

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดควบคุมพีเอชในของเหลว

pH CONTROLLER



โดย
นาย พิชญ รันฤติปัญญา
นาย รพีพล รุ่งแจ้ง
นาย วิชเรนทร์ จิวลีดา

เลขที่.....
81990
เลขทะเบียน.....
-4 ก.ค. 2551
วัน,เดือน,ปี.....

b. 11๙ ๘๘๒๙๘
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาแมคคาทรอนิกส์

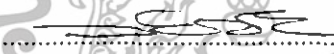
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

ชุดควบคุมพีเอชในของเหลว
pH CONTROLLER

ผู้จัดทำ

นายพิชญ	รินฤติปัญญา	47010512
นายรพีพล	รุ่งแจ้ง	47012262
นายวัชรเรนท์	จีวistica	47012264


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.วันชัย รีรุง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดควบคุมพีเอชในของเหลว

โดย

นายพิชญ รุ่งฤดีปัญญา 47010512

นายรพีพล รุ่งแจ้ง 47012262

นายวัชรินทร์ จิวส์ิตา 47012264

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วันชัย ธีรรัฐจา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาหลักการทำงานของหัววัดค่าพีเอชแบบพีเอช-อิเล็กทรอนิกส์ ในการแปลงสัญญาณทางเคมีให้กลายเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และศึกษาการใช้วงจรขยายสัญญาณเพื่อทำการขยายสัญญาณที่ได้จากหัววัดอิเล็กทรอนิกส์ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองระบบการควบคุมค่าพีเอชแบบ ON-OFF โดยการนำค่าพีเอชที่ได้แปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแล้วเข้าไปทำการประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการควบคุมความเป็นกรด-ด่างของของเหลว โดยการควบคุมมอเตอร์ปั๊มสารละลายกรด-ด่างให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH CONTROLLER

By

Mr. Pitchaya Ruenrueedeeponya

Mr. Rapiepon Roongjaeng

Mr. Watcharen Ngewseeda

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Vanchai Riewruja

Academic Year 2007

ABSTRACT

The purpose of this project is to study a principle of the pH electrode, which converts chemical signal to electrical signal, and an amplifier for amplification the voltage signal from pH electrode. The pH control system in ON-OFF type is created to demonstrate. The voltage value converted from the pH value is processed by microcontroller. Microcontroller will control the motor for pump the acid and alkaline solution to get the required acidity and alkalinity in the liquid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริยฐานิพนธ์ฉบับนี้สามารถลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รศ.ดร.วันชัย ธีร์รุจา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาตลอดตั้งแต่ต้น ให้ความช่วยเหลือที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณอย่างสูงขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่เสมอ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดในการจัดทำปฏิญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของปฏิญานิพนธ์	2
1.4 เนื้อหาของปฏิญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 การตรวจวัดค่าความเป็นกรดและด่าง	3
2.2 การนิยามความเป็นกรดเป็นด่างและการชี้ค่า	4
2.2.1 จากความหนาแน่นของไอออนไฮโดรเจนหรือไฮโดรเนียมไอออน	4
2.2.2 จากความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน	4
2.2.3 การกำหนดความเป็นกรดเป็นด่างในรูปของสเกล p	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนและค่า pH	6
2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	7
2.5 ขั้ววัดค่า pH	11
2.5.1 ขั้วอ้างอิง	11
2.5.2 ขั้วชี้บอก	13
2.5.4 ขั้วชนิดอื่นๆที่ใช้วัด pH	15
2.6 การวัดค่า pH	18
2.6.1 หลักการวัด pH โดยเซนเซอร์ค่า pH	18
2.6.2 ความหมายของ pH เซนเซอร์	19
2.6.3 ส่วนประกอบและการทำงานของอิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดอ้างอิง	20
2.7 สารละลายมาตรฐาน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 วงจรปรับสภาพสัญญาณ	27
2.8.1 วงจรวัด pH แบบการสมดุลของกระแส	28
2.8.2 การวัดค่า pH ชนิดมีการป้อนกลับ	28
2.8.3 การวัดค่า pH ด้วยการขยายสัญญาณเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	28
2.9 ระบบควบคุม	29
2.9.1 ระบบควบคุมแบบเปิด	29
2.9.2 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ แบบป้อนกลับ	29
บทที่ 3 หลักการและการออกแบบ	31
3.1 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า	31
3.1.1 ออปแอมป์	31
3.1.2 การใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายสัญญาณ	34
3.1.3 ตำแหน่งขาของออปแอมป์ที่ใช้	35
3.1.4 การวัดแรงดันไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด	36
3.1.5 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์	36
3.2 การออกแบบวงจรตัวแสดงผลค่า pH	43
3.2.1 การออกแบบวงจร	43
3.3 การออกแบบวงจรสั่งการมอเตอร์ปั๊มควบคุมสารละลาย	49
3.3.1 ไทรแอก	49
3.3.2 MOC 3021M	50
3.3.3 อุปกรณ์ขับ ไทรแอก	50
3.3.4 มอเตอร์ปั๊ม	51
3.3.5 สารละลายกรด – ด่าง	52
3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	53
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	55
4.1 วิธีการทดลอง	55
4.1.1 การทดลองตอนที่ 1	56
4.1.2 การทดลองตอนที่ 2	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลอง	57
4.2.1 ผลการทดลองตอนที่ 1	57
4.2.2 ผลการทดลองตอนที่ 2	63
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข	70
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	70
เอกสารอ้างอิง	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระดับค่าพีเอชของสารทั่วไป	6
2.2 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	7
2.3 การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและลบผ่านรอยต่อของสารละลาย	10
2.4 แสดงพีเอชมิเตอร์	18
2.5 แสดงตัวอย่างของอิเล็กโทรดวัดค่าพีเอชแบบแก้ว	19
2.6 ตัวอย่างอิเล็กโทรดอ้างอิงที่วัดค่าพีเอช	22
2.7 แหล่งกำเนิดความไม่เสถียรภาพของพีเอชเซ็นเซอร์	25
2.8 การวัดค่าพีเอชแบบมีการป้อนกลับ	28
2.9 การควบคุมระบบ	29
2.10 ระบบแบบเปิด	29
2.11 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	30
3.1 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	31
3.2 แสดงองค์ประกอบของออปแอมป์	32
3.3 ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้า	33
3.4 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า ± 15 VDC ที่เป็นไฟเลี้ยงออปแอมป์	33
3.5 แสดงวงจรฟเฟออร์	34
3.6 แสดงวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	34
3.7 แสดงวงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	34
3.8 แสดงตำแหน่งขาของออปแอมป์ HA 17741	35
3.9 วงจรรขยายสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล	37
3.10 วงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	38
3.11 วงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ปรับปรุงใหม่	40
3.12 วงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ใช้งาน	41
3.13 วงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ใช้เป็นอินพุตให้กับวงจร pH มิเตอร์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 สถาปัตยกรรมของ ICL7106	45
3.15 แสดงการเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรภายนอก (ก)	46
3.16 แสดงการเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรภายนอก (ข)	46
3.17 แสดงการเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรภายนอก (ค)	47
3.18 วงจรสมบูรณข์ของ pH มิเตอร์	48
3.19 ไทรแอก	49
3.20 ลักษณะภายนอกและวงจรภายในของไทรแอก	50
3.21 อุปกรณ์ขับไทรแอก	51
3.22 ถึงกวนเชื่อมต่อกับ pH อิเล็กโทรด และ มอเตอร์ปั้ม	51
3.23 ไมโครคอนโทรลเลอร์	53
3.24 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์	54
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 7.0	58
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.5	60
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.0	62
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.0	64
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.5	66
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 8.0	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน และ ไฮโดรเจนไอออนแอกทิวิตี้	6
2.2 ขั้วคาโลเมลที่ใช้มากที่สุด	11
2.3 แสดงค่าทางด้านเอาท์พุทที่อิเล็กทรอนิกส์ โทรดวัดค่า pH	20
2.4 แสดงค่าทางด้านเอาท์พุทของอิเล็กทรอนิกส์ โทรดวัดค่า pH ที่อุณหภูมิต่างๆ	21
2.5 ผลของอุณหภูมิบนค่า pH ของบัฟเฟอร์ที่เสถียรภาพ	22
2.6 อุณหภูมิที่มีผลต่อสารละลายที่กำหนด	23
2.7 เปรียบเทียบค่าเอาท์พุทของเซ็นเซอร์ โดยมีศักดิ์อ้างอิงรวมอยู่ด้วย	24
2.8 สาเหตุของความไม่เสถียรภาพในการวัดค่าของ pH เซ็นเซอร์	26
2.9 ชนิดของสารประกอบของสารละลายมาตรฐาน	27
3.1 แสดงขนาดใช้งานของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้า	33
4.1 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 7.0	57
4.2 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.5	59
4.3 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.0	61
4.4 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.0	63
4.5 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.5	65
4.6 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 8.0	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ในปัจจุบันการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมนั้นมีค่อนข้างสูง ทำให้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลของโรงงานผลิต ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยต้นทุนการผลิต และคุณภาพของสินค้ารวมไปถึงการปรับอัตราการผลิตให้เหมาะสมกับสภาวะความต้องการของตลาด ซึ่งส่วนสำคัญในการดำเนินการให้ได้ตามเป้าหมายตามต้องการ จะต้องมีการควบคุมการผลิตให้เหมาะสม โดยจะต้องเลือกวิธีการควบคุมที่เหมาะสมได้

การควบคุมค่าความเป็นกรดและด่างมีบทบาทสำคัญในงานอุตสาหกรรม ในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบที่อยู่ในรูปของเหลว รวมทั้งการบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยออกสู่ภายนอก จะมีการกำหนดค่า pH ไว้ด้วยเสมอ แนวคิดพื้นฐานของโครงการนี้ คือ ต้องการควบคุมค่า pH ให้เป็นไปตามที่เราต้องการ การควบคุมเป็นแบบวงปิด มีการวัดเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาด ไปเปลี่ยนแปลงการทำงานของมอเตอร์ปั๊มสารละลาย และใช้การควบคุมแบบต่างๆที่ใช้การควบคุมอัตโนมัติ เช่น การควบคุมแบบ ON-OFF เข้ามาเป็นส่วนที่ใช้การทำการทดลองนี้ การออกแบบและทดลองจะเป็นการจำลองระบบเล็กๆเพื่อเป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้แท้จริงในงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH Sensors)
2. เพื่อศึกษาเทคนิคการขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณไฟฟ้าด้วยออปแอมป์ (operational amplifier, op amp)
3. เพื่อออกแบบตัวควบคุมค่า pH ผ่านทางระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีของหลักการของการตรวจวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH sensors)
2. ทำการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ และ เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทำงาน
3. ศึกษาโปรแกรมและวงจรที่ใช้ในโครงการ
4. สร้างเครื่องต้นแบบ
5. ทดลองเครื่องต้นแบบและทำการปรับแต่งผลตอบสนองของระบบพร้อมทำการบันทึกผล

1.4 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงแนวความคิดในการจัดทำโครงการ วัตถุประสงค์ในการจัดทำโครงการ ขอบเขตของโครงการ และเนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของหลักการตรวจวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH sensors) และ หลักการควบคุมแบบอัตโนมัติ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจร และการสร้างชุดควบคุม

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองชุดควบคุมค่า pH ที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การตรวจวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH sensors)

ค่า pH เป็นตัวสำคัญในการบอกฟังก์ชันหลายๆ อย่างในงานเคมี และชีวเคมี (biochemical) เช่นในงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) การปรับค่า pH เพื่อกำหนดคุณภาพของชั้นโลหะในหม้อชุบ (electroplating vats) หรือการนำน้ำที่เป็นพิษซึ่งมาจากโรงชุบแข็งกลับมาใช้งานใหม่ ซึ่งปกติจะแปรผันกับค่า pH ที่ช่วงหนึ่ง เป็นต้น

ปกติในงานป้องกันสิ่งแวดล้อมที่เป็นมลภาวะค่า pH เป็นกุญแจสำคัญของตัวแปรในการป้องกันสิ่งแวดล้อม เช่น จะเป็นตัวบอกความรุนแรงของสนิมซึ่งเข้ากันได้กับทางเคมี (bio – compatibility) สำหรับการตรวจสอบคุณภาพของน้ำที่ผิวน้ำ น้ำใต้ผิวดิน น้ำฝน และน้ำเสีย เป็นต้น ตัวอย่างที่ชัดเจนอื่นๆ เช่นปัญหาฝนกรดในประเทศแถบสแกนดิเนเวียที่ได้ฆ่าปลาเทราท์และปลาแซลมอนในทะเลสาบตายเป็นจำนวนมากในปี 1950 หรือฝนกรดที่ทะเลสาบข้างภูเขา Adirondack ในกรุงนิวยอร์ก ซึ่งส่งผลให้ต้นไม้ตายเป็นจำนวนมากก็ล้วนแล้วแต่เป็นปัญหาของค่า pH ในสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

โดยปกติน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าเป็นกลาง คือ pH 7.0 แต่หากมันตกลงมาสัมผัสกับแก๊สหรือวัตถุเล็กๆ ในอากาศที่เป็นมลพิษก็จะมีโอกาสกลายเป็นฝนกรดได้ แก๊สสำคัญที่สามารถละลายได้ในน้ำฝน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ฝนที่ตกลงมากลายเป็นแอนไฮไดรด์ (anhydride) ของกรดคาร์บอนิก โดยกำหนดว่าปริมาณน้ำฝนที่มี pH น้อยกว่า 6.5 จะพิจารณาให้เป็นฝนกรดที่มาของฝนกรดนั้นยังไม่ทราบชัดเจน แต่ที่พบได้บ้างในธรรมชาติ เช่น ฟ้าแลบ การเปลี่ยนสารประกอบของฝัก การปะทุของภูเขาไฟและละอองของเกลือในน้ำทะเล แต่เชื่อกันว่าแหล่งที่สำคัญมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ได้มาจากฟอสซิล ซึ่งเป็นผลให้เกิดฝนกรด

นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณกรดยังจะผ่านมาจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นเบื้องต้น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นเกิดมาจากผลในการเผาไหม้ของถ่านหินและปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์ ส่วนไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดจากยานพาหนะที่ใช้แก๊สโซลีนและโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

2.2 การนิยามความเป็นกรดเป็นด่างและการชี้ค่า

เราสามารถจะบอกระดับความเป็นกรดต่างของสารใด ๆ ได้จากสิ่งต่อไปนี้

2.2.1 จากความหนาแน่นของไอออนไฮโดรเจนหรือไฮโดรเนียมไอออน, H^+ หรือ H_3O^+ (ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวก)

เราเรียก H^+ ในสารละลายว่า ไฮโดรเจนไอออนแอกทีวิตี หรือ ไฮโดรเนียม – ไอออน, H_3O^+ ซึ่งก็คือ “ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน” อันหมายถึงจำนวนกรัม - ไอออนของไอออนไฮโดรเจนที่มีอยู่ในสารละลาย 1 ลิตร (โมล/ลิตร)

pH เป็นตัวย่อที่มาจากภาษาละตินของคำว่า “pondus hydrogenii” (podus = pressure, hydrogenium = hydrogen แต่บางตำราก็ว่า p หมายถึง power ดังนั้นจึงเป็นการวัดการทำงานของไฮโดรเจนไอออนในสารนั้นเอง ค่า pH ของสารละลายใด ๆ กำหนดได้จากลอการิทึมลบ (ฐาน 10) ของความเข้มข้นไฮโดรเนียม – ไอออน นั่นคือ

$$pH = \log \left[\frac{1}{(H^+)} \right] = -\log [H^+] \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

หากสารละลายมีค่า pH มากกว่า จะมีค่า H_3O^+ (หรือ H^+) ในสารละลายมากกว่านั่นเอง

2.2.2 จากความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน, OH^- (ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าลบ)

สารประกอบทั่วไปมีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ถ้านำมาผสมลงในน้ำสารประกอบเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและลบ ปริมาณการแตกตัวเป็นไอออนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและอุณหภูมิของสารละลาย ที่จุดอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง อัตราส่วนของไอออนที่แตกตัวออกต่อจำนวนของสารประกอบซึ่งยังไม่แตกตัวจะมีค่าคงที่ เราเรียกรัตราส่วนนี้ว่าค่าคงที่ของการไอออนไนซ์ (ionization constant) ดังนั้นหากพิจารณาผลของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ก็เป็นการกำหนดความเป็นกรดเป็นด่างในรูปของ pOH scale ซึ่งกำหนดได้จากลอการิทึมลบของความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน นั่นคือ

$$pOH = -\log [OH^-] \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

ทั้งค่า pH และ pOH ของสารละลายที่กำหนดค่านั้นจะสัมพันธ์กับผลคูณไอออนของน้ำบริสุทธิ์ นั่นคือภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ $25^\circ C$

$$K_w = (H_3O^+)(OH^-) = 1.0 \times 10^{-14}$$

หรือเมื่อมีการทำปฏิกิริยากันแล้วก็จะได้เป็น



หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = \frac{(M^+)(A^-)}{(MA)} \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ของการไอออนไนซ์ (moles/l)

M^+ = ความเข้มข้นของไอออนบวก (moles/l)

A^- = ความเข้มข้นของไอออนลบ

(MA) = ความเข้มข้นของสารละลายที่ยังไม่แตกตัว (moles/l)

จากสมการที่ (2.3) M^+ คูณกับ A^- ซึ่งแทนด้วยค่าของ (H_3O^+) (OH^-) ได้เป็น K_w ซึ่ง $K_w = (H_3O^+) (OH^-) = 1.0 \times 10^{-14}$ หาก Take Log ทั้งสองด้านจะได้ความสัมพันธ์สุดท้ายออกมาเป็น $pH + pOH = 14$ หรือหากน้ำมี $pH = 2.00$ ค่า pOH ก็จะมีค่า

$$pOH = 14 - pH = 14.00 - 2.00 = 12.00$$

ดังนั้นที่ค่ากลาง ทั้ง pH และ pOH ต่างก็มีค่าเท่ากับ 7

2.2.3 การกำหนดความเป็นกรดเป็นด่างในรูปของสเกล p

การกำหนดความเป็นกรด-ด่างในรูปของสเกล p สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้

ดังนี้

$$pK = -\log K \dots\dots\dots(2.4)$$

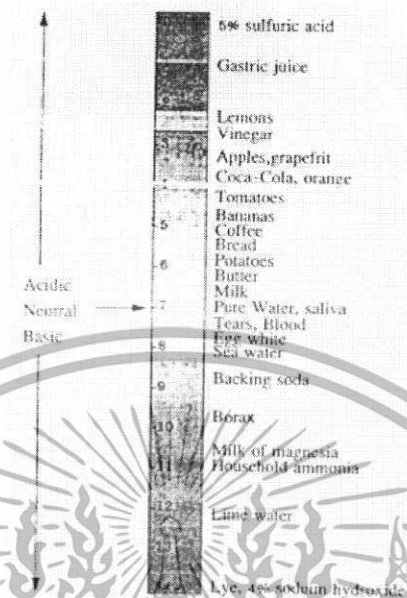
เมื่อ K = ค่าคงที่ของการไอออนไนซ์ (moles/l)

ดังนั้น เราจึงสามารถแสดงค่าคงที่ซึ่งสมมูลกับเทอมของ pK ได้ เช่น

ถ้า $K = 1.0 \times 10^6$ ก็จะได้ค่า $pK = -6.00$ และถ้า $K = 5 \times 10^{-4}$ แล้วค่า $pK = 3.3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนและค่า pH



รูปที่ 2.1 แสดงระดับค่าพีเอชของสารทั่วไปจากกรดของสารทั่วไปจากกรดแก่ถึงด่างแก่

กรดเกลือ (HCl) เป็นสารละลายที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและลบหมดหลังจากทำปฏิกิริยาด้วยเหตุนี้จึงเรียกรวมกรดเกลือว่าเป็น “กรดแก่” ในทางตรงกันข้าม กรดอะซิติก (HAc) เมื่อทำปฏิกิริยาจะมีการแตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมาก จึงมีค่าคงที่ การไอออนในชั้นน้อยจึงถือว่าเป็น “กรดอ่อน” หรือกล่าวได้ว่า เมื่อไฮโดรเจนไอออนแอทวิตีมากกว่า 10^{-7} กรัมไอออน $[H_3O^+] > [OH^-]$ นั่นคือหากค่า pH ต่ำกว่า 7 สารละลายนั้นจะเป็นกรด และถ้าสูงกว่ามากกว่า 7 สารละลายนั้นจะเป็นด่าง ในรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงค่า pH ของสารต่างๆ ทั่วไป

ตารางที่ 2.1 ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน และ ไฮโดรเจนไอออนแอทวิตี

สารละลาย	ความเข้มข้นของไฮโดรเจน(mol/l)	pH = $-\log_{10}$ (Hydrogen ion activity)
N/10-HCl	10^{-1}	1
N/100-HCl	10^{-2}	2
กลาง	10^{-7}	7
N/100 NaOH	10^{-12}	12
N/10 NaOH	10^{-13}	13

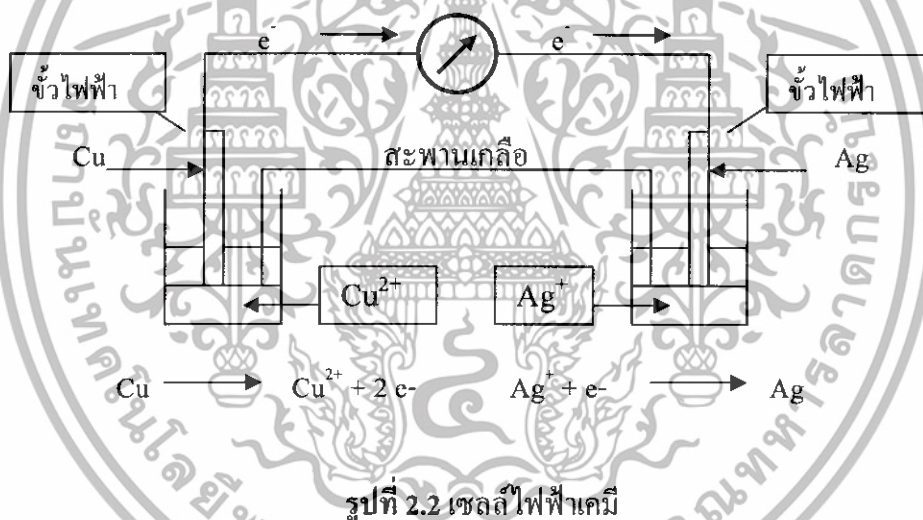
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell)

ถ้ามีสารละลายอยู่ 2 ชนิด ชนิดหนึ่งเป็นสารละลายประกอบด้วยออกซิไดซ์ เช่น Ag^3 (สารละลาย AgNO_3) อีกชนิดหนึ่งเป็นตัวรีดิวซ์อยู่ในรูปของโลหะ เช่น ทองแดง (CuO) เมื่อนำสารทั้งสองมาผสมกันจะเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ทำให้ได้โลหะเงิน(Ag^0) และทองแดงไอออน(Cu^{2+}) ดังสมการ



การเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้น เราไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงไม่สามารถมองเห็นว่ามี การถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้น และไม่สามารถนำเอาผลของการเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ แต่ถ้าเรานำสารทั้งสองชนิดมาประกอบเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะปรากฏว่ามีการไหลของอิเล็กตรอนในวงจรไฟฟ้า เมื่อเกิดการไหลของอิเล็กตรอนก็คือมีการไหลของกระแสเกิดขึ้นนั่นเอง เราจึงสามารถนำเซลล์ไฟฟ้าเคมีมาศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารต่างๆ และวิเคราะห์หาปริมาณได้



เมื่อต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีครบวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากโวลต์มิเตอร์ การไหลของกระแสเกิดขึ้นเนื่องจากโลหะทองแดงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิเล็กตรอนผ่านเส้นลวดไปยังขั้วของโลหะเงินที่จุ่มอยู่ในสารละลายของเงินไอออน เงินไอออนจะรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้โลหะเงินเกาะที่ขั้ว การเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ขั้วทั้งสองทำให้ไอออนในสารละลายของขั้วมีประจุไม่สมดุล ดังนั้นจึงเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนของอิเล็กโตรไลต์ในสะพานเกลือเพื่อทำให้ประจุสมดุลนั่นเอง คือ ในส่วนของสารละลายทองแดงไอออนจะมีโพแทสเซียมไอออนเคลื่อนที่มาและในส่วนของสารละลายเงินไอออน จะมีโพแทสเซียมไอออนเคลื่อนที่มาเพื่อทำให้ประจุสมดุล ถ้าต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีครบวงจรแล้วพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาและให้กระแสเกิดขึ้นเอง จะเรียกเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้ว่า กัลวานิกเซลล์ (galvanic cell) แต่ถ้าต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกจึงจะทำให้มีกระแสเกิดขึ้นภายในเซลล์ได้ จะเรียกเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนั้นว่า อิเล็กโทรไลติกเซลล์ (electrolytic cell) เมื่อพิจารณาเซลล์ไฟฟ้าเคมีต่างๆ ไป จะเห็นได้ชัดว่าเกิดขึ้นจากส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ที่เรียกว่า ครึ่งเซลล์ (half cell) ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน หรือ รับอิเล็กตรอนเรียกว่าแคโทด อีกครึ่งเซลล์หนึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือให้อิเล็กตรอนเรียกว่าแอโนด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แคโทดหรือ แอโนดเรียกว่า ปฏิกิริยาครึ่งเดียว (half reaction)

ปฏิกิริยาที่แคโทด



ปฏิกิริยาที่แอโนด

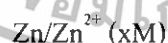


เมื่อรวมปฏิกิริยาที่ 2.6 กับ 2.7 จะได้ปฏิกิริยาที่ 2.8 คือ

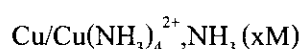


ในแต่ละครึ่งเซลล์ประกอบด้วยแท่งโลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเรียกว่าขั้วอิเล็กโทรด (electrode) จุ่มอยู่ในสารละลายที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันได้ เรียกว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ดังนั้นในครึ่งเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงเรียกว่าขั้วแคโทด และครึ่งเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเรียกว่า ขั้วแอโนด ความหมายของขั้วแคโทดหรือขั้วแอโนดมิได้หมายความเฉพาะแท่งโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายไอออนของโลหะที่สนใจเท่านั้น ยังมีความหมายได้อีกหลายแบบและแต่ละแบบสามารถเขียนสัญลักษณ์ที่แสดงความหมายของครึ่งเซลล์ได้ดังต่อไปนี้

ก.) Metal-metal อีออน ตัวอย่างเช่น แท่งสังกะสีจุ่มในสารละลายของสังกะสีไอออน สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้เป็น



ข.) Metal-complex อีออน ขั้วชนิดนี้ต้องเติมสารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ (complexing agent) ลงในสารละลายของทองแดงที่มีแอมโมเนียมากเกินพอ การเขียนสัญลักษณ์สามารถเขียนเป็น

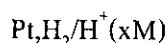


ค.) Metal-saturated solution of one of its salts ขั้วชนิดนี้ประกอบด้วยแท่งโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยเกลือของโลหะที่ละลายน้ำยาก ตัวอย่างเช่น ขั้วเงินจุ่มอยู่ในสารละลายอิ่มตัวด้วยเงินคลอไรด์ สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้เป็น

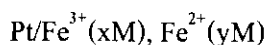


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

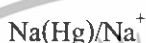
ง.) Gas อีออน ขั้วชนิดนี้ในสารละลายต้องอิมมัวด้วยก๊าซและมีความดันตามที่กำหนด โดยที่ก๊าซนั้นอยู่บริเวณขั้วเฉื่อย ได้แก่ ขั้วไฮโดรเจน เจียนสัญลักษณ์ได้เป็น



จ.) Ion-ion ถ้าอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งตัวรีดิวซ์และตัวออกซิไดซ์ต่างอยู่ในลักษณะที่เป็นไอออน สามารถใช้ขั้วของโลหะเฉื่อย เช่น เพลทินัม เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ เช่น

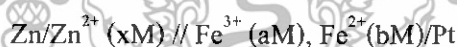


ฉ.) Amalgam-ion โลหะที่มีความไว (reactive-metal) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย เช่น น้ำได้ เมื่อนำมาทำเป็นขั้วควรทำให้อยู่ในรูปของอะมัลกัม เพื่อลดความไวของโลหะที่มีต่อตัวทำละลายลง เช่น



เมื่อนำครึ่งเซลล์ 2 อันมารวมกันจะเกิดเป็นเซลล์ขึ้น โดยที่ครึ่งเซลล์ที่เขียนไว้ทางซ้ายมือ หมายถึง ขั้วแอโนด และ ครึ่งเซลล์เขียนไว้ทางขวามือหมายถึง ขั้วแคโทด เมื่อต้องการทำให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีนี้ต่อครบวงจรสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. ต่อโดยใช้สะพานเชื่อม เมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของขั้วทั้งสองเป็นชนิดที่ต่างกัน บรรจุในภาชนะที่แยกกัน สามารถทำให้สารละลายทั้งสองเชื่อมกันครบวงจรได้โดยใช้สะพานเชื่อม การต่อเซลล์แบบนี้ทำให้เลือกอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมกับขั้วนั้นๆ ได้แต่มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่รอยต่อของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสอง เซลล์ที่สร้างในลักษณะนี้เรียกว่า Cell with liquid junction ตัวอย่างเช่น



เครื่องหมาย // เป็นสัญลักษณ์แทนสะพานเชื่อมระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสอง สะพานเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของครึ่งเซลล์ทั้งสองสามารถทำเป็นรูปแบบต่างๆ กันได้หลายแบบ ดังนี้คือ

ก.) สะพานเกลือ (salt bridge) เตรียมโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์อีกตัวหนึ่งที่นำไฟฟ้าได้ดีเช่น KCl, KNO₃ บรรจุในหลอดแก้วรูปตัวยู (U) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ควรอิมมัว สารละลายจะอยู่ในหลอดแก้วรูปตัวยูโดยกันไม่ให้ไหลออกมาได้ด้วยการใช้แผ่นแก้วพรุนปิดปลายหลอดแก้วไว้ หรือใช้วุ้น (agar) ที่อิมมัวด้วยอิเล็กโทรไลต์บรรจุในหลอดแก้ว การใช้สะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมจะทำให้สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อสารละลายได้มาก การวิเคราะห์บางอย่างสามารถตัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ทิ้งได้ จึงนิยมใช้กันมากที่สุด

ข.) ใช้แผ่นแก้วที่เป็นรูพรุนกั้นกลางระหว่างสารละลายทั้งสองเพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายผสมกันแต่แผ่นแก้วนั้นยอมให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านได้

ค.) สะพานของสารละลาย (liquid bridge) โดยการใส่หลอดแก้วรูปตัววาย (Y) ให้ปลายสองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนวไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งสองที่แยกออกจากกัน แล้วใช้ลวดขงาคูดสารละลายทางปลายอีกข้างหนึ่ง ให้สารละลายทั้งสองมาพบกัน สะพานของสารละลายแบบนี้ ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายได้มาก จึงไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ชนิดนี้ต้องนำศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายมาคิดด้วย ดังนั้น การคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คำนวณได้จากสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} + E_j \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

E_j คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลาย (liquid junction potential) ซึ่งจะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้เมื่อใช้สะพานเกลือที่อิ่มตัวด้วยอิเล็กโทรไลต์

การเกิดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายเกิดขึ้นได้เนื่องจากไอออนแต่ละตัวเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของสารละลายได้ด้วยความเร็วที่ต่างกัน อย่างเช่น พิจารณาการเกิดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลาย 2 ชนิดที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกันแต่ความเข้มข้นต่างกันของกรดเกลือ



ทั้ง H^+ และ Cl^- สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของสารละลายได้ทั้งสองทิศทางแต่ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนจากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำจะมีมากกว่า ซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะสัมพันธ์กับความแตกต่างของความเข้มข้น โดยธรรมชาติของไอออน H^+ สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า การที่รอยต่อของสารละลายเกิดการแยกของประจุขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่รอยต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อนี้ จะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ทั้งสอง



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและลบผ่านรอยต่อของสารละลาย

2. ต่อเซลล์โดยการไหลของไอออนไม่ต้องข้ามรอยต่อของสารละลาย เมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของขั้วทั้งสองของเซลล์สามารถใช้ชนิดเดียวกันได้ การต่อเซลล์ก็ไม่จำเป็นต้องมีสะพานเชื่อม เซลล์ชนิดนี้เรียกว่า cell without liquid junction

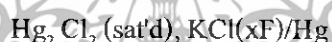
2.5 ขั้ววัดค่า pH

ในการสร้างเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ครึ่งเซลล์ไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นครึ่งเซลล์ที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนแล้ว ซึ่งเรียกว่า ขั้วอ้างอิง (reference - electrode) ส่วนอีกครึ่งเซลล์หนึ่งจะประกอบด้วยสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์กับขั้วที่ไวต่อสารละลายนั้น ซึ่งเรียกว่า ขั้วทำงาน หรือ ขั้วชี้บอก (working electrode or indicator electrode) ลักษณะของขั้วอ้างอิงจะมีรูปร่างอย่างไร สามารถผลิตขึ้นได้ตามความเหมาะสมในการใช้งาน และจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าได้ทุกวิธี จึงสามารถนำชนิดของขั้วอ้างอิงมากล่าวไว้รวมกันในบทนี้ได้

2.5.1 ขั้วอ้างอิง (reference electrode)

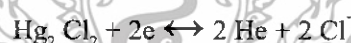
ขั้วอ้างอิงที่ใช้การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้ามี 3 ชนิด คือ

2.5.1.1 ขั้วคาโลเมล (calomel electrode) ขั้วคาโลเมลที่ประกอบเป็นครึ่งเซลล์ สามารถเขียนสัญลักษณ์ทั่วไปได้ดังนี้ คือ



เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของ KCl ในสารละลาย ถ้า x มีค่าเท่ากับ 1 ขั้วชนิดนี้เรียกว่า normal calomel electrode (NCE) ถ้าความเข้มข้นของ KCl มีค่าอิ่มตัวในสารละลาย เรียกขั้วชนิดนี้ว่า ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว (saturated calomel electrode, SCE)

ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นที่ขั้ว คือ



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์ (x F) ในสารละลาย ขั้วคาโลเมลที่ใช้กันมากที่สุดมีอยู่ 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขั้วคาโลเมลที่ใช้มากที่สุด

Name	Concentration of		Reduction potential (V) vs. standard hydrogen electrode
	Hg ₂ Cl ₂	KCl	
Saturated	Saturated	Saturated	+0.242 - 7.6 × 10 ⁻⁴ (t-25°C)
Normal	Saturated	1.0 F	+0.280 - 2.4 × 10 ⁻⁴ (t-25°C)
Decinormal	Saturated	0.1 F	+0.334 - 7.0 × 10 ⁻⁴ (t-25°C)

จะสังเกตได้ว่า ขั้วคาโลเมลแต่ละชนิดต้องมี Hg₂Cl₂ อิ่มตัว ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ KCl และ อุณหภูมิ คอลัมน์สุดท้ายแสดงการคำนวณศักย์ไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิไม่ใช่ 25°C ตัวอย่าง เช่น ที่อุณหภูมิ 30°C จะคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว normal calomel electrode ได้เท่ากับ

$$+0.280 - 2.4 \times 10^{-4} (30-25) = 0.279 \text{ Volt}$$

ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว (SCE) เป็นขั้วที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการวิเคราะห์เพราะง่ายต่อการเตรียม ความเข้มข้นของ KCl ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการวิเคราะห์ การสร้างขั้วคาโลเมลอิ่มตัวแบบง่ายๆ ได้แสดงไว้ มีสะพานเกลือที่บรรจุด้วยสารละลาย KCl อิ่มตัวเป็นตัวเชื่อมระหว่างครึ่งเซลล์ของคาโลเมลกับครึ่งเซลล์ของสารตัวอย่างที่ปลายหลอดแก้วของสะพานเกลือจะมีแผ่นแก้วพรุนกันไม่ให้สารละลายตัวอย่างที่อยู่ข้างนอกกับ KCl ไหลมาผสมกัน หรืออาจจะใช้ 3% ของวันที่มี KCl อิ่มตัวบรรจุ ในหลอดแก้วแล้วปล่อยให้แข็งตัวเป็นสะพานเกลือก็ได้

เนื่องจากขั้วคาโลเมลอิ่มตัวเป็นที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าทุกแบบดังนั้น จึงมีผู้ผลิตขั้วคาโลเมลอิ่มตัวเพื่อให้สะดวกในการใช้งานขึ้นจำหน่าย ซึ่งสามารถซื้อหามาใช้งานได้โดยไม่ต้องเตรียมขึ้นเอง ลักษณะของขั้วคาโลเมลที่ผลิตขึ้นมาประกอบด้วย หลอดแก้วยาว 5-15 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1.0 เซนติเมตร ผสม Hg กับ Hg_2Cl_2 กับ KCl อิ่มตัว ให้เข้ากัน บรรจุในหลอดภายใน (inner tube) ที่บรรจุอยู่ในหลอดที่ใหญ่กว่าอีกทีหนึ่ง (outer tube) หลอดใหญ่จะมี KCl ที่อิ่มตัวบรรจุอยู่และมีรูเล็กๆ ปิดด้วย porous fiber เพื่อให้สัมผัสกับสารละลายของอีกครึ่งเซลล์หนึ่งได้ ขั้วชนิดนี้มีความต้านทานสูงมาก

2.5.1.2 ขั้วไฮโดรเจน (hydrogen electrode) ขั้วไฮโดรเจนประกอบด้วยแผ่นแพลตตินัมที่สะอาดและฉาบไว้ด้วยแพลตตินัมอีกทีหนึ่ง (platinized platinum) อยู่ในหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซไฮโดรเจนที่สามารถควบคุมความดันได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว คือ



ขั้วไฮโดรเจนที่เป็นมาตรฐานต้องอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนตลอดเวลาภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ และจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเกลือเข้มข้น 1 แอคติวิตี เรียกว่า ขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน (standard hydrogen electrode, SHE) มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์

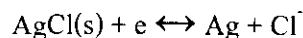
ในการวิเคราะห์ไม่ค่อยนิยมใช้ขั้วไฮโดรเจนเป็นขั้วอ้างอิงเท่าใดนัก เพราะยุ่งยากในการควบคุมความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความสำคัญของขั้วไฮโดรเจน คือ ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของขั้วอ้างอิง และขั้วชี้บอกที่ใช้ในงานวิเคราะห์

2.5.1.3 ขั้วเงิน-เงินคลอไรด์ (silver-silver chloride electrode) ส่วนประกอบของขั้ว Ag-AgCl คล้ายคลึงกับขั้วคาโลเมล คือ ประกอบด้วยสารละลายของ KCl ที่มี AgCl อิ่มตัวอยู่เขียนสัญลักษณ์ทั่วไปของขั้วได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

//AgCl (sat's), KCl (xF)/Ag

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ



โดยปกติขั้วชนิดนี้เตรียมจาก KCl ที่อิ่มตัว ศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25° C จะมีค่าเท่ากับ +0.197 volt เมื่อวัดเทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน

2.5.2 ขั้วชี้บอก (indicate electrode)

การแบ่งชนิดของขั้วชี้บอก สารละลายที่ต้องการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหรือ pH ต้องประกอบเป็น เซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยขั้ว 2 ชนิด คือ ขั้วชี้บอกซึ่งไวต่อสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์และขั้วอ้างอิงซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ จากนั้น จึงนำขั้วของเซลล์ทั้งสองต่อเข้าเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อวัดค่า ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัด ได้นั้นขึ้นอยู่กับขั้วชี้บอกและความเข้มข้นของ ไอออนที่ไวต่อขั้วชี้บอก ดังนั้น การศึกษาถึงชนิดของขั้วชี้บอกที่นำมาใช้ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของ ไอออนแต่ละชนิดจึง เป็นเรื่องสำคัญมาก ขั้วชี้บอกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนชิโอเมตริก แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ขั้วชี้บอกที่เป็นแท่งโลหะ และ ขั้วชี้บอกที่เป็นเมมเบรน

2.5.2.1 ขั้วชี้บอกที่เป็นโลหะ (metallic indicator electrode) ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึงเพราะ ไม่ใช้ในการวัดค่า pH

2.5.2.2 ขั้วชี้บอกที่เป็นเมมเบรน (membrane electrode) ขั้วเมมเบรนนั้นเป็นขั้วที่ได้ พัฒนาขึ้นเพื่อทำให้การวิเคราะห์ได้กว้างขวางขึ้นและสามารถวิเคราะห์ไอออนได้หลายชนิด ขั้วเมมเบรนบางชนิดที่ผลิตขึ้นมาสามารถใช้ได้ดีกับ ไอออนแต่ละตัวไม่เหมือนกันดังนั้นจึงมีชื่อเรียก เฉพาะว่า ion selective electrode ขั้วเมมเบรนที่ถูกค้นพบขึ้นก่อน คือ ขั้วที่ใช้แก้วเมมเบรนซึ่งไวต่อ ไฮโดรเจนไอออนและยอมให้ไฮโดรเจน ไอออนผ่านเมมเบรนได้เพียงอย่างเดียว ขั้วชนิดนี้มีไว้ สำหรับวัดค่า pH ของสารละลายเท่านั้น มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ขั้วแก้วสำหรับวัด pH (glass - electrode for pH measurement) นอกจากนี้ ยังได้ค้นพบแก้วเมมเบรนชนิดอื่นๆ อีกที่ยอมให้ ไอออนอื่นนอกเหนือ จาก H ผ่านได้ นั่นคือ ถ้าพิจารณาประเภทของขั้วเมมเบรน สามารถแบ่งไปเป็น 2 ชนิด คือ

ก. ขั้วแก้วเมมเบรน (glass membrane electrode) ขั้วที่ใช้แก้วเมมเบรนมี 2 ชนิดคือ ชนิดที่ วัดเฉพาะไฮโดรเจนไอออน และชนิดที่สามารถวัดไอออนอื่นๆ นอกเหนือจากไฮโดรเจนไอออน

ข. Ion selective electrode ขั้วชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบ ตามชนิดของเมมเบรนที่ใช้ดังนี้ คือ

- Liquid membrane electrode
- Solid-state or precipitate electrode
- Gas-sensing membrane electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Enzyme electrode
- Coated wire ion selective electrode

2.5.3 ขั้วแก้วสำหรับวัด pH

ขั้วแก้วที่ใช้วัด pH ของสารละลาย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่บรรจุอยู่ภายใน คือ กรดเกลือ (HCl) และมีขั้ว Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิงภายในเพื่อให้สามารถต่อเซลล์ได้ครบวงจร ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ HCl ที่อยู่ภายนอก โดยมีกลาสเมมเบรนเป็นตัวกั้นระหว่างสารละลาย HCl ภายนอก และ ภายใน

เมื่อต้องการวัด pH ของสารละลายต้องใช้ขั้วแก้วเป็นขั้วรับออก และขั้วคาโทดลิ่มตัวเป็นขั้วอ้างอิงจุ่มลงในสารละลายที่ต้องการวัดค่า pH แล้วต่อเข้าเครื่อง pH meter หรือ โปเทนชิโอมิเตอร์ สัญลักษณ์ที่เขียนแทนเซลล์ที่ต้องการวัดค่า pH เขียนได้ ดังนี้



จากสัญลักษณ์ของเซลล์ข้างต้นแสดงว่า ใช้ขั้วอ้างอิง SCE เป็นขั้วแคโทด ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์มีค่าดังนี้

E_j คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายระหว่างขั้ว SCE กับสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์

V_1 คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างแก้วเมมเบรนกับสารละลาย $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ที่ต้องการวิเคราะห์ (a₁)

V_2 คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างแก้วเมมเบรนกับสารละลาย $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ที่อยู่ในขั้วแก้ว (a₂)
เนื่องจาก $E_{\text{SCE}}, E_{\text{Ag}}$ และ E_j เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่าง V_2 กับ V_1 ค่า V_2 กับ V_1 จะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายเพราะเกิดการเปลี่ยน H^+ ที่ผิวแก้วจะประกอบด้วยกลุ่มของซิลิเกต (silicate group) ร่วมกับโซเดียมไอออน ($\text{SiO}^- \text{Na}^+$) เมื่อนำขั้วแก้วเมมเบรนมาแช่ในสารละลาย จะทำให้ผิวของเมมเบรนถูกไฮเดรต (hydrated) เมื่อขั้วถูกไฮเดรตแล้วสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na กับ H^+ ขึ้น

ไอออนอื่นๆ ก็สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ Na ได้เช่นกัน แต่เนื่องจากการแลกเปลี่ยนกับ H^+ มีค่าสมมูลของปฏิกิริยาสูงมากจึงทำให้ที่ผิวของแก้วอยู่ในรูปของกรดซิลิซิลิก (silicic acid) เกือบทั้งหมด นอกเสียจากว่าในสารละลายจะมีฤทธิ์เป็นด่างที่มีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนต่ำ นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้า (V_1) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายกับไอออนที่ผิวของแก้วเมมเบรนที่ถูกไฮเดรต

ในการทำงานเดียวกัน แก้วเมมเบรนด้านในสัมผัสกับสารละลายภายในจะเกิดศักย์ไฟฟ้า V_2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางใดๆ ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นแสดงว่าที่ผิวทั้งสองด้านของแก้วเมมเบรนจะเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น ซึ่งความต่างศักย์ระหว่าง V_1 กับ V_2 นี้เรียกว่า boundary potential (E_b)

