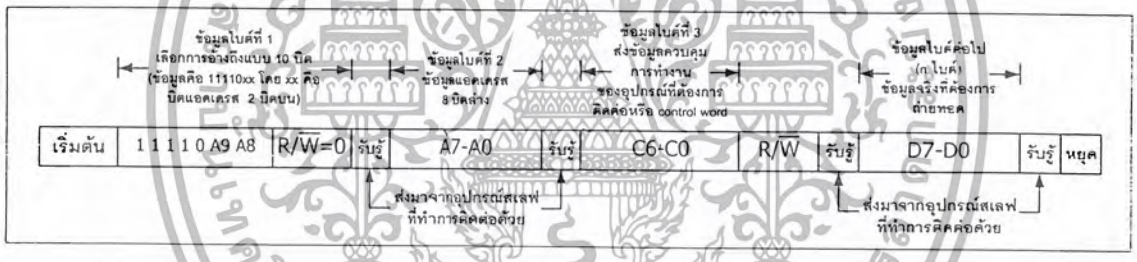
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.25 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เกิดขึ้นในการติดต่อบนบัส I^2C ของการอ้างถึงแบบ 7 บิต

การอ้างถึงแบบ 10 บิต

ในการอ้างถึงแบบนี้ ยังคงใช้รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกับแบบ 7 บิต หากแต่จะมีข้อมูลเพิ่มเติมขึ้นมาเล็กน้อย โดยในข้อมูลไบต์แรกหลังจากเกิดสภาวะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิตบนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิตถัดมาเป็นบิตแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรกยังคงเป็นการกำหนดว่า ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลแอดเดรสในไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุม ข้อมูลหลังจากนั้นก็จะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อ

เช่นเดียวกับการอ้างถึงแบบ 7 บิต หลังจากถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสภาวะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้ ในรูปที่ 2.26 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมของการอ้างถึงแบบ 10 บิต



รูปที่ 2.26 รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C แบบ 10 บิต

วงจรแปลงสัญญาณพอร์ตอนุกรมเพื่อเชื่อมต่อกับระบบบัส I^2C

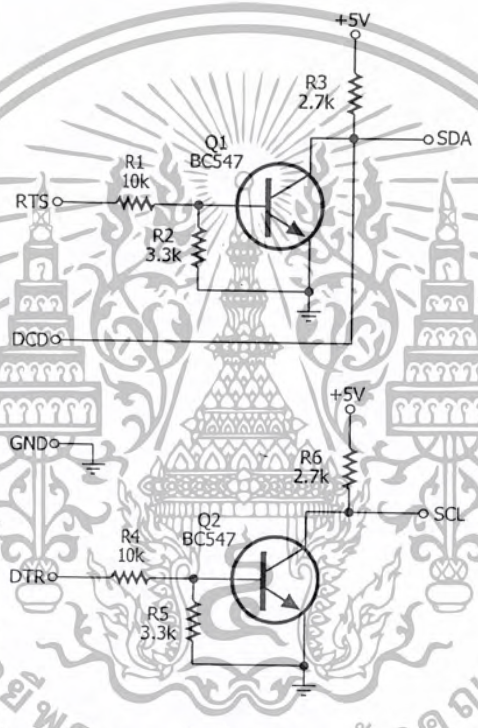
เพื่อให้สายสัญญาณของพอร์ตอนุกรมจากคอมพิวเตอร์สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I^2C ต้องมีวงจรเพื่อทำหน้าที่สร้างสายสัญญาณ SDA และ SCL ขึ้น จากสัญญาณของพอร์ตอนุกรม ดังมีตัวอย่างวงจรตามรูปที่ 2.27 โดยในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้าสู่บัส I^2C นี้ ต้องกำหนดให้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์มาสเตอร์เท่านั้น

ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ได้รับการจัดวงจรให้มีลักษณะเป็นวงจรบัฟเฟอร์แบบคอลเล็กเตอร์เปิด ตามข้อกำหนดของวงจรเอาต์พุตของบัส I^2C โดย Q_1 ใช้สำหรับถ่ายทอดสัญญาณของสาย SDA ในขณะที่ Q_2 ทำหน้าที่ถ่ายทอดสัญญาณของสาย SCL ไฟเลี้ยงของวงจรคือ +5 จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นเบอร์มาตรฐานเบอร์ใดก็ได้ที่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 100 kHz ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์จะถ่ายทอดสู่สาย SDA ของบัส I²C ผ่านทางขา RTS และรับข้อมูลเข้าทางขา DCD ส่วนสายสัญญาณนาฬิกาที่ออกจากพอร์ตอนุกรมจะถูกส่งออกมาทางขา DTR เพื่อใช้เป็นสาย SCL สำหรับบัส I²C

สำหรับบน S-Board อันเป็นบอร์ดหลักในการทดลองการเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกนี้ ได้จัดวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับระบบบัส I²C ไว้เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วงจรเดียวกับรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรสร้างสายสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อกับระบบบัส I²C ของพอร์ตอนุกรม

การเขียนโปรแกรมติดต่อบัส I²C ด้วย Visual BASIC

จากวงจรเชื่อมต่อระบบบัส I²C ในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่า ขาของพอร์ตอนุกรมที่ใช้ในการติดต่ออุปกรณ์บนระบบบัส I²C นั้นมี 3 ขา คือ DTR, RTS และ DCD ขาทั้งสามนี้สามารถควบคุมด้วยคอนโทรล MSComm ของ Visual BASIC ซึ่งมีรูปแบบการใช้งาน ดังนี้

การกำหนดให้ขา SDA เป็น "1" ต้องเขียนคำสั่งเป็น MSComm1.RTSEnable = True

การกำหนดให้ขา SDA เป็น "0" ต้องเขียนคำสั่งเป็น MSComm1.RTSEnable = False

การกำหนดให้ขา SCL เป็น "1" ต้องเขียนคำสั่งเป็น MSComm1.RTSEnable = True

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดให้ขา SCL เป็น “0” ต้องเขียนคำสั่งเป็น MSComm1.RTSEnable = False

ค่าที่อ่านได้จาก MSComm1.DCD เป็น False ขา SDA จะมีค่าเป็น “1”

ค่าที่อ่านได้จาก MSComm1.DCD เป็น True ขา SDA จะมีค่าเป็น “0”

การเขียนสถานะต่างๆของขาทั้งสามนี้เป็นโปรแกรมย่อยจะทำให้การติดต่อกับบัส I^2C นั้นง่ายและสะดวกขึ้น โดยสามารถเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

โปรแกรมย่อยกำหนดให้ขา SDA เป็น “1”

```
Private Sub SDA_H( )
        Form1.MSComm1.RTSEnable = True          'SDA=1
End Sub
```

