การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

นายณัฐพล วันทะมาตย์

นางสาววัจนา พิลหาเวสส

วัน เดือน ปี 4 ต.ค. 2541

เลขทะเบียน 038646

เลขเรียกหนังสือ T400.7(สพก)

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038646

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

โดย นายณัฐพล วันทะมาตย์

นางสาววัจนา พิลหาเวสส

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา Dr. Choko Tereza Ito

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(Dr. Choko Tereza Ito)

.....กรรมการ
(อาจารย์สุธาสินี แก้วพวงงาม)

.....กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

.....กรรมการ
(อาจารย์สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ
โดย นายณัฐพล วันทะมาตย์
นางสาววัจนา พิลหาเวสส
อาจารย์ที่ปรึกษา Dr. Choko Tereza Ito
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยนำหลักการของเครื่องพีเอชมิเตอร์มาประยุกต์ใช้วัดค่าพีเอชของสารละลายและนำมาเปรียบเทียบกับค่าพีเอชที่กำหนดไว้ ภายในเครื่องมือมีระบบควบคุมที่ทำหน้าที่รับค่าสัญญาณและส่งสัญญาณควบคุมไปยังโซลินอยด์ซึ่งเป็นตัวควบคุมปริมาณการเติมกรดหรือเบสลงไปในสารละลายตัวอย่าง จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายที่วัดได้จริงเท่ากับค่าพีเอชที่กำหนด เครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่จึงหยุดทำงาน

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ โดยใช้สารละลาย 0.5% HCl และสารละลาย 0.2 M NaOH พบว่าค่าพีเอชของสารละลายที่วัดได้จริงหลังจากที่เครื่องหยุดทำงานมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดประมาณ 0.03 ถึง 0.33 และช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการควบคุมอยู่ในช่วงประมาณ 5.0 ถึง 8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title The Designing and Invention of pH Stat for Laboratory

By Mr. Nattapol Wantamat

Miss Watjana Linhavess

Advisor Dr. Choko Tereza Ito

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project demonstrates the Designing and Invention of pH Stat for Laboratory. The pH meter is applied for measurement the pH value of solution and compared with pH value which is set. The internal of equipment has control systems that receive and send the control signal to solenoid. And solenoid controls the quantity of acid and base titrants which add to sample solution. This equipment stoped when the measured pH value equals set value.

The resulting experiments were performed with 0.5% HCl and 0.2 M NaOH solutions for testing efficiency of pH stat. It is experimentally observed that the pH errors appromimate 0.03 to 0.33 and range of pH values is optimal for control approximates 5.0 to 8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่ออาจารย์ Dr. Choko Tereza Ito อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ ที่เอื้อเฟื้อสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานและสารละลายอิ่มตัวที่ใช้เติมใน Probe และขอขอบคุณ คุณศมิทธิ์ เอมสมบัติ ที่ให้ข้อมูล คำแนะนำตลอดจนอุปกรณ์และความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการออกแบบวงจรของระบบควบคุม และขอขอบคุณ คุณโอ ที่ได้เอื้อเฟื้อหนังสือเพื่อใช้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีต่าง ๆ และอนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ทำการทดลอง และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและอบรมสั่งสอนมาตลอด 4 ปีที่ศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง เพื่อน ๆ และทุก ๆ ท่านซึ่งไม่สามารถแสดงนามได้หมด ที่ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ
สารบัญตาราง.....ช
สารบัญภาพ.....ฎ

บทที่

1. บทนำ.....1
2. ทฤษฎี.....4
3. หลักการและการออกแบบ.....45
4. การทดลองและผลการทดลอง.....58
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....92

รายการอ้างอิง.....94
ภาคผนวก.....95
ประวัติผู้เขียน.....107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 วิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า....12

ตารางที่ 2.2 ขั้วคาโลเมลที่ใช้มากที่สุด....14

ตารางที่ 2.3 PVC matrix-membrane coated wire ion selective electrode....30

ตารางที่ 2.4 ระบบเลขฐานสิบและระบบเลขฐานสอง....36

ตารางที่ 2.5 ก ระบบเลขฐานแปด....37

ตารางที่ 2.5 ข ระบบเลขฐานสิบหก....38

ตารางที่ 2.6 ค่าเทียบเคียงของระบบเลขฐานแปดและเลขฐานสอง....42

ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสอง....42

ตารางที่ 2.8 รหัส BCD (Binary Coded Decimal)....44

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการปรับค่าพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ....48

ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ได้จากการปรับพีเอชของ probe จำลองที่ค่าพีเอชต่าง ๆ....50

ตารางที่ 4.1.1 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด....60

ตารางที่ 4.1.1 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิลิตร/หยด....61

ตารางที่ 4.1.1 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด....62

ตารางที่ 4.1.1 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด....62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 4.1.2 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด.....63
ตารางที่ 4.1.2 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด.....64
ตารางที่ 4.1.2 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด.....64
ตารางที่ 4.1.2 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด.....65
ตารางที่ 4.1.3 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด.....66
ตารางที่ 4.1.3 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด.....66
ตารางที่ 4.1.3 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด.....67
ตารางที่ 4.1.3 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด.....68
ตารางที่ 4.1.4ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด.....68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 4.1.4 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด....69
ตารางที่ 4.1.4 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด....70
ตารางที่ 4.1.4 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด....70
ตารางที่ 4.2.1 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด....68
ตารางที่ 4.2.1 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด....69
ตารางที่ 4.2.1 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด....69
ตารางที่ 4.2.1 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด....70
ตารางที่ 4.2.2 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด....71
ตารางที่ 4.2.2 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด....71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 4.2.2 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด....72
ตารางที่ 4.2.2 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด....72
ตารางที่ 4.2.3 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด....73
ตารางที่ 4.2.3 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด....74
ตารางที่ 4.2.3 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด....74
ตารางที่ 4.2.3 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด....75
ตารางที่ 4.2.4 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิตร/หยด....76
ตารางที่ 4.2.4 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.05 มิลลิตร/หยด....76
ตารางที่ 4.2.4 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิตร/หยด....77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 4.2.4 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.1 มิลลิตร/หยด.....77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า....5
รูปที่ 2.2 เซลกัลวานิกที่ไม่มี liquid junction....6
รูปที่ 2.3 ถ่านไฟฉาย....7
รูปที่ 2.4 เซลกัลวานิก....7
รูปที่ 2.5 อิเลคโตรไลติกเซล....8
รูปที่ 2.6 บริเวณเชื่อมต่อระหว่างอิเลคโทรดและสารละลาย....10
รูปที่ 2.7 การสร้างขั้วคาโลเมลอิ่มตัวอย่างง่าย....15
รูปที่ 2.8 ขั้วคาโลเมลอิ่มตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์....15
รูปที่ 2.9 ขั้วไฮโดรเจน....16
รูปที่ 2.10 ขั้วเงิน-เงินคลอไรด์....17
รูปที่ 2.11 เซลไฟฟ้าเคมีสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า....18
รูปที่ 2.12 ขั้วกลาสสำหรับวัดพีเอช....20
รูปที่ 2.13 Combination pH/reference electrode....22
รูปที่ 2.14 ขั้วเมมเบรนของเหลว....25
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบขั้วเมมเบรนของเหลวกับขั้วกลาส....26
รูปที่ 2.16 Precipited-implegnated membrane electrode....26
รูปที่ 2.17 Solid-state fluoride electrode....27
รูปที่ 2.18 ขั้วที่ไวต่อก๊าซ....27
รูปที่ 2.19 ขั้วเอนไซม์....28
รูปที่ 2.20 PVC matrix-membrane coated wire ion selective electrode....29
รูปที่ 2.21 วงจรไฟฟ้าของเครื่องพีเอชมิเตอร์....32
รูปที่ 2.22 Direct reading pH meter with negative feedback....33
รูปที่ 2.23 โพเทนชิโอเมตริกไตเตรชัน....34
รูปที่ 2.24 Automated titrator....35
รูปที่ 2.25 Computerised titration system....35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบกลุ่มของเลขฐานสองจำนวน 4 บิตกับเลขฐานสิบ.....40
รูปที่ 3.1 การขยายแบบกลับเฟส.....46
รูปที่ 3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....47
รูปที่ 3.3 ก แบบการต่อวงจรบัฟเฟอร์ที่มีอัตรขยายเป็น 1.....46
รูปที่ 3.3 ข แบบวงจรขยายแรงดันตามที่มีอัตราขยายเป็น 1.....46
รูปที่ 3.4 การประกอบเครื่องมือเพื่อวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์.....47
รูปที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าของ probe จำลอง.....49
รูปที่ 3.6 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้า.....52
รูปที่ 3.7 วงจรไฟฟ้าของระบบควบคุมภายในเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่.....54
รูปที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 12 หยด/นาที.....71
รูปที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 6 หยด/นาที.....72
รูปที่ 4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 3 หยด/นาที.....72
รูปที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 12 หยด/นาที.....73
รูปที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด.....73
รูปที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 0.05 มิลลิลิตร/หยด.....74
รูปที่ 4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด.....74
รูปที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่ เท่ากับ 0.1 มิลลิลิตร/หยด.....75
รูปที่ 4.9 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 12 หยด/นาที.....87
รูปที่ 4.10 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 6 หยด/นาที.....88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.11 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 3 หยด/นาที....88
รูปที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 1.5 หยด/นาที....89
รูปที่ 4.13 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด....89
รูปที่ 4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 0.05 มิลลิลิตร/หยด....90
รูปที่ 4.15 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด....90
รูปที่ 4.16 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่ เท่ากับ 0.1 มิลลิลิตร/หยด....91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้าอย่างมาก โรงงานอุตสาหกรรมถือกำเนิดขึ้นและกระจายอยู่ทั่วทั้งประเทศเพื่อทำการผลิตสินค้า บริการ และรองรับปริมาณความต้องการที่มีมากขึ้น โรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อตั้งขึ้นและดำเนินงานการผลิตมีส่วนในการทำให้เกิดมลภาวะและมีผล กระทบต่อสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงโรงงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่โรงงานอุตสาหกรรมควรดำเนินการติดตั้งระบบที่จะช่วยลดมลภาวะที่เกิดขึ้นให้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมให้น้อยที่สุด ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือ การควบคุมปริมาณและบำบัดของเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม

มลภาวะทางน้ำเป็นปัจจัยประการหนึ่งที่โรงงานจำเป็นต้องมีการควบคุมและติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียของโรงงานให้มีสภาพใกล้เคียงกับธรรมชาติและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป ระบบบำบัดน้ำเสียมีอยู่หลายระบบด้วยกัน การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานและความเหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสียอาจมีทั้งการกำจัดโลหะหนัก สารปนเปื้อน สารแขวนลอย และไขมันที่ปนมาในน้ำเสีย รวมทั้งการปรับสภาพของน้ำเสียด้วยการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งการปรับค่าพีเอชในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีที่มีความเป็นกรด-เบสลงไป โดยที่ปริมาณของสารเคมีที่เติมลงไปในน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับช่วงของค่าพีเอชของน้ำเสียนั้น

เครื่องควบคุมพีเอชคงที่ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพีเอชของสารละลาย แล้วทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่าคงที่ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากเครื่องมือที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันมีราคาแพงและโดยมากเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ซึ่งเกินความจำเป็นที่จะนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ โครงงานนี้จึงได้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชคงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยการนำเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์

1. ใช้ความรู้เกี่ยวกับการวัดค่าพีเอชของสารละลาย หลักการทำงานของเครื่องพีเอชมิเตอร์ ความรู้ทางด้านเคมีวิเคราะห์ หลักการของระบบควบคุม และความรู้พื้นฐานทางด้านอิเลคทรอนิกส์มาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่

2. เครื่องมือที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาทดลองใช้งาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือและหาค่าความคลาดเคลื่อน

3. สรุปผลและศึกษาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง แก้ไขและพัฒนาเครื่องมือให้มีราคาถูกลง และมีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น

ขอบเขตของงาน

1. ศึกษาความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดค่าพีเอชของสารละลาย และขั้วที่ใช้วัดค่าพีเอชของสารละลาย

2. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องพีเอชมิเตอร์

3. ศึกษาความรู้ทางด้านเคมีวิเคราะห์ หลักการของระบบควบคุม และความรู้พื้นฐานทางด้านอิเลคทรอนิกส์

4. ออกแบบเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่

5. สร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

6. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่ โดยทำการทดลองวัดค่าพีเอชของสารละลายที่เตรียมได้จากห้องปฏิบัติการและทดลองการทำงานของเครื่อง แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าพีเอชที่วัดได้จากเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ใช้เป็นเครื่องมือสอบเทียบค่ามาตรฐาน

7. สรุปผลและเขียนรายงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของระบบและหลักการทำงานของเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่

2. มีความเข้าใจในการทำงานเกี่ยวกับการออกแบบและการเก็บข้อมูลในการทำงานวิจัย

3. สามารถออกแบบ และสร้างเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สามารถนำเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่มาใช้ในห้องปฏิบัติการได้จริง และนำมาใช้ในการทดลองในกรณีที่ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลาย เพื่อควบคุมค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าหรือเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า เป็นการวิเคราะห์ทางเคมีที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร เช่น กระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า หรือความจุไฟฟ้าของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจึงเป็นการวัดการตอบสนองที่เกี่ยวกับไฟฟ้าของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์หรือระบบทางเคมีที่ต้องการศึกษาเมื่อเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

2.1 หน่วยไฟฟ้าที่ใช้โดยทั่วไป

แอมแปร์ คือ หน่วยของกระแสไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์

คูลอมบ์ คือ หน่วยของปริมาณของไฟฟ้าโดยอิเลคตรอนหนึ่งตัว จะมีปริมาณไฟฟ้า $1.602X10^{-19}$ คูลอมบ์ หรือปริมาณไฟฟ้า 1 คูลอมบ์สามารถสะสมอิเลคตรอนได้ 0.0011180 อิเลคตรอน

ฟาราเดย์ เท่ากับ 96489 คูลอมบ์

โอห์ม คือ หน่วยของความต้านทานของคอลัมน์ที่สม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ที่มีมวล 14.4521 กรัม และยาว 106.3 เซนติเมตร

โวลท์ คือ หน่วยของความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า

วัตต์ คือ หน่วยของพลังงานที่ทำงานด้วยอัตรา 1 จูลต่อวินาที เป็นพลังงานที่เกิดจากกระแสกับศักย์ไฟฟ้า

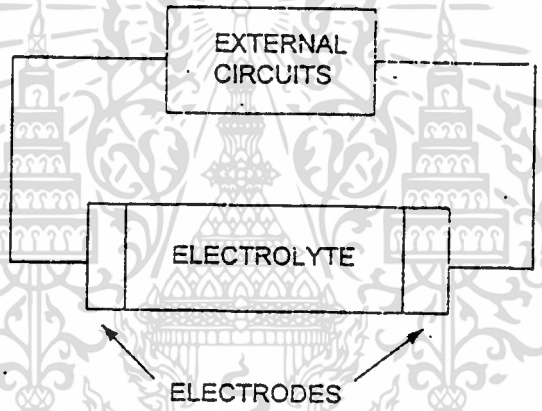
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้ามีการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือซึ่งส่วนประกอบของเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

2..2.1 เซลเคมีไฟฟ้า เป็นส่วนที่มีสารละลายอิเลคโตรไลท์ หรือ Chemical system ที่จะวัดบรรจุอยู่โดยต่อขั้วไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว โดยอาจแบ่งเป็นขั้วอาโนดกับขั้วคาโทดหรือแบ่งเป็นขั้วชี้บอกกับขั้วอ้างอิง

2.2.2 วงจรภายนอก เป็นส่วนที่มีอยู่ภายนอกและต่อกับขั้วไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงไปของระบบที่จะวิเคราะห์



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า [3]

2.3 เซลเคมีไฟฟ้า

เซลเคมีไฟฟ้า เป็นวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเลคโตรไลท์โดยขั้วหนึ่งทำหน้าที่อิเลคตรอนและอีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเลคตรอน

ก. ขั้วไฟฟ้าอาโนด เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ให้อิเลคตรอนเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายอิเลคโตรไลท์ อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ขั้วนี้จะไหลผ่านเข้าไปสู่วงจรภายนอกที่ทำหน้าที่วัดแล้วผ่านไปยังขั้วคาโทด

ข. ขั้วไฟฟ้าคาโทด เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับอิเลคตรอนเป็นขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยา

2.3.1 ส่วนประกอบของเซลเคมีไฟฟ้า

2.3.1.1 สารละลายอิเลคโตรไลท์ เป็นสารละลายของตัวอย่างหรือสารที่จะวิเคราะห์

2.3.1.2 ขั้วไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นขั้วให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้า-ออกจากเซลเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

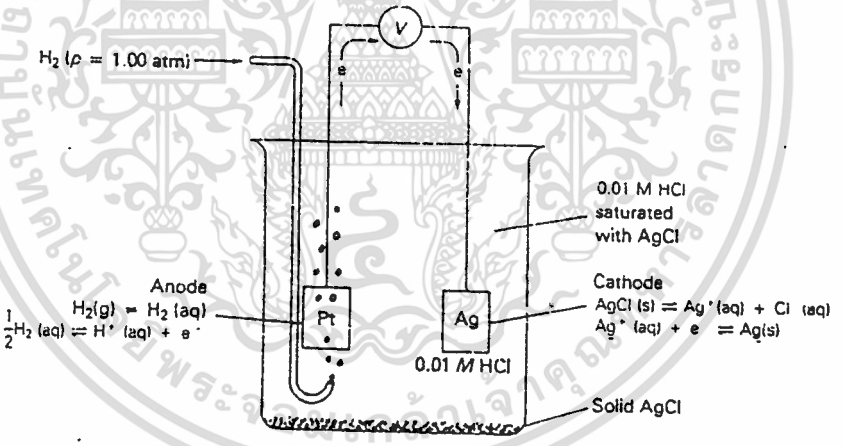
- Electronic conductor เป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าที่เป็นโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเลคโตรไลท์

- Electrolytic conductor เป็นส่วนที่นำไฟฟ้าที่เป็นสารละลายอิเลคโตรไลท์

2.3.1.3 สะพานเกลือ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงอิเลคโตรไลท์ในอาโนดและคาโทด โดยทั่วไปนิยมใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว

2.3.1.4 Liquid junction เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกอิเลคโตรไลท์ของอาโนดและคาโทดออกจากกัน เพื่อป้องกันการผสมกันของส่วนประกอบของทั้งสองในครึ่งเซลทั้งสอง และหลีกเลี่ยงการเกิดบ่ฏิกิริยาโดยตรงระหว่างส่วนประกอบของทั้งสองครึ่งเซล

เซลเคมีไฟฟ้าใดที่ไม่มี liquid junction จะเรียกว่า cell without liquid junction ดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างของเซลเคมีไฟฟ้าชนิดนี้ที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ ถ่านไฟฉาย ดังรูปที่ 2.3 จะมีทั้งขั้ว zinc anode และ copper cathode อยู่ในเซลเดียวกัน



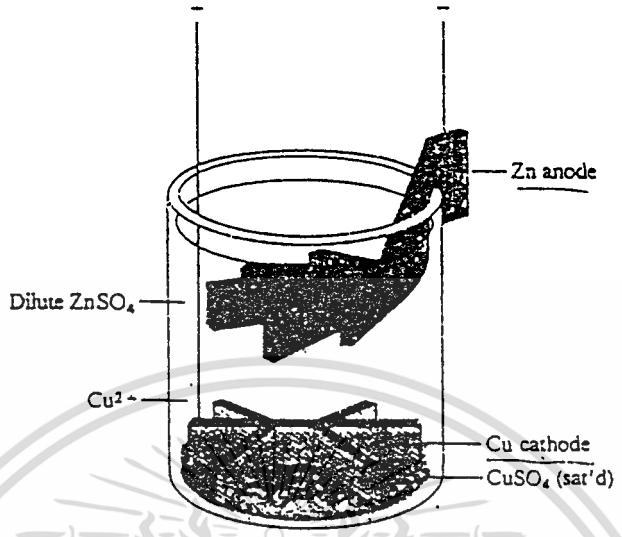
รูปที่ 2.2 เซลกัลวานิกที่ไม่มี liquid junction [2]

เซลเคมีไฟฟ้าใดมี liquid junction จะเรียกว่า cell with liquid junction ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 และเซลเคมีไฟฟ้าแบบนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างสารละลายอิเลคโตรไลท์ 2 ชนิดที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเชื่อมต่อ

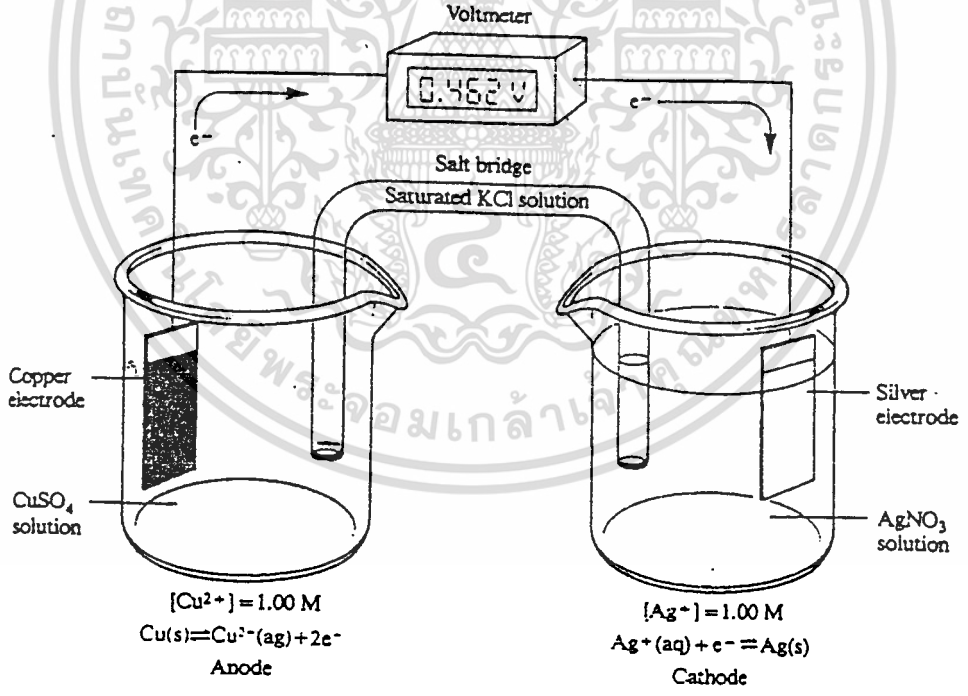
2.3.2 ชนิดของเซลเคมีไฟฟ้า

โดยทั่วไปเซลเคมีไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เซลกัลวานิก และ เซลอิเลคโตรไลติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ถ่านไฟฉาย [3]



รูปที่ 2.4 เซลกัลวานิก [3]

2.3.2.1 เซลกัลวานิก เป็นเซลเคมีไฟฟ้าชนิดที่พลังงานทางเคมีจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางไฟฟ้าได้โดยปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และจะมีอยู่ตลอดเท่าที่องค์ประกอบทั้งหมดยังคงมีอยู่ ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