ขั้วแก้วที่นำไปใช้ในการวัดค่า pH ของสารละลาย สามารถรับความรู้สึกต่อสารละลายได้ไว และเปลี่ยนแปลง pH ได้อย่างรวดเร็ว เพื่อปรับค่าให้อ่านได้ถูกต้อง เมื่อสารละลายเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ถ้าสารละลายไม่ใช่สารละลายบัฟเฟอร์ขั้วจะรับความรู้สึกต่างค่า pH นั้นได้ช้า ต้องให้เวลานานพอสมควรจึงจะอ่านค่า pH ได้ถูกต้อง เมื่อต้องการนำขั้วมาใช้วัดค่า pH แต่ครั้งต้องล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งแล้วล้างตามด้วยสารละลายที่ต้องการวัดค่า pH (rinse) จากนั้นจึงค่อยอ่านค่า pH เมื่อขั้วแก้วจุ่มอยู่ในสารละลายจนเข็มที่มิเตอร์คงที่ สารละลายที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นสารละลายบัฟเฟอร์เมื่อต้องการวัด pH ควรทำการคนสารละลายนั้นแรงๆ ขั้วแก้วสำหรับวัดค่า pH สามารถนำมาใช้ได้สะดวก มีสิ่งรบกวนน้อยกว่าการใช้ขั้วชนิดอื่นๆ และมีราคาไม่แพง สารประเภทที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ โปรตีน และก๊าซ ไม่สามารถรบกวนการวัดค่า pH โดยขั้วแก้วได้ในทางอุตสาหกรรม การผลิตขั้วเพื่อใช้ในการวัดค่า pH ของสารละลาย เขาได้นำขั้วซีบอกและขั้วอ้างอิงมาบรรจุอยู่ในหลอดแก้วเดียวกันทำให้มีลักษณะเหมือนเป็นขั้วอันเดียวกัน เรียกว่า combination electrode เมื่อต้องการวัด pH ของสารละลาย สามารถทำได้โดยใช้ขั้วชนิดนี้จุ่มลงในสารละลาย แล้วต่อเข้ากับเครื่อง pH มิเตอร์

2.5.4 ขั้วชนิดอื่นๆ ที่ใช้วัด pH

การวัด pH ของสารละลาย นอกจากจะใช้ขั้วแก้วเมมเบรนแล้ว ยังสามารถใช้ขั้วที่เป็นแท่งโลหะได้อีกหลายแบบ ซึ่งจะขอนำมากล่าวรายละเอียดต่อเนื่องจากการใช้ขั้วแก้วเมมเบรนสำหรับวัด pH เพื่อจะได้เปรียบเทียบกัน ไม่ว่าจะใช้ขั้วชนิดใดวัดค่า pH ของสารละลาย จะบอกค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้นั้นแปรผัน โดยตรงกับค่า pH เมื่อใช้ขั้วอ้างอิงเป็นแคโทด ตามสมการดังนี้ คือ

$$E_{cell} = k + 0.0591pH \dots\dots\dots(2.10)$$

ขั้วที่สามารถใช้วัดค่า pH ของสารละลายนอกเหนือจากขั้วแก้ว ได้แก่

ก. ขั้วไฮโดรเจน ขั้วไฮโดรเจนจะไวต่อ H^+ ของสารละลายด้วย เพราะเกิดปฏิกิริยา



การคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คำนวณได้ดังนี้

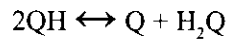
$$\begin{aligned} E_{cell} &= E_{SCE} - (E_{H_2}) \\ &= k + 0.0592pH \end{aligned}$$

ในการทดลองต้องควบคุมความดันของก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศในการวิเคราะห์ทั่วไปไม่นิยมใช้ขั้วชนิดนี้เพราะไม่สะดวกในการควบคุมความดันแก๊สและยากในการสร้างขั้วแก๊ส

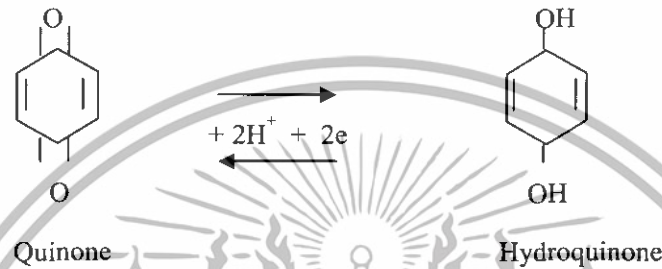
ไฮโดรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง และ แพลตินัมที่ใช้ต้องฉาบผิวด้วยแพลตินัมแบล็ค (Pt black)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ขั้วควินไฮโดรอน (quinhydrone electrode) ส่วนประกอบของขั้วชนิดนี้ คือ สารละลายของควินไฮโดรอนที่มีแท่งแพลตตินัมจุ่มอยู่เป็นสื่อไฟฟ้า สารละลายควินไฮโดรอนเตรียมได้จากการผสมควิโนนกับไฮโดรควิโนน ที่มีจำนวนโมลเท่ากันหรือใช้ของแข็งควินไฮโดรอนเตรียมเป็นสารละลายแยกก็ได้ ในสารละลายของควินไฮโดรอนจะเกิดสมดุล ดังนี้



เมื่อใช้ขั้วควินไฮโดรอนจุ่มในสารละลายของกรด จะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วควินไฮโดรอนจะขึ้นอยู่กับ H^+ ตามสมการของเนิร์นสต์

$$E_{qh} = E_{qh} - 0.0591/2 \log$$

ในเมื่อสารละลายของควินไฮโดรอนเตรียมจากการใช้ควิโนนและไฮโดรควิโนนเท่ากัน ดังนั้น อัตราส่วนของ $[H_2Q] : [Q] = 1 : 1$ นั่นคือ

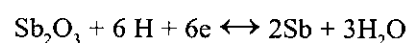
$$E_{qh} = E_{qh} - 0.0591 \text{pH}$$

ถ้านำขั้วควินไฮโดรอนวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายคู่กับขั้วอ้างอิงคาโลเมลล์อิ่มตัวโดยใช้ขั้วคาโลเมลเป็นแคโทด จะได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในรูปสมการเดียวกับการใช้ขั้วแก้วหรือขั้วไฮโดรเจนเช่นกันคือ

$$E_{cell} = k + 0.0591 \text{pH}$$

ขั้วควินไฮโดรอนไม่เหมาะสำหรับสารละลายที่มี pH สูงกว่า 9 เพราะไฮโดรควิโนนมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนที่สามารถถูกทำให้สะเทินได้ด้วยสารละลายของด่าง

ค. ขั้วแอนติโมนี (antimony electrode) ขั้วชนิดนี้ใช้แท่งโลหะของพลวงฉาบด้วยออกไซด์ของพลวง (Sb, Sb_2O_3) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วไวต่อ H^+ ดังนี้



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วคำนวณตามสมการของเนิร์นสต์ได้ดังนี้

$$E_{sb} = E_{sb} - 0.0591/6 \log I$$

เมื่อ Sb และ Sb_2O_3 เป็นของแข็งจึงมีแอกติวิตีเป็น 1

ถ้าใช้ขั้วแอนติโมนีเป็นขั้วแอโนดวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายคู่กับขั้วคาโทดเป็นแคโทด จะได้สมการในการคำนวณเช่นเดียวกับขั้วกลาสคือ

$$E_{\text{cell}} = k + 0.0591 \text{ pH}$$

ขั้วแอนติโมนีไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารละลายต่อไปนี้

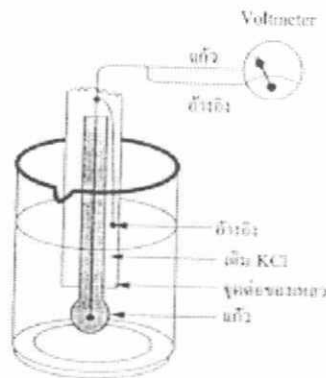
- สารละลายที่มีตัวออกซิไดซ์อย่างแรงและสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนปนอยู่
- สารละลายที่มี pH ต่ำกว่า 2 เพราะจะทำให้ Sb_2O_3 ละลายได้
- สารละลายที่มีโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ โนเบิล (Noble-metal) มากกว่าแอนติโมนี

โลหะทรานซิชันที่มีคุณสมบัติคล้ายกับแอนติโมนี คือ เกิดสมดุระหว่างโลหะกับโลหะออกไซด์ ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนไอออน สามารถใช้ทำเป็นขั้วในการวิเคราะห์หาค่าของสารละลายได้ เช่น แมงกานีส ทั้งสเดน โมลิบดีนัม พรอท และเจอร์มาเนียม แต่การใช้ขั้วเหล่านี้ยังไม่มีการรายงานการทดลองมากนัก



81990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.4 แสดงพีเอชมิเตอร์

(ก) แยกอิเล็กโทรดทั้งสองจากกัน

(ข) รวมอิเล็กโทรดทั้งสองเข้าไว้ในชุดเดียวกัน

2.6.2 ความหมายของ pH เซนเซอร์

pH เซนเซอร์ คืออุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical) ที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า pH ของสารละลายที่นำไปวัด

ส่วน pH มิเตอร์ก็ใช้หลักการที่กล่าวมา คือใช้หลักการวัดค่าความเป็นกรดหรือด่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งก็ใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้าเหมือนกัน หลังจากนั้นก็นำค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมาระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) กับอิเล็กโทรดวัด (sensing electrode) ไปขยาย ปรับสเกล และแสดงผลต่อไป

ดังนั้นหัวเซนเซอร์ pH จึงต้องมีทั้งขั้ววัดและขั้วอ้างอิงอยู่ แล้วแต่ว่าจะแยกออกจากกันหรืออยู่รวมกัน ในรูปที่ 2.4 (ก) แสดงลักษณะซึ่งแยกอิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดอ้างอิงออกจากกัน ส่วนในรูปที่ 2.4 (ข) เป็นการรวมอิเล็กโทรดเข้าไว้ในชุดเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ 2.5** แสดงตัวอย่างของอิเล็กโทรดวัดค่าพีเอชแบบแก้ว ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ส่วนประกอบและการทำงานของอิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดอ้างอิง

2.6.3.1 ขั้ววัด (sensors electrode) โดยปกติแล้วอิเล็กโทรดวัดจะทำจากแก้ว ขั้ววัดจะมีกระเปาะแก้วบางมาก ๆ เพื่อให้ไวต่อไอออน H^+ ภายในอิเล็กโทรดจะบรรจุสารละลายกันชนที่เรียกว่า บัฟเฟอร์ (buffer) ซึ่งมีค่า pH คงที่ (ประมาณ pH 7) สารละลายนี้ได้แก่ KCl อิ่มตัว ในสารละลายดังกล่าวจะมีขั้วไฟฟ้าซึ่งทำด้วยเงิน (silver) ณาบด้วยซิลเวอร์คลอไรด์จุ่มอยู่

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าทางด้านเอาต์พุตที่อิเล็กโทรดวัดค่า pH

pH	mV
0	+414.0
1	+354.9
2	+295.8
3	+236.6
4	+177.5
5	+118.3
6	+59.15
7	0
8	-59.15
9	-118.3
10	-177.5
11	-236.6
12	-295.8
13	-354.9
14	-414.0

ที่มา : จากบริษัท TBI – Bailey Controls จำกัด

นอกจากศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้น H^+ แล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย จากตารางที่ 2.4 พบว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จะแตกต่างกันแม้ว่ามีค่า pH เดียวกัน (เพราะอุณหภูมิแตกต่างกัน) ดังนั้นในการวัดค่า pH จึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิในการใช้งานให้ถูกต้องอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเอาต์พุตของอิเล็กโทรดวัดค่า pH ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

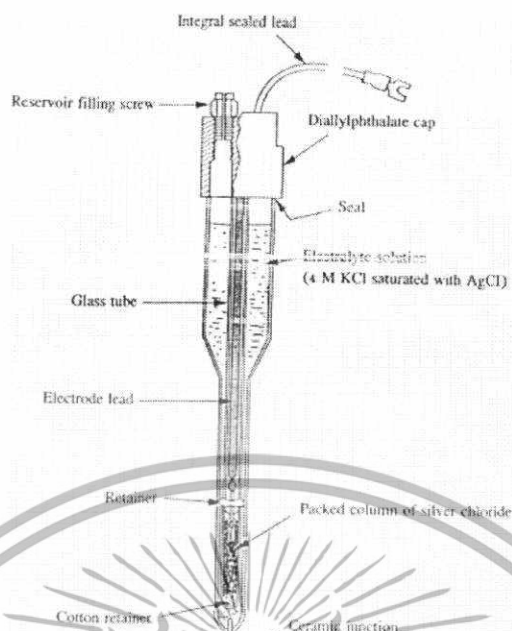
อุณหภูมิ	0° C	25° C	40° C	70° C	90° C
pH	mV	mV	mV	mV	mV
0	+379.3	+414.0	+434.9	+476.6	+504.4
3	+216.8	+236.6	+248.5	+272.4	+288.2
5	+108.4	+118.3	+124.2	+136.2	+144.1
7	0	0	0	0	0
8	-54.19	-59.15	-62.13	-68.09	-72.05
10	-162.6	-177.5	-186.4	-204.3	-216.2
12	-270.1	-295.8	-310.7	-340.5	-360.3
14	-379.3	-414.0	-434.9	-476.6	-504.4

ที่มา : จากบริษัท TBI – Bailey Controls จำกัด

2.6.3.2 ขั้วอ้างอิง (reference electrode) หรือเรียกว่าขั้วเปรียบเทียบ มีไว้เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ววัดครบวงจร ขั้วอ้างอิงนี้จะมีลวดนำ (lead wire) ต่อกับซิลเวอร์คลอไรด์และขั้วซิลเวอร์คลอไรด์ลงใน KCl ชนิดอิ่มตัว KCl นี้จะซึมผ่านรูเล็กๆ ที่ปลายของหลอดแก้วเพื่อสัมผัสกับสารละลายที่จะวัดการเชื่อมต่อระหว่างสารละลายทั้งสองนี้เรียกว่าสะพานเกลือ (salt bridge) รูที่เชื่อมต่อนี้มักจะมีสารเอสเบสทอสหรือเซรามิกวางคั่นเอาไว้ เพื่อให้การไหลของ KCl คงที่ตลอดเวลาขณะที่ทำการวัด ดังรูปที่ 2.6

ข้อควรระวังคือ ขั้วเปรียบเทียบที่ใช้ต้องเป็นชนิดเดียวกับอิเล็กโทรดภายในขั้วแก้ว นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลาย KCl ในอิเล็กโทรดอ้างอิงต้องเท่ากับในขั้วแก้วด้วย

จากผลของอุณหภูมิที่แยกกล่าวไว้ ผู้ผลิตตัววิเคราะห์หรือระบบการวัดค่า pH จึงต้องระมัดระวังผลของอุณหภูมิ นั่นคือต้องมีการชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติเพื่อกำจัดผลดังกล่าว จากตัวอย่างนี้ จึงต้องใช้สารละลาย pH ที่มีค่าคงที่ ในตารางที่ 2.5 จะแสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า pH ของบัฟเฟอร์ที่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างอิเล็กโทรดอ้างอิงที่วัดค่าพีเอช(อิเล็กโทรดแบบซิลเวอร์/ซิลเวอร์-คลอไรด์)

ค่าของบัฟเฟอร์ 2 ตัวในตารางที่ 2.4 คือที่ค่า pH 7 และ 10 ได้จากสมาคม EPA ส่วนบัฟเฟอร์ที่เห็นทั้งหมดในตารางที่ 2.5 นี้ได้มาจากความสามารถในการสืบทอดค่า (traceable) ของสมาคม NBS (แต่ไม่ใช่ค่า pH 7 และ 10) จากตารางดังกล่าว พบว่ากรณีที่เลวร้ายที่สุดของบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 10 ซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงเฉพาะกับอุณหภูมิเท่านั้นแต่จะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมอื่นด้วย และพบว่ามันจะรับเอาคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศด้วย ทำให้ความสามารถในการบัฟเฟอร์ของมันต่ำลง และยังมีผลอย่างมากหากค่า pH ที่วัดต่ำกว่าค่า pH ของมัน หรือถูกใช้ในการวัดค่าอื่นนานๆ

ตารางที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิต่อค่า pH ของบัฟเฟอร์ที่เสถียรภาพ

อุณหภูมิ	บัฟเฟอร์ที่ pH 4.01	บัฟเฟอร์ที่ pH 6.87	บัฟเฟอร์ที่ pH 9.18	บัฟเฟอร์ที่ pH 12.45
0° C	4.00	6.98	9.46	13.42
25° C	4.01	6.87	9.18	12.45
50° C	4.06	6.83	9.01	11.71
70° C	4.13	6.85	8.92	11.22
100° C	4.25	6.90	8.81	10.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางด้านล่างนี้แสดงให้เห็นการวัดค่า pH ในกระบวนการของอะลูมิเนียมไนเตรด และน้ำบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิที่มีผลต่อสารละลายที่กำหนด

อุณหภูมิ	pH ของ H ₂ O บริสุทธิ์	pH ของ NH ₄ NO ₃
18° C	7.12	7.47
25° C	7.00	-
50° C	6.64	6.27
70° C	6.41	-
90° C	6.23	5.18

ที่มา : จากบริษัท TBI – Bailey Controls จำกัด

ขณะวัดสารละลาย KCl จะไหลออกมาเพื่อเชื่อมต่อกับสารละลายที่ถูกวัดตลอดเวลา ดังนั้นในการใช้ pH มิเตอร์ จึงต้องหมั่นตรวจสอบดู KCl ในอิเล็กโทรดอ้างอิง เพื่อดูว่าขาดหายไปเท่าใด หากลดลงก็ให้เติมเข้าไปใหม่

ในห้องทดลองส่วนใหญ่จะอ้างอิงโดยใช้ KCl (โปตัสเซียมคลอไรด์) ก็ือสารละลายเกลือ ซึ่งมีจำนวนของ AgCl (ซิลเวอร์คลอไรด์) ที่ควบคุมไว้ โดยให้เกลือละลายในซิลเวอร์คลอไรด์ ดังกล่าว พร้อมกับวางอิเล็กโทรด Ag/AgCl ไว้เพื่อทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดโดยครึ่งเซลล์ทางเคมีนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของทั้ง KCl และเกลือ AgCl จากในตัวอย่างอิเล็กโทรไลต์ KCl ขนาด 1.0 โมล (M) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 8 มิลลิโวลต์ ขณะที่ KCl ขนาด 3.3 โมล (M) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า -45 มิลลิโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์โดยมีศักย์อ้างอิงรวมอยู่ด้วย

pH	แรงเคลื่อนทาง	แรงเคลื่อนเมื่ออ้างอิงกับ KCl	แรงเคลื่อนเมื่ออ้างอิงกับ KCl
	ทฤษฎี	1.0 M	3.3 M
0	+414	+406	+369.0
3	+236.6	+228.6	+191.6
6	+59.15	+51.15	+14.15
7	0	-8	-45
8	-59.15	-67.15	-104.15
11	-236.6	-244.6	-281.6
14	-414.0	-422.0	-459.0

ที่มา : จากบริษัท TBI – Bailey Controls จำกัด

เซนเซอร์ที่ทำมาจากอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน จะขึ้นอยู่กับความมุ่งหมายในการใช้งานที่ต่างกัน หากจะใช้หัววัดเซนเซอร์ในกระบวนการให้ได้ดีที่สุดและมีระยะใช้งานยาวนาน ต้องใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ

จากตารางที่ 2.7 สังเกตว่าในแต่ละคอลัมน์จะมีปรากฏการณ์หนึ่งร่วมกัน นั่นคือเมื่อค่า pH เปลี่ยนไป แรงเคลื่อนเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงไป 59.15 mV ผิดกันตรงที่แต่ละคอลัมน์จะมีออฟเซตแตกต่างกัน 8 mV, 33 mV, 45 mV ตามลำดับ ค่าออฟเซตนี้สามารถทำให้หายไปได้โดยกระบวนการปรับแต่งที่เรียกว่า “Standardization” บนตัววิเคราะห์ pH หรือเรียกการปรับแต่งนี้ว่า “การปรับซีโร”

จากที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ค่าออฟเซตอ้างอิงจะไม่มีผลต่อความชันของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ความชันของกราฟดังกล่าวสามารถหาได้จากประสิทธิภาพครึ่งเซลล์ของอิเล็กโทรดแบบแก้วที่วัดค่าได้จาก pH จริง แม้ว่าอิเล็กโทรดใหม่จะมีประสิทธิภาพ 100 % แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า มันจะสามารถผลิตแรงเคลื่อนได้ 59.15 mV ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในแต่ละหน่วยดังนั้นจึงสมมติให้มันมีประสิทธิภาพเพียงแค่ 98%

พบว่าอิเล็กโทรดแก้วแต่ละอันจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่เท่ากัน หากมีโซเดียมปะปนอยู่จะทำให้แรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุตถูกกดให้ต่ำลงที่ค่า pH สูง ๆ เช่นเมื่อจะเปลี่ยนชนิดของแก้ว แรงเคลื่อนอาจจะเกิดต่ำสุดที่ pH 10 แม้คุณสมบัติของตัวเซนเซอร์ที่บอกมาจะผิดพลาดต่ำก็ตาม โซเดียมที่ปะปนเข้ามาบางครั้งอาจทำให้เสมือนว่ามีค่า pH สูงกว่า 13 ในทางกลับกัน pH เซนเซอร์ส่วนใหญ่จะมีความผิดพลาดจากกรดที่ pH ต่ำกว่า 1.5 ซึ่งจะทำให้แรงเคลื่อนทางเอาต์พุตมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องรู้ชนิดของแก้วที่ใช้ทำอิเล็กโทรด ทั้งในห้องทดลองและในกระบวนการ

จุดต่อของเหลวในอิเล็กโทรดของห้องทดลองจะมีขนาดเล็กมาส่วนอิเล็กโทรดที่อยู่ในกระบวนการจะมีขนาดใหญ่กว่า ตัวอย่างของเซ็นเซอร์วัดค่า pH ยี่ห้อ TBI - Bailey ที่มีจุดอ้างอิงแบบโซลิดสเตต จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3/4 นิ้ว ส่วนจะต่ออีกอันจะทำให้มีขนาดเล็กกว่าปกติ

จุดต่ออ้างอิงที่ผิดพลาดจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าในวงจรวัดค่าผิดพลาดไปด้วย ในกรณีที่ผิดพลาดมากขึ้นจะทำให้เกิดการต่อต้านการไหลของกระแส โดยเริ่มอ่านค่า pH ผิดพลาดก่อนสุดท้ายจึงไม่สามารถใช้งานได้ ผลดังกล่าวอาจเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการแพร่กระจายของไอออนบวกและไอออนลบ ที่กระจายไปยังด้านหลังและด้านหน้าโดยผ่านซอลต์บริดจ์ ลักษณะดังกล่าวนี้จะมีผลต่อตัวเซนเซอร์ในกระบวนการมากกว่าเซนเซอร์ในห้องทดลอง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในห้องทดลอง มีเวลามากกว่า 99% ในกรรทำความสะอาดสิ่งแวดล้อมรอบๆบีกเกอร์ แต่เซนเซอร์ในกระบวนการจะใช้เวลามากกว่า 99% ของเวลาทั้งหมดอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่สกปรก