โปรแกรมย่อยกำหนดให้ขา SDA เป็น “0”

```
Private Sub SDA_L( )
        Form1.MSComm1.RTSEnable = False         'SDA=0
End Sub
```

โปรแกรมย่อยกำหนดให้ขา SCL เป็น “1”

```
Private Sub SCL_H( )
        Form1.MSComm1.DTREnable = True          'SCL=1
End Sub
```

โปรแกรมย่อยกำหนดให้ขา SCL เป็น “0”

```
Private Sub SCL_L( )
        Form1.MSComm1.DTREnable = False         'SCL=0
End Sub
```

โปรแกรมย่อยอ่านค่าจากขา SDA

```
Private Function Rd_SDA( ) As Boolean
        Rd_SDA = Not Form1.MSComm1.CDHolding
End Function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อยสร้างสัญญาณเริ่มต้นหรือ START

มีขั้นตอนการเขียนโปรแกรมดังนี้

1. กำหนดให้ขา SDA และ SCL มีลอจิกเป็น "1" ก่อนเพื่อให้อยู่ในสภาวะบัสว่าง
2. กำหนดให้ขา SDA มีลอจิกเป็น "0"
3. กำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น "0" ตาม

ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบการเขียนโปรแกรมนี้กับไดอะแกรมเวลาในรูปที่ 2.23 เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยลำดับขั้นต่างๆที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นโปรแกรมโดยเรียกใช้โปรแกรมย่อยกำหนดสถานะลอจิกของขา SDA และ SCL ซึ่งได้อธิบายมาแล้วได้ดังนี้

```
Public Sub  I2CStart( )
        SDA_H
        SCL_H
        SDA_L
        SCL_L
End Sub
```

โปรแกรมย่อยสร้างสัญญาณหยุดหรือ STOP

การทำให้เกิดสถานะหยุดหรือสิ้นสุดการถ่ายทอดข้อมูลบนบัส I^2C หรือสถานะหยุด (stop) ก็คือการทำให้บัสของ I^2C เข้าสู่สภาวะบัสว่าง มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้ขา SDA มีลอจิก "0"
2. จากนั้นกำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น "1"
3. ทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น "1"

สามารถนำขั้นตอนทั้งหมดมาเขียนโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Sub  I2CStop( )
        SDA_L
        SCL_H
        SDA_H
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อยรับสัญญาณรับรู้หรือ Acknowledge

เมื่อมีการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์มาสเตอร์ไปยังอุปกรณ์สเลฟ อุปกรณ์สเลฟจะตอบกลับด้วยสัญญาณรับรู้หรือ Acknowledge (Ack) เพื่อแจ้งให้ทราบว่าได้รับข้อมูลแล้ว แต่เนื่องจากกการหยุดรอรับสัญญาณรับรู้นี้ จะทำให้โปรแกรมหยุดชะงักถ้าไม่ได้รับสัญญาณ สามารถแก้ไขได้โดยการหน่วงเวลาแล้วจึงค่อยอ่านสัญญาณ หรืออีกวิธีหนึ่งคือ อ่านสัญญาณที่ขา SDA แล้วทำงานต่อไปจนจบการทำงาน โดยไม่สนใจสัญญาณรับรู้หรือนำสัญญาณที่อ่านได้ไปตรวจสอบว่าเป็นสัญญาณรับรู้หรือไม่ แล้วจึงทำงานขั้นต่อไป จากขั้นตอนเหล่านั้นสามารถนำมาเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Function Ack( ) As Boolean
        Ack = Not Rd_SDA
        SCL_H
        SCL_L
End Function
```

โปรแกรมย่อยส่งสัญญาณรับรู้ของมาสเตอร์หรือ Master Acknowledge

เมื่ออุปกรณ์มาสเตอร์มีการรับข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ อุปกรณ์มาสเตอร์จะต้องตอบกลับด้วยสัญญาณรับรู้ของมาสเตอร์หรือ Master Acknowledge (Mack) เพื่อเป็นการบอกให้อุปกรณ์สเลฟรู้ว่าได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะสามารถตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่ติดต่อได้ สามารถเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Sub MAck( )
        SDA_L
        SCL_H
        SCL_L
End Sub
```

โปรแกรมย่อยส่งสัญญาณไม่รับรู้ของมาสเตอร์หรือ Master Not Acknowledge

เมื่ออุปกรณ์สเลฟส่งข้อมูลสิ้นสุดลงจะต้องได้รับสัญญาณไม่รับรู้ของมาสเตอร์ เพื่อบอกว่าการรับข้อมูลได้สิ้นสุดลงแล้ว สามารถเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Sub MNAck( )
        SCL_H
        SCL_L
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

End Sub

โปรแกรมย่อยส่งข้อมูล

มีด้วยกัน 2 โปรแกรมย่อยคือ ส่งข้อมูลลอจิก "0" และลอจิก "1"

การส่งข้อมูลลอจิก "0" ก็คือการทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น "0" แล้วส่งสัญญาณนาฬิกาออกไป มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ขา SDA เป็น "0" สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก "0"
2. ให้ขา SCL เป็น "1" เพื่อการป้อนสัญญาณนาฬิกาในขณะที่ SDA ยังคงเป็น "0"
3. ให้ขา SCL กลับเป็นลอจิก "0" เพื่อเตรียมส่งข้อมูลต่อไป

สามารถเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Sub Send0( )
        SDA_L
        SCL_H
        SCL_L
End Sub
```

การส่งข้อมูลลอจิก "1" มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ขา SDA เป็น "0" สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก "0"
2. ให้ขา SCL เป็น "1" เพื่อการป้อนสัญญาณนาฬิกาในขณะที่ SDA ยังคงเป็น "0"
3. ให้ขา SCL กลับเป็นลอจิก "0" เพื่อเตรียมส่งข้อมูลต่อไป

สามารถเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Sub Send1( )
        SDA_H
        SCL_H
        SCL_L
End Sub
```

โปรแกรมย่อยอ่านและส่งข้อมูลขนาด 8 บิต

การอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ในระบบบัส I^2C ส่วนใหญ่ข้อมูลที่อ่านได้จะมีขนาด 8 บิต ขั้นตอนการอ่านค่าข้อมูลมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดลูปในการรับค่าอินพุตไว้ 8 รอบสำหรับการอ่านค่าอินพุต 8 บิต

2. ทำให้บัสว่างเพื่อรอรับสัญญาณจากอุปกรณ์สเลฟ โดยกำหนดให้ SDA และ SCL มีลอจิกเป็น "1"

3. อ่านค่าข้อมูลจากขา SDA ผ่านคำสั่ง CDHolding

4. ถ้าอ่านค่าบิตเข้ามาแล้วมีค่าเป็น "1" ให้นำค่าบิตนั้น OR กับตัวแปรที่ทำการเก็บค่า แต่ถ้าค่าบิตที่อ่านได้เป็น "0" ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงใดๆ เพราะตัวแปรที่สร้างขึ้นใหม่ทุกบิตมีค่าเป็น "0"

5. กำหนดให้ขา SCL มีลอจิก "0" เพื่อเป็นการตอบรับการรับข้อมูล

6. ถ้าข้อมูลที่ทำการอ่านยังไม่ครบ 8 บิต ให้ย้อนกลับไปอ่านค่าในบิตต่อๆไปจนครบ

7. นำค่าตัวแปรคืนค่าให้กับฟังก์ชัน

จากขั้นตอนที่กล่าวมานี้สามารถนำมาเขียนเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