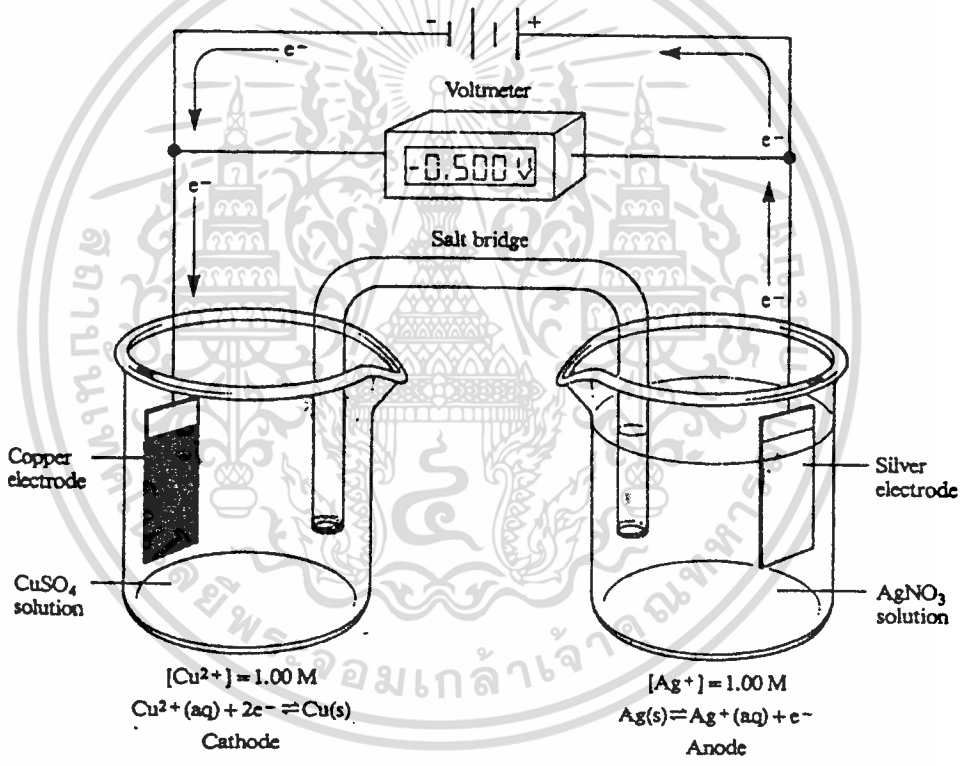
เซลเคมีไฟฟ้าที่มี silver electrode เป็นคาโทด และ copper electrode เป็นอาโนดนั้นเป็นเซลกัลวานิก ดังรูปที่ 2.4 เกิดปฏิกิริยาดังนี้

คาโทด $Ag^{+} + e^{-} \rightleftharpoons Ag\ (s)$ $E^{0} = +0.799$ โวลท์

อาโนด $Cu\ (s) \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2e^{-}$ $E^{0} = -0.377$ โวลท์

$2Ag^{+} + Cu\ (s) \rightleftharpoons Ag\ (s) + Cu^{2+}$ $E^{0}cell = +0.462$ โวลท์

จากค่า $E^{0}cell$ ที่เป็นบวก แสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้เอง และเมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลเคมีไฟฟ้าจะมีค่า 0.462 โวลท์ แบตเตอรี่ก็จัดเป็นเซลกัลวานิกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปนิยมใช้เซลกัลวานิกในการวัดความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางโพเทนชิโอเมตรี



รูปที่ 2.5 อิเลคโตรไลติกเซล [3]

2.3.2.2 อิเลคโตรไลติกเซล เป็นเซลเคมีไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ปฏิกิริยาเคมีจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป ตัวอย่างเช่น เซลเคมีไฟฟ้าที่มี copper electrode เป็นคาโทด และ silver electrode เป็นอาโนด ดังรูปที่ 2.5 เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจำนวน 0.462 โวลท์ ไปยัง copper electrode จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเลคโตรไลซิส ดังต่อไปนี้

คาโทด $Cu^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Cu\ (s)$ $E^{0} = -0.799$ โวลท์

อาโนด $Ag\ (s) \rightleftharpoons Ag^{+} + e^{-}$ $E^{0} = +0.377$ โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Cu^{2+} + Ag\ (s) \rightleftharpoons Cu\ (s) \qquad E^{0}cell = -0.462 \text{ โวลท์}$$

เนื่องจากทิศทางการไหลของอิเลคตรอนในเซลกัลวานิก และอิเลคโตรไลติกเซล จะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสับสนจึงนิยามชนิดของอิเลคโทรดตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ คาโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และอาโนดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.3.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของสาร

สารที่อยู่ในเซลเคมีไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ภายในสารละลายโดยเกิดกระบวนการอันใดอันหนึ่ง หรือเกิดหลายกระบวนการของการเคลื่อนที่ ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 Migration เป็นการเคลื่อนที่ของสารที่มีประจุ ซึ่งเป็นผลของแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของประจุบวก ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ หรือการเคลื่อนที่ของประจุลบไปยังขั้วไฟฟ้าบวก การเคลื่อนที่แบบ migration นี้มักเกิดกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ และเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่มีประโยชน์ ในบางครั้งมีความจำเป็นที่ต้องกำจัดการเคลื่อนที่ชนิดนี้ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการเติมสารละลายอิเลคโตรไลท์บางชนิด เช่น 0.1 M KCl หรือ 0.1 M HNO_3

2.3.3.2 Convection เป็นการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดจากแรงทางกายภาพแล้วทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย ตัวอย่างเช่น การคน หรือการกวน การเคลื่อนที่แบบนี้จะเรียกว่า force convection ถ้าเป็นการเคลื่อนที่ที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของสารจะเรียกว่า natural convection

2.3.3.3 Diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของสารอันเป็นผลมาจากเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของอิออนแต่ละแห่งในสารละลาย จะเกิดการแพร่กระจายของอิออนจากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ

2.3.4 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเลคโทรด

เมื่อพิจารณากลไกของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดที่ขั้วอาโนด สามารถเขียนขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก โลหะจะปล่อยไอออน (M^{n+}) ของโลหะนั้นเข้าไปในสารละลายแล้วยังทิ้งอิเลคตรอนไว้ที่โลหะอยู่ดังปฏิกิริยา

$$M\ (s) \rightarrow M^{n+}\ (aq) + ne^{-}$$

ขั้นตอนที่สอง คือ ไอออนของโลหะจากสารละลายจะรวมกับอิเลคตรอนที่พื้นผิวของโลหะเกิดเป็นอะตอมของโลหะ ดังปฏิกิริยา

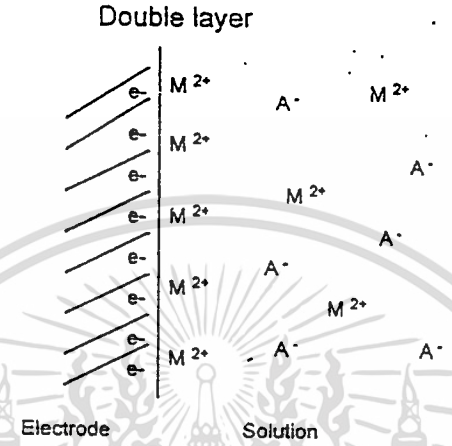
$$M^{n+}\ (aq) + ne^{-} \rightarrow M\ (s)$$

ทั้งสองปฏิกิริยานี้จะเป็นส่วนประกอบของกันและกัน และทำให้เกิดสมดุลที่พื้นผิวอิเลคโทรด ดังนี้

เอกสารนี้มีไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M\ (s) \rightleftharpoons M^{n+}\ (aq) + ne^-$$

ถ้าปฏิกิริยาที่ไปข้างหน้าเกิดได้ดีกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับ โลหะนี้จะกลายเป็นประจุลบที่บริเวณที่อยู่ติดกับสารละลาย ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บริเวณเชื่อมต่อระหว่างอิเลคโทรดและสารละลาย [2]

ค่าความต่างศักย์ที่บริเวณเชื่อมต่อระหว่างอิเลคโทรดและสารละลาย เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเลคโทรด (E) ค่านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแอคติวิตีของไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายด้วย

2.3.5 กระแสไฟฟ้าภายในเซลเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ภายในเซลเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอิออน สำหรับกระแสจำนวนน้อย กฎของโอห์มจะเป็นจริง ดังสมการ

$$E = IR$$

เมื่อ E เป็นศักย์ไฟฟ้าในหน่วยโวลท์ของการเคลื่อนที่ของอิออน

I เป็นกระแสในหน่วยแอมแปร์

R เป็นความต้านทานในหน่วยโอห์มของสารละลายอิเลคโตรไลท์ ความต้านทานจะขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของอิออนในสารละลาย

กระแสไฟฟ้าในเซลเคมีไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ faradaic current และ non-faradaic current ซึ่งปกติจะมีกระบวนการ 2 ชนิดที่สามารถเหนี่ยวนำกระแสให้ผ่านรอยต่อของอิเลคโทรดและสารละลาย

ก. ชนิดแรกจะเกี่ยวข้องกับการขนย้ายอิเลคตรอนโดยตรงในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาโนดและปฏิกิริยารีดักชันที่คาโทด กระบวนการแบบนี้เรียกว่า Faradaic process และเป็นไปตามกฎฟาราเดย์ที่ว่า ปริมาณของสารที่ทำปฏิกิริยาที่อิเลคโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่เกิดขึ้นนี้เรียกได้ว่า faradaic current

ข. ชนิดที่สองนั้นกระแสเกิดจากผลของกระบวนการแบบ non-faradaic ภายใต้สภาวะที่เซลเคมีไฟฟ้าอยู่ในช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่กระบวนการแบบ faradaic ไม่สามารถเกิดได้ที่อิเลคโทรดอันหนึ่งหรือทั้งคู่ กระบวนการแบบ non-faradaic นี้ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น กระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแบบนี้เรียก non-faradaic current

2.4 วิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

วิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. วิธีโพเทนชิโอเมตรี เป็นวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วชี้บอกที่ไวต่อสปีชีส์ที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ ลักษณะเซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับวิธีการวิเคราะห์นี้คือกัลวานิกเซล การใช้วิธีโพเทนชิโอเมตรีควบคู่กับเทคนิคของการไตเตรต เพื่อศึกษาหาจุดยุติของปฏิกิริยาจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดเทคนิคของการวิเคราะห์ที่เรียกว่า โพเทนชิโอเมตริกไตเตรชัน

2. วิธีโวลแทมเมตรี อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้าที่เกิดอิเลคโตรไลซีสขึ้นที่ขั้วทำงานขนาดเล็กและสารละลายนิ่งปราศจากการคนพบว่า เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่อิเลคโตรไลติกเซล จะเกิดกระแสที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณสาร โดยหลักการของโวลแทมเมตรีถ้าใช้ขั้วทำงานที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และเกิดการโพลาไรซ์ได้ง่าย เช่น ขั้วปรอทหยด ทำให้สามารถวัดกระแสเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซล วิธีการวิเคราะห์แบบนี้มีชื่อเรียกว่า โพลาโรกราฟฟี ถ้าควบคุมให้เซลมีกระแสคงที่แล้ววัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำงานเทียบกับเวลาคือวิธีวิเคราะห์ที่เรียกว่าโครโนโพเทนชิโอเมตรี นอกจากนี้การควบคุมสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลเพื่อวัดกระแสที่เกิดขึ้นโดยหลักการของโวลแทมเมตรีนี้ สามารถทำได้หลายแบบทำให้เกิดวิธีวิเคราะห์ขึ้นอีกหลายวิธี เช่น พัลส์โพลาโรกราฟี ลิเนียร์สวีปโพลาโรกราฟี ไซคลิกโวลแทมเมตรี และวิธีสตริปปิง เป็นต้น

2.4.1 ข้อดีของการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

- เป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความไวสูง สามารถวิเคราะห์สารได้ถึงความเข้มข้น 10^{-10} M

- เป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง เนื่องจากวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะตอบสนองต่อค่าแอคติวิตีของสารเคมี มากกว่าความเข้มข้น

- เป็นวิธีที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง คือ สามารถวิเคราะห์สารในสภาวะออกซิเดชันต่าง ๆ ได้ โดยไม่จำเป็นต้องแยกสารออกจากกันก่อนเนื่องจากเป็นวิธีที่จำเพาะเจาะจงกับรูปใดรูปหนึ่งของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถวิเคราะห์ได้สะดวก โดยไม่ต้องแยกสารรบกวนอื่น ๆ ออกจากสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ หากเลือกใช้อิเลคโทรดที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 วิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า [3]

Techniques	Controlled Electrode Variable	Response measure	Time
Potentiometry	i = 0	E	S
Potentiometric Titration	i = 0	E vs. ml	L
Voltammetry	E	i vs E	
Polarography	E	i vs E	M
Linear-scan or cyclic valtametry	E	i vs E	S
Pulse method	E	i vs E	M
Stripping Analysis	E	i vs E	M
Electrogravimetry	i or E	weight of deposit	L
Coulometry	i or E	charged consumed	L
Coulometric Titration	i or E	time	M
Amperometry	i or E	i	M
Conductometry	v (a.c.)	i (a.c.)	S

i = กระแสไฟฟ้า E = ศักย์ไฟฟ้า

S = short , M = medium และ L = long

2.4.2 ข้อเสียของการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

- เป็นเครื่องมือที่ราคาแพง

- การที่วิเคราะห์ได้เพียงรูปใดรูปหนึ่งของสารโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า อาจไม่มีประโยชน์ เพราะบางครั้งก็มีความจำเป็นที่ต้องหาปริมาณสารทั้งหมดไม่ใช่เพียงรูปใดรูปหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ปรอทที่มีอยู่ในมลภาวะจะมีทั้งรูปอนินทรีย์สารและอินทรีย์สาร ซึ่งเป็นพิษมากกว่านั้น ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบทั้งระดับของปรอททั้งหมด และยังต้องทราบอีกด้วยว่าเป็นปรอทในรูปไหนที่ได้รับเข้าไป ซึ่งการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าไม่สามารถวิเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 โพเทนชิโอเมตรี

โพเทนชิโอเมตรี เป็นวิธีวิเคราะห์โดยการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือค่าความต่างศักย์ของเซลเคมีไฟฟ้าชนิดกัลวานิกเซล โดยใช้อิเลคโทรด 2 ชนิด คือ ขั้วอ้างอิง และขั้วชี้บอก จุ่มในสารละลายที่ต้องการจะวัดและต้องควบคุมไม่ให้มีกระแสไหลผ่าน

ขั้วชี้บอกจะวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแอคติวิตี (หรือความเข้มข้น) ของอิออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ในขณะที่ขั้วอ้างอิงจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารละลายที่วัด ส่วน liquid junction เป็นรอยต่อที่อยู่ระหว่างสารละลายที่แตกต่างกันสองชนิดและค่าศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อนี้ (E_j) โดยทั่วไปมีค่าน้อยมากหรือเป็นค่าคงที่

2.5.1 อิเลคโทรดที่ใช้ทางโพเทนชิโอเมตรี

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีทางโพเทนชิโอเมตรีนั้น จำเป็นต้องมีอิเลคโทรดที่ทำหน้าที่วัดศักย์ไฟฟ้าซึ่งจะเป็นอิเลคโทรด 2 ชนิด คือ ขั้วอ้างอง และ ขั้วชี้บอก

ในการสร้างเซลไฟฟ้าเคมีเพื่อการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้ครึ่งเซลไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นครึ่งเซลที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนแล้วซึ่งเรียกว่า ขั้วอ้างอิง ส่วนอีกครึ่งเซลหนึ่งจะประกอบด้วยสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์กับขั้วที่ไวต่อสารละลายนั้นซึ่งเรียกว่า ขั้วทำงานหรือขั้วชี้บอก ลักษณะของขั้วอ้างอิงจะมีรูปร่างอย่างไร สามารถผลิตขึ้นได้ตามความเหมาะสมในการใช้งาน และจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ขั้วที่สามารถนำมาใช้เป็นขั้วอ้างอิงมีอยู่ไม่กี่ชนิด และแต่ละชนิดสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าได้ทุกวิธี

2.6 ขั้วอ้างอิง

ในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้านั้นต้องมีอิเลคโทรดอันหนึ่งที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทราบค่าแน่นอน มีความคงตัว และไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใด ๆของสารละลายที่ศึกษา เพื่อทำหน้าที่ให้ศักย์อ้างอิง ซึ่งเรียกอิเลคโทรดแบบนี้ว่า ขั้วอ้างอิง

คุณสมบัติทางอุดมคติของขั้วอ้างอิง ได้แก่

- สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ และเป็นไปตามสมการของเนินสท์
- ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลาที่ใช้
- สามารถกลับสู่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดิมได้โดยการให้กระแสเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนไป

ขั้วอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้ามี 3 ชนิด คือ

2.6.1 ขั้วคาโลเมล เป็นขั้วอ้างอิงที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คงที่และเตรียมได้ง่าย ขั้วคาโลเมลที่ประกอบเป็นครึ่งเซล สามารถเขียนสัญลักษณ์ทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$Hg / Hg_2Cl_2 \text{ (sat'd)}, KCl \text{ (x M)}$$

x คือ ความเข้มข้นของโพแตสเซียมคลอไรด์ในสารละลาย ถ้า x มีค่าเท่ากับ 1 M ขั้วชนิดนี้เรียกว่า normal calomel electrode (NCE) ถ้าความเข้มข้นของโพแตสเซียมคลอไรด์มีค่าอิ่มตัวในสารละลายเรียกขั้วชนิดนี้ว่า ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว (SCE)

ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นที่ขั้ว คือ

$$Hg_2Cl_2 (s) + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg (l) + 2Cl^-$$

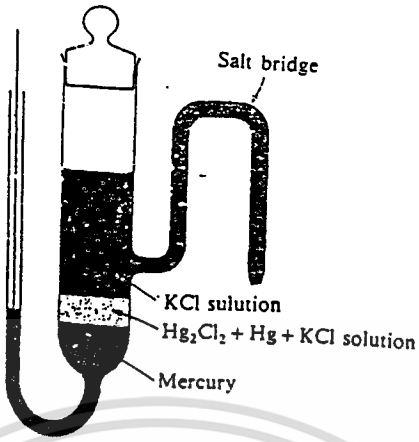
ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์ (x M) ในสารละลาย ขั้วคาโลเมลที่ใช้กันมากที่สุดมีอยู่ 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขั้วคาโลเมลที่ใช้มากที่สุด [1]

Name	Concentration of		Reduction potential (V) vs. standard hydrogen electrode
	Hg_2Cl_2	KCl	
Saturated	Saturated	Saturated	$+0.242 - 7.6\times10^{-4}$ (t − 25°C)
Normal	Saturated	1.0 F	$+0.280 - 2.4\times10^{-4}$ (t − 25°C)
Decinormal	Saturated	0.1 F	$+0.334 - 7 \times10^{-5}$ (t − 25°C)

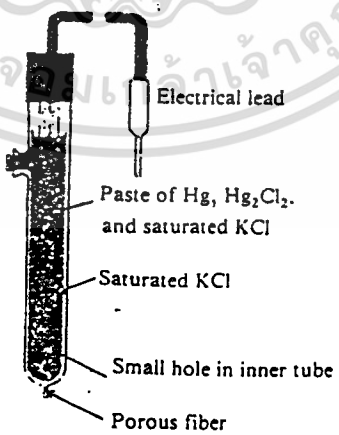
จะสังเกตได้ว่า ขั้วโคลาเมลแต่ละชนิดต้องมี Hg_2Cl_2 อิ่มตัว ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโพแตสเซียมคลอไรด์และอุณหภูมิ ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว (SCE) เป็นขั้วที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการวิเคราะห์ เพราะง่ายต่อการเตรียม ความเข้มข้นของโพแตสเซียมคลอไรด์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการวิเคราะห์ การสร้างขั้วคาโลเมลอิ่มตัวแบบง่าย ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 มีสะพานเกลือที่บรรจุด้วยสารละลายโพแตสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นตัวเชื่อมระหว่างครึ่งเซลของคาโลเมลกับครึ่งเซลของสารตัวอย่างที่ปลายหลอดแก้วของสะพานเกลือจะมีแผ่นแก้วพรุนกั้นไม่ให้สารละลายตัวอย่างที่อยู่ข้างนอกกับโพแตสเซียมคลอไรด์ไหลมาผสมกัน หรืออาจจะใช้ 3% ของวุ้นที่มีโพแตสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวบรรจุในหลอดแก้วแล้วปล่อยให้แข็งตัวเป็นสะพานเกลือก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การสร้างขั้วคาโลเมลอิ่มตัวอย่างง่าย [1]

เนื่องจากขั้วคาโลเมลอิ่มตัวเป็นที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าทุกแบบดังนั้น จึงมีผู้ผลิตขั้วคาโลเมลอิ่มตัวเพื่อให้สะดวกในการใช้งานขึ้นจำหน่าย ซึ่งสามารถซื้อหามาใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องเตรียมขึ้นเอง ลักษณะของขั้วคาโลเมลที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายมีรูปร่างลักษณะดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วยหลอดแก้วยาว 5-15 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.0 เซนติเมตร ผสม Hg กับ Hg_2Cl_2 กับโพแตสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว ให้เข้ากันบรรจุในหลอดภายในที่บรรจุอยู่ในหลอดที่ใหญ่กว่าอีกทีหนึ่ง หลอดใหญ่จะมีโพแตสเซียมคลอไรด์ที่อิ่มตัวบรรจุอยู่ และมีรูเล็ก ๆ ปิดด้วย porous fiber เพื่อให้สัมผัสกับสารละลายของอีกครึ่งเซลหนึ่งได้ ขั้วชนิดนี้มีความต้านทานสูงมาก ถึง 2,000-3,000 โอห์ม



รูปที่ 2.8 ขั้วคาโลเมลอิ่มตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ [1]

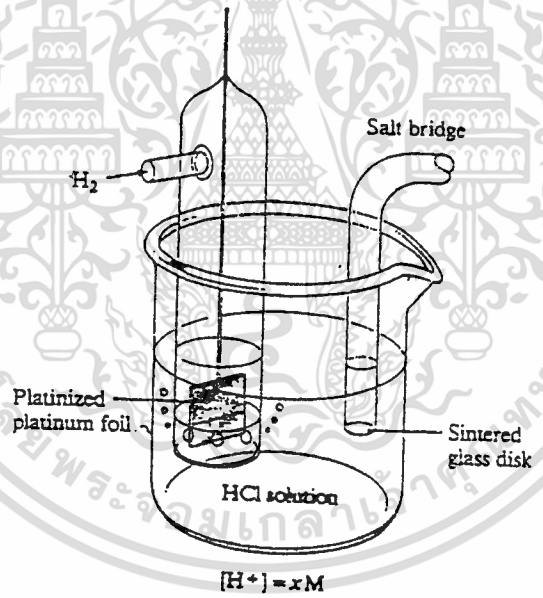
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ขั้วไฮโดรเจน ประกอบด้วยแผ่นแพลตินัมที่สะอาดและฉาบไว้ด้วยผงแพลทตินัมอีกทีหนึ่ง อยู่ในหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซไฮโดรเจนที่สามารถควบคุมความดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว คือ

$$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2(g)$$

ขั้วไฮโดรเจนที่เป็นมาตรฐานต้องอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนตลอดเวลา ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ และจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเกลือเข้มข้น 1 แอคติวิตี เรียกว่า ขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน (SHE) มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.00 โวลท์