รูปที่ 2.7 แหล่งกำเนิดความไม่เสถียรภาพของ pH เซนเซอร์

ในตารางที่ 2.8 ต่อไปนี้จะเป็นการรวมสาเหตุของความไม่เสถียรภาพของจากวัดความเป็นกรดเป็นด่างของหัวเซนเซอร์และมิเตอร์วัดค่า pH บ่อยครั้งที่ผู้วัดอาจจะไม่ทราบว่ามีปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไร และเกิดขึ้นหรือยัง อันจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการวัดได้ จึงต้องหมั่นสังเกตผลและหมั่นตรวจสอบอยู่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 สาเหตุของความไม่เสถียรภาพในการวัดค่าของ pH เซนเซอร์

จุดที่อาจจะเป็นปัญหา	อาการของปัญหา	สาเหตุที่เป็นไปได้
สายเคเบิล & ปริ๊อัมป์	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพน้อยลง - ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าที่อ่าน - เกิดการครีฟตัวอย่างรุนแรง - มีออฟเซต - ค่าที่อ่านได้ไม่สม่ำเสมอ 	<ul style="list-style-type: none"> - วงจรรั่ว - วงจรเปิด / วงจรช็อต - ปัญหากราวด์ลูป / วงจรเปิด - กราวด์ลูป / กราวด์ที่อินพุต (จุดอ้างอิง) - สัญญาณรบกวนภายนอก
KCl / AgCl อิเล็กโทรไลต์	<ul style="list-style-type: none"> - ออฟเซตเบา ๆ - ออฟเซตอย่างรุนแรง 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีอิเล็กโทรไลต์ - อิเล็กโทรไลต์สกปรก
สาร Ag / AgCl ที่อ้างอิง	<ul style="list-style-type: none"> - ออฟเซตอย่างรุนแรง 	<ul style="list-style-type: none"> - สกปรก
จุดต่อของเหลว	<ul style="list-style-type: none"> - ครีฟเบา ๆ - ออฟเซต - ไม่ตอบสนอง - ตอบสนองอย่างช้า ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - เสีย - มีการอุดตัน - มีการอุดตันอย่างรุนแรง - เสีย / อุดตัน
อิเล็กโทรดแก้ว	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพลดลง - ตอบสนองช้า - ไม่ตอบสนอง - ออฟเซตอย่างรุนแรง 	<ul style="list-style-type: none"> - หมดอายุ / เสีย - หมดอายุ / เสีย - หมดอายุ เสีย แตก ร้าวหรือกลั่นตัว - แตกหรือร้าว

ที่มา : จากบริษัท TBI – Bailey Controls จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สารละลายมาตรฐาน (standard solution)

สารละลายมาตรฐานดังตารางที่ 2.9 ต่อไปนี้ถูกใช้เพื่อการวัดค่า pH กับอิเล็กโทรดแก้ว เพื่อให้เกิดความสะดวกในการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 2.9 ชนิดของสารประกอบของสารละลายมาตรฐาน

ชนิดของสารละลาย มาตรฐาน	สารประกอบ
ออกซาลเลต (Oxalate)	สารละลายที่เป็นน้ำของ $\text{KH}_3(\text{C}_2\text{H}_4)_2\text{2H}_2\text{O}$ ขนาด 0.05 โมล / ลิตร
ธาเลต (Phthalate)	สารละลายที่เป็นน้ำของ $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOK})(\text{COOH})$ ขนาด 0.05 โมล / ลิตร
ฟอสเฟสที่มี pH เป็นกลาง (Neutral pHosphate)	สารละลายที่เป็นน้ำของ KN_2PO_4 ขนาด 0.025 โมล / ลิตร สารละลายที่เป็นน้ำของ Na_2HPO_4 ขนาด 0.025 โมล / ลิตร
บอเรต (Borate)	สารละลายที่เป็นน้ำของ $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ขนาด 0.01 โมล / ลิตร
คาร์บอเนต (Carbonate)	สารละลายที่เป็นน้ำของ NaHCO_3 ขนาด 0.025 โมล / ลิตร สารละลายที่เป็นน้ำของ Na_2CO_3 ขนาด 0.025 โมล / ลิตร

ในทางปฏิบัติ ค่า pH ของสารละลายมาตรฐานบางค่าจะไม่มีในตาราง ดังนั้นหากจะหาค่า pH ที่ต้องการก็ทำได้โดยการแบ่งค่ากลาง (interpolation)

2.8 วงจรปรับสภาพสัญญาณ (signal conditioners)

เมื่อจุ่มขั้ววัดและขั้วเปรียบเทียบลงในสารละลาย จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง โดยจะแปรตามค่า pH ซึ่งเป็นไปตามสูตรในสมการ ศักย์ไฟฟ้านี้จะมีค่า 59.1 mV ต่อ 1 pH ที่อุณหภูมิ 25 °C หรือเขียนให้อยู่ในรูปของสูตรอย่างง่ายได้เป็น

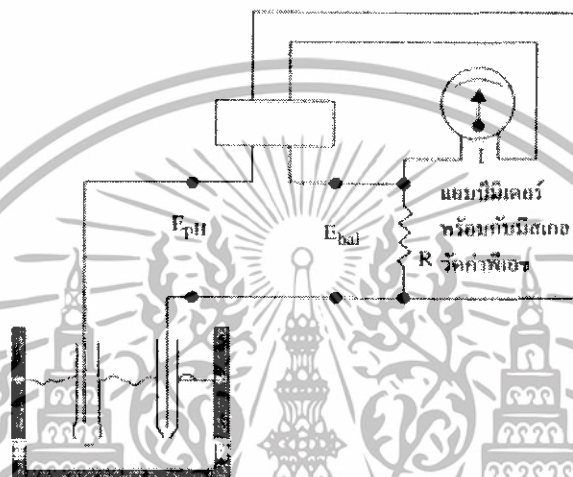
$$\text{EMF} = 59 (\text{pHX} - \text{pH7}) \text{ mV}$$

วงจรวัดจะทำหน้าที่ขยายศักย์ไฟฟ้านี้และแปลงเป็นค่า pH (ในรูปอย่างง่ายคือ ฟังก์ชันแอนติล็อก) เพื่อแสดงผลออกมา นอกจากนั้นยังต้องมีการชดเชยค่าจากอุณหภูมิและอาจต้องปรับค่าเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน เช่นการปรับค่าศูนย์ (ซีโร) และความชัน (สเปน) อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 วงจรวัด pH แบบการสมดุลของกระแส (null type pH measurement)

เป็นวิธีการวัดเพื่อให้ได้ค่า pH ที่แปรผันไปกับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยมีตัวขยายทำหน้าที่ขยายสัญญาณ วิธีนี้วัดได้แม่นยำแต่ไม่สามารถวัดค่าแบบต่อเนื่องได้ เนื่องจากต้องใช้วิธีปรับเทียบศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ววัดกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ เมื่อดูว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน (ทำได้จากการวัดกระแส) ก็อ่านค่าจากโพเทนชิโอมิเตอร์ที่เทียบไว้เป็นค่า pH จึงเห็นว่าการอ่านค่าแต่ละครั้งต้องการสมดุลของกระแส จึงไม่สามารถกระทำการวัดอย่างต่อเนื่องได้



รูปที่ 2.8 การวัดค่าพีเอชแบบมีการป้อนกลับ

2.8.2 การวัดค่า pH ชนิดมีการป้อนกลับ

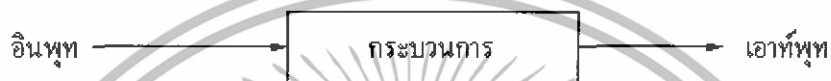
รูปที่ 2.8 เป็นการนำเอาสัญญาณที่ออกจากขั้ววัดและขั้วอ้างอิงมาเปรียบเทียบกัน แล้วนำสัญญาณแตกต่างกันไปขยาย ตัวขยายต้องมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตที่สูงมากๆ เพราะมิฉะนั้นมันจะโหลดกระแสจากตัวเซ็นเซอร์วัด pH มาก และทำให้การวัดผิดพลาด

2.8.3 การวัดค่า pH ด้วยการขยายสัญญาณเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

หรือแบบที่สามารถอ่านค่า pH ได้โดยตรงเป็นการวัดค่า pH ที่ประกอบไปด้วยวงจขยายสัญญาณแบบชอปเปอร์ นั่นคือเปลี่ยนสัญญาณเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนแล้วค่อยเปลี่ยนกลับเป็นกระแสตรงอีกครั้งหนึ่ง วงจขยายในแบบดังกล่าวนี้วงจขยายจะต้องมีอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงมากๆ เช่น การใช้อปแอมป์ที่ทำจาก FET เป็นต้น

2.9 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามที่เรารต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (process) ที่เรารต้องการที่จะควบคุม สามารถแทนด้วย บล็อก (block) ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักจะแทนด้วยสัญญาณ โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต



รูปที่ 2.9 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด (Closed Loop Control System) หรือแบบป้อนกลับ (Feedback Control - System)

2.9.1 ระบบควบคุมแบบเปิด

เป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุม (Controller) หรือ อุปกรณ์ส่งกำลัง (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่เรารต้องการ โดยไม่ต้องนำผลการตอบสนองของระบบเข้ามาสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.10

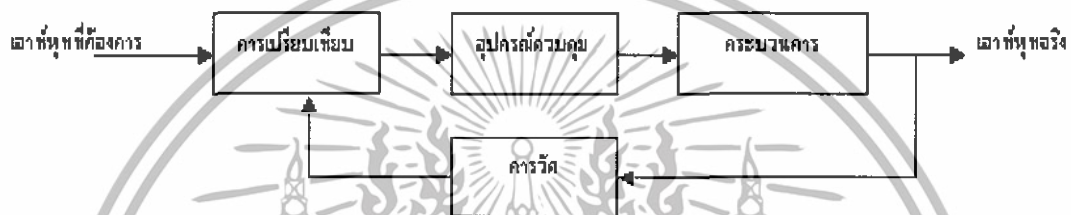


รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมแบบเปิด

2.9.2 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ แบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาต์พุตได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุตแล้วเรายังจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็จะได้ว่า ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี่ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมแบบเปิด - ปิด (ON-OFF control) เป็นลักษณะการควบคุมแบบเปิดปิดธรรมดา เหมือนการเปิดปิดสวิตซ์ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เทอร์โมสแตตในเตารีด หรือการปิด-เปิดวาล์ว การทำงานแบบการควบคุมเปิด-ปิด นั้นเอาต์พุตจะไม่คงที่จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทำให้ไม่สามารถใช้ในการควบคุมบางอย่างได้ ปกติการควบคุมแบบเปิด-ปิดจะมี Dead band ซึ่งหมายความว่า เอาต์พุตของตัวควบคุมที่ออกมาจะมีการแกว่งอยู่ในย่านที่ยอมรับได้ เช่น จากค่า pH จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 7.10 ถึง 6.90 ถ้ากำหนด Set point ที่ 7 การทำงานแบบเปิด-ปิดจะมี Dead band เท่ากับ $7.10 - 6.90 = 0.20$ หรือจะพูดได้ว่าตัวควบคุม เกิดการแกว่งระหว่าง 7.10 ถึง 6.90 ซึ่งการแกว่งนี้จะขึ้นกับค่า Dead time ของขั้นตอนการทำงานนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการและการออกแบบ

ในการออกแบบโครงงาน แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนของวงจรขยายสัญญาณ ส่วนของวงจรตัวแสดงผล ส่วนของวงจรขั้วมอเตอร์บี้ม และส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะอธิบายได้ดังนี้

3.1 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า

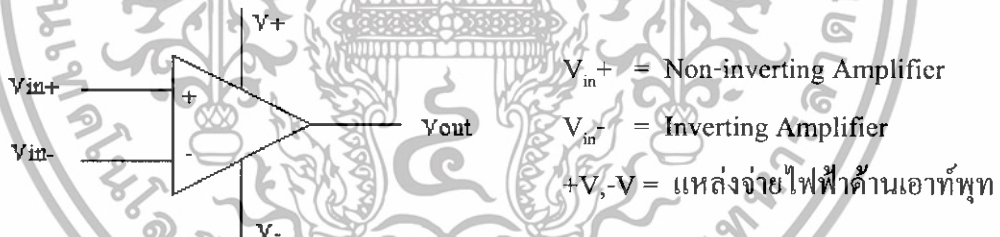
ความรู้พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์

ในการออกแบบต้องอาศัยวงจรขยายสัญญาณที่ได้จากอิล็กโทรูด โดยใช้ออปแอมป์ (Operational Amplifier) หรือ (op amp) ในการทำางาน โดยหลักการและการทำงานนั้นมีดังต่อไปนี้

3.1.1 ออปแอมป์ (op amp)

การขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ วงจรพื้นฐานของวงจรขยายสัญญาณในลักษณะวงจรรวมสามารถกำหนดอัตราที่แน่นอนได้ด้วยอุปกรณ์ภายนอก

3.1.1.1 สัญลักษณ์ของออปแอมป์



รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์ออปแอมป์

3.1.1.2 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ (ideal op amp)

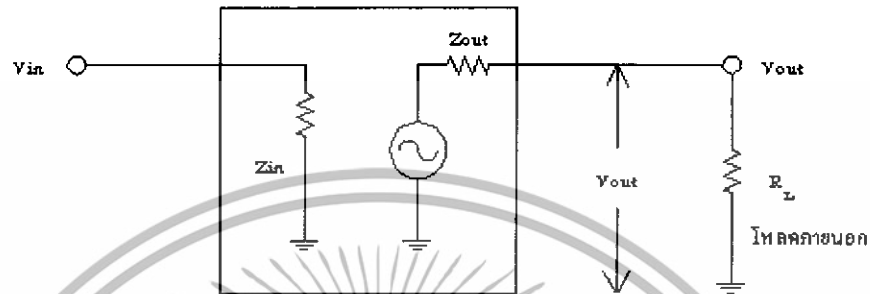
- อัตราขยายของออปแอมป์แบบเปิดมีค่าสูงมากจน เป็นอนันต์ ($A_v = \text{infinity}$)
- Z_{in} มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็นอนันต์
- Z_{out} มีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าเป็น 0
- อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่
- เมื่อ $V_{in} = 0$ จะได้ V_{out} เป็น 0 ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว มีผลสืบเนื่องดังนี้

- $I_{in} = 0$ เนื่องด้วย Z_{in} สูงมาก
- ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุททั้งสองของออปแอมป์เป็น 0 เนื่องจาก $I_{in}, Z_{in} = 0$

3.1.1.3 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์



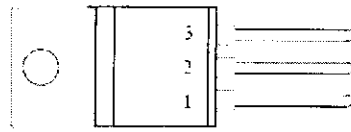
รูปที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของออปแอมป์ (Operational Amplifier)

Z_{in} มีค่าสูงมากจนประมาณได้ว่า $I_{in} = 0$

Z_{out} มีค่าต่ำมากจนประมาณได้ว่า $Z_{out} = 0$

3.1.1.4 แหล่งจ่ายไฟสำหรับออปแอมป์

ส่วนใหญ่ต้องการแหล่งจ่ายไฟสองขั้ว บวกและลบ วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมกันมากที่สุดคือการควบคุม โดยใช้ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากภายในตัวไอซีมีวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง (reference source) วงจรขยายเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator amplifier) ส่วนควบคุม (control device) และการป้องกันโหลดเกิน (overload protection) ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 2 แบบคือ แบบแรงดันไฟบวกคงที่ และแบบแรงดันไฟลบคงที่ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีขนาดตั้งแต่ 100 mA ขึ้นไปจนถึงระดับ 10 A การต่อวงจรสามารถทำได้ง่ายเพราะว่าไอซีมีขาต่อออกมาภายนอกเพียง 3 ขา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 รหัสของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบแรงดันไฟบวกคงที่ และแรงดันไฟลบคงที่คือ MC78XX และ MC79XX ตามลำดับ รหัส XX สองตัวท้ายจะบ่งบอกระดับของแรงดันคงที่

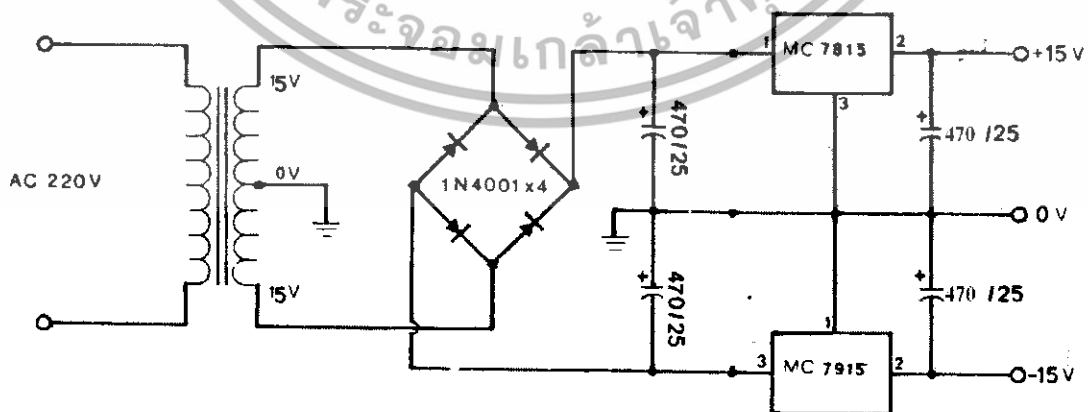


รูปที่ 3.3 ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 แสดงขาคู่ใช้งานของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าทั้งแบบแรงดันไฟฟ้าบวกและลบคงที่

Code	Pin 1	Pin 2	Pin 3
78XX	Input	Ground	Output
79XX	Ground	Input	Output

วงจรใช้งานของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันไฟฟ้าบวกและลบคงที่แสดงในรูปที่ 3.4 วงจรนี้ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ให้มีขนาดเล็กลง (+15V 0V -15V) ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มลูกคลื่น (full wave rectifier) เพื่อป้อนเป็นอินพุตของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันไฟฟ้าบวก ในทำนองเดียวกัน ไดโอด D_3 และ D_4 จะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มลูกคลื่น (full wave rectifier) เพื่อป้อนเป็นอินพุตของไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันไฟฟ้าลบ ไอซี 78XX หรือ 79XX จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตให้มีค่าคงที่อยู่เสมอแม้ว่าแรงดันที่อินพุตหรือขนาดของโหลดจะเปลี่ยนแปลงไป

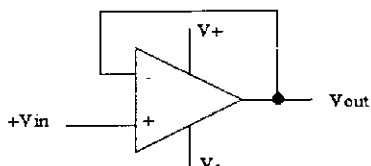


รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า ± 15 VDC ที่เป็นไฟเลี้ยงออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การใช้โอปแอมป์ในวงจรขยายสัญญาณ

3.1.2.1 วงจรบัฟเฟอร์ (buffer) หรือ (voltage follower)



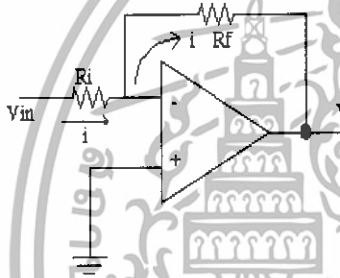
อัตราขยายของวงจรชนิดนี้มีค่าประมาณ 1 นั่นคือ

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

$$V_{out} = V_{in}$$

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรบัฟเฟอร์

3.1.2.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverter amplifier)



ความต่างศักย์ระหว่าง V_{in+} และ $V_{in-} = 0$ ดังนั้นศักย์

ไฟฟ้าที่ขา $V_{in-} = 0$ กระแสผ่าน R_i และ R_f มีค่าเท่ากัน

$$V_{in} = iR_i ; V_{out} = -iR_f$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{iR_f}{iR_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

เพราะฉะนั้น $A_v = -\frac{R_f}{R_i}$

รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

3.1.2.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (non-inverting amplifier)

จากรูป กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R_i และ R_f มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

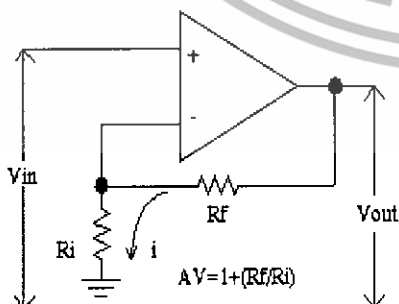
$$V_{in} = iR_i$$

$$V_{out} = i(R_i + R_f)$$

$$A_v = \frac{i(R_i + R_f)}{iR_i}$$

$$A_v = R_i + \frac{R_f}{R_i}$$

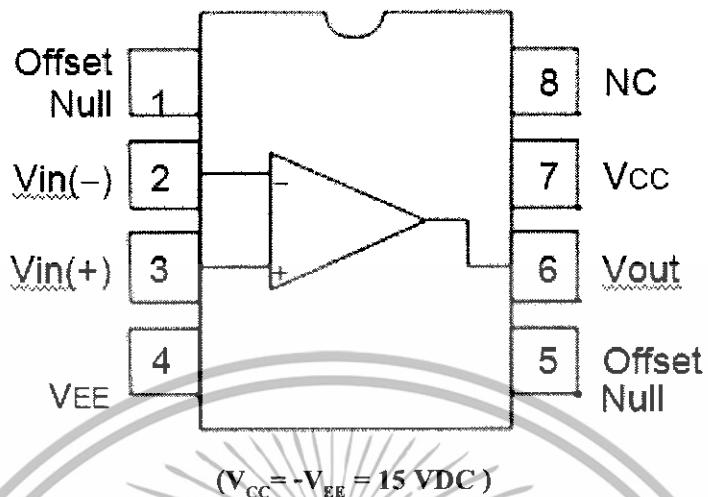
$$\text{หรือ } A_v = 1 + \left(\frac{R_f}{R_i}\right)$$



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ตำแหน่งของขาของออปแอมป์ที่ใช้ (HA 17741)



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งขาของออปแอมป์ HA 17741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การวัดแรงดันไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดสำหรับวัดค่า pH มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองขูด และ วงจรขยายสัญญาณ (amplifier)

ขั้วอิเล็กโทรดขูดแรก คือ อิเล็กโทรดแอ็กทีฟ (active electrode) ซึ่งทำหน้าที่เสมือน เซนเซอร์ตรวจวัดและกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีขนาดสัญญาณแปรผันตรงกับปริมาณไอออนไฮโดรเจนของสารละลายที่กำลังตรวจวัด

ส่วนขั้วอิเล็กโทรดอีกขูดหนึ่งที่ต้องการอ้างอิง (reference electrode) ทำหน้าที่สร้างได้จากแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นศักย์ไฟฟ้าให้กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันอิเล็กโทรดแอ็กทีฟจะทำหน้าที่ขยายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดให้มีขนาดมากพอที่จะนำไปแสดงผลหรือทำการส่งผ่านไปยังส่วนอื่นของระบบเพื่อประมวลผลต่อไป