```
Public Function Read8Bit( ) As Byte
Dim Dat1 As Integer
Dim i As Integer
  For i = 7 To 0 Step -1                    'Loop 8 Cycle
    SCL_H
    SDA_H
    If Rd_SDA Then                          'Read SDA
      Dat1 = (2 ^ i) Or Dat1
    End If
    SCL_L
  Next i
  Read8Bit = Dat1                           'Data 8 Bit
End Function
```

การส่งค่าข้อมูลไปยังอุปกรณ์บนระบบบัส I^2C ปกติจะเป็นการส่งข้อมูลขนาด 8 บิตหรือ 1 ไบต์ โปรแกรมย่อยต่อไปนี้จะเป็นการนำเอาข้อมูล 8 บิต มาทำการตรวจสอบว่าเป็นลอจิก "0" หรือ "1" แล้วทำการส่งข้อมูลเหล่านั้นออกไป

```
Public Sub Send8Bit(Data As Byte)
Dim i As Interger
  For i = 7 To 0 Step -1                    'Loop 8 Cycle
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        If (Data And 2 ^ i) = 2 ^ i  Then          'Test Bit 0 OR 1
            Call Send1
        Else
            Call Send0
        End If
    Next i
End Sub
```

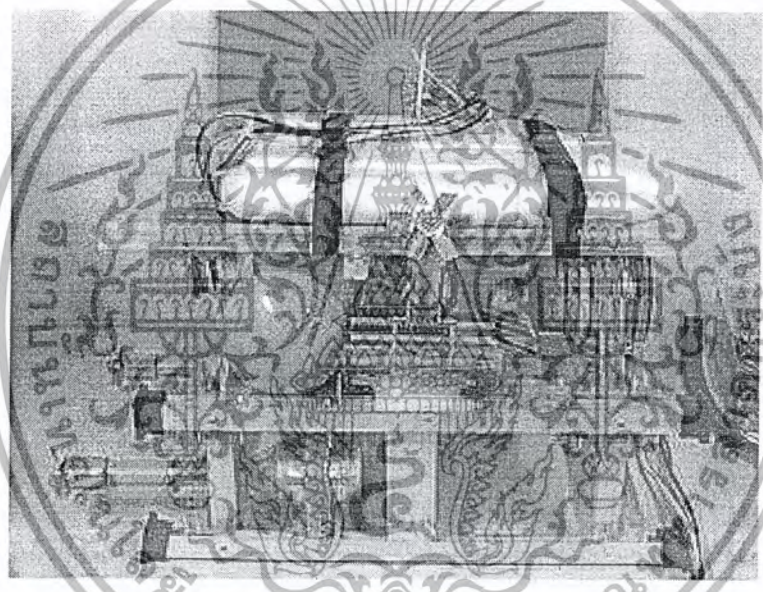
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การสร้างและออกแบบ

3.1 การออกแบบ

ตัวเรือ

ตัวเรือที่ทำการออกแบบจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างทรงสี่เหลี่ยม มี 2 ชั้น ตัวโครงเรือทำด้วยแท่งอะคริลิกใสซึ่งหุ้มไว้ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฉากอีกชั้นหนึ่งเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ซึ่งถ้าหากใช้โครงเหล็กแล้วอาจทำให้เกิดสนิมได้ง่ายเนื่องจากตัวเรือต้องสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอด



รูปที่ 3.1 ด้านข้างของตัวเรือ

มอเตอร์

ทางด้านข้างของตัวเรือจะมีมอเตอร์อยู่ 2 ตัว (ข้างละตัว) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนในแนวดิ่ง โดยติดตั้งอยู่ในลักษณะเอียงทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวระนาบ เพื่อให้แรงกดที่กระทำกับตัวเรือแล้วเรือจะดำลงใต้น้ำโดยที่ตัวเรือไม่แกว่ง ส่วนมอเตอร์อีก 2 ตัว ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในแนวระนาบ จะถูกติดตั้งอยู่ทางด้านท้ายของตัวเรือ โดยจะวางอยู่ในแนวระนาบ

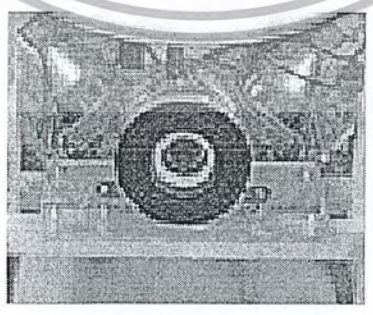
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของมอเตอร์จะถูกบรรจุอยู่ในวัสดุสแตนเลส และต่อแกนมอเตอร์กับเพลาออกมาเพื่อติดใบพัด ในส่วนของแกนจะถูกใส่อยู่ในท่อพีวีซีซึ่งต่อเชื่อมกับภาชนะสแตนเลสที่ครอบมอเตอร์ไว้ ภายในท่อพีวีซีจะมีระบบการกันน้ำโดยการใส่จารบีเข้าไปในท่อให้เต็ม แล้วใส่ตลับลูกปืนไว้ที่ปลายท่อเพื่อเป็นการกันน้ำเข้าและลดแรงเสียดทานที่เพลา ทำให้เพลาสามารถหมุนได้ลื่น และมียางซีลกันน้ำอีกชั้นหนึ่ง

รูปที่ 3.2 ภาพภายในของการกันน้ำมอเตอร์

กล้องวิดีโอ