ในการวิเคราะห์ไม่ค่อยนิยมใช้ขั้วไฮโดรเจนเป็นขั้วอ้างอิงเท่าใดนัก เพราะยุ่งยากในการควบคุมความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความสำคัญของขั้วไฮโดรเจน คือ ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของขั้วอ้างอิง และขั้วชี้บอกที่ใช้ในงานวิเคราะห์



รูปที่ 2.9 ขั้วไฮโดรเจน [2]

2.6.3 ขั้วเงิน-เงินคลอไรด์ ส่วนประกอบของขั้วเงิน-เงินคลอไรด์คล้ายคลึงกับขั้วคาโลเมล คือ ประกอบด้วยสารละลายของโพแตสเซียมคลอไรด์ที่มีเงินคลอไรด์อิ่มตัวอยู่ เขียนสัญลักษณ์ทั่วไปของขั้วได้ ดังนี้

$$Ag / AgCl\ (sat's), KCl\ (x\ M)$$

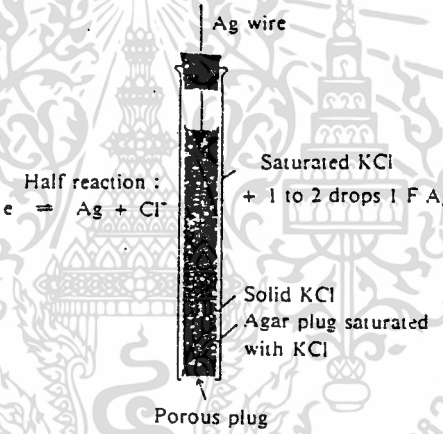
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

$$AgCl(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Cl^-$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติขั้วชนิดนี้เตรียมจากโพแตสเซียมคลอไรด์ที่อิ่มตัว ศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าเท่ากับ +0.197 โวลท์ เมื่อวัดเทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน

ขั้วเงิน-เงินคลอไรด์สามารถสร้างได้ง่าย ๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.10 โดยใช้หลอดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ในชั้นของวุ้นอิ่มตัวด้วยโพแตสเซียมคลอไรด์ วางไว้เหนือ disk หรือ porous plug เพื่อกันไม่ให้สารละลายในขั้วไหลออกมา ชั้นของวุ้นเตรียมได้โดยใช้ agar 5 กรัม ใส่ในน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต้มจนเดือด เติมโพแตสเซียมคลอไรด์ 35 กรัม เมื่อสารละลายยังอุ่นอยู่ให้เทลงในหลอดแก้ว แล้วทำให้เย็น วุ้นจะแข็งตัวและมีความต้านทานต่ำ ถัดจากชั้นของวุ้น ให้เติมของแข็งโพแตสเซียมคลอไรด์ แล้วตามด้วยสารละลายของโพแตสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว และ 1 M $AgNO_3$ 1-2 หยด ใช้ลวดเงินจุ่มในสารละลายเพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 ขั้วเงิน-เงินคลอไรด์ [6]

ข้อควรระวังในการใช้อิเลคโทรดอ้างอิง

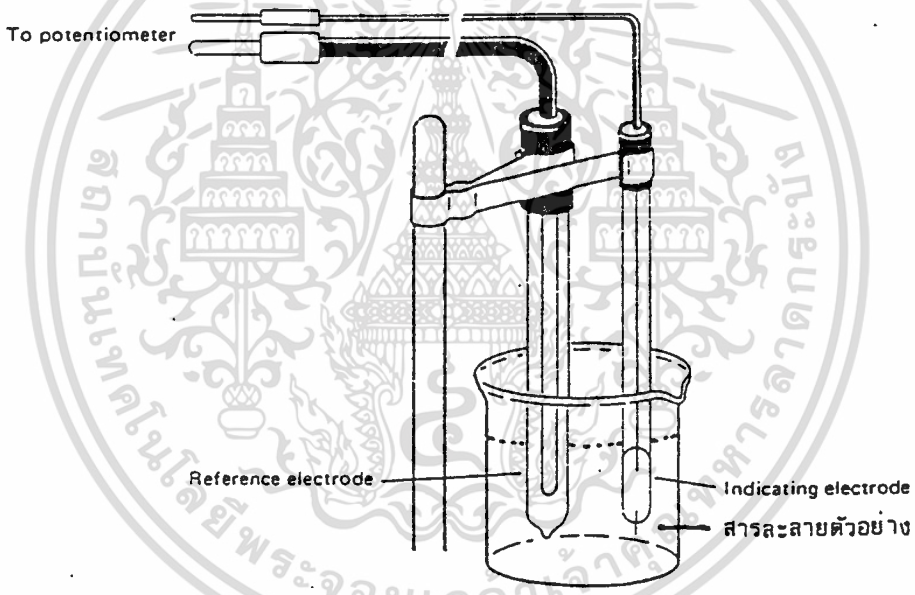
การใช้อิเลคโทรดอ้างอิงนั้นระดับของเหลวภายในควรต้องอยู่เหนือสารละลายที่จุ่มวัดอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารละลายภายในอิเลคโทรดหรือการอุดตันของรอยต่อ เนื่องจากปฏิกิริยาของอิออนของสารที่วิเคราะห์กับสารที่อยู่ภายในอิเลคโทรด การอุดตันของรอยต่อนี้บางครั้งเป็นสาเหตุที่ทำให้การวัดมีความผิดพลาดวัดค่าได้ไม่แน่นอน

ถึงแม้ระดับของเหลวภายในอิเลคโทรดจะอยู่เหนือสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ บางครั้งการปนเปื้อนก็อาจเกิดขึ้นอย่างหลีดเลี่ยงไม่ได้ หลายครั้งที่ปริมาณสารปนเปื้อนอาจน้อยจนไม่ต้องสนใจแต่ในการวิเคราะห์อิออนประเภท คลอไรด์ โปแตสเซียม ซิลเวอร์ หรือเมอร์คิวรี ควรจะระมัดระวังสาเหตุของความผิดพลาดจากการปนเปื้อนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การแบ่งชนิดของขั้วชี้บอก

สารละลายที่ต้องการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหรือพีเอช ต้องประกอบเป็นเซลไฟฟ้าเคมีโดยมีขั้ว 2 ชนิด คือ ขั้วชี้บอกความไวต่อสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ และขั้วอ้างอิงซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ จากนั้น จึงนำขั้วของเซลทั้งสองต่อเข้าเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อวัดค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ศักย์ไฟฟ้าของเซลที่วัดได้นั้นขึ้นอยู่กับขั้วชี้บอกและความเข้มข้นของอิออนที่ไวต่อขั้วชี้บอก ดังนั้นการศึกษาถึงชนิดของขั้วชี้บอกที่นำมาใช้ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอิออนแต่ละชนิดจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก ขั้วชี้บอกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนชิโอเมตรี แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ขั้วชี้บอกที่เป็นแท่งโลหะ และขั้วชี้บอกที่เป็นเมมเบรน



รูปที่ 2.11 เซลไฟฟ้าเคมีสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า [2]

2.7.1 ขั้วชี้บอกที่เป็นโลหะ โลหะที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผันกลับได้ สามารถนำมาใช้เป็นขั้วชี้บอกได้ ขั้วชี้บอกชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็นอีกหลายแบบตามลักษณะของขั้วและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนี้

ก. อิเลคโทรดชนิดนี้จะเป็นชิ้นโลหะบริสุทธิ์ที่เกิดสมดุลโดยตรงกับแคทอิออนของโลหะนั้น โลหะที่ใช้แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- พวกที่ปฏิกิริยาเป็นแบบผันกลับได้ ได้แก่ Ag, Cu Hg, Pb, Zn และ Cd
- พวกที่ปฏิกิริยาเป็นแบบไม่ผันกลับ ได้แก่ Fe, Ni, Co, Ti และ Cr ในกลุ่มนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าไม่คงที่ สาเหตุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในโครงสร้างของผลึกของโลหะ หรือการเกิดฟิล์มของออกไซด์บนผิวหน้าของโลหะ

ข. อิเลคโทรดชนิดนี้โลหะจะเป็นขั้วชี้บอกที่ขึ้นกับความเข้มข้นของแอนอิออนในรูปที่เป็นตะกอนที่ละลายน้ำยาก หรือเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่คงตัวกับแคทอิออนของโลหะ ตัวอย่างเช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วเงิน-เงินคลอไรด์ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์

ค. ขั้วชี้บอกที่ประกอบด้วยโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ ขั้วชนิดนี้ใช้สำหรับการทำโพเทนชิโอเมตริกไตเตรชันแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ตัวคอมเพลกซิงเอเจนต์ที่นำมาใช้เป็นไตแตรนท์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับอิออนของโลหะที่ใช้เป็นขั้ว ตัวอย่างขั้วชนิดนี้ คือขั้วปรอท ถูกใช้สำหรับวัดค่า pCa ของสารละลายที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

ง. ขั้วรีดอกซ์ ใช้สำหรับสารละลายที่มีตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์อยู่ในสภาพที่เป็นอิออนทั้งสองตัว โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วชนิดนี้ได้คือ โลหะเฉื่อย ได้แก่ ทอง แพลตินัม และคาร์บอน ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ในสารละลาย ตัวอย่างของขั้วชนิดนี้เช่นขั้วแพลตินัม โดยขั้วแพลตินัมจะไม่เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์สารละลายของอิออนที่มีกำลังในการรีดิวซ์สูง ๆ เพราะแพลตินัมจะเป็นตัวเร่งให้ตัวรีดิวซ์เหล่านี้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไฮโดรเจนอิออนที่ผิวของแพลตินัม

2.7.2 ขั้วชี้บอกที่เป็นเมมเบรน ขั้วเมมเบรนเป็นขั้วที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทำให้การวิเคราะห์ใช้ได้กว้างขวางขึ้นและสามารถวิเคราะห์อิออนได้หลายชนิด ขั้วเมมเบรนบางชนิดที่ผลิตขึ้นสามารถใช้ได้ดีกับอิออนแต่ละตัวไม่เหมือนกันดังนั้นจึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Ion selective electrode (ISE) ขั้วเมมเบรนที่ถูกค้นพบขึ้นก่อนคือขั้วที่ใช้กลาสเมมเบรนซึ่งไวต่อไฮโดรเจนอิออนและยอมให้ไฮโดรเจนอิออนผ่านเมมเบรนได้เพียงอย่างเดียว ขั้วชนิดนี้มีไว้สำหรับวัดพีเอชของสารละลายเท่านั้น มีชื่อเรียกว่าทั่ว ๆ ไปว่า ขั้วกลาสสำหรับวัดพีเอช นอกจากนี้ยังได้ค้นพบกลาสเมมเบรนชนิดอื่น ๆ อีกที่ยอมให้อิออนอื่นนอกเหนือจากไฮโดรเจนอิออนผ่านได้ นั่นคือ ถ้าพิจารณาประเภทของขั้วเมมเบรน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.7.2.1 ขั้วกลาสเมมเบรน ขั้วที่ใช้กลาสเมมเบรนมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่วัดเฉพาะไฮโดรเจนไอออนที่เรียกว่า ขั้วกลาสสำหรับวัดพีเอช และขั้วกลาสเมมเบรนที่สามารถวัดอิออนอื่น ๆ นอกเหนือจากไฮโดรเจนอิออน

2.7.2.2 Ion selective electrode ขั้วชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบ ตามชนิดของเมมเบรนที่ใช้ ดังนี้คือ

- Liquid membrane electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038646

- Solid-state or precipitate electrode
- Gas-sensing membrane electrode
- Enzyme electrode
- Coated wire ion selective electrode

คุณสมบัติของ ion selective membrane

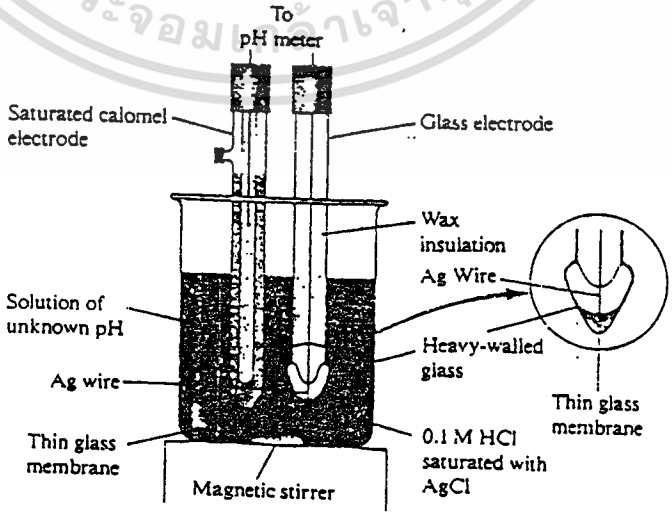
1. มีการละลายที่ต่ำ คุณสมบัติที่จำเป็นของ ion selective membrane คือไม่ละลายในสารละลายที่จะวิเคราะห์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารละลายในน้ำ หรือการละลายเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมมเบรนที่ใช้หลายชนิดจะทำจากโมเลกุลขนาดใหญ่หรือหลาย ๆ โมเลกุลรวมกัน

2. มีการนำไฟฟ้า คือ เมมเบรนต้องนำไฟฟ้าได้บ้าง โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าจะเกิดจากเคลื่อนย้ายที่ของอิออน

3. มีความจำเพาะเจาะจง คือต้องมีความสามารถในการจับกับ analyte ion แบบเจาะจง เช่น การเกิด ion-exchange, crystallization และ complexation

2.8 ขั้วกลาสสำหรับวัดพีเอช

ขั้วกลาสที่ใช้วัดค่าพีเอชของสารละลายมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12 สารละลายอิเลคโตรไลต์ที่บรรจุอยู่ภายในคือกรดเกลือ (HCl) และมีขั้ว Ag/AgC1 เป็นขั้วอ้างอิงภายในเพื่อทำให้สามารถต่อเซลได้ครบวงจร ศักย์ไฟฟ้าของขั้วขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ HC1 ที่อยู่ภายนอก โดยมีกลาสเมมเบรนเป็นตัวกั้นระหว่างสารละลาย HC1 ภายนอกและภายใน



รูปที่ 2.12 ขั้วกลาสสำหรับวัดพีเอช [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการวัดพีเอชของสารละลายต้องใช้ขั้วกลาสเป็นขั้วชี้บอก และขั้วคาโลเมลอิ่มตัวเป็นขั้วอ้างอิง จุ่มลงในสารละลายที่ต้องการวัดค่าพีเอชแล้วต่อเข้าเครื่องพีเอชมิเตอร์ หรือโพเทนชิโอมิเตอร์ โดยทั่วไปกลาสเมมเบรนจะประกอบด้วย Na_2O และ SiO_2 ซึ่งที่ผิวของกลาสจะประกอบด้วยซิลิเกตกรุ๊ปที่รวมกับโซเดียมอิออน ($-SiO^-Na^+$) เมื่อนำขั้วกลาสเมมเบรนมาแช่ในสารละลาย จะทำให้ผิวของเมมเบรนถูกไฮเดรท เมื่อขั้วถูกไฮเดรทแล้วสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่าง Na กับ H ขึ้น

$$-SiO\text{-}Na + H \rightleftharpoons -SiO\text{-}H + Na$$

ขั้วกลาสที่นำมาใช้ในการวัดค่าพีเอชของสารละลาย สามารถรับความรู้สึกต่อสารละลายได้ไว และเปลี่ยนแปลงพีเอชได้อย่างรวดเร็ว เพื่อปรับค่าให้อ่านได้ถูกต้องเมื่อสารละลายเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ถ้าสารละลายไม่ใช่สารละลายบัฟเฟอร์ขั้วจะรับความรู้สึกต่อค่าพีเอชนั้นได้ช้า ต้องหาเวลานานพอสมควรจึงจะอ่านค่าพีเอชได้ถูกต้อง เมื่อต้องการนำขั้วมาใช้วัดค่าพีเอชแต่ละครั้งต้องล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง แล้วล้างตามด้วยสารละลายที่ต้องการวัดค่าพีเอช จากนั้นจึงค่อยอ่านค่าพีเอช เมื่อขั้วกลาสจุ่มอยู่ในสารละลายจนเข็มที่มิเตอร์คงที่ สารละลายที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นสารบัฟเฟอร์เมื่อต้องการวัดพีเอชควรทำการคนสารละลายนั้นแรง ๆ

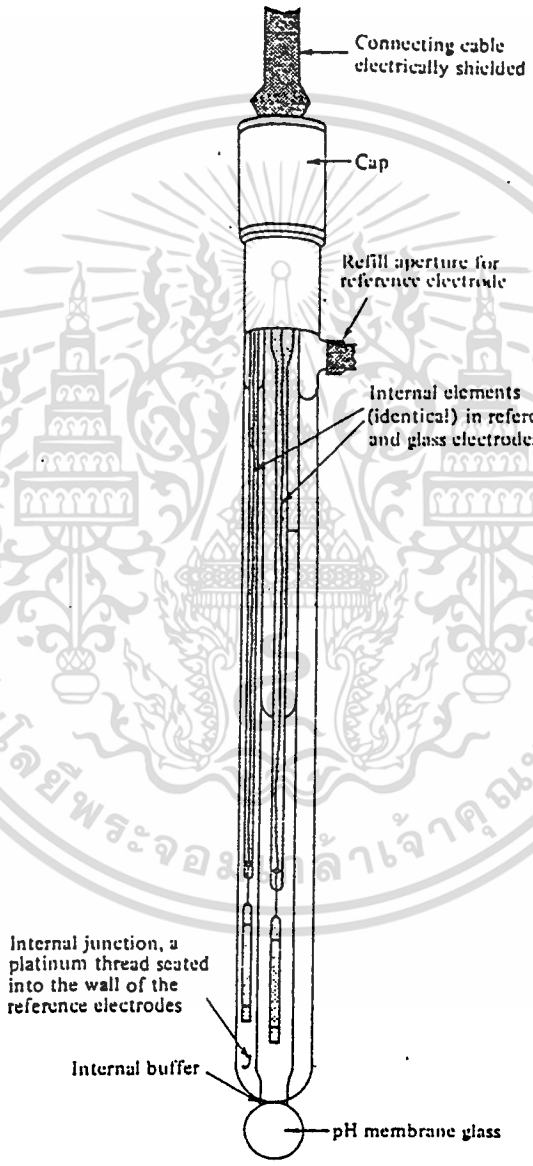
ขั้วกลาสสำหรับวัดค่าพีเอชสามารถนำมาใช้ได้สะดวก มีสิ่งรบกวนน้อยกว่าการใช้ขั้วชนิดอื่น ๆ และมีราคาไม่แพง สารประเภทที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ โปรตีนและก๊าซ ไม่สามารถรบกวนการวัดค่าพีเอชโดยใช้ขั้วกลาสได้ ในทางอุตสาหกรรมการผลิตขั้วเพื่อใช้ในการวัดค่าพีเอชของสารละลาย จะได้นำขั้วชี้บอกและขั้วอ้างอิงมาบรรจุในหลอดแก้วเดียวกันทำให้มีลักษณะเหมือนเป็นขั้วอันเดียวกันเรียกว่า combination electrode มีรูปร่างลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 เมื่อต้องการวัดพีเอชของสารละลาย สามารถทำได้โดยใช้ขั้วชนิดนี้จุ่มลงในสารละลายแล้วต่อเข้ากับเครื่องพีเอชมิเตอร์

การใช้ขั้วกลาสสำหรับวัดค่าพีเอชของสารละลาย มิใช่ว่าจะได้ผลถูกต้องเสมอไปอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังต่อไปนี้คือ

1. ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตร ถ้าสารละลายที่ต้องการวัดค่าพีเอช มีคุณสมบัติเหมือนกับสารละลายภายในขั้วกลาสทุกอย่างและผิวของกลาสเมมเบรนทั้งสองข้างก็มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ควรมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่จากการวัดค่าจริง ๆ พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไม่เป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตร ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการทดลอง เมื่อขั้วกลาสมีอายุการใช้งานนานขึ้นพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรจะมีค่ามากขึ้น เหตุของการเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรนั้น ยังเป็นเรื่องที่สงสัยกันอยู่ว่าเกิดจากอะไรบ้าง แต่สิ่งที่มีผลอย่างแน่นอนไม่ต้องสงสัย ก็คือคุณสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างผิวทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านของกลาสเมมเบรน ซึ่งเกิดขึ้นจากการผลิตและขณะใช้ขั้วกลาสจุ่มในสารละลายเพื่อวัดค่าอาจจะเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากผิวของกลาสเมมเบรนด้านนอกมีกรีสฟิล์ม หรือสารตัวอื่นที่สามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของกลาสเมมเบรนได้ แต่อย่างไรก็ตามผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นนี้ สามารถขจัดได้โดยการทำแคลิเบรทขั้วโดยใช้สารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ที่ทราบค่าพีเอชที่แน่นอน



รูปที่ 2.13 Combination pH/referenec electrode [6]

2. Alkali error เป็นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากกลาสเมมเบรนที่ใช้มีความว่องไวต่อแคทไอออนอื่น ๆ นอกเหนือจากไฮโดรเจนไอออนได้ด้วย เมื่อความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำ แทนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่าง H^+ ในสารละลายกับ Na^+ ในไฮเดรทเจลกลับกลายเป็นว่าเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่าง Na^+ ในสารละลายกับ H^+ ในไฮเดรทเจลขึ้นแทน ดังนี้

$$-SiO^-H^+ + Na^+ \rightleftharpoons -SiO^-Na^+ + H^+$$

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างผิวของกลาสเมมเบรนกับสารละลายจึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแอคติวิตีของโซเดียมไอออนแทน ข้อผิดพลาดนี้จะเกิดขึ้นในทางลบคือ พีเอชที่วัดได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง

3. Acid error ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นวัดได้มากกว่าความเป็นจริงซึ่งเกิดในทางตรงกันข้ามกัน alkali error ในสารละลายที่มีพีเอชน้อยกว่า 1 หรือมี H^+ มาก ๆ พบว่าข้อผิดพลาดของพีเอชที่วัดได้จะสูงขึ้น เมื่อพีเอชต่ำลง

4. Dehydration ขั้วกลาสที่ใช้วัดพีเอชของสารละลายไม่ควรปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง ผิวของกลาสเมมเบรนต้องถูกไฮเดรทตลอดเวลา มิฉะนั้นจะทำให้การวัดค่าพีเอชของสารละลายเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้

5. Variation in junction potential ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของสารละลายอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง ทำให้ค่าพีเอชที่วัดได้ไม่แน่นอน โดยปกติจะเปลี่ยนแปลงได้ 0.01 หน่วยของพีเอชของสารละลายชนิดเดียวกันได้ค่าที่แตกต่างกัน