การทำงานของอิเล็กโทรดวัดค่า pH อาศัยหลักการตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไปทำการวิเคราะห์หรือประมวลผลสัญญาณต่อไป ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

สารละลายบัฟเฟอร์ที่บรรจุอยู่ในอิเล็กโทรดจะมีความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนที่ทำให้ pH มีค่าเท่ากับ 7 และเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนของสภาพกระบวนการที่กำลังตรวจวัดอยู่มีค่าแตกต่างไปจากสารละลายบัฟเฟอร์ในอิเล็กโทรดแล้ว จะเป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมอิเล็กโทรดขึ้น โดยมีขนาดแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า pH ของสภาพกระบวนการที่กำลังตรวจวัดนั่นเอง

โดยทั่วไป ณ อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส อิเล็กโทรดจะสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นประมาณ 59.2 mV ในทุกๆหน่วยการวัด pH ที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่อ pH ของสภาพกระบวนการมีค่าเท่ากับ 7 แล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดจะมีค่าเท่ากับ 0 V แต่ถ้าสภาพกระบวนการมีค่า pH มากกว่า 7 แล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเป็นลบ และในทางกลับกันหากค่า pH ต่ำกว่า 7 ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก จากทฤษฎี ณ อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส อิเล็กโทรดจะสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นประมาณ 59.2 mV ในทุกๆหน่วยการวัด pH ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่สัญญาณที่ได้จาก pH อิเล็กโทรดนั้นมีค่า impedance สูงมาก จึงต้องทำการบัฟเฟอร์โดยใช้โอปแอมป์

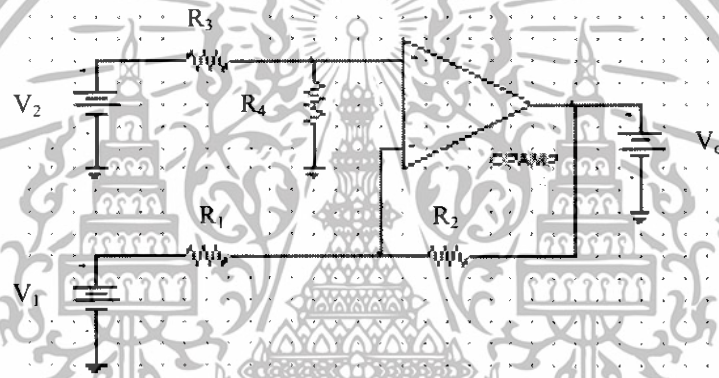
3.1.5 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ (instrument amplifier)

เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบหนึ่งที่ใช้วัดสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ (transducer) แบบต่างๆ โดยที่สัญญาณที่รับมานั้นจะถูกขยายได้โดยไม่คิดเพี้ยน และมีความถูกต้อง ดังนั้นวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ให้ใช้งานจริงได้จะต้องทำให้มีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อิมพีแดนซ์ที่ทางเข้ามีค่าเป็นอนันต์
- กระแสออฟเซตทางเข้า และ แรงดันออฟเซตทางเข้า (input offset current and input offset voltage) มีค่าเป็น 0
- อัตราการขยายมีค่าเป็นอนันต์

ในเครื่องมือวัดส่วนใหญ่จะมีการปรับซีโร (zero) เพื่อเป็นการกำหนดจุดเริ่มต้นของการวัดและขณะเดียวกันกับการปรับสเปน (span) ก็คือการปรับอัตราขยายเพื่อให้ทราบถึงค่าสูงสุดที่ได้จากการวัดจากการวัด จากหลักการทั้ง 2 พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับออฟเซตทางเข้า (input offset) และอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์หลักการของวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์จึงเริ่มจากวงจรขยายสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล (differential amplifier)



รูปที่ 3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล

จากรูปที่ 3.9 ใช้หลักการของ Kirchoff Current's law

$$I_1 = I_2 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

ดังนั้น $pH_0 = 406.9 \text{ mV}$

เนื่องจากต้องแสดงผลเป็นค่า pH ตั้งแต่ pH_0 ถึง pH_{14} ดังนั้นการแสดงผลซึ่งในการออกแบบจะใช้ IC single ship เบอร์ Icl 7106 ซึ่งเป็น A/D Display ซึ่งจะต้องมีค่าอินพุตที่ได้จากการปรับเปลี่ยนเป็น 0.00-14.00 ดังนั้นเราจึงออกแบบตัวแสดงผลให้อ่านค่า mV ได้ตั้งแต่ 0 mV ถึง 1400 mV เมื่อนำไปแปลงเป็นค่า pH จาก 0.00 -14.00 ดังนั้นจะได้การคำนวณ วงจร $\text{mV} \rightarrow \text{pH}$ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรยังไม่สามารถใช้งานได้ดีถ้านำไปขยายสัญญาณขนาดต่ำ ๆ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มภาคขยายให้กับวงจร และในขณะเดียวกันด้านทางเข้าของวงจรทั้ง 2 ด้าน จะต้องมามีค่าอิมพีแดนซ์สูงด้วย

$$\text{เพราะ } V_{o1} = I_1(R_1 + R_2) + V_2 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$I_1 = \frac{(V_1 - V_2)}{R_1} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

แทนค่า (3.7) ใน (3.6) จะได้

$$V_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)V_2 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)V_2 - \left(\frac{R_3}{R_1}\right)V_1 \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

ความสัมพันธ์ของ V_o กับ V_{o1} กับ V_{o2} คือ

$$V_o = \left(\frac{R_4 + R_6}{R_5 + R_7}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right)V_{o2} - \left(\frac{R_6}{R_5}\right)V_{o1} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.8) และ (3.9) ใน (3.10) พบว่า

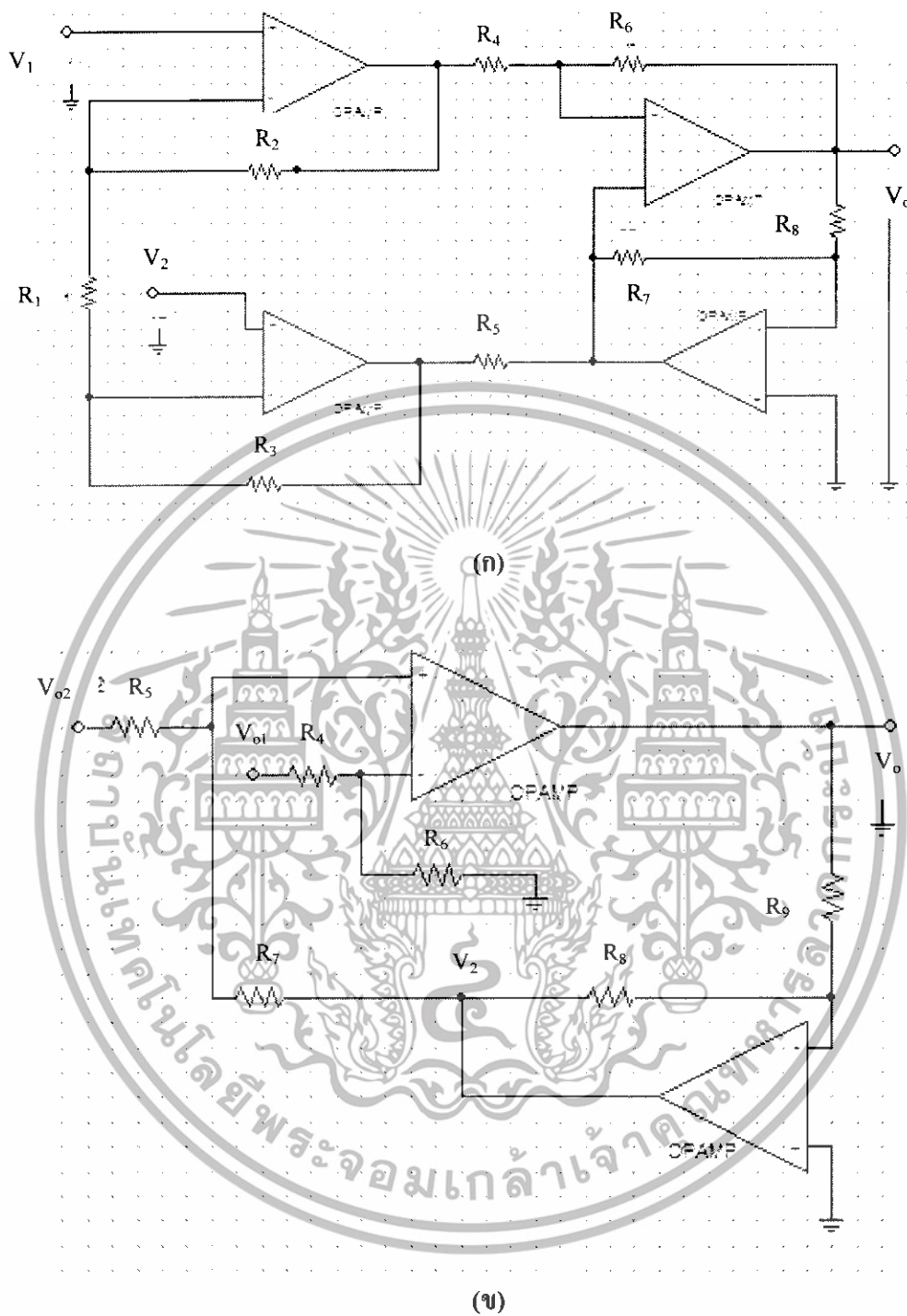
$$V_o = \left[\left(\frac{R_4 + R_6}{R_5 + R_7}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1}\right) + \left(\frac{R_6}{R_4}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right] V_2 - \left[\left(\frac{R_4 + R_6}{R_5 + R_7}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_1}\right) + \left(\frac{R_6}{R_4}\right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1}\right) \right] V_1 \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

เมื่อกำหนดให้ $R_2 = R_3 = R$ และ $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$ พบว่า

$$V_o = \left(1 + \frac{2R}{R_1}\right)(V_2 - V_1) \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

จะเห็นว่าเมื่อกำหนดตามเงื่อนไขสมการ (3.12) แล้วอัตราการขยายของวงจร เป็นวงจรที่ให้คุณสมบัติด้านอัตราขยายไม่เป็นจริงเชิงเส้นที่ดีดังนั้นจึงถูกปรับปรุงวงจรใหม่ให้มีอัตราการขยายตอบสนองได้เป็นเชิงเส้นดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ปรับปรุงใหม่

เมื่อพิจารณาจาก V_{o1} และ V_{o2} ถึงทางออกรูปที่ 3.11 (ข) สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

เพราะว่า $I_1 = I_2$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_1}{R_6} = \frac{V_{o1}}{(R_4 + R_5)} \dots\dots\dots(3.13)$$

และที่จุด V1

$$\begin{aligned} I_3 - I_4 &= 0 \\ \frac{(V_{o2} - V_{o1})}{R_3} - \frac{(V_1 - V_2)}{R_7} &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(3.14)$$

แต่เพราะว่า

$$V_2 = - \left(\frac{R_6}{R_9} \right) V_{o2} \dots\dots\dots(3.15)$$

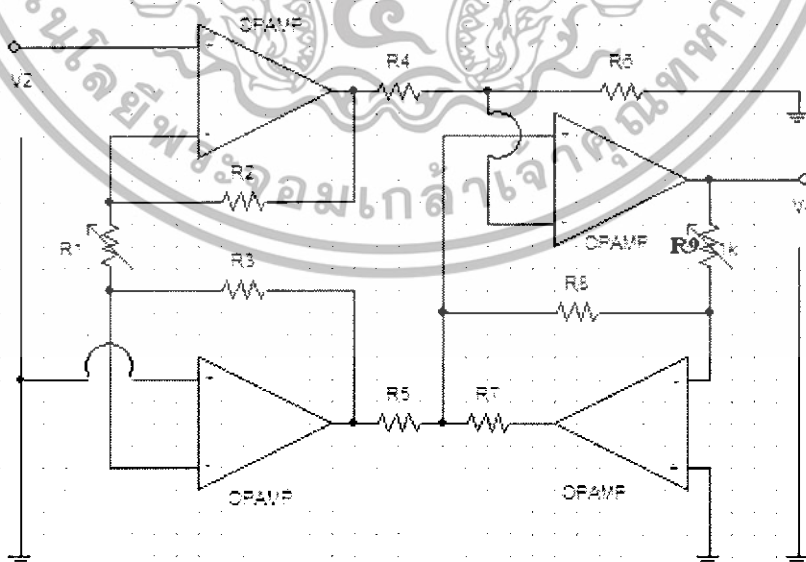
เมื่อแทนค่า (3.13) และ (3.15) ใน (3.14) จะได้ความสัมพันธ์ V_{o1} , V_{o2} และ V_o คือ

$$V_{o2} - V_{o1} \left[\left(\frac{R_6}{R_4 + R_5} \right) \left(\frac{R_7 R_6}{R_4 + R_5} \right) R_7 \right] = \left(\frac{R_7 R_6}{R_7 - R_9} \right) V_o$$

และเมื่อกำหนดให้ $R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R$ จะได้ว่า

$$\frac{V_o}{(V_{o1} + V_{o2})} = \left(\frac{R_9}{R_8} \right)$$

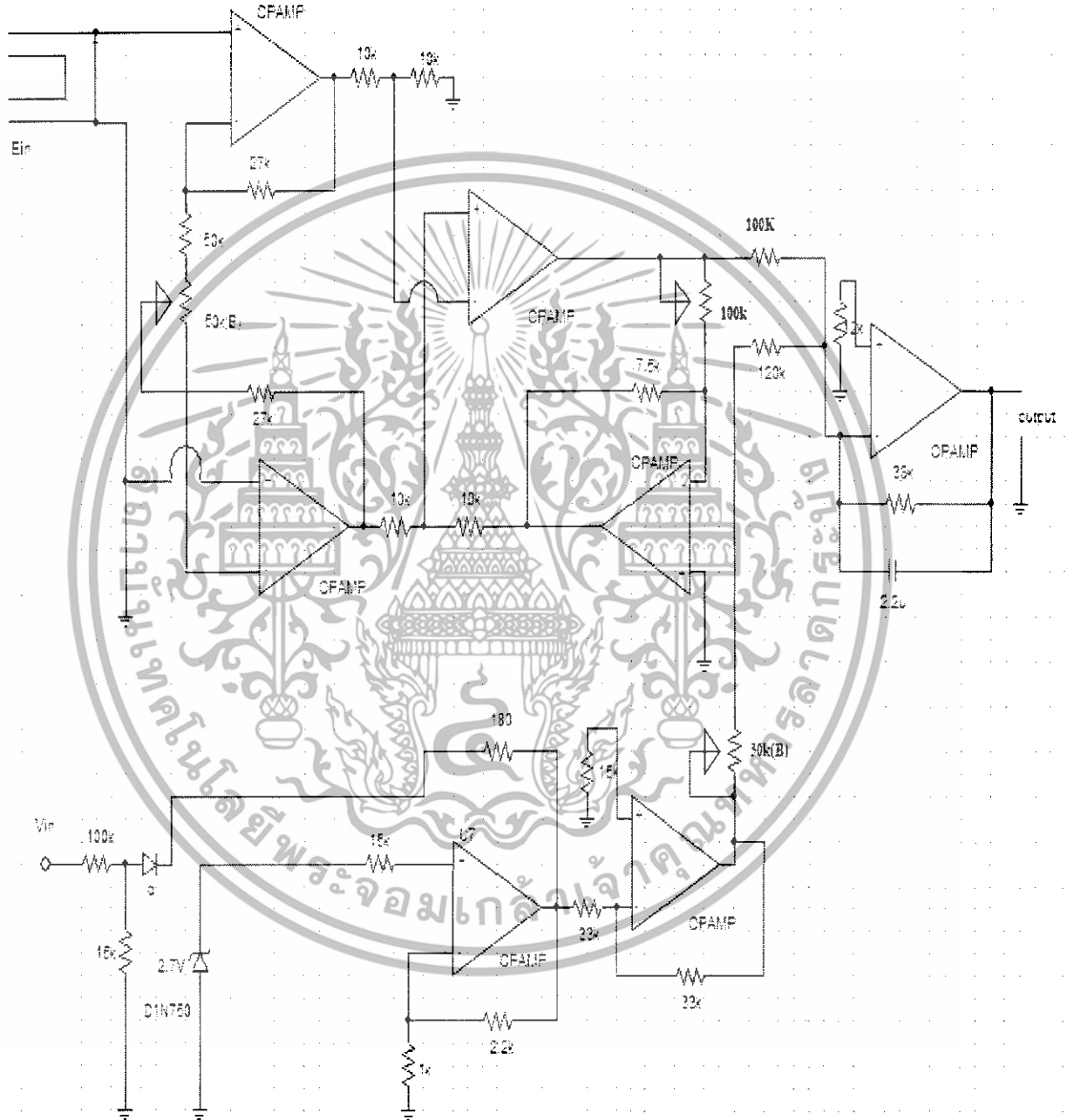
จากสมการพบว่า R_9 สามารถปรับระดับแรงดันทางออกของรูปที่ 3.11(ข) ได้



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้วงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ในการออกแบบ pH มิเตอร์จากทฤษฎีของวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์คือ มีคุณสมบัติเป็นอุดมคติและสามารถปรับซีโร่ (zero) และปรับสเปน (span) ของวงจรได้ ดังนั้นเราสามารถนำวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์นี้มาใช้เป็น pH มิเตอร์ได้ดังรูป



รูปที่ 3.13 วงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่ใช้เป็นอินพุตให้กับวงจร pH มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบวงจรตัวแสดงผลค่า pH

เครื่องวัด pH (pH meter) จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ

ก.) ส่วนที่เป็นตัวเครื่อง ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ และมีการแสดงผลของค่าของศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ซึ่งก็จะนำศักย์ไฟฟ้านี้มาเปรียบเทียบกับค่า pH ของสารละลายที่ต้องการทราบค่า และมีการแสดงผลแบบต่างๆ ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่โรงงานนี้จะได้ออกแบบวงจรที่เหมาะสมกับการวัดค่า pH ในสารละลายที่ต้องการทราบค่าพิเศษ

ข.) ส่วนที่เป็นอิเล็กโทรด ซึ่งอิเล็กโทรดจะมีขั้วที่ใช้วัดอยู่ 2 ขั้ว คือ

- ขั้วอ้างอิง (reference electrode)
- ขั้วใช้งาน (working electrode)

ซึ่งค่าที่ได้จากอิเล็กโทรดจะเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของอิเล็กโทรด คือ

$$E_{\text{ref}} - E_{\text{ind}} = E_{\text{cell}}$$

3.2.1 การออกแบบวงจร

ข้อกำหนด

1. สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากส่วนของวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าจริงที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าในสารละลาย คือสารละลายที่มีความเป็นกรด ($\text{pH}_0 - \text{pH}_7$) จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนอ็อกไซด์ระหว่างสารละลายกับอิเล็กโทรด ซึ่งจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นบวก (positive voltage) โดยคำนวณจากค่า E ที่ได้จากการ

$$\Delta E = \Delta(\text{npH}) \times (t^\circ\text{C} + 273) \times 0.1984$$

เช่น pH 1 ที่ อุณหภูมิ 20°C

$$E = 1 \times (20^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}) \times 0.1984 \text{ mV}$$

$$= 8.13 \text{ mV}$$

และที่ pH 1 ที่อุณหภูมิ 40°C

$$E = 1 \times (40^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}) \times 0.1984 \text{ mV}$$

$$= 62.10 \text{ mV}$$

ดังนั้น ถ้าวัดที่อุณหภูมิปกติ 20°C จะได้ค่า 58.13 mV/pH มาคำนวณค่าในวงจร

2. จะต้องอ่านค่าพิเศษจาก $\text{pH}_0 - \text{pH}_7$ ซึ่ง pH ที่มีค่าเป็นกลางจะแลกเปลี่ยนอ็อกไซด์อย่างสมบูรณ์ทำให้ไม่เกิดค่า potential ระหว่างสารละลาย กับ อิเล็กโทรด จึงได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 0 mV ดังนั้นค่า pH_7 ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกจะมีค่าดังนี้

$$\text{pH}_7 = 0 \text{ mV } \text{pH}_0$$

ซึ่งมีความแตกต่างจาก $\text{pH}_7 = \text{pH}_7 - \text{pH}_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\text{pH} = 7 - 0 = 7$$

$$\Delta\text{pH} 7 + 7 \text{ ที่อุณหภูมิ } 20^\circ\text{C}$$

$$E = 7 (20^\circ\text{C} + 273) \times 0.1984 \text{ mV}$$

$$= 406.9 \text{ mV}$$

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่า mV ที่ได้ทางอินพุตของวงจรดังนั้นเพื่อให้ได้ค่า pH ที่ถูกต้องคือไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดตัวแสดงผลก็ยังคงจะต้องแสดงค่า pH เท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามอินพุต เพราะว่าสารละลาย pH โค้ดก็ตามความเป็นจริงอัตราขยายของวงจรจะต้องปรับได้เล็กน้อยตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงจะต้องมี potentiometer เป็นตัวปรับ compensate gain และในขณะเดียวกันเพื่อให้ได้ความถูกต้องในการปรับเทียบค่า (calibrate pH) วงจรจึงออกแบบให้มีการปรับเทียบค่า pH ในช่วง pH ถึง 2 จุด ด้วยกัน คือ ถ้าวัดค่า pH ในช่วง $\text{pH}_0 - \text{pH}_1$ ในการใช้งานเราจะ calibrate ที่ pH_1 เป็นครั้งที่ 1 โดยนำสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอนมีค่า $\text{pH} = \text{pH}_1$ มาเป็นสารละลายอ้างอิง และนำอิเล็กโทรดจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ 7 แล้วจากนั้นให้ปรับเทียบค่าให้อ่านค่าได้ $\text{pH} = 7.00$ แล้วจุ่มอิเล็กโทรดลงในสารละลายค่าที่ได้จากการวัด จะอ่านค่าได้ประมาณใกล้เคียงกับ 4 คือประมาณ 3 กว่าๆ หรือ 4 กว่าๆ ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว จะต้องอ่านได้ 4.00 ตามมาตรฐานที่วัดได้จากโรงงานผลิตสารเคมีมาตรฐาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบ

การปรับเทียบค่าครั้งนี้จะเป็นเสมือนเป็นการปรับค่า factor ค่าหนึ่งเพื่อนำมาคูณกับค่าที่ได้ให้อ่านค่าออกมาตรงตามค่า pH ของสารละลายมาตรฐานตัวที่ 2 โดยการปรับค่า factor นี้ ในทางปฏิบัติจะมีค่า factor 0.92 – 1.02 ดังนั้น ถ้าค่าที่อ่านได้จากสารละลายบัฟเฟอร์ตัวที่ 2 ตรงตามค่าที่ได้ตรงตามค่ามาตรฐาน จะต้องคูณด้วยค่า factor ตัวที่ 2 แต่ถ้าค่าที่ได้ ต่ำกว่าค่ามาตรฐานจะต้องคูณด้วยค่า factor มากกว่า 1 – 1.02 ขณะเดียวกันถ้าค่าอ่านมาได้มากกว่าค่ามาตรฐานจะต้องคูณด้วยค่า factor จาก 0.92 – 0.99