ด้านหน้าของตัวเรือเป็นส่วนของกล้องวิดีโอที่ใช้ในการถ่ายภาพใต้น้ำซึ่งจะถูกบรรจุอยู่ในวัสดุที่กันน้ำ โดยที่ด้านหน้าจะติดด้วยแผ่นอะคริลิคใสซึ่งโปร่งแสงเพื่อให้กล้องสามารถถ่ายภาพได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.3 กล้องวิดีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์อื่นๆ

ตัวแผ่นวงจรต่างๆ จะถูกบรรจุอยู่ในท่อพีวีซีที่สามารถกันน้ำได้

วัสดุพยุง ใช้โฟมว่ายน้ำมาติดไว้ด้านบนของตัวเรือเพื่อเป็นตัวเพิ่มแรงพยุง

สายไฟและสายส่งสัญญาณ เป็นสายแบบที่สามารถกันน้ำได้ มีความยาว 20 เมตร

แหล่งจ่ายไฟ มี 2 ชุด 12 V. 60 A. เป็นแบบ Switching Power Supply

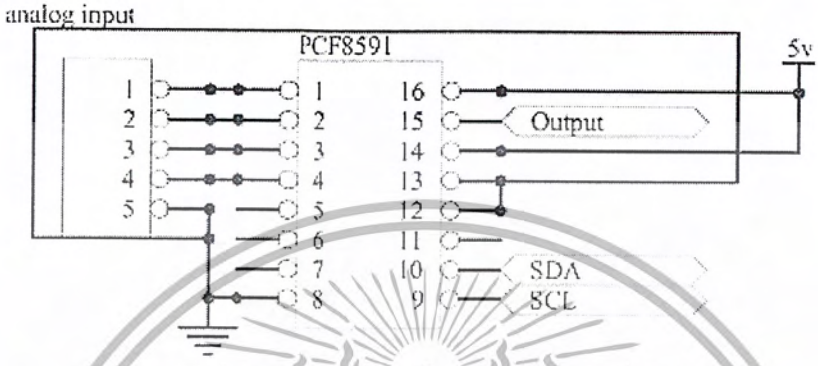
ตามรอยต่อ ช่อง รู ของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่เจาะไว้เพื่อร้อยสายไฟ จะต้องกันน้ำโดยติดซิลิโคน กาวยาง หรือกาวอีพร็อกซี่เอาไว้อย่างแน่นหนา

3.2 ขนาดตัวเรือ

ความกว้าง	38	เซนติเมตร
ความยาว	56	เซนติเมตร
ความสูง	41	เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

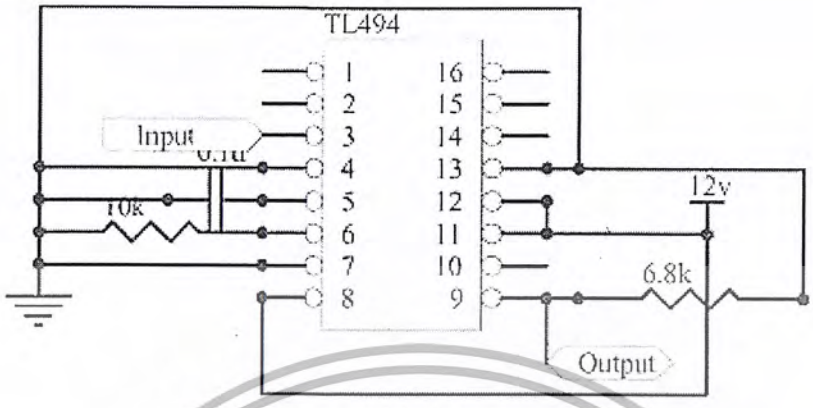
3.3 วงจร



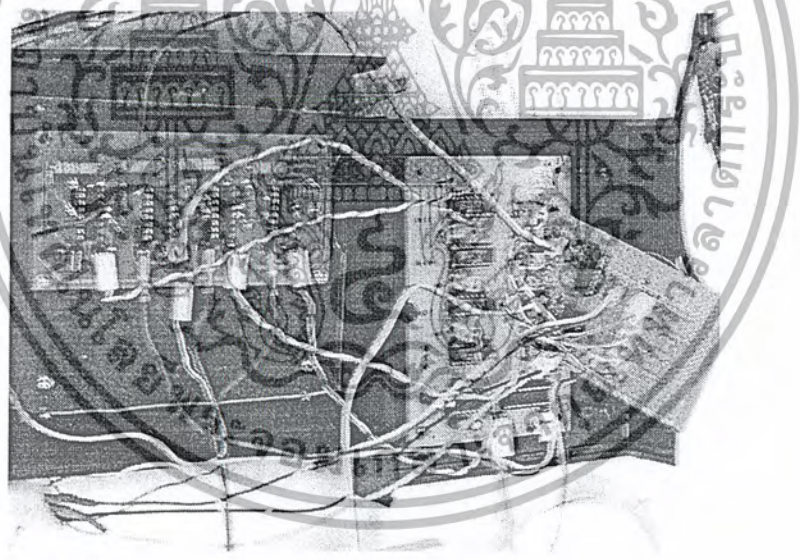
รูปที่ 3.4 วงจร PCF 8591

จากรูปที่ 3.4 วงจร PCF 8591 เป็นวงจร D/A ซึ่งรับค่าผ่านพอร์ตอนุกรม ใช้การส่งค่าแบบ I^2C เมื่อได้เอาต์พุต analog มา ก็ส่งต่อไปยังวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อส่งให้วงจรขับมอเตอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

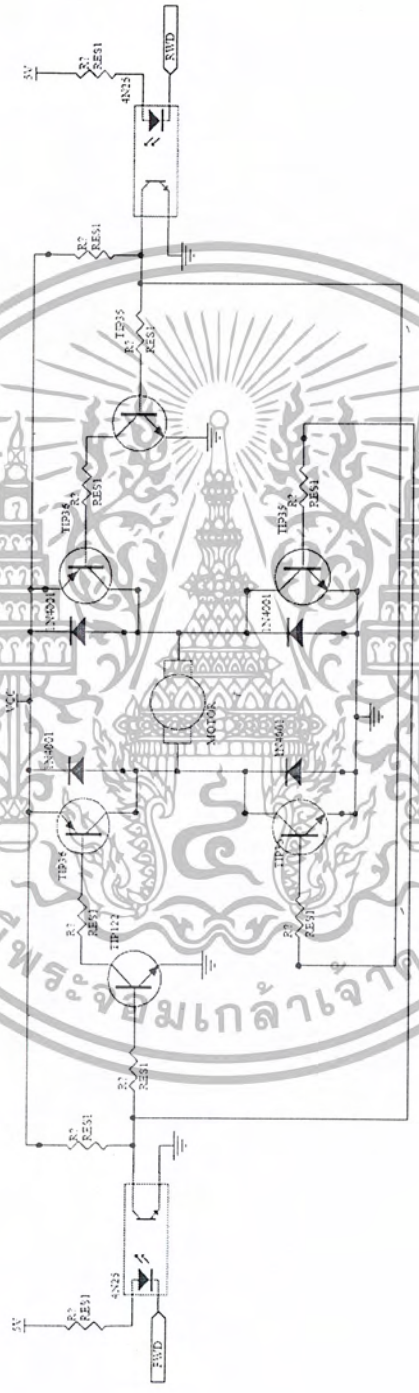


(ข)

รูปที่ 3.5 วงจร TL 494 (PWM)

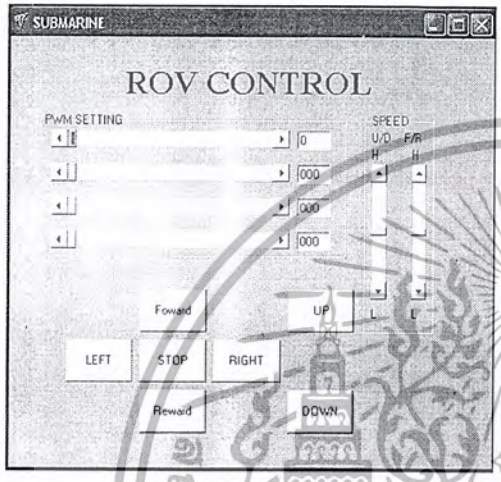
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งรับอินพุทจากวงจร PCF 8591 แล้วส่งไปยังวงจรขับมอเตอร์

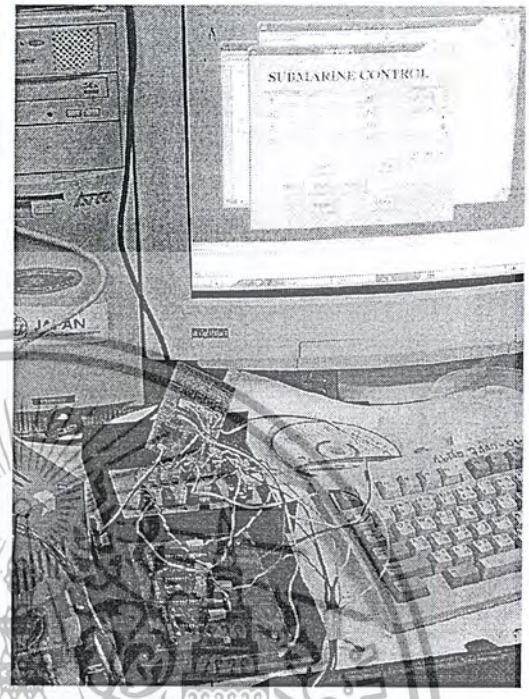


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 วงจรขับมอเตอร์



รูปที่ 3.7
แผงควบคุมผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.8
การสั่งงานผ่านทางคอมพิวเตอร์

ผู้ควบคุมสามารถสั่งงานเรือดำน้ำผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยใช้แผงควบคุม ดังรูปที่ 3.7 คอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลแบบ I^2C ผ่านเข้ากล่องวงจร D-to-A แปลงข้อมูลเข้าสู่วงจร generate pulse จากนั้นส่งข้อมูลไปยังวงจรขับมอเตอร์ซึ่งอยู่ภายในตัวเรือ เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและสรุป

4.1 ทดลองการลอยตัวในน้ำของตัวเรือ

เพื่อสังเกตว่าเรือลอยตัวอยู่ในลักษณะที่สมดุลหรือไม่ จะต้องทำการถ่วงหรือพยุงน้ำหนักตรงไหนเท่าใด และมีรอยรั่วซึมของน้ำในบริเวณใดบ้างหรือไม่

ผลการทดลอง : ความหนาแน่นรวมของตัวเรือ(ที่ใส่แผ่นโฟมด้วยแล้ว) มีค่าน้อยกว่าน้ำ ต้องใช้แรงกดมากพอสมควรจึงจะทำให้เรือจมในน้ำได้ รวมทั้งเกิดรอยรั่วในหลายบริเวณระหว่างรอยต่อของวัสดุต่างๆ ตัวเรือจะค่อนข้างหนักไปทางด้านท้าย เนื่องจากมีมอเตอร์ซึ่งติดตั้งไว้ด้านท้ายอยู่สองตัว

การแก้ไข : ในส่วนของความหนาแน่นของตัวเรือได้ทำการตัดโฟมออกให้เล็กลงให้พอดีกับการพยุงตัวเรือ ส่วนในบริเวณที่น้ำซึมเข้าได้นั้นได้ทำการติดซิลิโคนและกาวยางเพิ่มเติม นอกจากนั้นยังทำการจัดวางตำแหน่งตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆในตัวเรือใหม่ เพื่อให้เกิดความสมดุลของน้ำหนัก