6. ข้อผิดพลาดจากค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์ ในการวัดค่าพีเอชของสารละลายทุกครั้ง ต้องมีการแคลิเบรทขั้วกลาสและเครื่องพีเอชมิเตอร์ทุกครั้งด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน ถ้าสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการแคลิเบรทมีค่าพีเอชผิดไป เนื่องจากเก็บรักษาไว้ไม่ดีทำให้ส่วนประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลง ก็จะเป็นสาเหตุทำให้การวัดค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างที่วัดได้ผิดพลาดด้วย

2.8.1 ขั้วชนิดอื่น ๆ ที่ใช้วัดพีเอช

การวัดพีเอชของสารละลาย นอกจากจะใช้ขั้วกลาสเมมเบรนแล้ว ยังสามารถใช้ขั้วที่เป็นแท่งโลหะได้อีกหลายแบบ ซึ่งจะขอนำมากล่าวรายละเอียดต่อเนื่องจากการใช้ขั้วกลาสเมมเบรนสำหรับวัดพีเอช ขั้วที่สามารถใช้วัดค่าพีเอชของสารละลายนอกเหนือจากขั้วกลาส ได้แก่

2.8.1.1 ขั้วไฮโดรเจน จะไวต่อ H^+ ของสารละลายด้วย เพราะเกิดปฏิกิริยา

$$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$$

ในการทดลองต้องควบคุมความดันของก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ ในการวิเคราะห์ทั่วไปไม่นิยมใช้ขั้วชนิดนี้ เพราะไม่สะดวกในการควบคุมความดันก๊าซและยุ่งยากในการสร้าง ขั้วก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง และแพลตินัมที่ใช้ต้องฉาบผิวด้วยแพลตินัมแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1.2 ขั้วควินไฮโดรน อิเลคโทรดชนิดนี้ปัจจุบันใช้น้อยมากในการวัดค่าพีเอช

2.8.1.3 ขั้วแอนติโมนี มีหลักการง่าย ๆ คือ ปล่อยให้สารอยู่ในอากาศแล้วเกิดออกไซด์ที่ผิวเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับกับไฮโดรเจนอิออนในสารละลาย ดังนี้

$$Sb_2O_3 + 6H^+ + 6e^- \rightleftharpoons 2Sb + 3H_2O$$

ปัจจุบันอิเลคโทรดชนิดนี้มีการใช้น้อยมากในห้องปฏิบัติการเนื่องจากต้องมีการเทียบมาตรฐานสำหรับชนิดของสารละลายที่ใช้ แต่อิเลคโทรดชนิดนี้ยังมีประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้สำหรับการวัดพีเอชของโรงงาน

2.8.2 ขั้วกลาสเมมเบรนสำหรับวิเคราะห์แคทอิออนตัวอื่น ๆ

เนื่องจากการเกิด alkali error ในการใช้ขั้วกลาส จึงมีการศึกษาและค้นคว้าหาส่วนประกอบของกลาสเมมเบรนที่ไวต่อแคทอิออนตัวอื่น ๆ บ้างการพัฒนาส่วนประกอบของเมมเบรนเพื่อเพิ่มความสามารถให้แคทอิออนอื่นนอกจาก H^+ เกิดการแลกเปลี่ยนอิออนกับกลาสเมมเบรนได้ กระทำจนสามารถจัดแบ่งกลาสเมมเบรนได้เป็น 3 แบบคือ

ก. pH type ลักษณะของขั้วแบบนี้ก็คือ ขั้วสำหรับวัดพีเอชนั่นเอง ความสามารถในการเลือกไวต่ออิออนของเมมเบรน (selectivity order) เรียงตามลำดับดังนี้

$$H^+ >>> Na^+ > K^+, Rb^+, Cs^+ .....>> Ca^+$$

ข. Cation-sensitive type ขั้วชนิดนี้จะเลือกไวต่ออิออนที่เป็นชนิดโมโนวาเลนซ์แคทอิออน โดยเรียงตามลำดับได้ดังนี้

$$H^+ > K^+ > Na^+ > NH_4^+, Li^+ .....>> Ca^+$$

ค. Sodium-sensitive type ความสามารถในการเลือกไวต่ออิออนของขั้วชนิดนี้เรียงตามลำดับได้ดังนี้

$$Ag^+ > H^+ > Na^+ >> K^+, Li^+ .....>> Ca^+$$

ขั้วทั้ง 3 แบบไวต่อ H^+ แต่ 2 ชนิดหลังมีความไวต่อ H^+ น้อยกว่าชนิดแรก ในการนำขั้วทั้ง 3 แบบนี้มาวิเคราะห์แคทอิออนต่าง ๆ ควรทำให้สารละลายมีฤทธิ์เป็นเบสหรือมีพีเอชสูง ๆ เพื่อทำให้มี H^+ ต่ำมาก ๆ เพื่อที่อิออนอื่น ๆ จะได้ไวต่อขั้วแทน H^+ และในการวิเคราะห์สารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ จะต้องไม่มีอิออนที่ไวต่อขั้วสูงกว่าอิออนที่ต้องการวิเคราะห์ปนอยู่ด้วย เช่น ถ้าการวิเคราะห์ Na^+ โดยใช้ขั้วชนิดที่ 2 ในสารละลายต้องมีฤทธิ์เป็นเบส และไม่มี K^+ ปนอยู่เลย จึงจะทำการวิเคราะห์ได้ผลถูกต้อง

2.8.3 Ion Selective Electrode (ISE)

ในช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาและคิดค้นเมมเบรนที่ไม่ใช่กลาสชนิดต่าง ๆ ขึ้นเพื่อให้ได้ผลที่แสดงการเลือกที่ดีและมีความไวที่ดี เมมเบรนที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นมามีหลาย

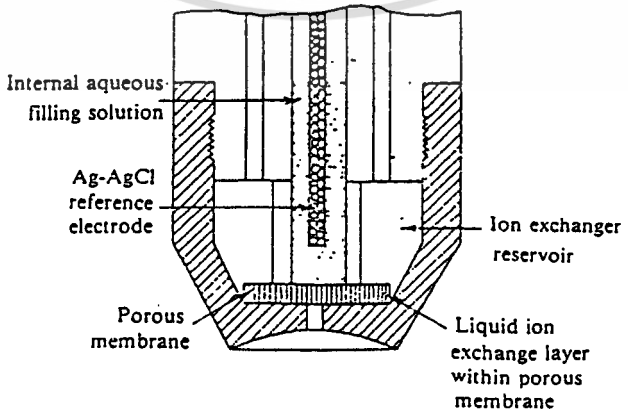
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด และแต่ชนิดก็สามารถผลิตขึ้นให้มีส่วนประกอบของเมมเบรนต่าง ๆ กันเพื่อให้เมมเบรนนั้นเลือกไวต่ออิออนได้แตกต่างกันเนื่องจากเมมเบรนชนิดเดียวกันสามารถไวต่ออิออนได้หลายตัว แต่ความไวนั้นแตกต่างกันดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จึงเนื่องมาจากอิออนที่ไวต่อเมมเบรนมากที่สุดนั่นเอง การเรียกชื่อขั้วชนิดนี้จึงต้องใช้คำว่า ion selective electrode และสามารถแบ่งได้ตามชนิดและหน้าที่ของเมมเบรน ดังนี้

2.8.3.1 ขั้วเมมเบรนของเหลว ศักย์ไฟฟ้าของขั้วเกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวที่มีอยู่ที่ผิวของเมมเบรนไวต่ออิออนในสารละลายของเหลวที่มีอยู่ที่ผิวของเมมเบรนจะเป็นชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ และไวต่ออิออนชนิดหนึ่ง ๆ ได้โดยเฉพาะ ของเหลวที่ใช้คือสารอินทรีย์ที่ไม่ระเหยและประกอบด้วยหมู่ฟังชันนอลต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของกรดและเบส จึงทำให้สามารถวิเคราะห์แคทอิออนชนิดที่เป็นโพลีวาเลนซ์ได้ดีพอ ๆ กับการวิเคราะห์แอนอิออน เมื่อของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดการแลกที่ของอิออน ทำให้เกิดสมดุลของปฏิกิริยาขึ้น ดังนี้

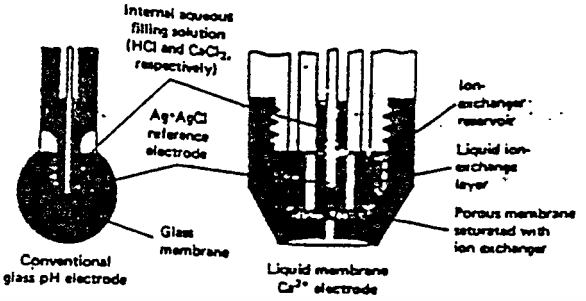
$$RH_{2x} + xM^{2+} \rightleftharpoons RM^{x} + 2xH^{+}$$

ขั้วเมมเบรนที่เป็นของเหลวน้ำ สามารถประกอบขึ้นได้โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมมเบรนที่เป็นรูจะเต็มไปด้วยของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถแลกเปลี่ยนอิออนได้ หลอดแก้วภายในบรรจุด้วยสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วย $MC1_2$ เมื่อ M^{2+} คือแคทอิออนชนิดเดียวกับที่ต้องการวิเคราะห์และสารละลายนี้อิ่มตัวด้วย AgC1 ทำให้เกิดขั้วอ้างอิง Ag/AgC1 ขึ้นภายในเมื่อใช้ลวดเงินต่อเชื่อมให้ครบวงจร เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบต่าง ๆ ของขั้วเมมเบรนของเหลวกับขั้วกลาส พบว่าจะมีส่วนประกอบของขั้วคล้ายกัน ต่างกันที่ส่วนประกอบของเมมเบรน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ขั้วเมมเบรนของเหลว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

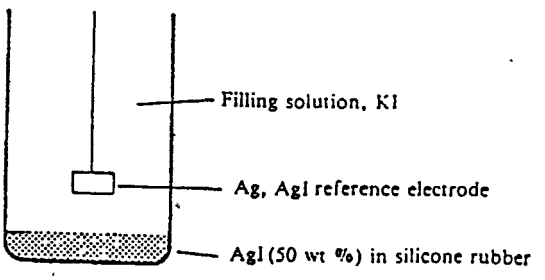


รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบขั้วเมมเบรนของเหลวกับขั้วกลาส [1]

ส่วนของของเหลวที่อยู่ที่ผิวของเมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนอิออนคือ aliphatic dewster ของกรดฟอสฟอริคที่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นโพลาร์ ความยาวของเชนของกลุ่ม aliphatic ในเอสเทอร์ประมาณ 8-16 เชน ไดเอสเทอร์จะประกอบด้วยโปรตอนเพียงตัวเดียว ดังนั้น 2 โมเลกุลของของเหลวจะแลกเปลี่ยนอิออนที่สนใจที่เป็นไดวาเลนซ์แคทอิออนได้หนึ่งตัว (ในที่นี้คือแคลเซียม) สารละลายที่อยู่ภายในขั้วคือสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคงที่ ซึ่งสัมผัสกับเมมเบรนด้านใน มี Ag/AgC1 เป็นขั้วอ้างอิงภายในจุ่มอยู่ในสารละลาย $CaC1_2$ สมดุลของการแลกเปลี่ยนอิออนเกิดขึ้นดังนี้

$$[(RO)_2POO]_2Ca \rightleftharpoons 2(RO)_2POO^- + Ca^{2+}$$

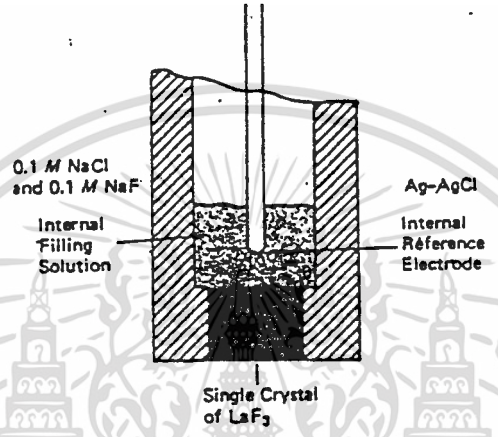
2.8.3.2 Solid-state and precipitate electrode เมื่อได้มีการพัฒนาขั้วเมมเบรนชนิดต่าง ๆ ต่อมาจึงพบว่าเมมเบรนชนิดที่เป็นของแข็งก็สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนหรือไวต่ออิออนที่ต้องการวิเคราะห์ได้เช่นกัน และส่วนใหญ่จะเลือกไวต่อแอนอิออนซึ่งตรงข้ามกับกลาสเมมเบรน ขั้วที่เรียกว่า precipitate electrode มีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.16 ขั้วชนิดนี้เหมาะสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเฮไลด์ เช่น ไอโอไดด์ และคลอไรด์ และสามารถวิเคราะห์ซัลไฟด์ได้ด้วย ความไวของขั้วชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าการละลายของตะกอนที่เกิดขึ้นที่เมมเบรน AgCI เป็นตะกอนที่ละลายน้ำยาก ดังนั้นการวัดความเข้มข้นของไอโอไดด์จึงสามารถวัดได้ต่ำ



รูปที่ 2.16 precipited-impregnated membrane electrode [6]

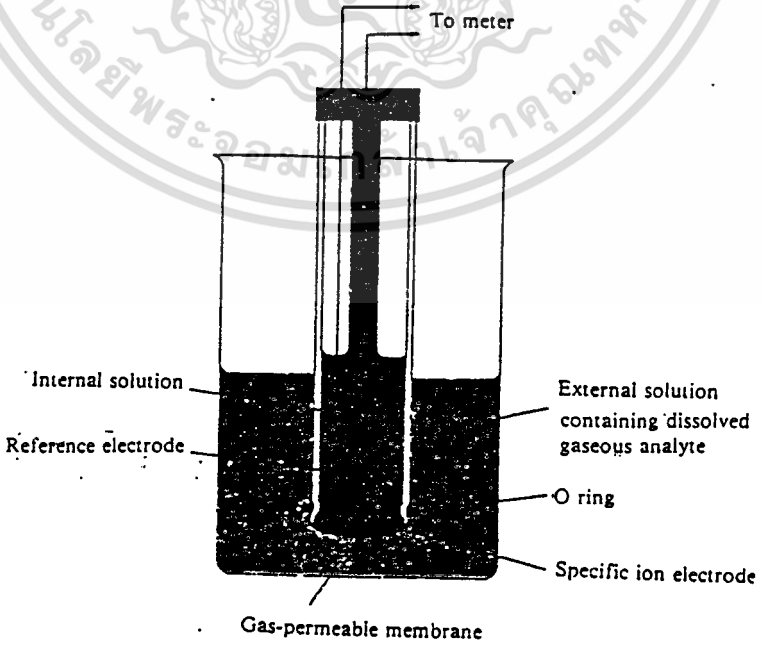
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้ว solid-state electrode ที่ใช้งานมากที่สุดคือ ขั้วที่ไวต่อฟลูออไรด์ เมมเบรนประกอบด้วย ผลึกของแลนทานัมฟลูออไรด์ที่มี europium (II) ปนอยู่เล็กน้อย เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ขั้วชนิดนี้มีความไวต่ออิออนฟลูออไรด์มาก ซึ่งไวมากกว่าอิออนอื่น เช่น Cl^-, Br^-, I^-, NO_3^- และ SO_4^{2-} ถึง 1,000 เท่าและมากกว่า OH^- อย่างน้อย 10 เท่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ฟลูออไรด์ คือ 4 ถึง 9 ส่วนประกอบของขั้วชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 solid-state fluoride electrode [1]

2.8.3.3 ขั้วที่ไวต่อก๊าซ รูปที่ 2.18 คือ รูปแสดงส่วนประกอบของขั้วที่ไวต่อก๊าซ ขั้วเมม เบรน ขั้วอ้างอิง และสารละลายอิเลคโตรไลท์จะบรรจุอยู่ในภาชนะพลาสติกทรงกระบอก



รูปที่ 2.18 ขั้วที่ไวต่อก๊าซ [1]

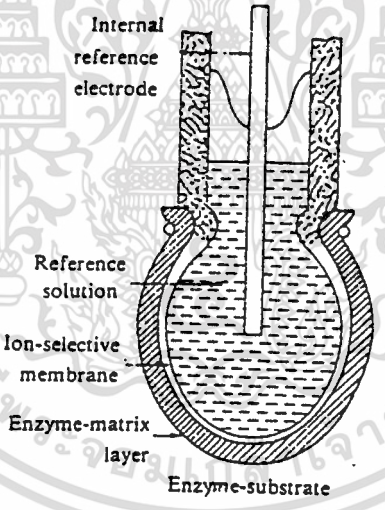
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีเมมเบรนที่ยอมให้ก๊าซผ่านได้เป็นตัวกั้นระหว่างสารละลายอิเลคโตรไลท์และสารละลายที่มีก๊าซที่ต้องการวิเคราะห์ละลายอยู่ เช่น SO_2 กล่าวคือ เมื่อ SO_2 จากสารละลายที่ต้องการจะวิเคราะห์ผ่านเข้าไปในเมมเบรนจะถูกกลั่นให้เป็นก๊าซ

2.8.3.4 ขั้วเอนไซม์ ใช้วัดความเข้มข้นของเอนไซม์ได้ โดยขั้วที่ใช้จะไวต่อเอนไซม์ซับสเตรต เช่น ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสของซับสเตรตยูเรียเมื่อมีเอนไซม์ยูริเอส

$$NH_2\text{-}CO\text{-}NH_2 + 2H_2O + H^+ \rightleftharpoons 2NH_4^+ + HCO_3^-$$

ขั้วที่ใช้วัดสารละลายของเอนไซม์ เตรียมได้โดยใช้เอนไซม์ซับสเตรตยูเรียทำให้เป็นเจลแล้วฉาบที่ผิวของขั้วกลาสที่เป็นชนิด cation-sensitive เมื่อเอนไซม์เกิดการแพร่กระจายไปที่ชั้นของเจลหรือชั้นที่มีเอนไซม์ซับสเตรตจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสตามปฏิกิริยาให้ NH_4^+ ซึ่งไวต่อขั้วกลาส จึงทำให้สามารถวัดปริมาณ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นได้และปริมาณของ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นก็สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเอนไซม์ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์หาปริมาณเอนไซม์ได้โดยใช้ขั้วชนิดนี้นั่นเอง

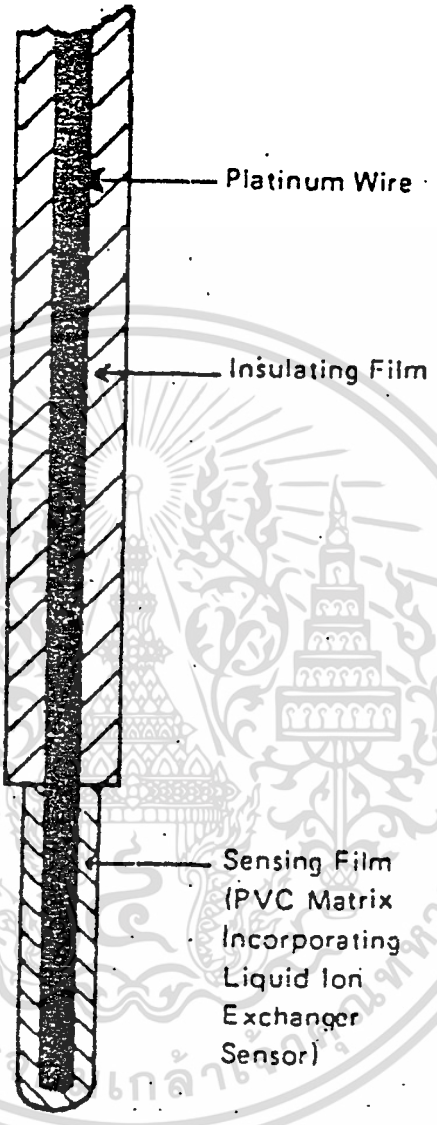


รูปที่ 2.19 ขั้วเอนไซม์ [6]

2.8.3.5 Coated wire ion selective electrode (CWISE) อาศัยหลักการเดียวกับขั้วเมมเบรนของเหลว คือ ส่วนประกอบของเมมเบรนจะมีของเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ และมีสารที่ไวต่อการแลกเปลี่ยนอิออนกับสารที่สนใจละลายอยู่ โดยเมมเบรนนี้จะฉาบอยู่ที่ผิวของลวดตัวนำไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ลวดแพลตินัม หรือลวดทองแดง จึงเรียกขั้วชนิดนี้ว่า coated wire ion selective electrode สารที่เป็นตัวช่วยทำให้ของเหลวและตัวแลกเปลี่ยนอิออนฉาบอยู่ที่ลวดตัวนำได้ คือ พลาสติไซเซอร์ พลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้กันมาก คือ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ลักษณะของขั้วชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ซึ่งขั้วที่ใช้ PVC เป็นพลาสติกไซเซอร์มีชื่อเรียกเฉพาะว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PVC matrix-membrane ion selective electrode



รูปที่ 2.20 PVC matrix-membrane coated wire ion selective electrode [1]

ขั้ว CWISE ไม่เพียงแต่สามารถวิเคราะห์อิออนต่าง ๆ ของสารอนินทรีย์เท่านั้น ยังสามารถใช้กับการวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ได้ด้วย ถ้าสามารถเลือกใช้ส่วนประกอบของเมมเบรนที่ไวต่อสารประกอบอินทรีย์ได้เหมาะสม ตารางที่ 2.3 เป็นส่วนหนึ่งที่แสดงถึงขั้ว CWISE ชนิดที่ใช้ PVC เป็นพลาสติไซเซอร์และมีส่วนประกอบของเมมเบรนต่าง ๆ กัน ซึ่งได้ทำการทดลองและวิจัยจนได้ผลแล้ว แต่ยังมิได้ผลิตขึ้นเป็นทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 PVC matrix-membrane coated wire ion selective electrode [2]

ชนิดของขั้ว	ส่วนประกอบของเมมเบรน	Linear response range (M)	pH range	Response (mV)
Calcium	Various di-and mono-esters of phosphoric acid	$\sim 10^{-5}$ to 10^{-2}	4 – 9	– 30
	di(2-ethylhexyl) 2-ethylhexyl-phosphonate			
Potassium	- Valinomycin + dipentylphthalate	10^{-5} to 10^{-1}	2 – 10	57
	- Valinomycin + di-(2-ethylhexyl)2-ethylhexylphosphonate	10^{-4} to 10^{-1}	5 – 10	51
Perchlorate	1 : 10 Phenanthroline iron (II) perchlorate + p-nitrocymene	10^{-3} to $\sim 10^{-1}$	–	– 75
Chloride		10^{-4} to 10^{-1}	–	55-60
Iodide		10^{-4} to 10^{-1}	–	55-60
Bromide	Aliquot 336S in decan-l-ol shaken	10^{-3} to 10^{-1}	–	50-59
Acetate	with aqueous solution of	10^{-3} to 10^{-1}	–	50-59
Benzoate	appropriate sodium salt	10^{-3} to 10^{-1}	–	50-59
Salicylate		10^{-3} to 10^{-1}	–	50-59
Phenylalanine		2.5×10^{-3} to 10^{-1}	–	52-54

ปัจจุบันการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนชิโอเมตริกนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมาก เพราะสามารถผลิตขั้ว ISE ที่สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมสำหรับงานวิเคราะห์แต่ละอย่างโดยเฉพาะ แต่อย่างไรก็ตาม ขั้ว ISE ก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าที่ขั้ววัดได้ คือ แอคติวิตีไม่ใช่ความเข้มข้น สามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเข้มข้นได้เมื่อทราบค่าความแรงของอิออน

2. การวัดโดยใช้ขั้วชนิดนี้เกิดได้เมื่อสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในรูปของอิออน ดังนั้นข้อผิดพลาดของการวัดจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือเกิดการโปรโตเนทเข้ามารบกวน

3. ไม่สามารถขจัดสิ่งรบกวนที่มีความไวต่อขั้วได้ เพราะขั้วไม่ได้มีความเฉพาะเจาะจงต่ออิออนที่ต้องการวิเคราะห์เพียงอิออนเดียว

4. ขั้วที่มีลักษณะขุ่น หรือมีสีจะทำให้การวิเคราะห์ไม่ได้ผล

5. ในสารละลายที่เจือจางมาก ๆ ต้องให้เวลาในการเกิดสมดุลอย่างน้อย 1 นาที แล้วจึงค่อยวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

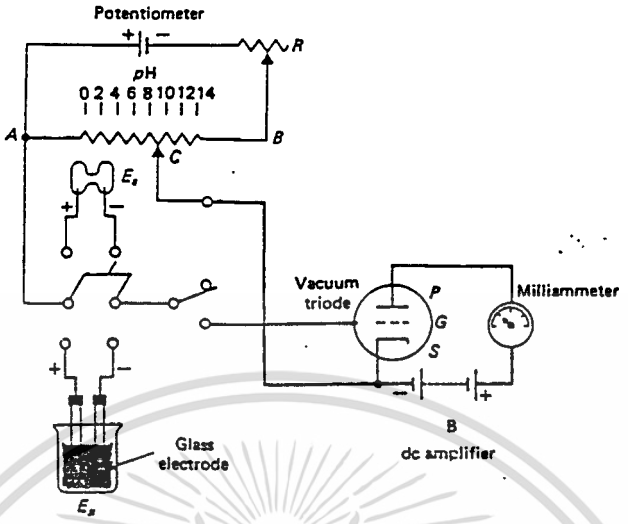
6. ค่าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย
7. สารละลายที่มีปริมาณน้อย ๆ ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถนำมาวิเคราะห์ได้
8. สารละลายตัวอย่างไม่ถูกทำลาย
9. ต้องทำการแคลิเบรทเครื่องมือและขั้วทุกครั้งที่วัดค่า

2.9 พีเอชมิเตอร์

วงจรไฟฟ้าของเครื่องพีเอชมิเตอร์อย่างง่าย ได้แสดงในรูปที่ 2.21 ส่วนขยายกระแสให้แก่แอมมิเตอร์คือ หลอดสูญญากาศชนิดหลอดไตรโอดเดี่ยว หลอดไตรโอดตามที่แสดงในรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยขั้ว 3 ชนิด คือ เพลต P, กริด G และขั้วแคโทดที่ร้อน S เมื่อแคโทด S ถูกทำให้เป็นลบเมื่อเทียบกับเพลต P โดยแบตเตอรี่ B (45 ถึง 90 โวลท์) อิเลคตรอนจาก S จะถูกส่งต่อไปยังกริด G และเพลต P ขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่ามากน้อยขอย่างไรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแคโทด ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่แคโทด และที่สำคัญที่สุดคือความต่างศักย์ระหว่างกริดกับแคโทด นั่นคือ ความสามารถในการขยายของหลอดสูญญากาศจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่เหมาะสมของหลอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยที่กริด จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากแคโทดไปยังเพลตได้อย่างมาก ดังนี้คือ ถ้ากริดถูกทำให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากขึ้นอิเลคตรอนที่ขั้วแคโทดจะถูกผลักการไหลของกระแสจะลดลง ในทางกลับกันถ้ากริดเป็นลบน้อยลงกระแสจะเกิดมากขึ้น ในการวัดค่าพีเอชของสารละลาย ต้องมีการตรวจสอบมิเตอร์ให้อ่านค่าได้ถูกต้อง โดยใช้สารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ เรียกว่า การแคลิเบรทเครื่องมือ เมื่อนำสารละลายบัฟเฟอร์มาประกอบเป็นเซลล์ คือ E ให้ปรับความยาว AC ให้อ่านค่าได้เท่ากับค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นปรับศักย์ไฟฟ้าของกริดจนกระทั่งไม่มีกระแสไหลในกัลวานอมิเตอร์ ถ้าต้องการให้ค่าที่อ่านได้ถูกต้องและแน่นอนยิ่งขึ้น ควรใช้สารละลายบัฟเฟอร์อีกชนิดหนึ่งแคลิเบรทเครื่องมือโดยเมื่อประกอบเป็นเซลแล้วปรับความยาว AC ให้อ่านค่าได้เท่ากับค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์นั้น ถ้าปรากฏว่าเข็มกัลวานอมิเตอร์ไม่ชี้ที่ 0 ต้องปรับความต้านทาน R จนกระทั่งไม่มีกระแสไหลในกัลวานอมิเตอร์ ในการวิเคราะห์ถ้าเป็นการวัดอย่างหยาบ ๆ สามารถใช้การแคลิเบรทเพียงครั้งเดียวก็พอ เมื่อนำสารละลายตัวอย่างมาประกอบเป็นเซล E เพื่อวัดค่าพีเอช จะพบว่าความยาว AC ที่อ่านได้เมื่อทำให้ไม่มีกระแสไหลในกัลวานอมิเตอร์ก็คือค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างนั้น นั่นเอง

เครื่องพีเอชมิเตอร์ตามรูปที่ 2.21 เป็นแบบที่ต้องแคลิเบรทเครื่องด้วยสารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ถึง 2 ครั้ง พบว่าจะมีเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ใช้วงจรอิเลคทรอนิกส์ที่สามารถอ่านค่าพีเอชได้โดยตรง พีเอชมิเตอร์ชนิดนี้มีวงจรไฟฟ้าส่วนขยายเช่นเดียวกับแบบแรกตามที่อยู่ทางด้านขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจรไฟฟ้าของเครื่องพีเอชมิเตอร์ [1]

ของรูปที่ 2.21 เมื่อสัญญาณของกระแสออกจากเซล ซึ่งประกอบด้วยขั้วกลาสและขั้วคาโลเมล จะเข้าสู่ส่วนขยาย คือ กริดและแคโทดโดยตรง แล้วส่งต่อไปยังมิเตอร์ ซึ่งเท่ากับมีผลทำให้มิเตอร์รับสัญญาณโดยตรงจากเซล ดังนั้นถ้าทำการแคลิเบรทมิเตอร์ให้สามารถอ่านเป็นค่าพีเอชได้ ก็จะทำให้การวัดค่าพีเอชของสารละลายทำได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการแคลิเบรท เพราะว่า การไหลของกระแสระหว่าง กริดและแคโทดมีความต้านทานสูง ดังนั้นกระแสที่ได้จากเซลไม่ควรน้อยจนเกินไป กระแสสามารถมีปริมาณน้อยได้ถึง -5×10^{-11} แอมแปร์ โดยทั่วไปเครื่องพีเอชมิเตอร์แบบนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดค่า พีเอชที่ต้องการความถูกต้องสูง ๆ เพราะวงจรไฟฟ้าแบบนี้ไม่เสถียรเท่าที่ควร ถ้าต้องการให้อ่านค่า พีเอชได้ถูกต้องและเสถียรมาก ๆ และค่าที่อ่านได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เครื่องมือต้องมีวงจรไฟฟ้าเพิ่มเติม โดยใช้หลักของ inverse feedback หรือ negative feedback เพื่อทำให้เข้าใจหลักการของ negative feedback จะต้องพิจารณาความประพฤติของส่วนขยายก่อนดังนี้ ในช่วงศักย์ไฟฟ้าจำนวนน้อย ๆ ปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้ออกมาต้องแปรผันโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไป

$$E_0 = nE_{in}$$

ให้ E_0 คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้ออกมา

E_{in} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไป

n คือ ค่าคงที่ที่เรียกว่า แฟกเตอร์ส่วนขยาย

แผนภาพของวงจรไฟฟ้า negative feecback แสดงในรูปที่ 2.22 กระแส i ผ่านความต้านทานและมิลลิแอมมิเตอร์ที่ได้แคลิเบรทเป็นหน่วยพีเอชแล้ว ถ้าให้ R คือ ความต้านทานรวมทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

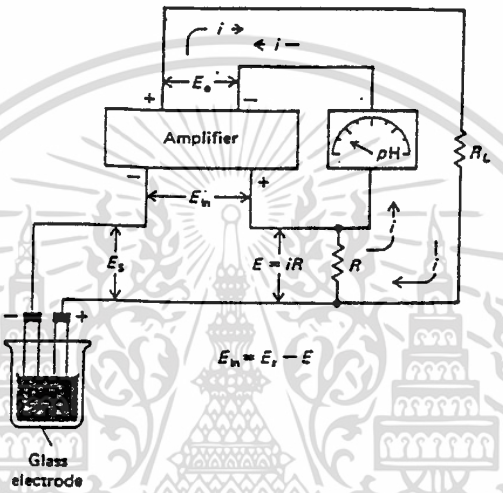
ของวงจรอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งมีผลทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าลดลง (E = IR) ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซล ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในส่วนขยายจะมีค่าดังนี้

$$E_{in} = E_s - E$$

E_s คือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลที่ต้องการวัดค่า ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับค่าพีเอช ดังนั้น

$$pH = ki$$

k คือ ค่าคงที่ที่ทำให้พีเอชสัมพันธ์โดยตรงกับกระแส i



รูปที่ 2.22 direct reading pH meter with megative feedback [1]

เครื่องพีเอชมิเตอร์ที่กล่าวมาทั้งสองชนิดนี้ เป็นแบบที่ส่วนขยายต้องใช้ไฟกระแสตรงซึ่งเป็นแบบที่สามารถผลิตได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ความแน่นอนของการวัด มีค่าเพียง 0.05 ถึง 0.1 หน่วยพี เอชเท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ผลิตขึ้นใช้ในปัจจุบันสามารถทำให้ส่วนขยายใช้ไฟ กระแสสลับและทำให้มีความคงตัวสูง ความยุ่งยากในการเปลี่ยนสัญญาณจากเซลที่เป็นไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับก่อนเข้าเครื่องขยาย และเมื่อสัญญาณออกจากเครื่องขยายจะต้องเปลี่ยนไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรงเพื่อเข้าเครื่องวัดอีกทีหนึ่งนั้น ทำให้ราคาในการผลิตสูงขึ้น แต่การวัดจะสะดวกมากกว่า

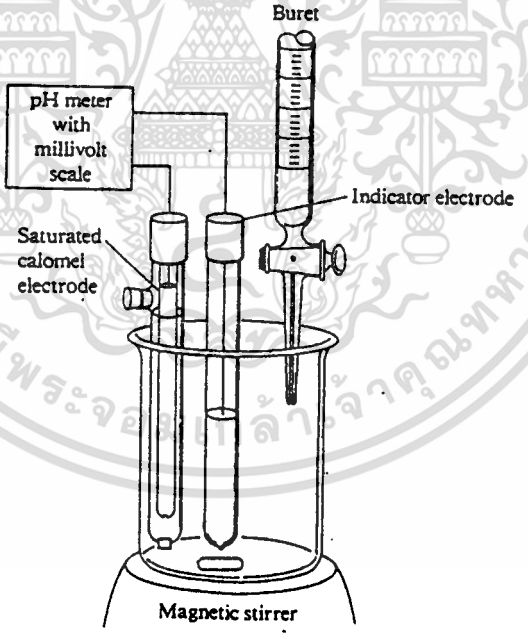
2.10 โพเทนชิโอเมตริคไตเตรชัน

โพเทนชิโอเมตริคไตเตรชัน เป็นเทคนิคในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซล หรือค่าพีเอชของเซล ในขณะที่เติมปริมาณของไตแตรนท์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนลงไปในสารละลายตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในเซลเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิงไม่จำเป็นต้องทราบค่าที่แท้จริง ปกติแล้วจะเลือกใช้อิเลคโทรดที่ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ตลอดการไตเตรต ส่วนขั้วชี้บอกต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของการไตเตรต (เช่น ใช้ glass electrode สำหรับการไตเตรตกรด-ด่าง) และควรถึงสมดุลได้อย่างรวดเร็ว

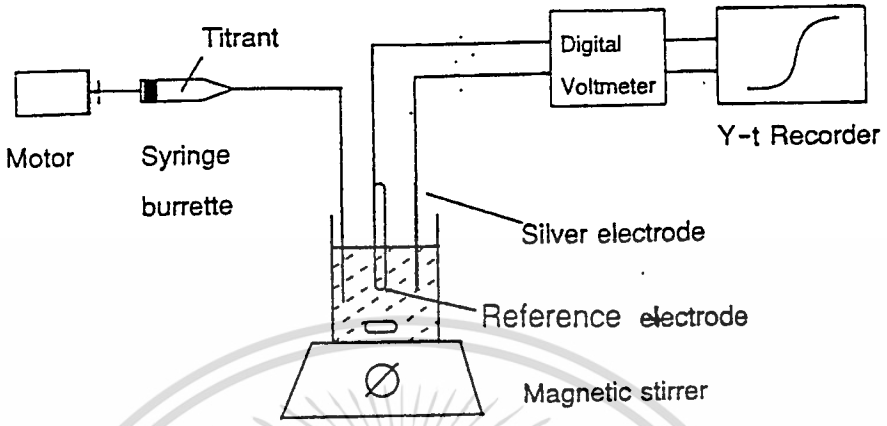
ขณะมีการไตเตรต อิเลคโทรดจะจุ่มอยู่ในสารละลายที่ถูกไตเตรตเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาตรที่เติมของไตแตรนท์ และเมื่อพล็อทกราฟจะได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า ไตเตรชันเคอร์ฟ โดยทั่วไปไตแตรนท์จะถูกเติมลงไปจำนวนมากในาช่วงแรก ต่อมาการเติมจะน้อยลงเมื่อเข้าใกล้จุดยุติ ซึ่งทราบโดยพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้ามากต่อการเติมไตแตรนท์ลงไป จนสุดท้ายจึงเติมเป็นหยดหรือน้อยกว่าหยดเพื่อทำให้การหาจุดยุติมีความถูกต้องมากที่สุด ในการไตเตรตจำนวนมาก การวัดศักย์ไฟฟ้าจะใช้เวลาหลายวินาทีหลังการเติมไตแตรนท์เพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาเกิดอย่างสมดุล การเข้าใกล้จุดยุติจะทราบเมื่อพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกลงน้อยกว่า 1 ถึง 2 มิลลิโวลท์ ในช่วงเวลามากกว่า 30 วินาที การคนที่จะช่วยให้ถึงสมดุลได้เร็วขึ้น ดังนั้นขณะการไตเตรตจึงต้องมีการคนกวนอย่างทั่วถึง



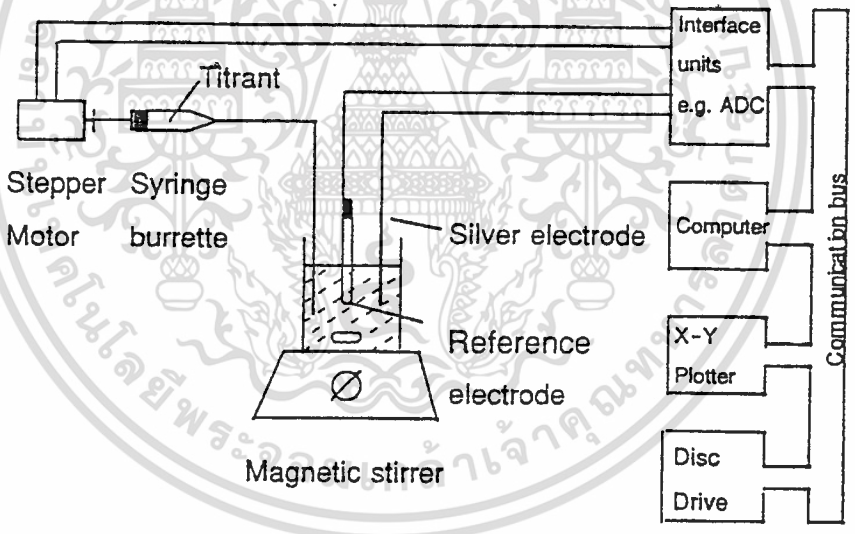
รูปที่ 2.23 โพเทนชิโอเมตริคไตเตรชัน [3]

การจัดเครื่องมือสำหรับโพเทนชิโอเมตริคไตเตรชัน อย่างน้อยต้องมีโพเทนชิโอมิเตอร์ หรือพีเอชมิเตอร์ ที่มีขั้วอ้างอิงและขั้วชี้บอกที่เหมาะสม และส่วนประกอบอื่นได้แก่ บิวเรต บีกเกอร์ และเครื่องคนกวน ซึ่งเป็นการจัดเครื่องมือแบบง่าย ดังรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 Automated Titrator [3]



รูปที่ 2.25 Computerised Titration System [3].

นอกจากนี้ยังมีการจัดเครื่องมือแบบอื่น เช่น automated titrator ดังรูปที่ 2.24 จะเป็นระบบอัตโนมัติสามารถไตเตรตโดยมีกระบอกฉีดบรรจุไตเตรนท์ที่ควบคุมการไหลด้วยมอเตอร์ และมีเรคคอร์ดเดอร์ที่แสดงภาพการ พล็อทของไตเตรชันเคอร์ฟได้ ส่วนแบบ computerised titration system ดังรูปที่ 2.25 เป็นระบบที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จะมีซอฟแวร์ในการควบคุมมอเตอร์ในขณะเติมไตเตรนท์ลงในเซลกัลวานิค ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลจะแสดงเป็นตัวเลขโดย ADC และค่าของสัญญาณจะถูกจัดเก็บในคอมพิวเตอร์และพิมพ์เป็นรายงานออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่สำคัญของโพเทนชิโอเมตริคไตเตรชัน คือ การหาจุดยุติของการไตเตรต ซึ่งสามารถใช้ได้กับปฏิกิริยาชนิดใดก็ได้ ถ้ามีขั้วชี้บอกที่ตอบสนองต่อแอคติวิตีของสารที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งชนิด

2.11 ระบบเลข

2.11.1 ระบบเลขดิจิตอล

ระบบเลขพื้นฐานที่ใช้กับดิจิตอลมี 4 ระบบ คือ

- ระบบเลขฐานสิบ
- ระบบเลขฐานสอง
- ระบบเลขฐานแปด
- ระบบเลขฐานสิบหก

ก. ระบบเลขฐานสิบ

ระบบเลขฐานสิบ เป็นระบบที่ทำความเข้าใจได้ง่ายที่สุด เพราะเป็นระบบเลขที่ใช้กันอยู่ทุกวัน ระบบเลขฐานสิบประกอบด้วย สัญลักษณ์ของตัวเลข 10 ตัว คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระบบเลขฐานสิบและระบบเลขฐานสอง [4]

ระบบเลขฐานสิบ	ระบบเลขฐานสอง
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปเรียกสัญลักษณ์ของตัวเลขแต่ละตัวในระบบเลขว่า ดิจิต จึงกล่าวได้ว่าระบบเลขฐานสิบมี 10 ดิจิต

ข. ระบบเลขฐานสอง

เนื่องจากระบบเลขฐานสิบมี 10 ดิจิต จึงไม่สะดวกในการนำมาใช้กับระบบดิจิตอล เพราะออกแบบระบบดิจิตอลให้ทำงานกับแรงดันไฟฟ้าถึง 10 ระดับที่สอดคล้องกับ 10 ดิจิต ของเลขฐานสิบได้ยาก ระบบเลขที่เหมาะสมกับการทำงานของวงจรดิจิตอล ควรมีจำนวนดิจิตน้อยกว่าระบบเลขฐานสิบ ระบบที่นิยมใช้ คือ ระบบเลขฐานสอง

ระบบเลขฐานสองประกอบด้วย สัญลักษณ์ 2 ตัว หรือ 2 ดิจิต คือ 0 กับ 1 แสดงดังตารางที่ 2.4 ระบบเลขฐานสองนี้สามารถเทียบเคียงกับระบบเลขฐานสิบและระบบเลขอื่นได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในลำดับต่อไป

ค. ระบบเลขฐานแปด

ระบบเลขฐานแปดประกอบด้วย สัญลักษณ์ 8 ตัว หรือ 8 ดิจิต คือ 0 ถึง 7 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ก

ตารางที่ 2.5 ก ระบบเลขฐานแปด [4]

เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง	เลขฐานแปด
0	000	0
1	001	1
2	010	2
3	011	3
4	100	4
5	101	5
6	110	6
7	111	7
8	001 000	10
9	001 001	11
10	001 010	12
11	001 011	13
12	001 100	14
13	001 101	15
14	001 110	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ก ระบบเลขฐานแปด (ต่อ) [4]

เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง	เลขฐานแปด
15	001 111	17
16	010 000	20
17	010 001	21

ง. ระบบเลขฐานสิบหก

ระบบเลขฐานสิบหกประกอบด้วย สัญลักษณ์ 16 ตัว หรือ 16 ดิจิต คือ 0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E และ F ดังตารางที่ 2.5 ข สังเกตว่า A ถึง F ของเลขฐานสิบหกเทียบเคียงกับ 10 ถึง 15 ของเลขฐานสิบ

ตารางที่ 2.5 ข ระบบเลขฐานสิบหก [4]

เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง	เลขฐานสิบหก
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
16	10000	10
17	10001	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 การเปลี่ยนระบบเลข

1. การเปลี่ยนเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบ

ระบบเลขฐานสิบ เรียกสั้น ๆ ว่าเลขฐานสิบ เป็นระบบที่บอกค่าของตำแหน่ง หรือน้ำหนักของดิจิต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น ตัวเลข 453 ทราบว่า 4 เป็นเลขหลักร้อยแสดงค่า 400, 5 เป็นเลขหลักสิบแสดงค่า 50 และ 3 เป็นเลขหลักหน่วยแสดงค่า 3 หน่วย จึงกล่าวได้ว่า 4 เป็นตัวเลขที่มีค่ามากที่สุดของดิจิตทั้ง 3 ตัว เป็นนัยให้ทราบว่าเลข 4 เป็นดิจิตที่มีความสำคัญมากที่สุด (MSD) ส่วนเลข 3 เป็นดิจิตที่มีความสำคัญน้อยที่สุด (LSD)