ในการปรับ factor นี้ ในทางเคมีเรียกว่าการปรับความชัน $du/d\text{pH}$ คือค่า potential (mV) ต่อค่า pH ส่วน U_n คือ Nernst's voltage

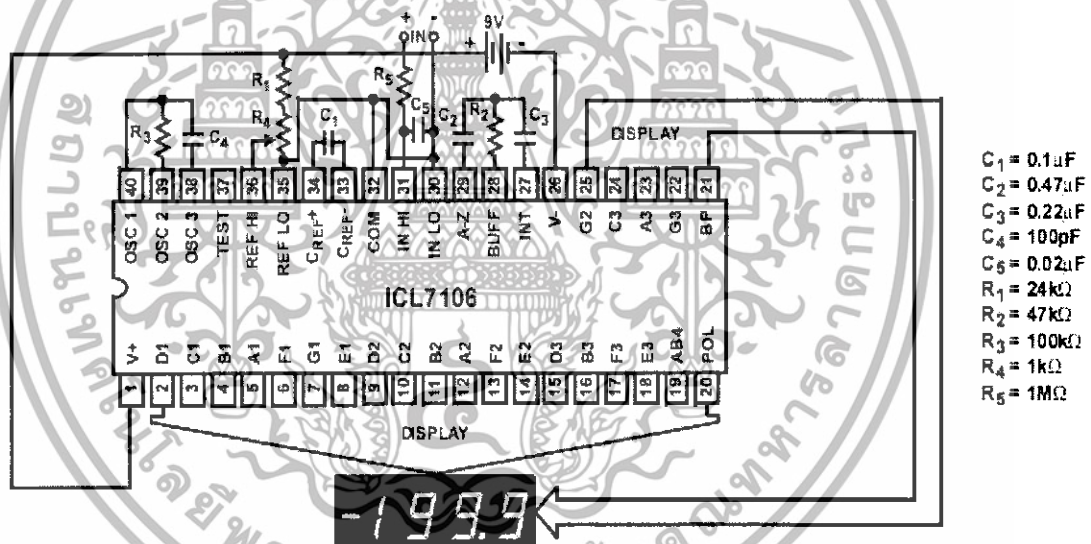
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบภาคแสดงค่า pH เป็นตัวดิจิทัล (digital display)

ข้อกำหนดในการออกแบบวงจร

- 1 สัญญาณ 700 mV แสดงค่าเป็น 0.00 pH
- 2 สัญญาณ 0 mV แสดงค่าเป็น 7.00 pH
- 3 สัญญาณ -700 mV แสดงว่าเป็น 14.00 pH

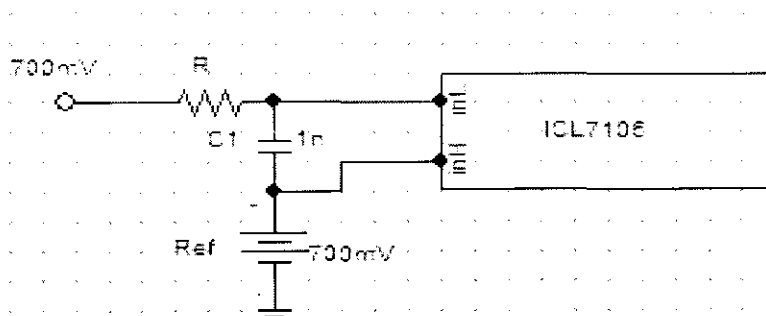
เนื่องจากข้อกำหนดดังกล่าวไม่สามารถใช้ตัวแสดงผลปกติได้เพราะตัวแสดงผลธรรมดาปกติจะแสดงค่าตามแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนเข้าทางขาอินพุต High (inH) แต่ตัวแสดงผลที่ใช้ในการแสดงค่า pH นี้ไม่ได้แสดงค่าตรงตามอินพุตที่ป้อนเข้ามาดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบวงจรเฉพาะซึ่งใช้ในการแสดงผลเป็นค่า pH โดยเฉพาะตามข้อกำหนดข้างต้น



รูปที่ 3.14 สถาปัตยกรรมของ ICL7106

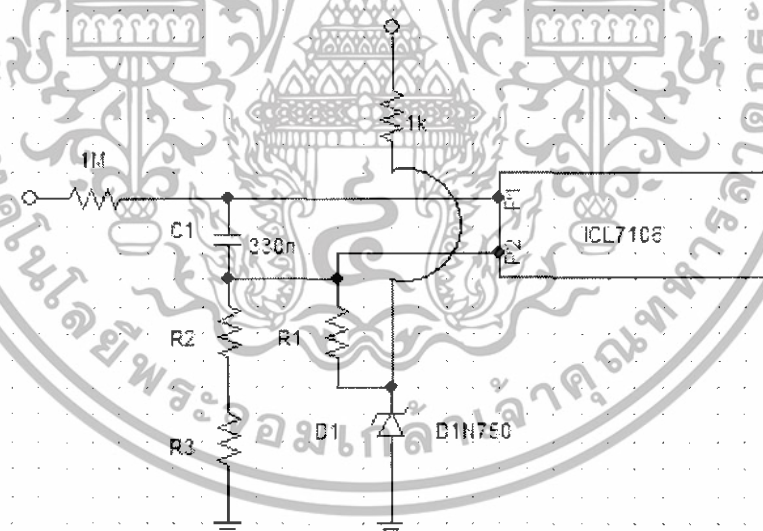
หลักการเพื่อให้ได้การแสดงผลตามข้อกำหนดให้ 0 mV แสดงที่ตัวแสดงผลเป็น 7.00 ขณะเดียวกัน 700 mV ให้แสดง 0.00 และ -700 mV ให้แสดง 14.00 ดังนั้นมีวิธีเดียวที่จะทำได้คือป้อนสัญญาณเข้าทางขาอินพุต low (inL) และให้ขาอินพุต high (inH) มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ค่าหนึ่งคือ 700 mV ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรภายนอก (ก)

จากวงจรในรูปจะได้ว่า ถ้าอินพุต 0 mV เข้าทาง inL แต่ที่ inH มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงอยู่ 700 mV ดังนั้นค่าที่แสดงออกทางเอาต์พุตจะเท่ากับค่าความแตกต่างระหว่าง inH และ inL = 700 และเมื่อ inL = +700 และเมื่อ inH ยังคงมีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 700 mV ดังนั้นเอาต์พุตจะแสดงค่า 0.00 mV และเมื่อ inL รับแรงดัน -700 mV ขณะที่ยังมีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงอยู่ที่ inH 700 mV เอาต์พุตจะแสดงค่าความแตกต่างระหว่าง inH กับ inL = $700 - (-700) = 1400$ mV



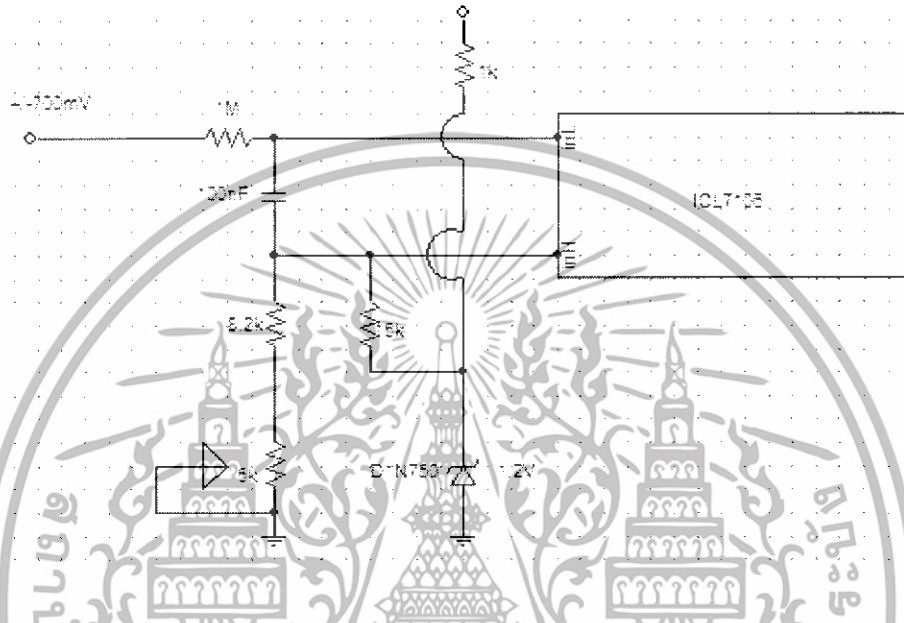
รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรภายนอก (ข)

คำนวณ R_1 , R_2 , R_3 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง = 700 mV ดังนั้น เลือกใช้ ซีเนอร์ ไดโอด 1.2 V และ แบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วย R_1 , R_2 , R_3 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 700 mV ดังนั้น ถ้าเลือก $R_1 = 15k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 R_1 / (R_1 + (R_2 + R_3)) &= 700 / 1200 \\
 1200 R_1 &= 700 R_1 + 700 (R_2 + R_3) \\
 (1200 - 700) R_1 &= 700 (R_2 + R_3) \\
 500 R_1 &= 700 (R_2 + R_3) \\
 (500 / 700) &= R_2 + R_3
 \end{aligned}$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = 15k$ จะได้ $(R_2 + R_3) = 15k \times (500/700) = 10.7k$ และ $R_2 + R_3 = 10.7k$



รูปที่ 3.17 การเชื่อมต่อขาอินพุตของ ICL7106 กับวงจรรายนอก (ค)

ดังนั้นในการปรับเทียบสารละลายมาตรฐานตัวที่หนึ่ง (สารละลายบัฟเฟอร์ 7.00) นั้น เปรียบเหมือนเป็นการปรับซีโร (zero) ของการวัดอื่นๆ เพียงแต่ pH มิเตอร์ไม่ได้ปรับเทียบที่ค่าศูนย์ แต่ pH ปรับเทียบที่ค่า 7.00 โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าว่ามีค่า pH = 7.00 มาเป็นตัวเปรียบเทียบให้เครื่องอ่านเป็นค่า 7.00 ดังนั้นตัวแสดงผลที่ออกแบบข้างต้นจะต้องสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง จาก 700 mV ให้ได้เป็นค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่า 700 mV

ดังนั้น R_2, R_3 ที่แบ่งแรงดัน 1.2 V จากซีเนอร์ไดโอดตัวหนึ่งจะต้องปรับค่าได้ในที่นี้ให้ R_3 ปรับค่าได้

$$\text{จะได้ว่า } R_2 + R_3 = 10.7k$$

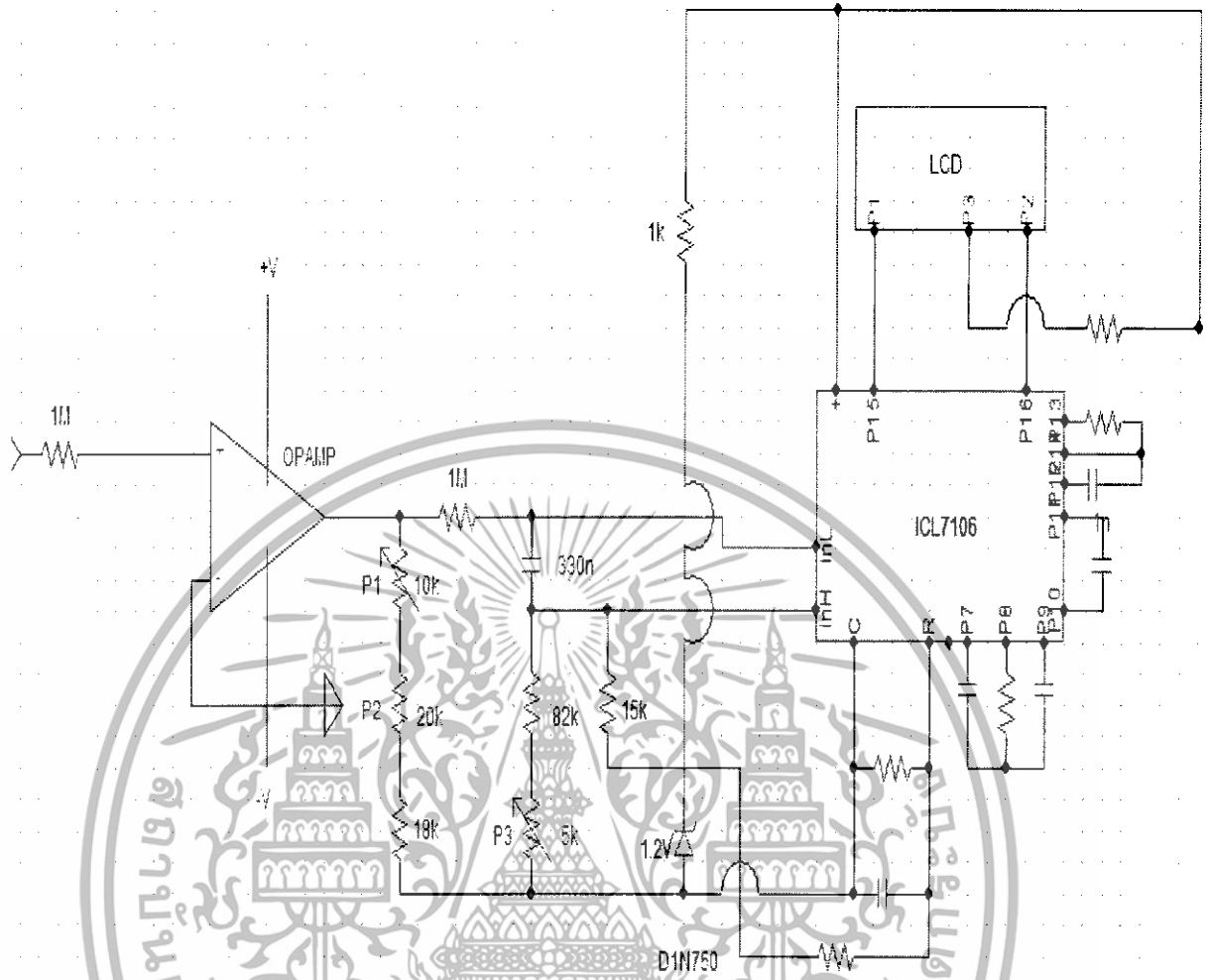
ค่า R_2 ที่เป็นค่ามาตรฐานคือ 3.2 k เพื่อให้เวลาปรับ R_3 เป็นศูนย์จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้า

$$\text{อ้างอิง } \left(\frac{15k}{15k + 3.2k} \right) (1200 \text{ mV}) = 775.8 \text{ mV} \text{ ซึ่งใกล้กับค่ากลาง}$$

และค่า R_3 ปรับค่าได้จะเท่ากับ $10.7k - 3.2k = 7.5k$ ซึ่ง 7.5k คือค่ากึ่งกลางของ potentiometer R_3

ดังนั้นจะได้ potentiometer R_3 แทน R_3 มีค่า = $2(7.5k) = 15k$ ได้วงจรส่วนแสดงผลสมบูรณ์ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 วงจรสมบูรณของ pH มิเตอร์

- หมายเหตุ P₁ ใช้ปรับ Compensate เมื่ออุณหภูมิในสารละลายมีค่าอุณหภูมิต่างๆ
P₂ ใช้ Cal. Buffer ตัวที่ 2 (Second Buffer) เพื่อให้ได้การสเปนที่ถูกต้อง
P₃ ใช้ Cal. Buffer ตัวที่ 1 เสมือนการ Set Zero ของอินสตรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรสั่งการมอเตอร์บีบควบคุมสารละลาย

ในส่วนของการควบคุมนั้น การทำให้เป็นระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด ต้องเลือกใช้งานไทรแอกในการควบคุมการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้า โดยใช้งานร่วมกับ MOC ในการขับให้ไทรแอก ดังนี้

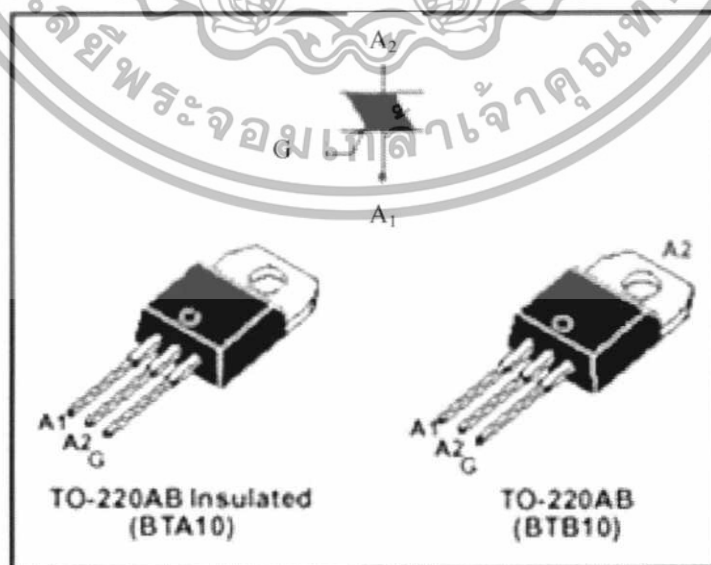
3.3.1 ไทรแอก (triac)

ไทรแอกเป็นเซมิคอนดักเตอร์ชนิดหนึ่งสามารถควบคุมการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับ SCR แต่ SCR สามารถควบคุมการเปิด - ปิดกระแสไฟฟ้าได้เมื่อขั้วอาโนด มีแรงดันไฟฟ้าบวก ส่วน ไทรแอก สามารถควบคุมได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกหรือลบ ดังนั้นขั้วของไทรแอก จึงมีชื่อเรียกเป็น A_2 , A_1 และ G แทนที่จะเป็น อาโนด, คาโทด, และเกท แบบกรณีของ SCR ในการบอกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ ของไทรแอก เราจะถือเอา ขั้ว A_1 เป็นขั้วอ้างอิงเสมอ เช่น เมื่อบอกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว A_2 เป็นบวก ก็หมายความว่าขั้ว A_2 มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้ว A_1 เป็นต้น

ไทรแอกสามารถปิดกระแสได้สองทิศทาง และสามารถถูกสวิตช์ให้นำ กระแสได้ทั้งสองทิศทาง โดยกระแสเกทที่ใช้จุดชนวนจะมีทิศทางเข้าหรือออกจากไทรแอกก็ได้ ดังนั้นการจุดชนวนไทรแอก จึงแบ่งออกได้เป็น 4 แบบคือ

- 1.) แบบ I+ แรงดันไฟฟ้าที่ A_2 เป็นบวก และกระแสเกทไหลเข้าไทรแอก
- 2.) แบบ I- แรงดันไฟฟ้าที่ A_2 เป็นบวก และกระแสเกทไหลออกจากไทรแอก
- 3.) แบบ III+ แรงดันไฟฟ้าที่ A_2 เป็นลบ และกระแสเกทไหลเข้าไทรแอก
- 4.) แบบ III- แรงดันไฟฟ้าที่ A_2 เป็นลบ และกระแสเกทไหลผ่านออกจากไทรแอก

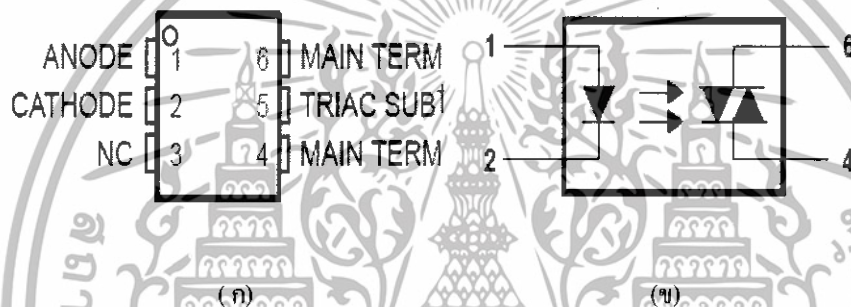
สำหรับ ไทรแอกที่นำมาใช้ในการทำโครงการในครั้งนี้คือ 10A TRIAC (BTA16) Series โดยมีคุณสมบัตินำกระแสสูงสุดได้ถึง 10 แอมป์ และต้องการกระแสทรักขนาด 20-50 มิลลิแอมป์ ทำงานที่ 50-60 Hz 220 VAC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 MOC 3021M

เป็นอุปกรณ์ช่วยในการขับไทรแอกให้นำกระแส โดยอุปกรณ์ภายในของ optoisolator triac driver แยกวงจรออกเป็นสองส่วนแต่เชื่อมต่อกันด้วยแสงอินฟราเรด จึงทำหน้าที่แยกวงจรออกเป็นสองส่วนเพื่อประโยชน์ในการป้องกันกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเกินขนาดจากวงจรทางด้านอินพุตของไทรแอกมาทำอันตรายกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของ optoisolator triac driver ที่นำมาใช้กับการทดลองนี้คือ MOC3021M โดยมีคุณสมบัติดังนี้
ทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 โวลต์ และมีการป้องกันแรงดันสูงสุดที่ระดับแรงดัน 400 โวลต์ ระดับกระแสไหลผ่าน emitter เท่ากับ 60 มิลลิแอมป์ และให้กระแสทริกไทรแอกขนาด 30 มิลลิแอมป์ โดยมีลักษณะและการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.20



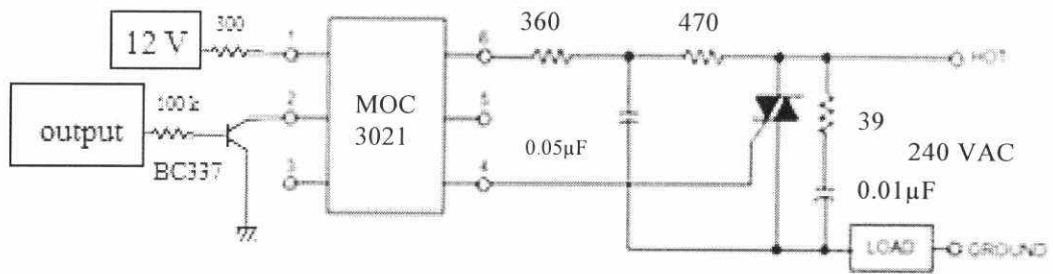
รูปที่ 3.20 ลักษณะภายนอกและวงจรภายในของ ไทรแอก

(ก) ลักษณะภายนอกของ optoisolator triac driver

(ข) วงจรภายในของ optoisolator triac driver

3.3.3 อุปกรณ์ขับไทรแอก (optoisolator triac drive)