4.2 ทดลองการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์

เพื่อดูการทำงานของวงจรว่าสามารถสั่งให้มอเตอร์แต่ละตัวกระทำตามคำสั่งที่ต้องการได้หรือไม่ และมีปัญหาในส่วนใดบ้าง

ผลการทดลอง : นำวงจรขับมอเตอร์มาต่อเข้ากับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว สั่งให้หมุนไปและหมุนกลับด้าน ซึ่งก็ได้ผลตามที่ต้องการ

โดยก่อนหน้านั้นได้ทำการหาค่าความต้านทานในวงจรขับมอเตอร์ที่สามารถให้ค่า V_{CE} ที่สูงที่สุด ซึ่งได้ผลตามตารางข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ขา Trick	ค่าความต้านทาน	ค่า V_{CE} ที่วัดได้
5 V.	1 k	0.6 V.
12 V.	1 k	0.80 V.
5 V.	330 Ω	0.80 V.
12 V.	330 Ω	0.87 V.
5 V.	68 Ω	1.03 V.
12 V.	68 Ω	1.05 V.
5 V.	4.7 Ω	1.15 V.
12 V.	4.7 Ω	1.18 V.

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานและค่า V_{CE} ที่วัดได้

จากตารางจะได้ว่า ที่ค่าความต้านทาน 4.7 Ω จะให้ค่า V_{CE} ที่สูงสุด

4.3 ทดลองการเคลื่อนที่ใต้ผิวน้ำ

เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของตัวเรือทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบ

ผลการทดลอง : สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง เมื่อสั่งให้มอเตอร์สองตัวบนทำงาน ปรากฏว่าตัวเรือสามารถเคลื่อนที่ดิ่งลงโดยที่ไม่มีการแกว่ง เนื่องจากแรงจากใบพัดทั้งสองตัวกระทำต่อตัวเรือเท่าๆกัน และเมื่อหยุดการทำงานของใบพัด ตัวเรือก็จะค่อยๆลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ แต่จะลอยขึ้นค่อนข้างช้า

ในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อสั่งให้มอเตอร์ทั้งสองตัวทางด้านท้ายทำงาน ตัวเรือก็จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แต่จะค่อนข้างเลี้ยวไปทางด้านขวา เนื่องจากมอเตอร์ทางด้านซ้ายจะหมุนเร็วกว่ามอเตอร์ทางด้านขวาเล็กน้อย เมื่อลองสั่งให้มอเตอร์ตัวซ้ายทำงานโดยที่มอเตอร์ตัวขวาหยุดทำงาน ตัวเรือก็จะทำการเลี้ยวขวา และเมื่อลองสั่งให้มอเตอร์ตัวซ้ายหยุดทำงานโดยที่มอเตอร์ตัวขวาทำงาน ตัวเรือก็จะทำการเลี้ยวซ้าย

การแก้ไข : ในส่วนของการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำนั้น สามารถเร่งให้เร็วขึ้นได้ด้วยการใช้มอเตอร์เข้าช่วย โดยสั่งการให้มอเตอร์สองตัวบนหมุนกลับด้านกับตอนที่กำลังดำลงสู่ใต้น้ำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มแรงยกให้กับตัวเรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนปัญหาในเรื่องของการที่มอเตอร์สองตัวทางด้านท้ายนั้นหมุนด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ก็แก้ไขด้วยการจ่ายสัญญาณพัลส์ที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ให้ช่วงระยะสัญญาณการ on สั้นลงจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองตัวนั้นใกล้เคียงกัน