นอกจากนี้เลขฐานสิบแต่ละตำแหน่ง ยังมีความสัมพันธ์กับจุดทศนิยมซึ่งเขียนอยู่ในรูปการยกกำลังของเลขสิบ เช่น เลข 2745.214 ตัวเลขที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของจุดทศนิยม เขียนอยู่ในรูปยกกำลังที่เป็นบวกของเลขสิบ ส่วนตัวเลขด้านขวามือเขียนอยู่ในรูปยกกำลังที่เป็นลบของเลขสิบ ดังนี้

$$(2 \times 10^{+3}) + (7 \times 10^{+2}) + (4 \times 10^{1}) + (5 \times 10^{0}) + (2 \times 10^{-1}) + (1 \times 10^{-2}) + (4 \times 10^{-3})$$

ระบบเลขฐานสอง เรียกสั้น ๆ ว่าเลขฐานสอง เป็นระบบที่มีค่าของตำแหน่งหรือน้ำหนักเขียนอยู่ในรูปการยกกำลังของเลขสองของดิจิต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

โดยทั่วไปแล้วดิจิตเลขฐานสอง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ มักเรียกสั้น ๆ ว่า บิต เช่น ตัวเลขฐานสองมี 4 บิต ถ้านับจากซ้ายถึงจุดไบนารี บิตทางซ้ายสุดมีน้ำหนักมากที่สุด เรียกว่า บิตที่มีความสำคัญมากที่สุด (MSB) ส่วนบิตขวามือสุดมีน้ำหนักน้อยที่สุด เรียกว่า บิตที่มีความสำคัญน้อยที่สุด (LSB)

ตัวอย่างเช่น เลข 1011.101 แต่ละตำแหน่งของเลขที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของจุดไบนารี เขียนอยู่ในรูปการยกกำลังของเลขสองที่เป็นบวก ส่วนด้านขวามือเขียนอยู่ในรูปการยกกำลังของเลขสองที่เป็นลบ

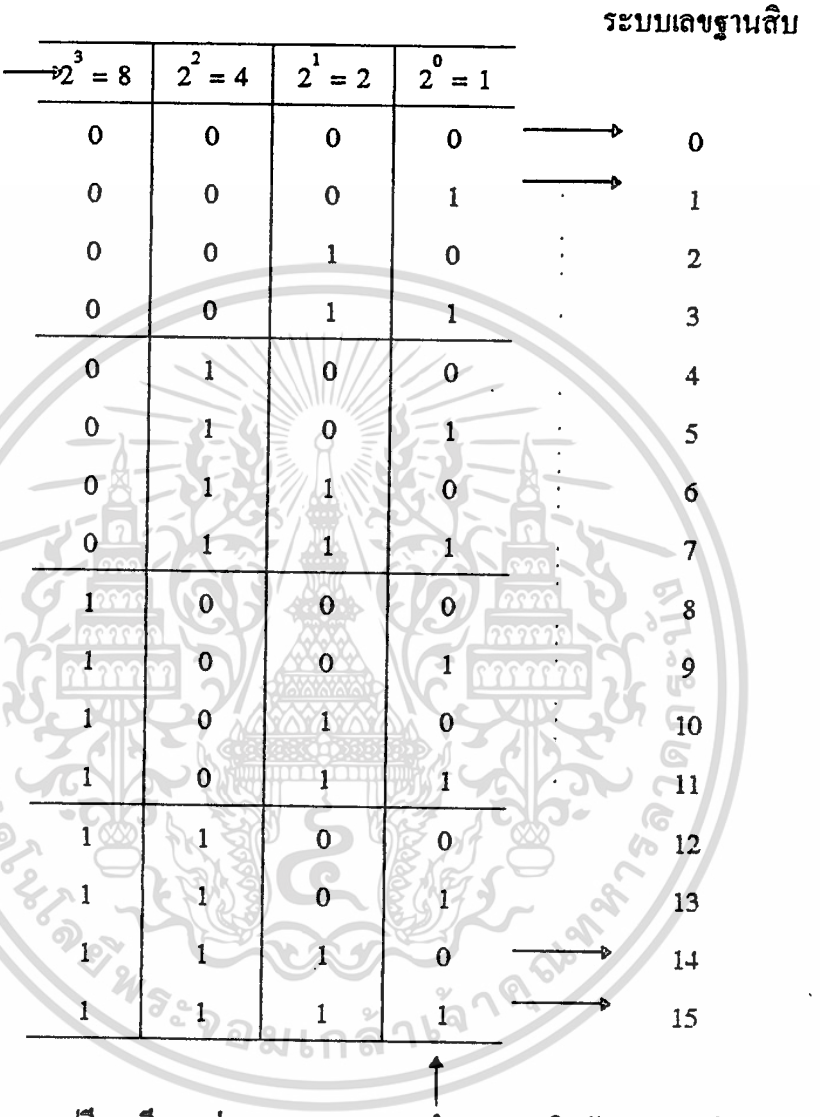
การเปลี่ยนเลขฐานสองเทียบเคียงกับเลขฐานสิบ ทำได้โดยคูณแต่ละดิจิตของเลขฐานสองที่ต้องการเปลี่ยนเป็นเลขฐานสิบนั้นด้วยน้ำหนักที่ตำแหน่ง จากนั้นนำผลที่ได้มารวมกัน เช่น เลขฐานสองในรูป 2.27 เปลี่ยนเป็นเลขฐานสิบ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 1011.101_2 &= (1 \times 2^{3}) + (0 \times 2^{2}) + (1 \times 2^{1}) + (1 \times 2^{0}) \\ &\quad + (1 \times 2^{-1}) + (0 \times 2^{-2}) + (1 \times 2^{-3}) \\ &= 8 + 0 + 0 + 1 + 0.5 + 0 + 0.125 \\ &= 11.625_{10} \end{aligned}$$

สังเกตได้ว่ามีการใส่ตัวห้อย 2 และ 10 เพื่อระบุฐานของตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถเปรียบเทียบกลุ่มของเลขฐานสองจำนวน 4 บิตกับเลขฐานสิบ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบกลุ่มของเลขฐานสองจำนวน 4 บิตกับเลขฐานสิบ [4]

2. การเปลี่ยนแปลงเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง

การเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสองทำได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1

ลำดับขั้นตอนดังนี้

(ก) นำเลขสองยกกำลังด้วยเลขใด ๆ แล้วได้ค่าไม่เกินค่าของเลขฐานสิบที่ต้องการเปลี่ยนเป็นเลขฐานสอง พร้อมทั้งกำหนดเลขฐานสองที่ตำแหน่งนั้นเป็น 1 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปลบกับเลขฐานสิบ จะได้ผลลัพธ์ในการพิจารณาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) นำเลขสองยกกำลังด้วยเลขใด ๆ แล้ว ได้ค่าไม่เกินผลลัพธ์ในข้อ (ก) แล้วนำค่าที่ได้ไปลบกับผลลัพธ์ในข้อ (ก) จะได้ผลลัพธ์ในการพิจารณาต่อไป ทำเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบจำนวน

(ค) ระหว่างทำตามขั้นตอน (ก) และ (ข) ตัวเลขที่ใช้ในการยกกำลังของเลขสองต้องเรียงลำดับอย่างเป็นขั้นตอน เช่น $2^5, 2^4, 2^3, 2^2, 2^1, 2^0$ เป็นต้น ถ้าค่าที่ได้จากการยกกำลังของเลขสองลำดับใดเกินกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการลบกัน ให้กำหนดเลขหลักนั้นเป็นศูนย์ จากนั้นให้พิจารณาการยกกำลังของเลขสองในลำดับถัดไปที่ให้ค่าไม่เกินผลลัพธ์นั้น

(ง) ถ้าได้ค่าของเลขฐานสองก่อนการเรียงลำดับของการยกกำลังของเลขสองสิ้นสุด ให้กำหนดตำแหน่งที่เหลือเป็นศูนย์

วิธีที่ 2

ทำได้โดยหารเลขฐานสิบด้วยสอง เมื่อได้ผลลัพธ์ก็นำเอาสองมาหารผลลัพธ์นั้น กระทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ ถ้าผลลัพธ์ของการหารครั้งใดเหลือเศษ 1 ให้กำหนดเลขฐานสองที่ตำแหน่งนั้นเป็น 1 แต่ถ้าผลลัพธ์ของการหารครั้งใดลงตัว หรือเศษ 0 ให้กำหนดเลขฐานสองที่ตำแหน่งนั้นเป็นศูนย์

ข้อควรจำ คือ เศษที่เกิดจากการหารครั้งแรกเป็น LSB และเศษที่เกิดจากการหารครั้งสุดท้ายเป็น MSB

3. การเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสิบ

ตำแหน่งดิจิตในระบบเลขฐานแปดซึ่งมีน้ำหนัก ดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสิบ ทำได้โดยการคูณแต่ละดิจิตของเลขฐานแปดที่ต้องการเปลี่ยนเป็นเลขฐานสิบนั้นด้วยน้ำหนักที่ตำแหน่ง จากนั้นนำผลที่ได้มารวมกัน

4. การเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานแปด

การเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานแปด ทำได้โดยการหารซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง เพียงแต่เปลี่ยนตัวหารจากเลข 2 เป็นเลข 8

5. การเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสอง

การเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสอง จะสะดวกมากถ้าเราใช้ตารางที่ 2.6 ที่แสดงค่าเทียบเคียงของระบบเลขฐานทั้งสองประกอบการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าเทียบเคียงของระบบเลขฐานแปดและเลขฐานสอง [4]

Octal Digit	0	1	2	3	4	5	6	7
Binary Equivalent	000	001	010	011	100	101	110	111

6. การเปลี่ยนเลขฐานสองเป็นเลขฐานแปด

การเปลี่ยนเลขฐานสองเป็นเลขฐานแปด ทำได้โดยการจัดกลุ่มของเลขฐานสองเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 3 บิต ดังตารางที่ 2.6 เริ่มต้นที่ LSB แล้วจึงค่อย ๆ เปลี่ยนทีละกลุ่มจนครบจำนวน

บางครั้งจัดจำนวนเลขฐานสองแต่ละกลุ่มให้ครบ 3 บิตไม่ได้ จึงแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มเลขศูนย์เข้าไปทางด้านซ้ายมือของ MSB ของเลขฐานสองกลุ่มสุดท้าย

7. การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสิบ

การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสิบ ทำได้โดยการคูณแต่ละดิจิตของเลขฐานสิบหกที่ต้องการเปลี่ยนเป็นเลขฐานสิบนั้นด้วยน้ำหนักที่ตำแหน่ง จากนั้นนำผลที่ได้มารวมกัน ค่า LSD มีน้ำหนัก $16^0 = 1$ ดิจิตลำดับสูงขึ้นมีน้ำหนัก $16^1 = 16$ และดิจิตลำดับต่อมามีค่า $16^2 = 256$ เป็นต้น

8. การเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสิบหก

คงจำได้ว่า วิธีการเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง ทำได้โดยหารซ้ำด้วยเลข 2 และการเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานแปด ทำได้โดยหารซ้ำด้วยเลข 8 ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสิบหก ก็สามารถทำได้โดยหารซ้ำด้วยเลข 16

9. การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสอง

การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสอง มีวิธีการเหมือนกับการเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสอง โดยจะใช้ตารางที่ 2.7 ประกอบการพิจารณา

ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสอง [4]

เลขฐานสิบหก	เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสอง (ต่อ) [4]

เลขฐานสิบหก	เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง
7	7	0111
8	8	1000
9	9	1001
A	10	1010
B	11	1011
C	12	1100
D	13	1101
E	14	1110
F	15	1111

10. การเปลี่ยนเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบหก

การเปลี่ยนเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบหก ทำได้โดยแบ่งกลุ่มของเลขฐานสองเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 4 บิต จากนั้นจึงเปลี่ยนแต่ละกลุ่มเป็นดิจิตของเลขฐานสิบหก กรณีที่ไม่สามารถจัดกลุ่มเลขฐานสองแต่ละกลุ่มให้ครบ 4 บิต ต้องเพิ่มเลข 0 ทางด้านซ้ายสุดเพื่อให้แต่ละกลุ่มมี 4 บิตเท่ากัน

2.12 รหัส

รหัสมีมากมายหลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวถึงรหัสที่มีความสำคัญในระบบดิจิตอล ได้แก่ รหัส BCD รหัสเพิ่ม 3 รหัสเกรย์ และรหัสแอสกี

2.12.1 รหัส BCD

โดยทั่วไปมักใช้เลขฐานสองกับการทำงานในระบบดิจิตอลและใช้เลขฐานสิบในการแสดงค่า ดังนั้นการทำงานและการแสดงค่าของระบบดิจิตอล จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงระบบของเลขฐานทั้งสองนี้ แต่เมื่อตัวเลขภายในระบบดิจิตอลมีจำนวนมาก ๆ การเปลี่ยนระหว่างเลขฐานสิบกับเลขฐานสองย่อมซับซ้อนและใช้เวลานานขึ้น ปัญหาดังกล่าวจะลดลงเมื่อใช้รหัส BCD

รหัส BCD (Binary Coded Decimal เรียกสั้น ๆ ว่า BCD) เป็นรหัสที่ประกอบด้วยกลุ่มของตัวเลขฐานสองจำนวน 4 บิต สำหรับเลขฐานสิบแต่ละดิจิต (คือเลข 0 ถึง 9) ดังตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า แต่ละดิจิตของเลขฐานสิบแทนได้ด้วย BCD ที่ประกอบขึ้นจากเลขฐานสองจำนวน 4 บิต

ตารางที่ 2.8 รหัส BCD (Binary Coded Decimal) และรหัสเพิ่ม 3 [4]

เลขฐานสิบ	BCD	Excess-3
0	0000	0011
1	0001	0100
2	0010	0101
3	0011	0110
4	0100	0111
5	0101	1000
6	0110	1001
7	0111	1010
8	1000	1011
9	1001	1100

เมื่อนำตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า มีกลุ่มตัวเลขฐานสองจำนวน 6 กลุ่มที่ไม่ได้ใช้ใน BCD ซึ่งได้แก่ 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 และ 1111

ถ้าผลลัพธ์เป็นกลุ่มตัวเลข 6 กลุ่ม ที่ไม่ได้ใช้ใน BCD หรือมีกลุ่มตัวเลขนอดเหนือจากเลขฐานสองในตารางที่ 2.8 แสดงว่าเกิดความคลาดเคลื่อน

2.12.2 การเปรียบเทียบระหว่าง BCD กับรหัสเลขฐานสอง

ในการแสดงค่าแต่ละดิจิตของเลขฐานสิบที่เป็นค่าเดียวกัน รหัสเลขฐานสองใช้จำนวนบิตน้อยกว่า BCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการและการออกแบบ

ในการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมพีเอชคงที่ จะต้องมีการสร้างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจากเครื่องพีเอชมิเตอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดกับค่าที่ตั้งไว้ แล้วนำค่าสัญญาณเปรียบเทียบที่ได้ไปใช้ในการควบคุมปริมาณของกรดหรือเบสที่จะเติมลงในสารละลาย เพื่อควบคุมค่าพีเอชให้คงที่และได้ค่าตามต้องการ ซึ่งในการสร้างวงจรเปรียบเทียบนั้นจะต้องอาศัยหลักการทำงานของออปแอมป์มาประยุกต์ใช้

3.1 การประยุกต์ใช้งานออปแอมป์

การประยุกต์ใช้งานออปแอมป์มีมากมายไม่สิ้นสุด จนกระทั่งออปแอมป์เป็นไอซีที่เด่นมากในไอซีจำพวกลิเนียร์ไอซี เพราะสามารถสร้างวงจรต่าง ๆ ได้มาก สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้ออปแอมป์มีที่ใช้กันมากคือออปแอมป์มีราคาถูก

การต่อวงจรพื้นฐานของออปแอมป์...

3.1.1 การขยายแบบกลับเฟส

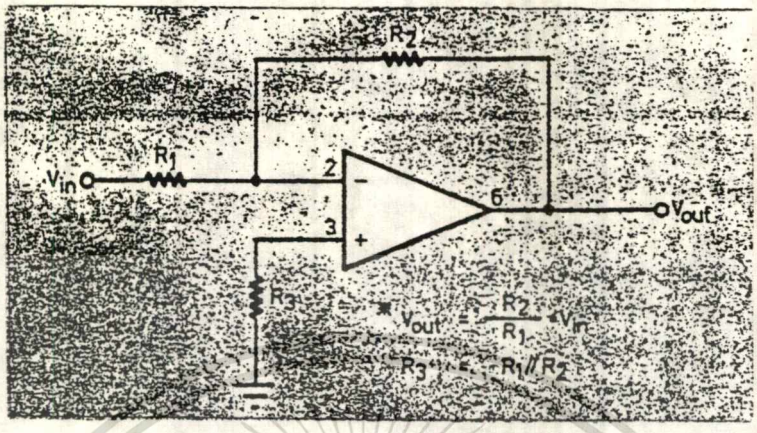
วงจรพื้นฐานของการขยายสัญญาณแบบกลับเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ในวงจรนี้มีอัตราขยายปิดลูป เท่ากับ R_2/R_1 อัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังขยายของอัตราขยายเปิดลูป ค่า Z_{in} จะมีค่าเท่ากับ R_1 แถบความกว้าง (BW) ของอัตราขยายปิดลูปจะมีค่าเท่ากับความถี่กำลังขยายที่เป็นหนึ่งหารด้วยอัตราขยายปิดลูป

ข้อควรระวังที่ควรจะสังเกต คือ

1. R_3 ควรจะเลือกค่าเท่ากับ R_1 ขนานกับ R_2 เพื่อที่จะลดค่าคลาดเคลื่อนของแรงดันออฟเซทซึ่งเกิดจากกระแสไบแอส

2. ค่าแรงดันออฟเซทที่เอาท์พุทของออปแอมป์ จะมีค่าเท่ากับอัตราขยายปิดลูปคูณกับแรงดันออฟเซทที่อินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การขยายแบบกลับเฟส [5]

ค่าคลาดเคลื่อนออฟเซทที่อินพุทของออปแอมป์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ แรงดันอินพุทออฟเซท และกระแสอินพุทไบแอส ค่าแรงดันออฟเซทที่อินพุทของออปแอมป์อาจจะถูกกำหนดไว้ตายตัว ถึงอย่างไรก็ตามผลอันเนื่องมาจากกระแสอินพุทไบแอสก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจองวงจรที่ใช้ สำหรับการลดค่าแรงดันออฟเซทของออปแอมป์ที่อินพุทให้น้อยที่สุดโดยปราศจากการปรับค่าในวงจรนั้นทำได้โดยให้ค่าความต้านทานที่ต่อที่ขาอินพุทของทั้ง 2 อินพุทมีค่าเท่ากัน ในกรณีนี้ค่ามากที่สุดของแรงดันตกคร่อมระหว่างความต้านทานของแหล่งกำเนิดซึ่งเกิดจากกระแสออฟเซท โดยปกติแรงดันออฟเซทซึ่งจะเป็นเทอมที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าในกรณีที่ค่าความต้านทานของแหล่งกำเนิดที่มีค่าต่ำ และกระแสออฟเซทจะเกิดความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความต้านทานของแหล่งกำเนิดมีค่าสูง

ในการประยุกต์ควรให้ค่าความต้านทานที่ต่อขาอินพุททั้งสองมีค่าสูง และค่าแรงดันออฟเซทของออปแอมป์ที่เอาท์พุทอาจจะปรับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า R_3 โดยใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมระหว่าง R_3 คล้าย ๆ กับเป็นตัวจัดแรงดันออฟเซทที่อินพุท ค่าแรงดันออฟเซทของออปแอมป์ที่เอาท์พุทไม่ค่อยจะมีความสำคัญเท่าไรนัก ในกรณีที่ใช้การประยุกต์แบบการคัปปลิ้งสัญญาณไฟสลับ ในที่นี้สิ่งที่นำมาพิจารณาก็คือ แรงดันออฟเซทใด ๆ ที่เอาท์พุทจะลดความเป็นเส้นตรงจากจุดสูงสุดถึงต่ำสุดของการแกว่งของเอาท์พุทของวงจรขยาย

คุณสมบัติของอัตราขยายความถี่ของออปแอมป์ และการป้อนกลับของวงจรจะต้องไม่ทำให้เกิดการออสซิลเลท และการป้อนกลับจะต้องไม่ทำให้เฟสเลื่อนเกิน 180° สำหรับทุก ๆ ความถี่ ซึ่งจะต้องทำให้กำลังขยายของออปแอมป์และวงจรป้อนกลับของมันมีค่ามากกว่าหนึ่ง ในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

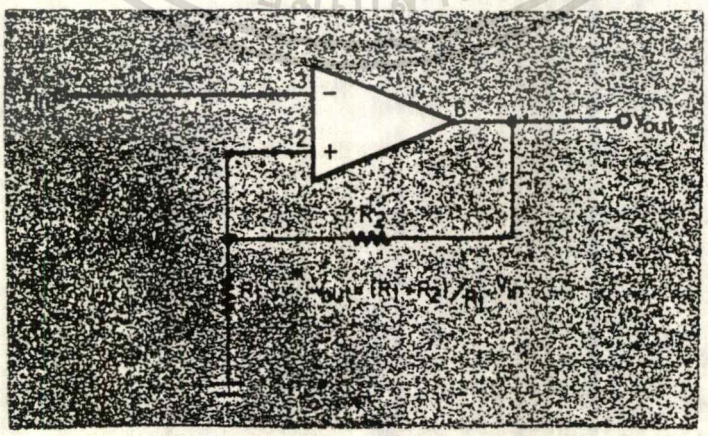
ปฏิบัติการเคลื่อนเฟสไม่ควรจะเข้าใกล้ 180° เพราะว่าจะเป็นการทำให้เสถียรภาพของภาวะที่กำหนดเข้าใกล้จุดวิกฤตของการออสซิลเลท

ออปแอมป์ที่ไม่มีการชดเชยภายในอาจจะนำมาใช้เพื่อให้การบั่นทอนของวงจรป้อนกลับมีค่าสูงได้ ดังตัวอย่างเช่น ไอซีเบอร์ LM101A อาจจะทำงานเป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยายเป็น 1 ในวงจรขยายแบบกลับเฟสโดยใช้ตัวเก็บประจุการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 15 pF เพราะว่าวงจรป้อนกลับมีค่าการบั่นทอนเท่ากับ 6 เดซิเบล ในขณะเดียวกันถ้าใช้ค่า 30 pF สำหรับกำลังขยายเป็น 1 แบบไม่ป้อนกลับ จะทำให้วงจรป้อนกลับมีอัตราการบั่นทอนเท่ากับศูนย์ เนื่องจากอัตราสลูของออปแอมป์ขึ้นอยู่กับการชดเชย ดังนั้นค่าอัตราสลูของ LM101A ในการต่อให้อัตราขยายเป็นหนึ่งแบบกลับเฟสจะมีค่าเป็นสองเท่าของการต่อแบบไม่กลับเฟส การชดเชยด้วยการต่อวงจรพิเศษแก้เสถียรภาพและแถบความกว้างชดเชยที่ใช้ยิ่งมีค่ามากจะทำให้ค่าของเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

3.1.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 3.2 เป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ซึ่งจะมีค่าความต้านทานอินพุทที่สูงและอัตราขยายปิดลูปของวงจรจะมีค่าเท่ากับผลรวมของ R_1 และ R_2 หารด้วย R_1 และช่วงกว้างทางความถี่ที่ 3 เดซิเบลจะมีค่าเท่ากับความถี่ที่อัตราขยายเป็นหนึ่งของออปแอมป์หารด้วยกำลังขยายปิดลูป