เป็นการนำเอา Moc 3021 กับ ไทรแอกมาทำงานร่วมกันทำหน้าที่ เป็นการควบคุมเปิด-ปิด เมื่อแรงดัน 5 โวลต์ จ่ายจากขา 29,30 ซึ่งเป็นขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A วงจรก็จะเกิดการนำกระแสได้ทำให้ไทรแอกเกิดการทริกทำให้ทำงาน จึงเป็นการเปิดการทำงาน ของวงจร แต่ในทางกลับกันเหมือนไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A ทำการจ่ายแรงดัน 0 โวลต์ออกมาจากขา 30 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A กระแสจะไม่มีทำให้ไทรแอกนั้น ไม่ทำงานจึงเป็นการทำให้วงจรนั้นไม่ทำงาน



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ขับไทรแอก

3.3.4 มอเตอร์ปั๊ม (pump motor)

โหนดที่ใช้ต่อกับไทรแอกจะใช้เป็นมอเตอร์ปั๊มเพื่อใช้ปั๊มสารละลายกรด - ด่าง ควบคุมค่า pH โดยมอเตอร์ปั๊มที่เลือกใช้นั้น เป็นมอเตอร์ปั๊มขนาด 5 W มีประสิทธิภาพสามารถปั๊มของเหลวได้ต่ำสุดที่ 10 มิลลิลิตร ต่อ 1 วินาที และสูงสุดที่ 50 มิลลิลิตร ต่อ 1 วินาที

ซึ่งจะใช้งานที่ 10 มิลลิลิตร ต่อ 1 วินาที เพราะถ้าให้มอเตอร์ปั๊มเติมสารละลายปริมาณมาก จะมีปัญหาในการควบคุมเป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.22 ถังกวนเชื่อมต่อกับ Probe และ มอเตอร์ปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 สารละลายกรด – ด่าง (acid – base solution)

สารละลายที่ใช้ในการควบคุมค่า pH นั้น ใช้เป็นสารละลายดังนี้

มอเตอร์ปั๊มตัวที่ 1 จะใช้สารละลายที่มีค่าสมบัติเป็นกรด ซึ่งสารที่ใช้คือ กรดอะซิติก (acetic acid)

CH_3COOH ซึ่งเจือจางให้มีค่า pH เท่ากับ 4

มอเตอร์ปั๊มตัวที่ 2 จะใช้สารละลายที่มีค่าสมบัติเป็นด่าง ซึ่งสารที่ใช้คือ โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate)

Na_2CO_3 ซึ่งเจือจางให้มีค่า pH เท่ากับ 10

โดยสารละลายที่ใช้ควบคุมค่ากรด – ด่าง จะบรรจุในภาชนะรวมกันมอเตอร์ปั๊ม และสารละลายตั้งต้นที่ต้องการควบคุม จะบรรจุในถังซึ่งเชื่อมต่อกับ pH อิเล็กโทรด และมอเตอร์ติดใบพัดสำหรับกวนสารละลาย ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 5 V โดยใช้แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 1.5 V ทำให้มีรอบที่ต่ำลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้คือ PIC 16F877A ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้จำนวนขาทั้งหมด 40 ขา ใช้กับความถี่สัญญาณนาฬิกา 50-20 MHz และมีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช 8 กิโลเวิร์ด (8K x 14 bit) และหน่วยความจำข้อมูลแรม 368 ไบต์ มีหน่วยความจำอีอีพรอม 256 ไบต์ มีพอร์ต A-E เป็นพอร์ตอินเอาต์พุต จำนวน 33 บิต มีโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และ มีโมดูลสื่อสารอนุกรม (USART) ตอบสนองแหล่งกำเนิดอินเทอร์รัปต์สูงสุด 15 แหล่ง เช่น แหล่งตอบสนองสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก ใช้ไฟเลี้ยง 2-5.5 โวลต์ มีกระแสซิงก์และซอร์สของพอร์ต 25 มิลลิแอมป์

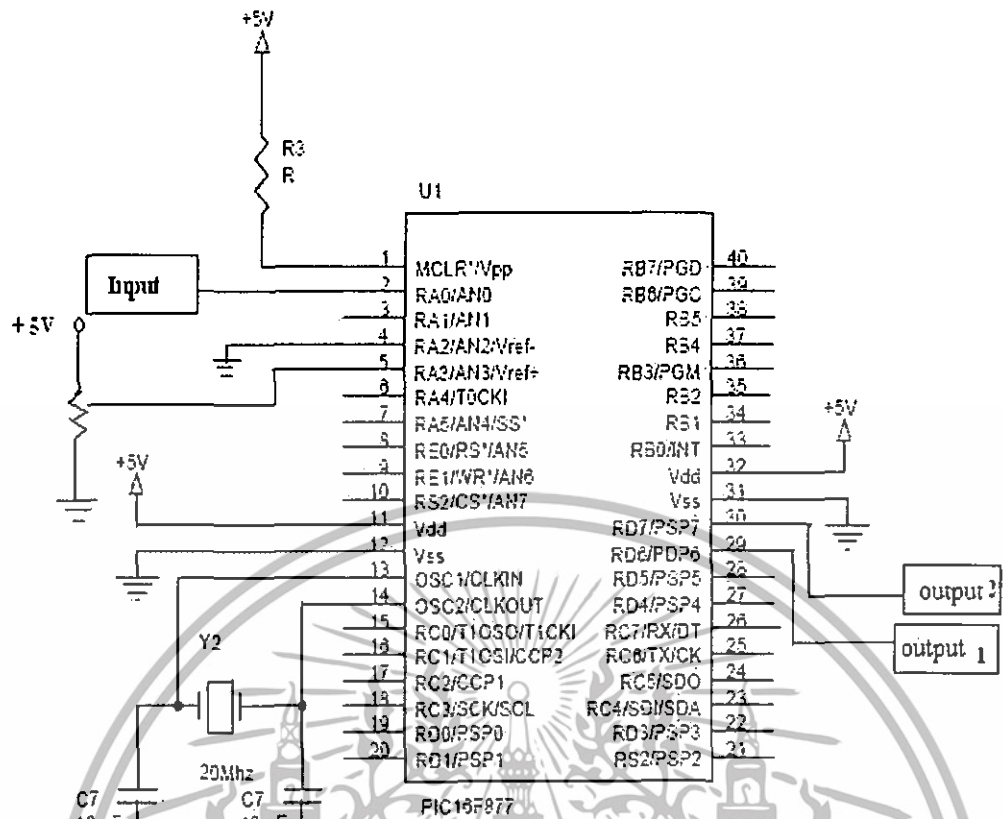


รูปที่ 3.25 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

PIC 16F877A

ทำหน้าที่ประมวลผลต่างๆ อาทิเช่น ใช้สำหรับการอ่านค่าแรงดันแล้วนำค่าที่อ่านได้ไปประมวลผลเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิด การทำงานของมอเตอร์ โดยการเชื่อมต่อจะทำได้โดย ป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุตเข้าทางขา 2 (RA0) และให้แรงดันอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบเข้าทางขา 5 (RA3/V_{REF+}) และให้สัญญาณเอาต์พุตเชื่อมต่อกับวงจรขับไทแรนด โดย เอาท์พุต 1 ออกทางขา 29 (RD6) และเอาต์พุต 2 ออกทางขา 30 (RD7) ดังแสดงในรูปที่ 3.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองนี้ เป็นการทดลองเพื่อทดสอบระบบในการควบคุมค่า pH โดยจากการออกแบบวงจรทั้งหมดนำมาใช้งานควบคุมค่า pH ของสารละลายในการทดลอง แต่เนื่องจากวงจรที่ออกแบบใช้งานเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้า จะเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าเอาต์พุตของเครื่อง pH มิเตอร์กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองโดยเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่อง pH มิเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH เพื่อคุณลักษณะของแวนโวลท์และช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันว่าเป็นไปในลักษณะใด แล้วนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการสร้างสเกลของมิเตอร์เพื่อใช้ในการตั้งค่า pH และควบคุม โดยวิธีการดังในวิธีการทดลองต่อไปนี้

4.1 วิธีการทดลอง

กำหนดให้ค่ากลางเป็นค่า pH = 7 และแรงดันสเปคค่าไว้ที่ 700 mV โดยจะเปลี่ยนแปลงไป 100 mV ต่อ 1 pH ทำการเขียนโปรแกรม ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A ใช้งานเป็นระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด โดยสร้างแรงดันอ้างอิงจากภายนอก 700 mV เป็นตัวเปรียบเทียบ เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรมีสัญญาณน้อยกว่า 700 mV ไมโครคอนโทรลเลอร์จะจ่ายไฟ 5 V ให้ขา 29 ซึ่งเป็นขาเอาต์พุต 1 ทำให้ MOC ขับ ไทรแอก ให้ทำงาน ทำให้มอเตอร์ปั๊มสารละลายตัวแรกทำงาน และให้มีการสั่งหน่วงเวลา (Delay) เพื่อรอการเปลี่ยนแปลงของค่า pH แล้วจึงประมวลผลใหม่ ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันมากกว่า 700 mV ไมโครคอนโทรลเลอร์จะจ่ายไฟออกทางขา 30 ซึ่งเป็นขาเอาต์พุต 2 เพื่อให้ปั๊มตัวที่ 2 ทำงานและสั่งหน่วงเวลาเพื่อรอการเปลี่ยนแปลงของค่า pH แล้วจึงประมวลผลใหม่

จากการทดลองสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อมีการเติมสารละลายจากมอเตอร์ปั๊ม พบว่า

- เมื่อเติมสารละลายกรด หรือ CH_3COOH ลงไป 10 มิลลิลิตร ค่าแรงดันที่ได้จะเพิ่มขึ้น และค่า pH ที่ได้จะลดลง โดยจะใช้เวลาประมาณ 30 วินาทีที่ค่า pH ถึงจะหยุดนิ่ง
- เมื่อเติมสารละลายด่าง หรือ Na_2CO_3 ลงไป 10 มิลลิลิตร ค่าแรงดันที่ได้จะลดลง และค่า pH ที่ได้จะเพิ่มขึ้น โดยจะใช้เวลาประมาณ 20 วินาที ค่า pH ถึงจะหยุดนิ่ง

เมื่อได้ความสัมพันธ์ข้างต้นแล้ว จึงกำหนดเวลาหน่วง (Delay Time) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสั่งการเอาต์พุตมอเตอร์ปั๊ม โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เอาท์พุท 1 หรือ มอเตอร์ปั๊มตัวที่ 1 หนึ่งเวลา 30 วินาที
- เอาท์พุท 2 หรือ มอเตอร์ปั๊มตัวที่ 2 หนึ่งเวลา 20 วินาที

ในการสั่งงาน 1 ครั้ง จะให้มอเตอร์ปั๊มทำงาน 1 วินาที โดยจะปั๊มสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ใช้สารที่ต้องการควบคุมเป็นกรด และ ด่าง โดยใช้สารละลาย pH 5 และ pH 10 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เพื่อทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมมอเตอร์ปั๊มสารละลาย

4.1.1 การทดลองตอนที่ 1

สารละลายตั้งต้น pH 5

การทดลองครั้งที่ 1 กำหนด set point ไว้ที่ pH 7.0 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 700 mV

การทดลองครั้งที่ 2 กำหนด set point ไว้ที่ pH 6.5 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 750 mV

การทดลองครั้งที่ 3 กำหนด set point ไว้ที่ pH 6.0 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 800 mV

4.1.2 การทดลองตอนที่ 2

สารละลายตั้งต้น pH 10

การทดลองครั้งที่ 1 กำหนด set point ไว้ที่ pH 7.0 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 700 mV

การทดลองครั้งที่ 2 กำหนด set point ไว้ที่ pH 7.5 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 650 mV

การทดลองครั้งที่ 3 กำหนด set point ไว้ที่ pH 8.0 โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 600 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

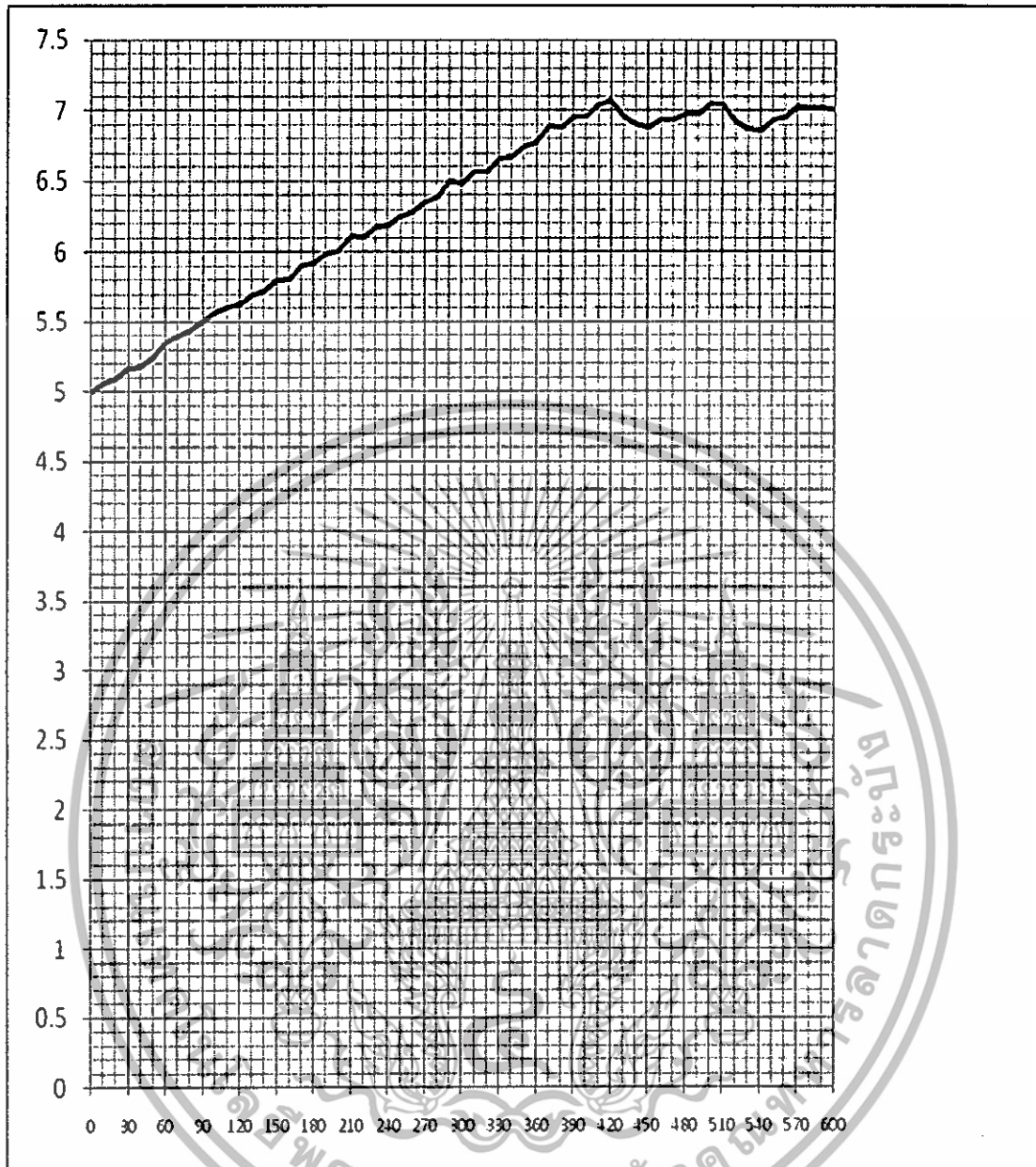
การทดลองครั้งที่ 1

สารละลาย pH 5 500 มิลลิลิตร เมื่อ set point ที่ pH 7.0

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 7.0

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	5.06	160	5.81	310	6.56	460	6.93
20	5.09	170	5.90	320	6.57	470	6.93
30	5.17	180	5.92	330	6.66	480	6.98
40	5.18	190	5.99	340	6.67	490	6.97
50	5.25	200	6.01	350	6.74	500	7.05
60	5.35	210	6.11	360	6.77	510	7.04
70	5.40	220	6.10	370	6.89	520	6.92
80	5.44	230	6.18	380	6.88	530	6.87
90	5.50	240	6.19	390	6.95	540	6.86
100	5.56	250	6.25	400	6.95	550	6.93
110	5.61	260	6.28	410	7.04	560	6.95
120	5.63	270	6.35	420	7.07	570	7.03
130	5.69	280	6.39	430	6.95	580	7.02
140	5.72	290	6.50	440	6.90	590	7.02
150	5.80	300	6.48	450	6.88	600	7.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 7.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

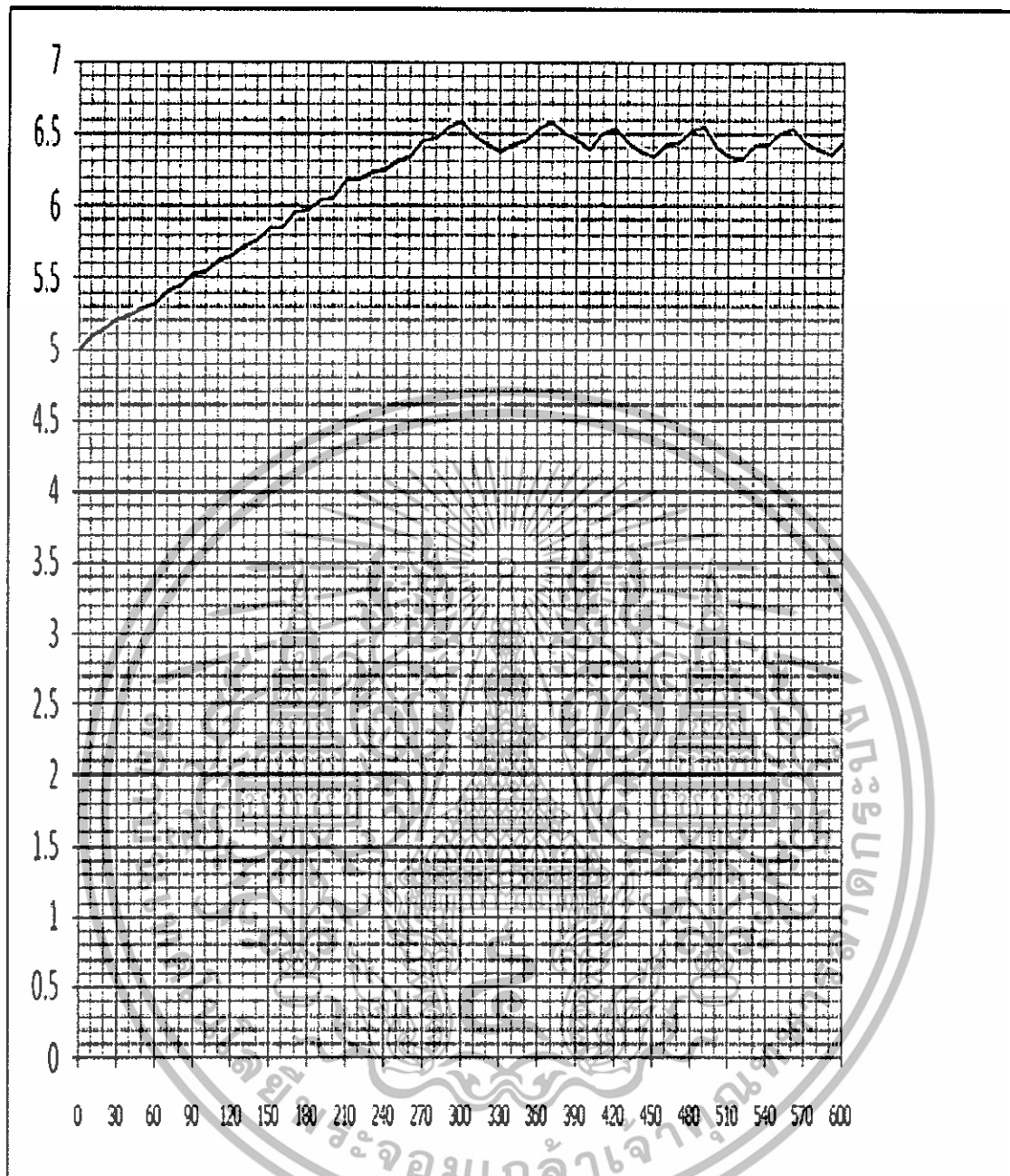
การทดลองครั้งที่ 2

สารละลาย pH 5 500 มิลลิลิตร เมื่อ set point ที่ pH 6.5

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.5

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	5.10	160	5.85	310	6.49	460	6.43
20	5.14	170	5.96	320	6.42	470	6.44
30	5.20	180	5.97	330	6.37	480	6.52
40	5.23	190	6.04	340	6.43	490	6.55
50	5.28	200	6.06	350	6.45	500	6.41
60	5.32	210	6.19	360	6.54	510	6.35
70	5.42	220	6.18	370	6.58	520	6.33
80	5.44	230	6.23	380	6.50	530	6.42
90	5.52	240	6.25	390	6.45	540	6.42
100	5.54	250	6.31	400	6.40	550	6.50
110	5.63	260	6.35	410	6.51	560	6.53
120	5.66	270	6.45	420	6.53	570	6.44
130	5.72	280	6.47	430	6.44	580	6.40
140	5.76	290	6.56	440	6.38	590	6.36
150	5.84	300	6.58	450	6.34	600	6.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