4.4 ทดลองวัดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่

เพื่อหาความเร็วในการเคลื่อนที่ในน้ำของตัวเรือ ทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบ

ผลการทดลอง :

วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวระนาบที่ระดับผิวน้ำ โดยใช้ระยะทาง 12.5 เมตร

วัดครั้งที่ 1	ใช้เวลา	32.06	วินาที
วัดครั้งที่ 2	ใช้เวลา	40.07	วินาที
วัดครั้งที่ 3	ใช้เวลา	37.06	วินาที
ค่าเฉลี่ย		36.369	วินาที
คิดเป็นความเร็ว		0.34	เมตร/วินาที

วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวระนาบที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร จากผิวน้ำ โดยใช้ระยะทาง 12.5 เมตร

วัดครั้งที่ 1	ใช้เวลา	44.02	วินาที
วัดครั้งที่ 2	ใช้เวลา	43.52	วินาที
วัดครั้งที่ 3	ใช้เวลา	43.42	วินาที
ค่าเฉลี่ย		43.65	วินาที
คิดเป็นความเร็ว		0.286	เมตร/วินาที

วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง โดยการเคลื่อนที่จากระดับผิวน้ำลงสู่ความลึกที่ระดับ 1 เมตร

วัดครั้งที่ 1	ใช้เวลา	12.07	วินาที
วัดครั้งที่ 2	ใช้เวลา	12.16	วินาที
วัดครั้งที่ 3	ใช้เวลา	12.06	วินาที
ค่าเฉลี่ย		12.096	วินาที
คิดเป็นความเร็ว		0.083	เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง โดยการเคลื่อนที่จากระดับความลึก 1 เมตร ลอยขึ้นสู่ระดับผิวน้ำ(โดยไม่ใช้มอเตอร์ช่วย)

วัดครั้งที่ 1	ใช้เวลา	32.51	วินาที
วัดครั้งที่ 2	ใช้เวลา	33.14	วินาที
วัดครั้งที่ 3	ใช้เวลา	33.16	วินาที
ค่าเฉลี่ย		32.94	วินาที
คิดเป็นความเร็ว		0.030	เมตร/วินาที

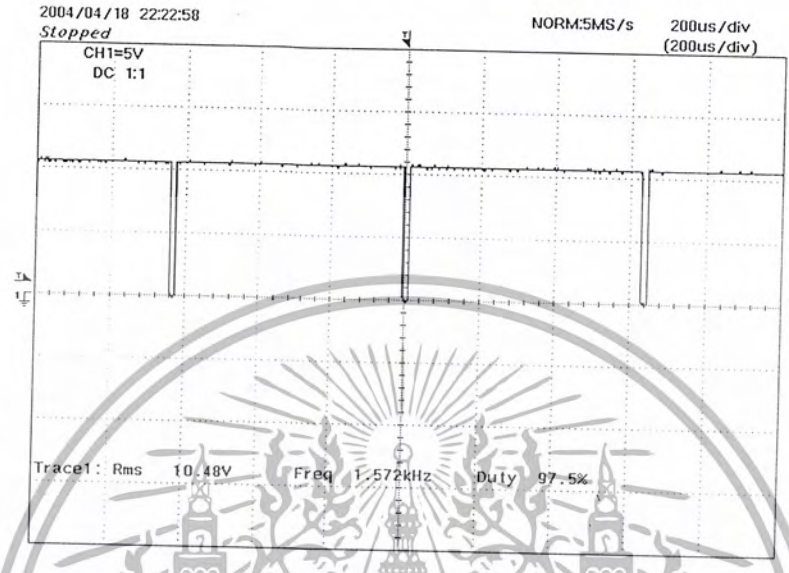
วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง โดยการเคลื่อนที่จากระดับความลึก 1 เมตร ลอยขึ้นสู่ระดับผิวน้ำ(โดยใช้มอเตอร์ช่วย)

วัดครั้งที่ 1	ใช้เวลา	16.00	วินาที
วัดครั้งที่ 2	ใช้เวลา	16.17	วินาที
วัดครั้งที่ 3	ใช้เวลา	15.51	วินาที
ค่าเฉลี่ย		15.893	วินาที
คิดเป็นความเร็ว		0.063	เมตร/วินาที

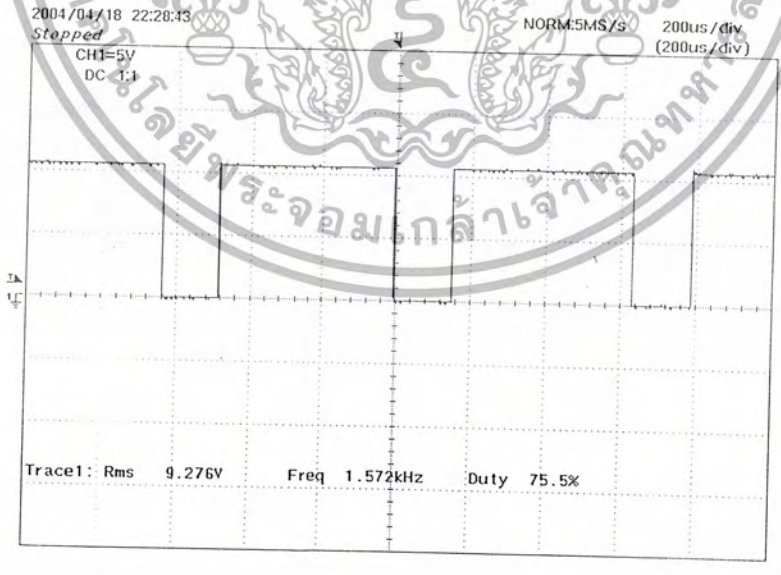
เนื่องจากการทดลองวัดค่าความเร็วนี้กระทำที่สระว่ายน้ำ ซึ่งในวันที่กระทำการทดลองมีกระแสลมพัดอยู่พอสมควร ทำให้มีปัจจัยในเรื่องของกระแสน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง รวมถึงระดับความลึกของสระที่ใช้วัดความเร็วในแนวดิ่งมีจำกัด ไม่สามารถที่จะทำการทดลองที่ระดับความลึกมากๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ทดลองหาค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM

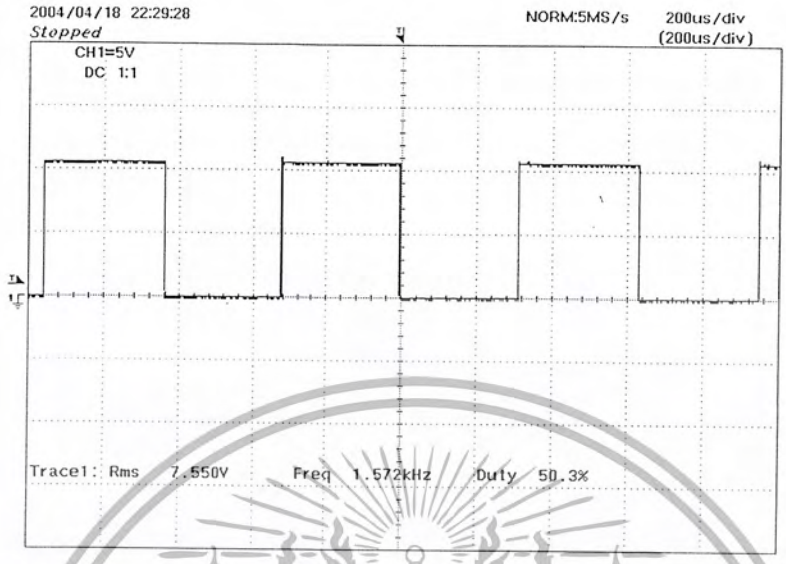


รูปที่ 4.1 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 0 V.

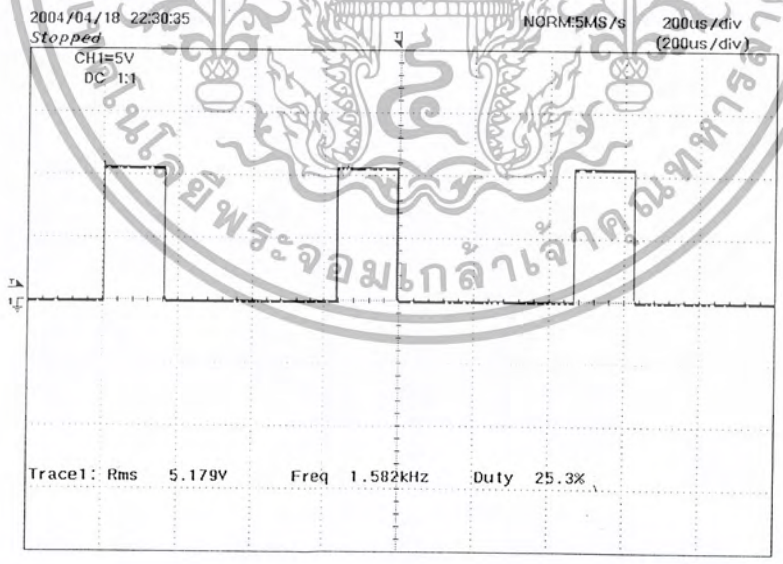


รูปที่ 4.2 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 1.64 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

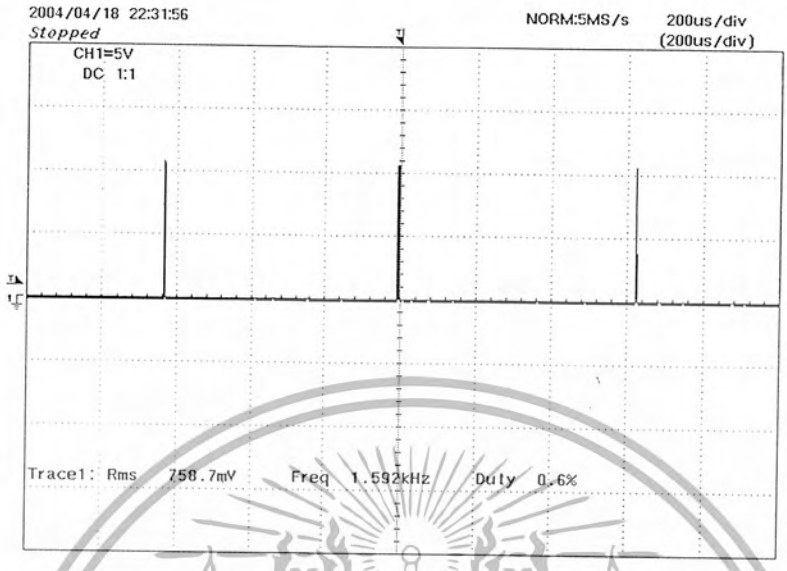


รูปที่ 4.3 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 2.27 V.