ข้อแตกต่างอันดับแรกระหว่างการต่อวงจรแบบนี้กับการต่อวงจรแบบกลับเฟส คือ เอาท์พุทจะมีลักษณะเหมือนกับทางอินพุท และยังมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างของอินพุทอิมพีแดนซ์คูณด้วยอัตราขยายปิดลูป ในการประยุกต์เกี่ยวกับการคัปปลิ้งนั้น ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ไม่ค่อยจะมีความสำคัญเท่าไรเมื่อเทียบกับกระแสอินพุทและแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานของแหล่งกำเนิดแล้ว



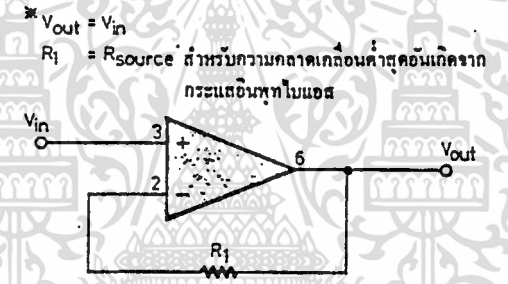
รูปที่ 3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

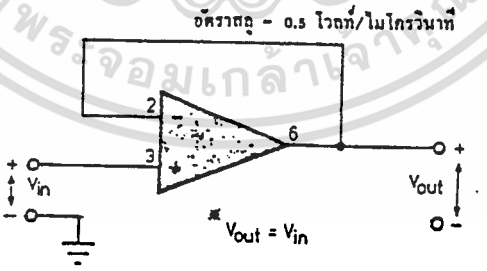
ข้อควรระวังในการใช้งานสำหรับออปแอมป์แบบนี้ก็เหมือนกับของการขยายแบบกลับเฟส แต่มีข้อยกเว้นอยู่ข้อหนึ่ง คือ เอาท์พุทของออปแอมป์จะเข้าไปอยู่ในย่านการอิ่มตัวถ้าอินพุทเกิดการลอย และจะเป็นสิ่งที่สำคัญมากถ้าออปแอมป์นั้นต้องสวิทช์จากแหล่งจ่ายไฟหนึ่งไปยังอีกแหล่งจ่ายไฟหนึ่ง ส่วนการชดเชยที่ใช้ในวงจรขยายแบบกลับเฟส จะมีผลนำมาใช้ได้ในการต่อวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

3.1.3 วงจรบัฟเฟอร์

วงจรขยายแรงดันมักจะพบใช้อยู่เสมอ คือเป็นวงจรบัฟเฟอร์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่เกิดจากการบั่นทอนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ และเพื่อแยกความต้านทานของแหล่งกำเนิดที่มีค่าสูงดังรูปที่ 3.3 อัตราขยายของวงจรนี้เป็นหนึ่ง เอาท์พุทจะเป็นไปตามอินพุท ดังนั้นจึงได้ชื่อว่า วงจรขยายแรงดันตาม วงจรขยายบัฟเฟอร์ดังรูปที่ 3.3 ให้ค่าอินพุทอิมพิแดนซ์มากที่สุด



รูปที่ 3.3 ก แบบการต่อวงจรบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเป็น 1 [5]



รูปที่ 3.3 ข แบบวงจรขยายแรงดันตามที่มีอัตราขยายเป็น 1 [5]

ข้อควรระวัง 3 ประการที่ควรจะสังเกตในการประยุกต์วงจรรูปที่ 3.3 คือ

1) วงจรขยายจะต้องชดเชยความถี่ สำหรับการทำงานที่อัตราขยายเป็น 1

2) การสวิงของเอาท์พุทของวงจรขยายจะต้องถูกกำหนด โดยช่วงของสัญญาณเฟสร่วมของวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) วงจรขยายบางตัวจะแสดงลักษณะแรงดันค้างเมื่อช่วงของสัญญาณเฟสร่วมของวงจรขยายมีค่าเกินกว่าที่กำหนด (ถ้าอินพุททรานซิสเตอร์ที่จุดอินเวอร์ติ้งอินพุทอิ่มตัว ดังนั้นอินพุทที่ไปยังทรานซิสเตอร์นี้จะถูกป้อนโดยตรงไปยังวงจรคอลเลคเตอร์ของมันเองผ่านรอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส ดังนั้นอินเวอร์ติ้งอินพุทจะกลายเป็นนอนอินเวอร์ติ้งไปโดยปริยาย และถ้าเราจำกัดค่าของโหมดร่วมมีค่าเกินกว่าที่กำหนดไว้ผลอันนี้จะทำให้เกิดการป้อนกลับแบบบวก เป็นผลให้เกิดการอิ่มตัวในวงจรขยาย หรือที่เรียกว่า การค้าง (แลทช์)

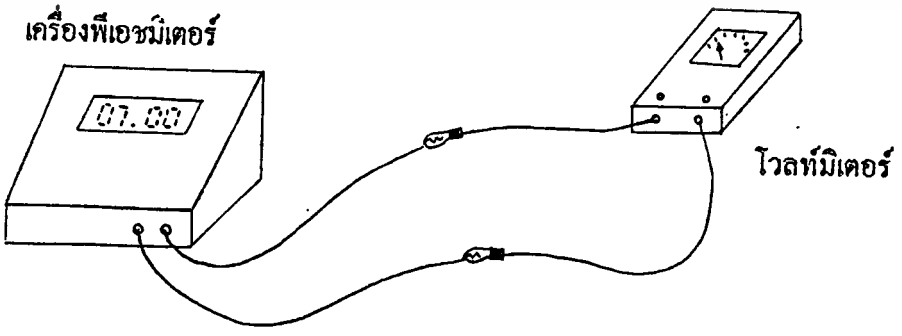
3.2 วิธีการสร้างสเกล

เนื่องจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าดังกล่าว จะเป็นการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดค่าเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์กับค่าสัญญาณที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองโดยเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง เพื่อดูลักษณะของแนวโน้มและช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันว่าเป็นไปในลักษณะใด แล้วนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการสร้างสเกลของมิเตอร์เพื่อใช้ในการตั้งค่าพีเอช

1. นำ probe จุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ แล้ววัดค่าพีเอชและค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์

2. ทำการเติมกรดหรือเบสลงไปในสารละลาย (เพื่อให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง) วัดค่าพีเอชและค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์

เนื่องจากเครื่องพีเอชมิเตอร์ทั่วไป จะมีเอาท์พุทที่ใช้ควบคุมการทำงานของเพ็นพลอทอยู่ จึงสามารถนำเอาท์พุทนี้มาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างสเกลได้ ซึ่งทำการประกอบเครื่องมือเพื่อวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ ได้ดังรูป



รูปที่ 3.4 การประกอบเครื่องมือเพื่อวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวิธีการทดลองดังกล่าว จะต้องทำการเติมกรดหรือเบสลงไปในสารละลาย เพื่อให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนหลาย ๆ ค่า แล้วทำการวัดค่าพีเอชและค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ จึงต้องมีการเตรียมสารละลายหลาย ๆ ครั้ง เป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีและทำให้ไม่สะดวกในการทดลองและเกิดความล่าช้า เพราะการทดลองแต่ละครั้งจะต้องใช้เวลานานในการเติมกรดหรือเบส เพื่อให้ได้ค่าพีเอชถูกต้องตามที่ต้องการ อีกทั้งวิธีดังกล่าวก็เกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นจึงได้อาศัยหลักการถ่ายเทประจุของอิเลกตรอนของ probe มาใช้ในการสร้าง probe จำลองขึ้นแทนการใช้สารเคมีโดยตรง

3.2.1 การสร้าง probe จำลอง

การสร้าง probe จำลอง จะอาศัยหลักการของการให้ประจุและการคายประจุอิเลคตรอนของ probe มาใช้ในการสร้างวงจรทางไฟฟ้าเพื่อจำลองการทำงานของ probe ขึ้น ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าพีเอชไปมาได้ตามต้องการ

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าของ probe จำลอง จะต้องทราบถึงแนวโน้มของค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ว่าอยู่ในช่วงใด เพื่อใช้เป็นแนวทางเปรียบเทียบในการสร้างวงจรไฟฟ้า โดยทำการทดลองวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ได้จากการปรับค่าพีเอชจากตัวเครื่องพีเอชมิเตอร์เอง ซึ่งทำการประกอบเครื่องมือในการวัดได้ ดังรูปที่ 3.4 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการปรับค่าพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ค่าแรงดันที่ได้จากการปรับค่าพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์ (มิลลิโวลท์)
0	416
1	355
2	295
3	237
4	178.3
5	118
6	59.7
7	-0.3
8	-59.3
9	-117.7

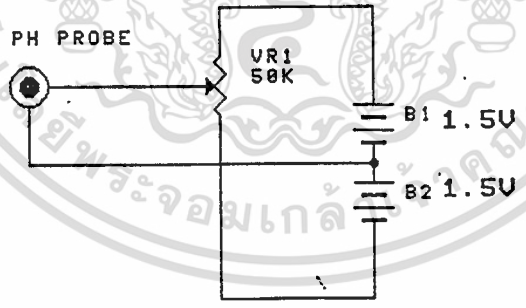
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการปรับค่าพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (ต่อ)

ค่าพีเอช	ค่าแรงดันที่ได้จากการปรับค่าพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์ (มิลลิโวลท์)
10	-177.5
11	-237
12	-297
13	-356
14	-415

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันที่ได้จากการปรับพีเอชของเครื่องพีเอชมิเตอร์จะอยู่ในช่วง -415 mV ถึง 416 mV จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าของ probe จำลองได้ โดยใช้ถ่านไฟฉายจำนวน 2 ก้อน ซึ่งมีแรงดันก้อนละ 1.5 V มาต่ออนุกรมกัน และต่อตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ให้อยู่ในตำแหน่งระหว่างถ่านไฟฉาย 2 ก้อน เพื่อใช้ปรับให้แรงดันมีค่าเป็นบวกหรือลบได้ตามต้องการ

วงจรไฟฟ้าของ probe จำลองจะเป็นดังรูป



รูปที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าของ probe จำลอง

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าในวงจรไฟฟ้าของ probe จำลอง ค่าแรงดันจะมีค่าทั้งบวกและลบ และจะมีตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นในการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ กัน จะใช้ probe จำลองเป็นตัวปรับค่าพีเอชแทนการใช้สารละลายกรดหรือเบสหยดลงในสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยทำการปรับตัวต้านทานในวงจรเพื่อปรับค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงตามต้องการ (เนื่องจากค่าแรงดันเปลี่ยนแปลง) ทำให้ไม่ต้องผสมสารเคมีโดยตรง ไม่สิ้นเปลืองสารเคมี การทดลองมีความเที่ยงตรง สะดวก และรวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำ probe จำลองที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลองวัดค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ กัน จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่ได้จากการปรับพีเอชของ probe จำลองที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ค่าแรงดันที่ได้จากการปรับพีเอชของ probe จำลอง (มิลลิโวลท์)			ค่าแรงดันเฉลี่ย (มิลลิโวลท์)	ผลต่างแรงดัน (มิลลิโวลท์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	410	412	411	411	59.67
1	350	352	352	351.33	59.33
2	292	292	292	292	57.67
3	235	235	233	234.33	55.66
4	176.6	179.3	180.1	178.67	60.94
5	118.5	118.2	116.5	117.73	57.06
6	60.8	60.5	60.7	60.67	61
7	-0.7	0.2	-0.5	-0.33	61
8	-62.5	-60.3	-61.2	-61.33	61
9	-117.7	-118.6	-118.7	-118.33	57
10	-177	-181	-180.3	-179.43	61.1
11	-236	-235	-236	-235.67	56.24
12	-295	-294	-295	-294.67	59
13	-354	-354	-352	-353.33	58.66
14	-410	-414	-411	-411.67	58.34

ต้องการนำข้อมูลที่ได้จากตารางมาใช้เป็นระดับแรงดันอ้างอิงในการสร้างตัวเปรียบเทียบแรงดันว่าควรอยู่ในช่วงใด

จากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์จะอยู่ในช่วง -411.67 mV ถึง 411 mV และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย จะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ คืออยู่ในช่วง 55-61 mV กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงเป็นความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลจากตารางมาใช้ในการออกแบบระดับแรงดันเปรียบเทียบ เพื่อใช้ในการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่ทำการทดลอง ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการควบคุมค่าพีเอช ให้มีค่าเท่ากับ 6 จะต้องสร้างแรงดันให้มีค่าเท่ากับ 60.67 mV (ดังตารางที่ 3.2) เป็นต้น

3.2.2 ขั้นตอนในการสร้างสเกล

1. ปรับค่าพีเอชของ probe จำลองไปที่ full scale ทางด้านขวา คือค่าพีเอชเท่ากับ 14 แล้วทำการปรับเข็มของมิเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่ง full scale พอดี ทำเครื่องหมายไว้

2. ในทำนองเดียวกัน ทำการปรับค่าพีเอชของ probe จำลองไป full scale ทางด้านซ้าย คือที่พีเอชเท่ากับ 0 แล้วทำการปรับเข็มของมิเตอร์ให้อยู่ตรงตำแหน่ง full scale ทางซ้าย ทำเครื่องหมายไว้

3. ปรับค่าพีเอชของ probe จำลองไปที่พีเอชเท่ากับ 7 ปรับเข็มมิเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางสเกลพอดี ทำเครื่องหมาย

4. ปรับค่าพีเอชของ probe จำลองค่าละ 1.0 เพื่อทำการสร้างสเกลอย่างหยาบ

5. ทำการปรับค่าพีเอชของ probe จำลองค่าละ 0.5 เพื่อสร้างเป็นสเกลละเอียด

6. ปรับค่าพีเอชของ probe จำลองให้ได้ครบทุกค่า เขียนสเกลให้สมบูรณ์

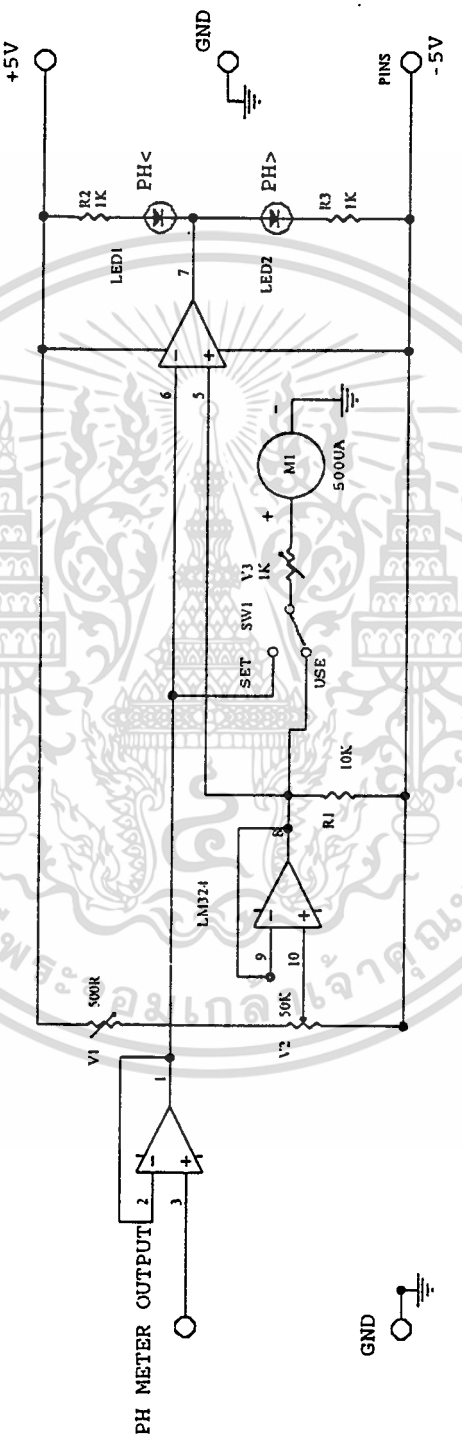
เมื่อทำการสร้าง probe จำลอง เพื่อทำการวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ และสร้างสเกลของมิเตอร์ที่จะใช้เป็นตัวตั้งค่าสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าครบทุกขั้นตอนแล้ว จะสามารถสร้างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าได้

จากรูปที่ 3.6 ค่าสัญญาณเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์จะผ่านออปแอมป์ซึ่งต่อเป็นวงจรบัฟเฟอร์ ซึ่งทำหน้าที่เลียนแบบสัญญาณเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์มายังวงจรเปรียบเทียบโดยไม่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อสัญญาณเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์ จึงไม่ทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุทตก สัญญาณที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ โดยใช้ออปแอมป์ซึ่งมีขาบนต่อกับค่าแรงดันอินพุทที่เป็นบวก และขาล่างต่อกับค่าแรงดันอินพุทที่เป็นลบ ส่วนขากลางจะมีตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ โดยมีตัว volume เป็นตัวปรับค่า

ในการเปรียบเทียบจะใช้ LED เป็นตัวแสดงผล ถ้าค่าสัญญาณของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันที่ตั้งไว้ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่เอาท์พุทของออปแอมป์ กล่าวคือ หลอด LED1 จะติดสว่าง ถ้าค่าสัญญาณของเครื่องพีเอชมิเตอร์ที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าแรงดันที่ตั้งไว้ จะเกิดกระแสไหลออกจากเอาท์พุทของออปแอมป์ กล่าวคือ หลอด LED2 จะติดสว่าง และจากหลักการดังกล่าว สามารถนำค่าสัญญาณเปรียบเทียบที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมปริมาณของกรดหรือเบสที่จะเติมลงในสารละลาย เพื่อควบคุมให้ค่าพีเอชมีค่าคงที่ตามต้องการได้

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้า มีลักษณะดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

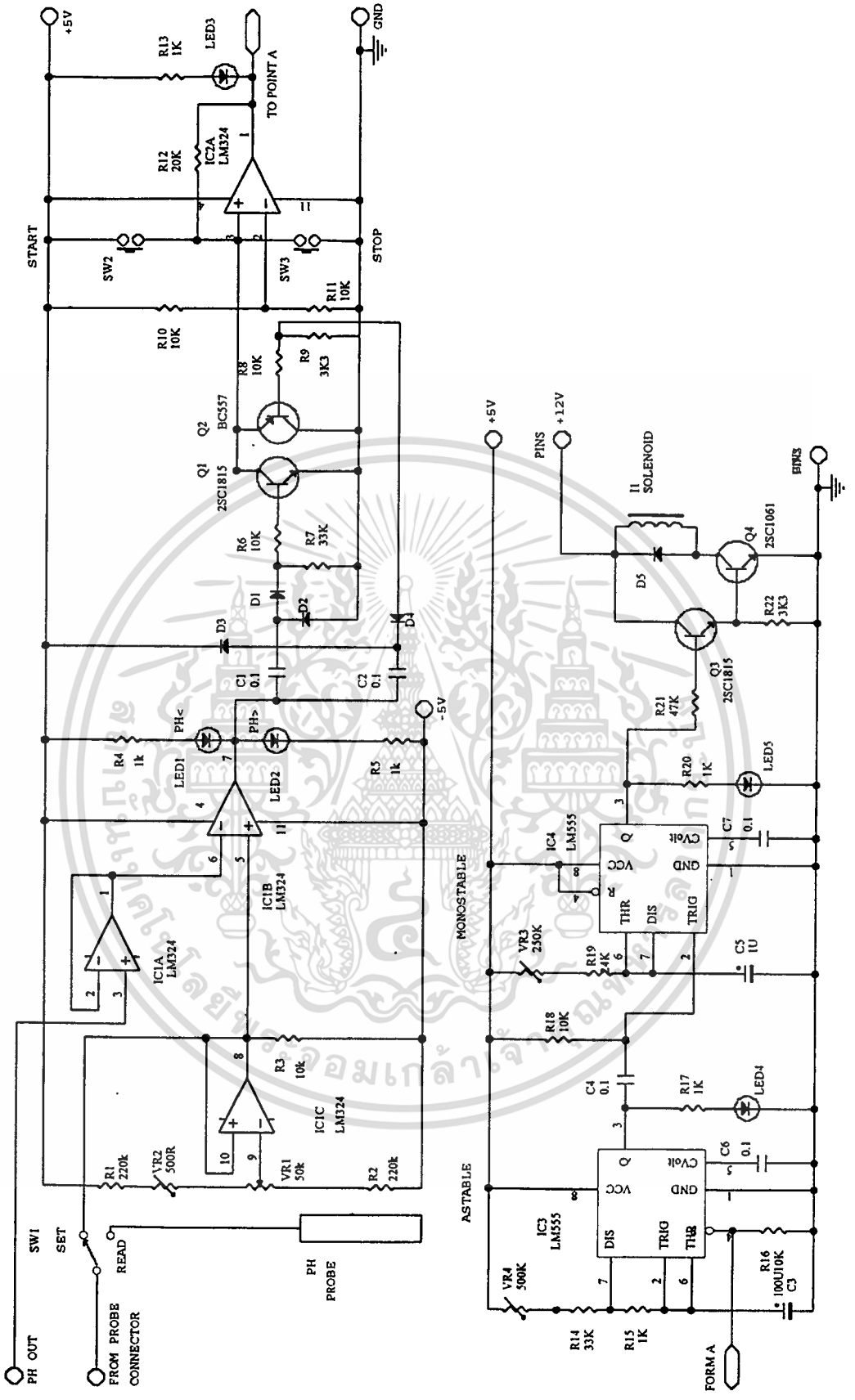
สำหรับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 มีส่วนที่สำคัญอื่น ๆ อีก คือ

- ภาคจ่ายไฟ ใช้ในการควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ คือ 5 โวลท์
- คอนเดนเซอร์ เป็นตัวกรองไฟให้เรียบเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ซึ่งมีอยู่ 2 ตัว คือ คอนเดนเซอร์ขนาด 0.1 คูลอมบ์ และ 100 คูลอมบ์
- ตัวต้านทาน 25 รอบ ใช้เพื่อให้ตัวปรับค่าสามารถปรับค่าได้ละเอียดยิ่งขึ้น

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.6 ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้เป็นระบบควบคุมของเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ และเพื่อความสะดวกยิ่งขึ้นจึงอาศัยหลักการทำงานของเครื่องพีเอชมิเตอร์ และทำการดัดแปลงวงจรเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าให้สามารถอ่านค่าพีเอชได้จากจอแสดงผลของเครื่องพีเอชมิเตอร์ วงจรทั้งหมดของระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 3.7