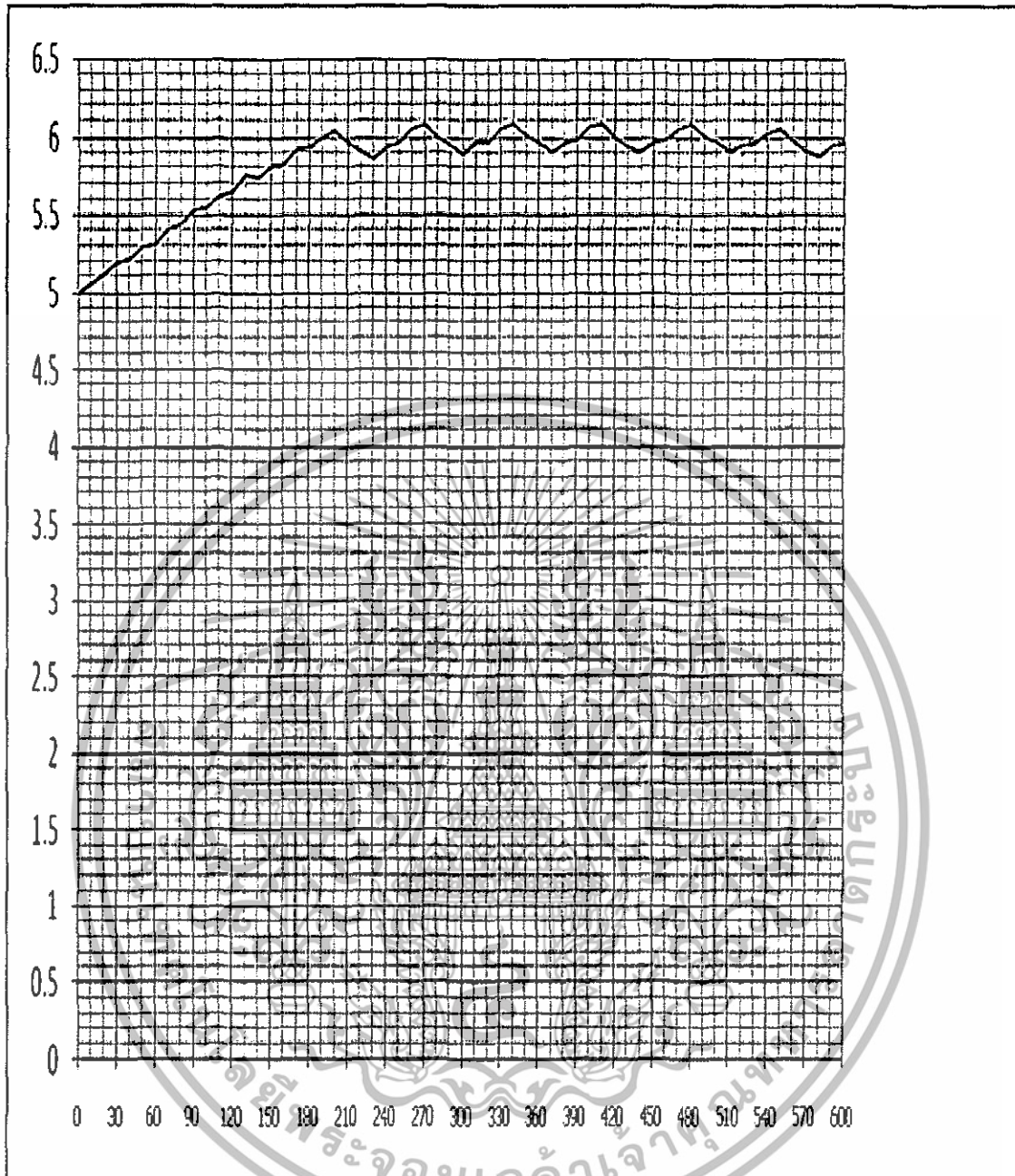
การทดลองครั้งที่ 3

สารละลาย pH 5 500 มิลลิลิตร เมื่อ set point ที่ pH 6.0

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.0

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	5.06	160	5.83	310	5.96	460	5.98
20	5.11	170	5.92	320	5.97	470	6.05
30	5.19	180	5.93	330	6.06	480	6.09
40	5.22	190	6.00	340	6.09	490	6.01
50	5.30	200	6.04	350	6.01	500	5.96
60	5.31	210	5.97	360	5.96	510	5.90
70	5.42	220	5.91	370	5.90	520	5.95
80	5.45	230	5.86	380	5.97	530	5.97
90	5.53	240	5.94	390	5.98	540	6.03
100	5.55	250	5.96	400	6.07	550	6.06
110	5.63	260	6.05	410	6.09	560	5.97
120	5.65	270	6.08	420	5.99	570	5.91
130	5.75	280	6.00	430	5.94	580	5.87
140	5.74	290	5.95	440	5.90	590	5.95
150	5.82	300	5.89	450	5.96	600	5.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 5 เมื่อ set point ที่ pH 6.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

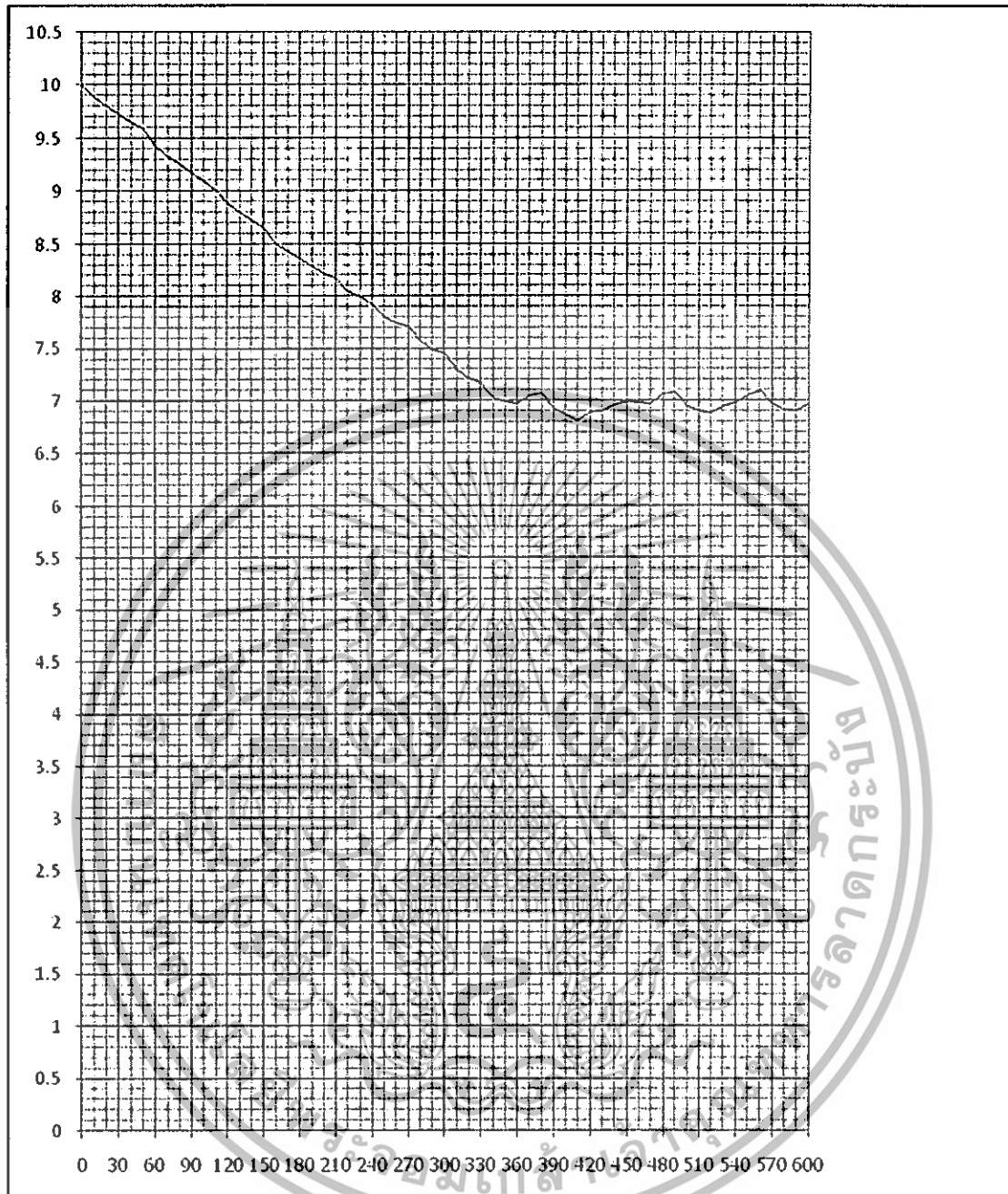
การทดลองครั้งที่ 1

สารละลาย pH 10 500 มิลลิลิตร เมื่อ set point ที่ pH 7.0

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.0

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	9.89	160	8.50	310	7.30	460	6.98
20	9.81	170	8.43	320	7.22	470	6.97
30	9.73	180	8.37	330	7.17	480	7.06
40	9.65	190	8.29	340	7.03	490	7.08
50	9.59	200	8.22	350	6.99	500	6.95
60	9.42	210	8.17	360	6.97	510	6.90
70	9.33	220	8.05	370	7.05	520	6.88
80	9.25	230	8.00	380	7.07	530	6.95
90	9.18	240	7.93	390	6.92	540	6.98
100	9.10	250	7.8	400	6.87	550	7.05
110	9.02	260	7.75	410	6.81	560	7.09
120	8.88	270	7.71	420	6.89	570	6.97
130	8.81	280	7.58	430	6.90	580	6.91
140	8.73	290	7.49	440	6.96	590	6.90
150	8.66	300	7.46	450	6.99	600	6.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

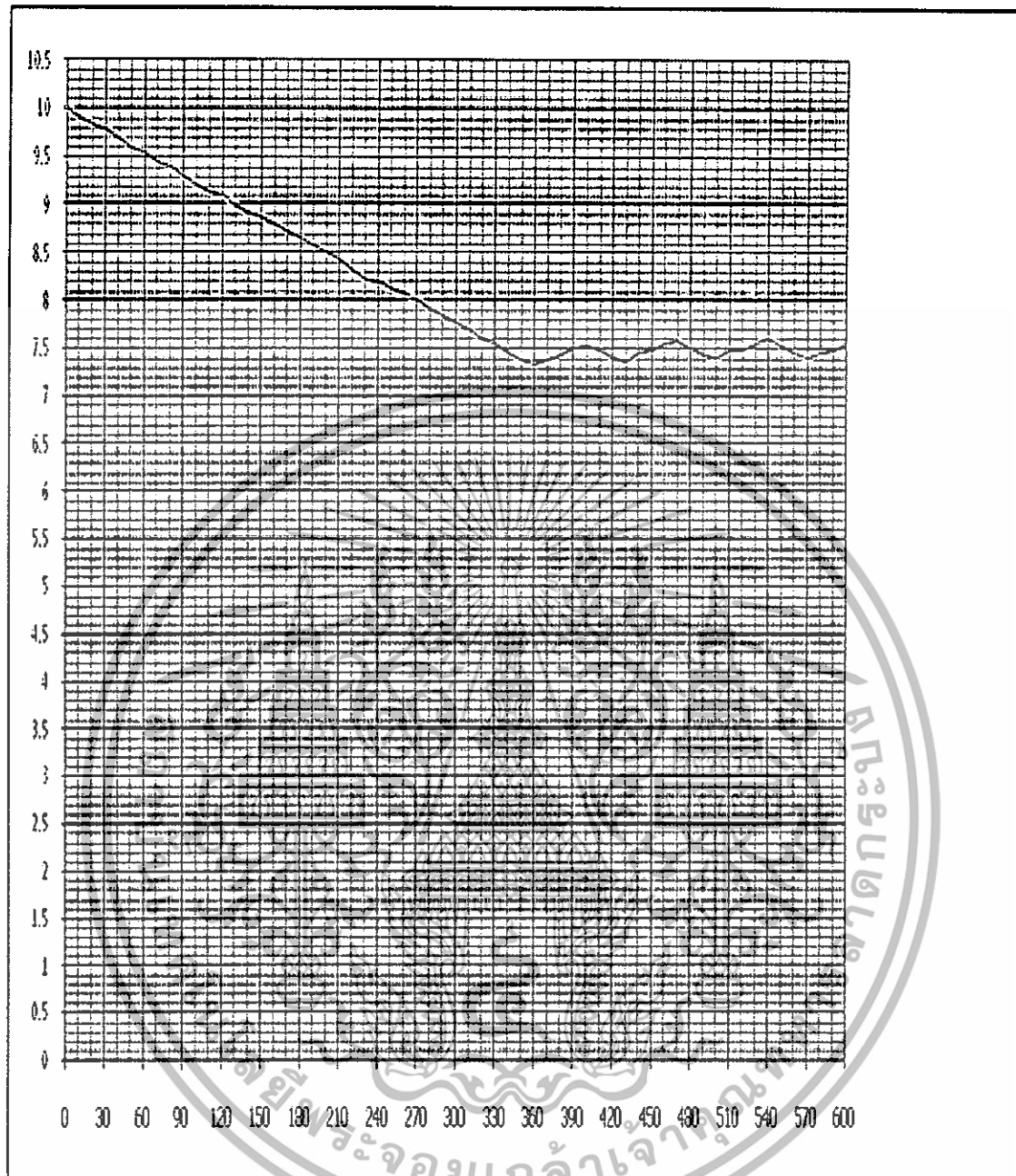
การทดลองครั้งที่ 2

สารละลาย pH 10 500 มิลลิลิตร เมื่อ Set point ที่ pH 7.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ Set point ที่ pH 7.5

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	9.90	160	8.80	310	7.69	460	7.56
20	9.84	170	8.72	320	7.60	470	7.58
30	9.79	180	8.67	330	7.56	480	7.50
40	9.69	190	8.58	340	7.45	490	7.44
50	9.60	200	8.51	350	7.38	500	7.40
60	9.55	210	8.45	360	7.33	510	7.47
70	9.44	220	8.32	370	7.39	520	7.48
80	9.40	230	8.23	380	7.42	530	7.56
90	9.30	240	8.2	390	7.50	540	7.59
100	9.22	250	8.14	400	7.52	550	7.52
110	9.15	260	8.07	410	7.47	560	7.45
120	9.11	270	8.00	420	7.40	570	7.40
130	9.00	280	7.91	430	7.36	580	7.46
140	8.92	290	7.83	440	7.45	590	7.48
150	8.88	300	7.78	450	7.47	600	7.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

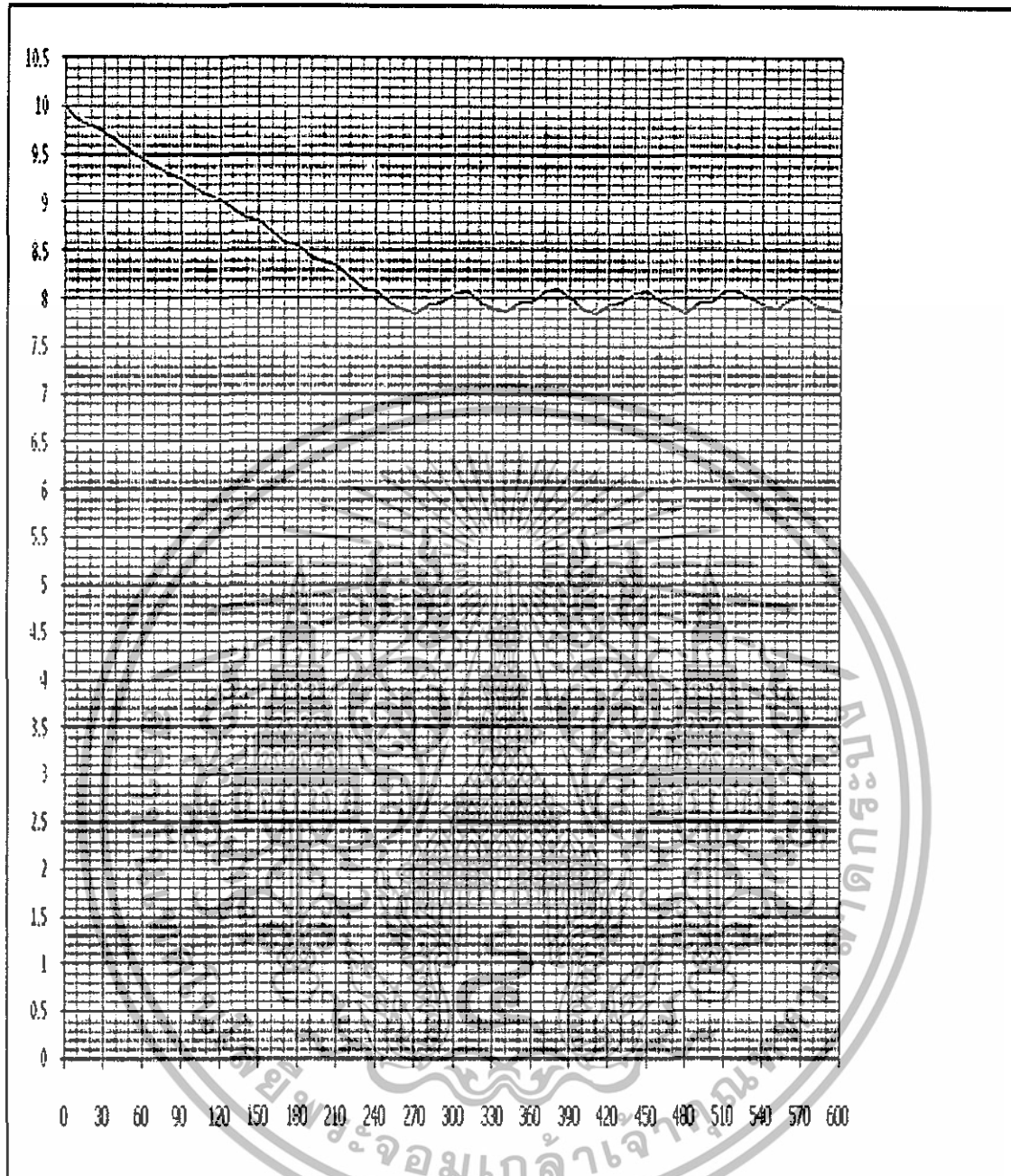
การทดลองครั้งที่ 3

สารละลาย pH 10 500 มิลลิลิตร เมื่อ set point ที่ pH 8.0

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า pH เมื่อเทียบกับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 8.0

t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH	t(s)	pH
10	9.87	160	8.70	310	8.08	460	7.99
20	9.82	170	8.58	320	7.97	470	7.92
30	9.75	180	8.55	330	7.90	480	7.85
40	9.65	190	8.45	340	7.86	490	7.95
50	9.54	200	8.39	350	7.95	500	7.96
60	9.45	210	8.34	360	7.96	510	8.07
70	9.39	220	8.22	370	8.07	520	8.09
80	9.30	230	8.10	380	8.10	530	8.00
90	9.25	240	8.07	390	8.01	540	7.94
100	9.17	250	7.97	400	7.89	550	7.89
110	9.10	260	7.90	410	7.84	560	7.99
120	9.05	270	7.85	420	7.93	570	8.03
130	8.95	280	7.93	430	7.96	580	7.94
140	8.86	290	7.96	440	8.05	590	7.89
150	8.82	300	8.05	450	8.08	600	7.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาของสารตั้งต้น pH 10 เมื่อ set point ที่ pH 8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทำโครงการชุดควบคุมค่า pH ในของเหลว ได้ดำเนินงานสำเร็จจนเครื่องสามารถใช้งานแสดงค่า pH ได้ถูกต้องตามจุดมุ่งหมาย และประยุกต์ใช้ในการควบคุมสารละลายเพื่อกำหนดค่า pH สรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสร้าง ซึ่งต้องใช้เวลาเนื่องจากข้อมูลต่างๆ ไม่ได้เป็นข้อมูลทางไฟฟ้าที่สามารถนำค่าตัวเลขต่างๆมาออกแบบได้โดยตรง แต่เป็นลักษณะของสมการเคมี ไม่ได้แสดงเป็นสมการไฟฟ้า ซึ่งสรุปได้ว่า 1 pH unit มีค่าประมาณ 59.16 mV และมีการเปลี่ยนค่าเป็นเชิงเส้นตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิผลต่อค่า mV เล็กน้อย เพราะเมื่อเป็นอุณหภูมิเคลวิน (Kelvin) ในสมการแล้ว ค่าอุณหภูมิเซลเซียส (Celsius) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่า 273

2. ขั้นตอนออกแบบวงจรขยายสัญญาณซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่เกี่ยวกับความเที่ยงตรงของค่า pH ซึ่งขั้นแรกนั้น ต้องทำการบัพเฟอร์สัญญาณที่ได้โดยใช้วงจรที่รับ impedance สูงมากได้ ซึ่งได้ออกแบบใช้งานวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ซึ่งสามารถใช้งานได้และได้ทำการปรับปรุงให้สามารถชดเชยค่าออฟเซต (offset) และสามารถสเปนซีโร (span zero) ได้

3. ขั้นตอนการแสดงผล ได้ใช้ IC display 7106 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าอินพุตจากวงจรที่ออกแบบไว้โดยให้ค่า 0 mV แสดงค่าเป็น 7.00 และมีค่าเพิ่ม-ลด ประมาณ 1.00 ต่อแรงดันไฟฟ้า 100 mV โดยค่าการแสดงผลจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลง และค่าการแสดงผลจะลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

4. ขั้นตอนการควบคุม โดยใช้การควบคุมแบบเปิด-ปิด โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้ในการควบคุมมอเตอร์ปั๊ม เพื่อใช้เติมสารเพื่อให้ได้ค่า pH ที่ต้องการได้โดยจากการทดลองจะมี dead band ซึ่งหมายความว่าเอาต์พุตของระบบควบคุมที่ออกมาจะมีการแกว่งอยู่ในย่านที่ตัวควบคุมยอมรับได้ คือมีค่าเบี่ยงเบนน้อยมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบมากนัก โดยค่า pH จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างประมาณ 7.10 ถึง 6.90 กำหนด set point ที่ 7 การทำงานแบบระบบควบคุมเปิด-ปิด จะมี dead band เท่ากับ $7.10 - 6.90 = 0.20$ หรือจะพูดได้ว่าการควบคุมเกิดการแกว่งระหว่าง 7.10 ถึง 6.90 โดยค่า set point ของระบบสามารถปรับแต่งได้จากการปรับแรงดันอ้างอิงที่ขา 5 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A โดยปรับค่าตัวต้านทาน เช่น ถ้าต้องการให้ set point เป็น pH 6 จะทำได้โดยปรับแรงดันอ้างอิงเป็น 800 mV และถ้าต้องการ pH ต่ำกว่านี้ ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้น 100 mV ต่อ 1 pH ในทางกลับกัน ถ้าต้องการ set point เป็นค่า pH ที่มากขึ้น จะต้องปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้ลดลง 100 mV ต่อ 1 pH

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณนั้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไม่ค่อยมีความแน่นอน ทำให้การแสดงผลค่า pH และการสั่งควบคุมมอเตอร์ปั๊มมีปัญหา แนวทางแก้ไขคือ ลดความยาวของสายไฟเชื่อมต่อ และสายสัญญาณให้สั้นลงที่สุด และทำการกรองสัญญาณด้วยวงจรกรองสัญญาณ (low pass filter) ทำให้สัญญาณที่ได้มีความแน่นอนมากขึ้น และในการทดลองนั้นไม่สามารถหาสารละลายที่เป็นกรดแก่ได้ เพราะมีความอันตรายสูง จึงต้องทำการทดลองเฉพาะสารละลายที่มีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถเตรียมได้เท่านั้น

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

โครงการนี้เป็นเพียงแบบจำลองที่ใช้เพื่อศึกษาและเป็นการทดลองกระบวนการทำงานเท่านั้น ยังขาดความสมบูรณ์และมีข้อบกพร่องอยู่พอสมควร แนวทางการพัฒนานั้น สามารถปรับเปลี่ยนชนิด และความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการควบคุมค่า pH ที่เหมาะสมได้ เพื่อที่จะทำให้ระบบเข้าสู่ set point ได้เร็วขึ้น และสามารถเขียนโปรแกรมใหม่ เพื่อให้ระบบมีการแกว่งน้อยลง รวมทั้งการออกแบบระบบควบคุมใหม่ให้เป็นระบบควบคุมแบบอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รองศาสตราจารย์ รัชชัย ศรีวิบูลย์. เคมิวิเคราะห์ 2. 6. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ - มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2537.
- [2] รองศาสตราจารย์ ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. เคมิวิเคราะห์. 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ - จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
- [3] ภ.ญ.อ. ลาวัลย์ ศรีพงษ์. การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า. ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [4] Katsuhiko Ogata. **Modern Control Engineering**. Fourth edition. Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ 07458, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้