รูปที่ 4.4 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 2.95 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PWM เมื่อป้อนแรงดันอินพุทเท่ากับ 3.59 V.

เมื่อต่อไฟ 12 V. ตรงๆ โดยไม่ผ่านวงจรขับมอเตอร์ ความเร็วรอบมอเตอร์มีค่าประมาณ 3600 รอบ/นาที

ทำการทดลองปรับค่า Duty Cycle ของ Pulse โดยจ่ายผ่านวงจรขับมอเตอร์ และวัดความเร็วรอบ ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 2.7

Duty Cycle = pulse/pause (%)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)
97.5	1090
75.5	720
50.3	501
25.3	200
0.6	0

ตารางที่ 4.2 ความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อจ่ายไฟผ่านวงจรขับมอเตอร์และทำการปรับ Duty Cycle ของ Pulse ที่จ่ายให้วงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต่อวงจรขับมอเตอร์โดยไม่ผ่าน วงจร PWM วัดค่า V_{in} และ V_{out} ได้ดังนี้

V_{in} = 12 V.

V_{out} ≈ 12 V.

เมื่อต่อวงจร PWM เข้ากับวงจรขับมอเตอร์ วัดค่า V_{in} และ V_{out} ได้ดังนี้

V_{in} = 12 V.

V_{out} = 3 V.

เหตุผลที่ค่า V ลดลง มีได้จากหลายสาเหตุ

1. สัญญาณพัลส์ที่จ่ายออกมาไม่สามารถทำให้มี duty cycle 100% ได้

2. วงจรขับมอเตอร์ซึ่งเป็นวงจรทรานซิสเตอร์ ตอบสนองกับความถี่ของสัญญาณพัลส์ได้ไม่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

5.1 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

ด้านอุปกรณ์และสถานที่...

ในภาคเรียนแรกนั้น เสียเวลาไปกับการทำด้านฮาร์ดแวร์มากพอสมควร เนื่องจากต้องทำความเข้าใจและเรียนรู้เกี่ยวกับการทำงานของเครื่องมือต่างๆ เช่น เครื่องกลึง เครื่องเจาะ รวมทั้งข้อจำกัดด้านเวลาในการใช้ห้องเครื่องมือ นอกจากนั้นงบประมาณที่มีอยู่จำกัดทำให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้อย่างคล่องตัว

การทดลองที่ใช้สถานที่สระว่ายน้ำของสถาบันฯนั้น จะใช้ได้เฉพาะวันจันทร์เท่านั้น และเนื่องจากสระว่ายน้ำมีความลึกมากสุดแค่เพียง 1.6 เมตรเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวเรือและอุปกรณ์ต่างๆที่ระดับความลึกมากๆได้

ในด้านของชิ้นงาน...

การปฏิบัติงานเป็นเวลานานๆ จะส่งผลให้มีน้ำรั่วซึมในบริเวณแพลาของมอเตอร์บ้างเล็กน้อย เนื่องจากตรงส่วนนี้เป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่หมุนอยู่ตลอด นอกจากนั้นจารบีที่ใส่ไว้ในบริเวณแพลาของมอเตอร์เมื่อระยะเวลานานเข้าก็จะเกิดการแข็งตัวได้

การจัดวางน้ำหนักของตัวเรือให้สมดุลมีความจำเป็น เนื่องจากถ้าตัวเรือเอียง จะมีผลให้การเคลื่อนที่มีข้อผิดพลาดได้

5.2 แนวทางในการค้นคว้าและพัฒนา

ในส่วนของชุดควบคุมการเคลื่อนที่ พัฒนาได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวดิ่งหรือปรับระดับความลึกได้รวดเร็วขึ้น

ระบบการกันซึมน้ำ ควรหาสถานที่ที่มีระดับความลึกมากพอสมควร เพื่อสามารถทดสอบอุปกรณ์ที่แรงดันน้ำสูงๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมรับคำสั่งควบคุมเรือดำน้ำ

```
Option Explicit

Public Sub I2CStart()
    SDA_H
    SCL_H
    SDA_L
    SCL_L
End Sub

Public Sub I2CStop()
    SDA_L
    SCL_H
    SDA_H
End Sub

Public Sub Send0()
    SDA_L
    SCL_H
    SCL_L
End Sub

Public Sub Send1()
    SDA_H
    SCL_H
    SCL_L
End Sub
```

ธนานุเคราะห์โดยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Public Function Ack() As Boolean
   Ack = Not Rd_SDA
   SCL_H
   SCL_L
End Function

Public Sub MAck()
   SDA_L
   SCL_H
   SCL_L
End Sub

Public Sub MNAck()
   SCL_H
   SCL_L
End Sub

Public Function Read8Bit() As Byte
Dim Dat1 As Integer
Dim i As Integer
   For i = 7 To 0 Step -1          'Loop 8 Cycle
      If Rd_SDA Then               'Read SDA
         Dat1 = (2 ^ i) Or Dat1
      End If
      SCL_H
      SCL_L
   Next i
   Read8Bit = Dat1                 'Data 8 Bit
End Function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Public Sub Send8BIT(Data As Byte)
Dim i As Integer
   For i = 7 To 0 Step -1              'Loop 8 Cycle
      If (Data And 2 ^ i) = 2 ^ i Then     'Test Bit 0 OR 1
         Call Send1
      Else
         Call Send0
      End If
   Next i
End Sub

Private Sub SDA_H()
   Form1.MSComm1.RTSEnable = True        'SDA=1
End Sub

Private Sub SDA_L()
   Form1.MSComm1.RTSEnable = False       'SDA=0
End Sub

Private Sub SCL_H()
   Form1.MSComm1.DTREnable = True        'SCL=1
End Sub

Private Sub SCL_L()
   Form1.MSComm1.DTREnable = False       'SCL=0
End Sub

Private Function Rd_SDA() As Boolean
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    SDA_H
    Rd_SDA = Not Form1.MSComm1.CDHolding
End Function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมรับคำสั่ง I^2C

```
Private Sub Command1_Click()
    Sendout Val("&H" & Text1.Text)
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
    Call I2CStart                   'Start
    Call Send8BIT(&H79)             'Control Word Read
    Call Ack                        'Acknowledge
    Text2.Text = Hex(Read8Bit)      'Read Data
    Call Ack                        'Acknowledge
    Call I2CStop                    'Stop
End Sub

Private Sub Sendout(B As Byte)
    Call I2CStart           'Start
    Call Send8BIT(&H70)     'Send Control Word
    Call Ack                'Acknowledge
    Call Send8BIT(B)        'Send Data
    Call Ack                'Acknowledge
    Call I2CStop            'Stop
End Sub

Private Sub Form_Load()
    MSComm1.CommPort = 1
    MSComm1.PortOpen = True
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ถาวร เบญจนราสุทธิ์ ที่ได้กรุณาและคอยให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้น ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์พรสุข รติโรจน์อนันต์ และอาจารย์ดอน อิศรากร ที่ให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน

ขอขอบพระคุณอาจารย์เกียรติวรรณ ทรงสัตย์ ที่กรุณาเป็นธุระในการประสานงานเรื่องขอใช้สระว่ายน้ำของสถาบันเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงงานอยู่ตลอดเวลา

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีเสมอตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงงานนี้สำเร็จลงได้

... ผู้จัดทำ ...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กฤษฎา ใจเย็น, อรรถพล บุญยะโภคา, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, "เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม" ,บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนท์ จำกัด ชั้น 3 อาคารจูราสสิกเฮ้าส์ 2188/199 ซ.รามวิลล่า ถ.รามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพ 10240

[2] อรรถพล บุญยะโภคา, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, "เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม (ฉบับปรับปรุงครั้งที่2)", บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนท์ จำกัด 3133/53 ซ.สุขุมวิท 101/2 ถ.สุขุมวิท แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรีธน วรศักดิ์โยธิน, "ฟิสิกส์ 1" ,ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พิมพ์ครั้งที่ 1, หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา,2542

[4] มนตรี พิรุณเกษตร, "ฟิสิกส์ ระดับมหาวิทยาลัย" , ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชัน จำกัด (มหาชน) 800/43-45 ซอย ตระกูลสุข ถนนอโศกดินแดง เขต ดินแดง กรุงเทพ 10400

[5] สมพงษ์ ใจดี, "ฟิสิกส์ มหาลัย 2" , โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2541

[6] ข้อมูลจาก http://www.rov.org/index.html

[7] ข้อมูลจาก http://www.submarine.freehosting.net/

[8] ข้อมูลจาก http://www.thaio.com

[9] ข้อมูลจาก http://www.heiszwolf.com/subs/tech/tech01.html#Contents

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้