จากรูป สวิทช์ SW1 จะทำหน้าที่เลือกค่าสัญญาณจาก Probe หรือจุดอ้างอิง ที่ตำแหน่ง Set ระดับสัญญาณความต่างศักย์จะถูกส่งจากวงจรดีไวเดอร์ VR1 เพื่อนำไปแสดงผลบนจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์ โดยที่ระดับสัญญาณความต่างศักย์นี้จะถูกใช้เป็นแรงดันอ้างอิงของ IC1C โดยออกจากขา 8 เพื่อไปยังขา 5 ของ IC1B สำหรับค่าสัญญาณที่ได้จากเอาท์พุทของเครื่องพีเอชมิเตอร์จะถูกส่งผ่าน IC1A ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ โดยออกจากขา 1 ไปยังขา 6 ของ IC1B จากนั้นระดับความต่างศักย์ระหว่างขา 5 กับขา 6 จะถูกนำมาเปรียบเทียบและแสดงผลผ่านขา 7 ของ IC1B เมื่อค่าพีเอชที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ผลของสัญญาณจะถูกส่งผ่านหลอดไฟ LED1 ทำให้ LED 1 ติดสว่าง และถ้าค่าพีเอชอ่านได้มากกว่าค่าที่ตั้งไว้จะทำให้หลอดไฟ LED 2 ติดสว่าง ผลของสัญญาณที่ปรากฏออกมาทางขา 7 จะถูกนำไปใช้ทำการควบคุมปริมาณการเติมสารละลาย (ไตแตรนท์) โดยเมื่อกดปุ่ม Start จะทำให้ขา 1 ของ IC2A แสดงสถานะเป็น High และจากจุดนี้จะนำไปควบคุมขา 4 ของ IC3 ซึ่งเป็นแอสเตเบิล และทำหน้าที่ในการควบคุมการเปิด-ปิดของโซลีนอยด์เพื่อใช้ในการควบคุมการหยดสารละลายตั้งแต่ 0.5 ถึง 30 วินาที โดยค่านี้จะสามารถตั้งได้จาก VR4 สำหรับสัญญาณเอาท์พุทของ IC3 จะออกทางขา 3 และผ่านตัวเก็บประจุ C4 ไปยังขา 2 ของ IC4 ซึ่งเป็นโมโนสเตเบิล VR3 จะเป็นตัวปรับเพื่อตั้งเวลาการทำงานของโซลีนอยด์ โดยที่ถ้าให้โซลีนอยด์อยู่ในสถานะ On นานจะทำให้ปริมาณของสารละลายถูกปล่อยลงมามากขึ้น เมื่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเข้าใกล้ค่าที่ได้ตั้งไว้จนกระทั่งเท่ากันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับแรงดันที่ขา 7 ของ IC1B โดยระดับสัญญาณจะเปลี่ยนค่าจากลบไปเป็นบวกและผ่าน C1 ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสถานะการเปลี่ยนแปลงของขา 7 และผ่าน D1 ไปยัง Q1 ทำให้ Q1 ทำงาน ศักดาที่ขา 3 ของ IC2A จะตกลงต่ำกว่าที่ขา 2 ของ IC2A ทำให้ IC2A หยุดทำงาน สำหรับกรณีที่ระดับการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรไฟฟ้าของระบบควบคุมภายในเครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณของแรงดันจากขา 7 ของ IC1B เปลี่ยนจากค่าบวกเป็นลบ จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน C2 และ D4 ทำให้ Q2 ทำงาน ศักดาที่ขา 3 ของ IC2A จะตกลงต่ำกว่าขา 2 และมีผลทำให้ IC2A หยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

ลำดับวิธีการใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์

ก. การวัดค่าพีเอชของสารละลาย

1. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน กรณีวัดค่าพีเอชในช่วงที่สารละลายเป็นกรดใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 4 ส่วนกรณีที่วัดค่าพีเอชในช่วงที่สารละลายเป็นเบสใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 9

2. ปรับ temperature potentiometer ให้ตรงกับขีดอุณหภูมิตามอุณหภูมิของสารละลายที่ต้องการวัด

3. ปรับศูนย์ โดยจุ่มปลายอิเลคโทรดลงในสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานพีเอชเท่ากับ 7 แล้วปรับ buffer potentiometer ให้อ่านค่าได้เท่ากับ 7.0 แล้วนำอิเลคโทรดออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาดและใช้กระดาษทิชชูเช็ดกระเปาะแก้ว

4. ปรับ slope โดยจุ่มปลายอิเลคโทรดลงในสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานตัวที่สอง (สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานค่าพีเอชเท่ากับ 4 กรณีที่วัดสารละลายกรด และสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานค่าพีเอชเท่ากับ 9 กรณีที่วัดสารละลายเบส) ปรับ slope potentiometer ให้อ่านค่าตรงกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่เลือกใช้

5. นำอิเลคโทรดล้างน้ำกลั่นให้สะอาด จากนั้นนำอิเลคโทรดจุ่มในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าพีเอช รอให้ตัวเลขแสดงค่าจนกว่าจะคงที่ แล้วอ่านค่าจากจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์

ข. การวัดค่าความต่างศักย์ของสารละลาย (มิลลิโวลท์)

1. ทำการแคลิเบรทเครื่องพีเอชมิเตอร์ตามวิธีการวัดค่าพีเอชของสารละลาย

2. เลื่อน SW ในตำแหน่ง stand by แล้วปรับ buffer potentiometer ให้อ่านค่าได้ 0.00 มิลลิโวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จุ่มปลายอิเลคโทรดในสารละลายอย่าง แล้วเปลี่ยนตำแหน่งสวิทซ์ไปที่ mV อ่านค่ามิลลิโวลท์จากจอแสดงตัวเลขของเครื่องพีเอชมิเตอร์

หมายเหตุ :

1. ขณะทำการวัดให้เปิดฝาจุกยางที่ข้างกระเปาะอิเลคโทรดเพื่อให้ Internal fill ไหลถึงกับเมมเบรน มิฉะนั้นค่าที่อ่านได้จะไม่ถูกต้อง

2. ขณะทำการวัดควรรอเวลาให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Internal fill กับสารละลายตัวอย่างแลกเปลี่ยนอิออนถึงสมดุลก่อน ระยะเวลารอให้ค่าที่แสดงผลคงที่ขึ้นอยู่กับความว่องไวของอิเลคโทรด

ข้อจำกัดของการทดลอง

1. สารละลายที่ใช้ในการทดลอง คือ สารละลาย 0.5% HCl และ 0.2 M NaOH

2. ปริมาตรมากที่สุดของกระบอกฉีดสำหรับบรรจุสารไตแตรนท์คือ 35 มิลลิลิตร

3. ปริมาตรของบีกเกอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ 250 มิลลิลิตร

4. เนื่องจากออกแบบให้มีการควบคุมปริมาณของสารไตแตรนท์โดยใช้โซลีนอยด์เป็นตัวควบคุม และมีกระบอกฉีดสำหรับบรรจุสารไตแตรนท์ 1 กระบอก ดังนั้นในการทดลองจึงต้องเลือกทำการทดลองเพียงกรณีเดียว คือ

- กรณีที่ค่าพีเอชที่กำหนดสูงกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่าง (ใช้สารละลาย NaOH เป็นไตแตรนท์ และใช้สารละลาย HCl เป็นสารละลายตัวอย่าง) หรือ

- กรณีที่ค่าพีเอชที่กำหนดต่ำกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่าง (ใช้สารละลาย HCl เป็นไตแตรนท์ และใช้สารละลาย NaOH เป็นสารละลายตัวอย่าง)

5. ในการทดลองให้ถือว่าไม่เกิดการออสซิเลท (เนื่องจากข้อจำกัดในข้อ 3)

6. กำหนดให้ความเร็วของเครื่องคนกวนมีค่าคงที่ คือ 800 รอบ/นาที

ตอนที่ 1 ค่าพีเอชที่กำหนดสูงกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่าง

1. เตรียมสารละลาย 0.5% HCl และ 0.2 M NaOH

2. วัดค่าพีเอชของสารละลายทั้งสอง คือ 0.5% HCl และ 0.2 M NaOH ซึ่งวัดได้เท่ากับ 3.2 และ 11.7 ตามลำดับ

3. นำสารละลาย NaOH ที่เตรียมไว้ใส่ลงในกระบอกฉีดเพื่อใช้เป็นสารไตแตรนท์ปรับค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง (ในที่นี้คือ สารละลาย HCl)

4. นำสารละลาย HCl ที่เตรียมไว้แบ่งใส่บีกเกอร์จำนวน 12 ใบ สำหรับทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งค่าพีเอชที่ต้องการควบคุมโดยปรับสวิทช์ของตัวควบคุมไปยังตำแหน่ง Set และปรับหมุนปุ่มเพื่อกำหนดค่าพีเอชที่ต้องการจะควบคุม ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยตั้งค่าไว้ 4 ค่า คือ 5.0, 6.6, 8.2 และ 10.1 ค่าที่ตั้งไว้จะสังเกตได้จากจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์

6. เริ่มทำการทดลองโดยปรับอัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH ประมาณ 12 หยด/นาที ปรับปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้เติมให้ได้ประมาณ 0.025 มิลลิลิตร/หยด จากนั้นปรับสวิทช์ของตัวควบคุมมายังตำแหน่ง Read

7. นำ Probe จุ่มลงในสารละลาย เมื่อค่าพีเอชจากจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์อ่านได้น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงกดปุ่ม Start เพื่อเริ่มต้นการทำงาน เครื่องจะทำการควบคุมปริมาณการเติม NaOH ลงในสารละลายตัวอย่าง (สารละลาย HCl) เพื่อปรับค่าพีเอช

8. สังเกตและบันทึกผลเมื่อเครื่องหยุดทำงาน และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

9. ปรับปริมาตรของ NaOH/หยด ให้ได้ประมาณ 0.05 มิลลิลิตร 0.075 มิลลิลิตร และ 0.1 มิลลิลิตร แล้วทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 7 และ 8

10. ตั้งค่าพีเอชไว้ที่ค่า 6.6, 8.2 และ 10.1 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 6 ถึง 9

11. ปรับอัตราเร็วในการหยด NaOH เป็น 6, 3 และ 1.5 หยด/นาที ตามลำดับแล้วทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 6 ถึง 10

ตารางผลการทดลองตอนที่ 1

ตารางที่ 4.1.1 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.3	0.2
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.3	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.1 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.0	0.2
8.2	3.2	7.9	0.3
8.2	3.2	8.0	0.2
10.1	3.2	9.9	0.2
10.1	3.2	9.9	0.2
10.1	3.2	9.8	0.3

ตารางที่ 4.1.1 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.2	0.3
6.5	3.2	6.4	0.1
8.2	3.2	7.9	0.3
8.2	3.2	7.9	0.3
8.2	3.2	8.0	0.2
10.1	3.2	9.8	0.3
10.1	3.2	9.8	0.3
10.1	3.2	10.1	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.1 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.8	0.3
6.5	3.2	6.8	0.3
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.5	0.3
8.2	3.2	8.5	0.3
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.5	0.4

ตารางที่ 4.1.1 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.2	0.2
5.0	3.2	5.2	0.2
6.5	3.2	6.7	0.2
6.5	3.2	6.7	0.2
6.5	3.2	6.8	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.1 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.5	0.3
8.2	3.2	8.6	0.4
8.2	3.2	8.5	0.3
10.1	3.2	10.5	0.4
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.4	0.3

ตารางที่ 4.1.2 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.0	-
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.5	-
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1
8.2	3.2	8.1	0.1
8.2	3.2	8.2	-
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.1	-
10.1	3.2	9.9	0.2
10.1	3.2	10.0	0.1

ตารางที่ 4.1.2 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.0	-
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2
6.5	3.2	6.7	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2

ตารางที่ 4.1.2 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.2	0.2
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.3 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.5	-
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1
8.2	3.2	8.1	0.1
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1

ตารางที่ 4.1.3 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.0	-
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.5	-
6.5	3.2	6.6	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.3 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.4	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.2	0.1

ตารางที่ 4.1.3 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.4	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.3 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2
6.5	3.2	6.7	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.4	0.3
10.1	3.2	10.3	0.2

ตารางที่ 4.1.4 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.5	-
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.4 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.2	-
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.1	-

ตารางที่ 4.1.4 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.0	-
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.4	0.1
6.5	3.2	6.5	-
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.3	0.1
8.2	3.2	8.2	-
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.4 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.0	-
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.5	-
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.3	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1

ตารางที่ 4.1.4 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

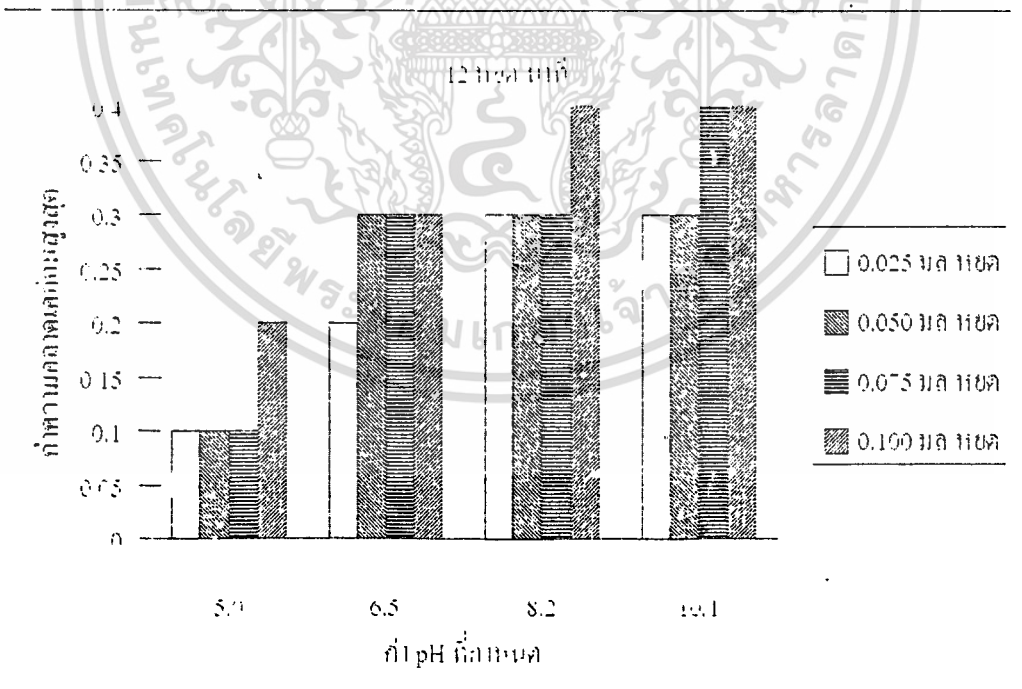
ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
5.0	3.2	5.1	0.1
5.0	3.2	5.2	0.2
5.0	3.2	5.1	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.6	0.1
6.5	3.2	6.7	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.4 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ NaOH/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

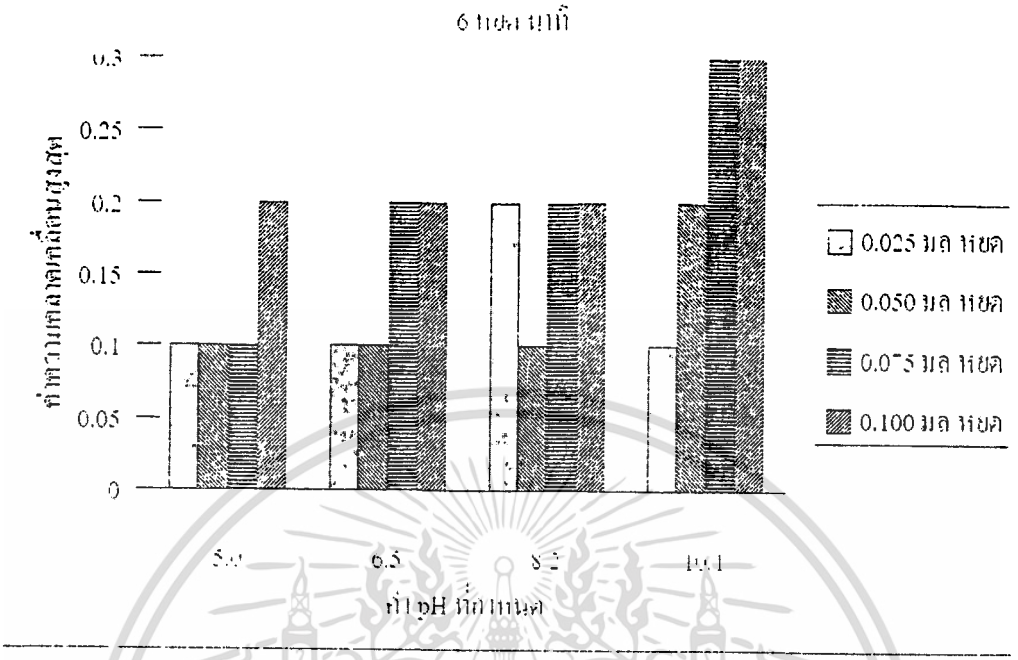
ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
8.2	3.2	8.4	0.2
10.1	3.2	10.3	0.2
10.1	3.2	10.2	0.1
10.1	3.2	10.3	0.2

กราฟแสดงผลการทดลองตอนที่ 1

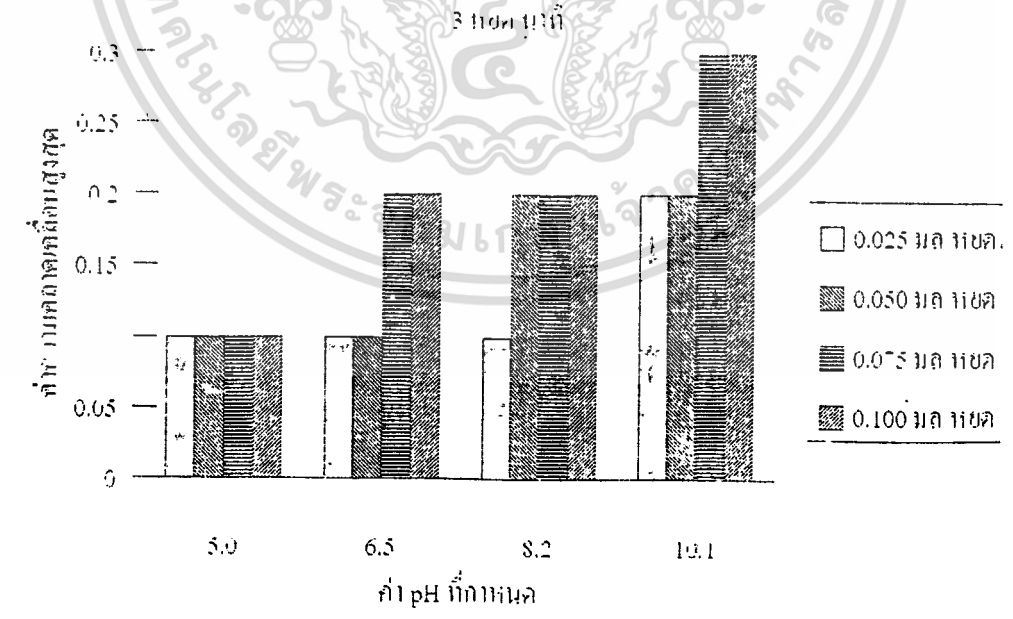


รูปที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 12 หยด/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

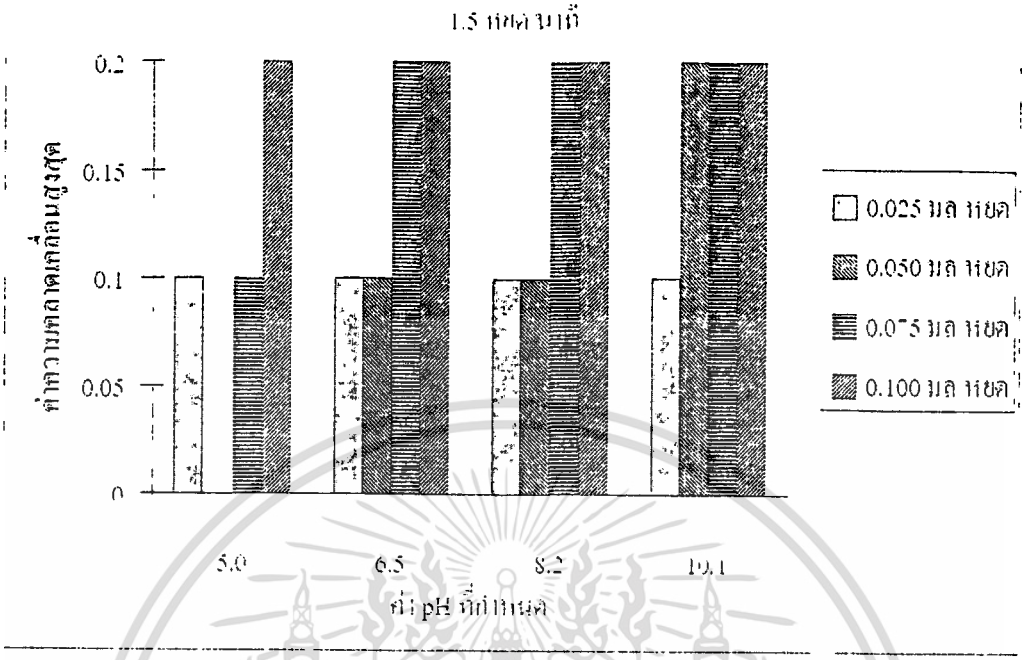


รูปที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 6 หยด/นาที

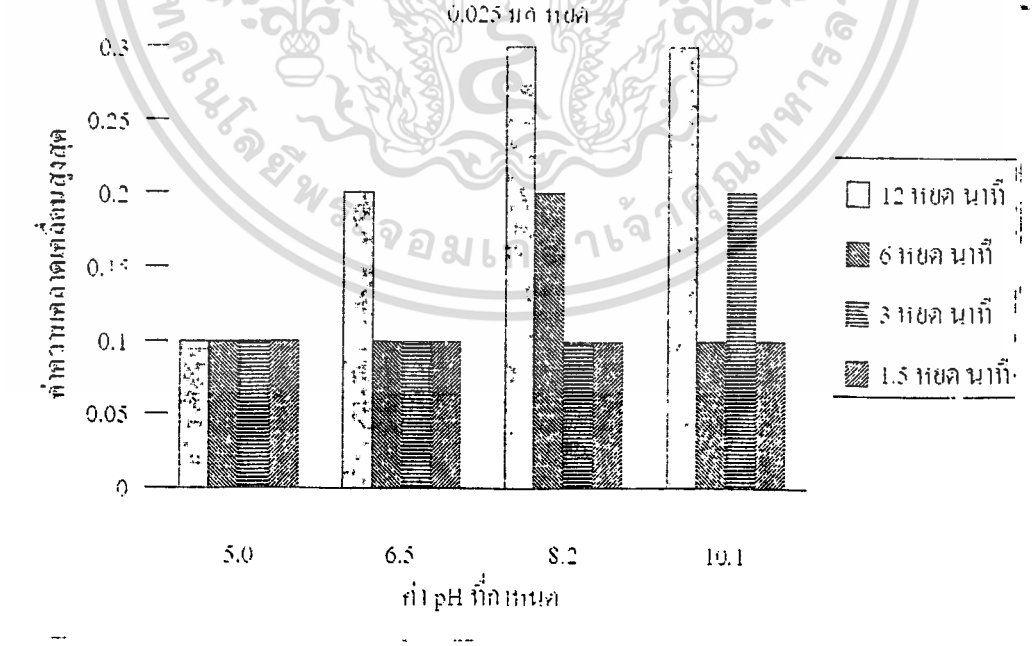


รูปที่ 4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 3 หยด/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

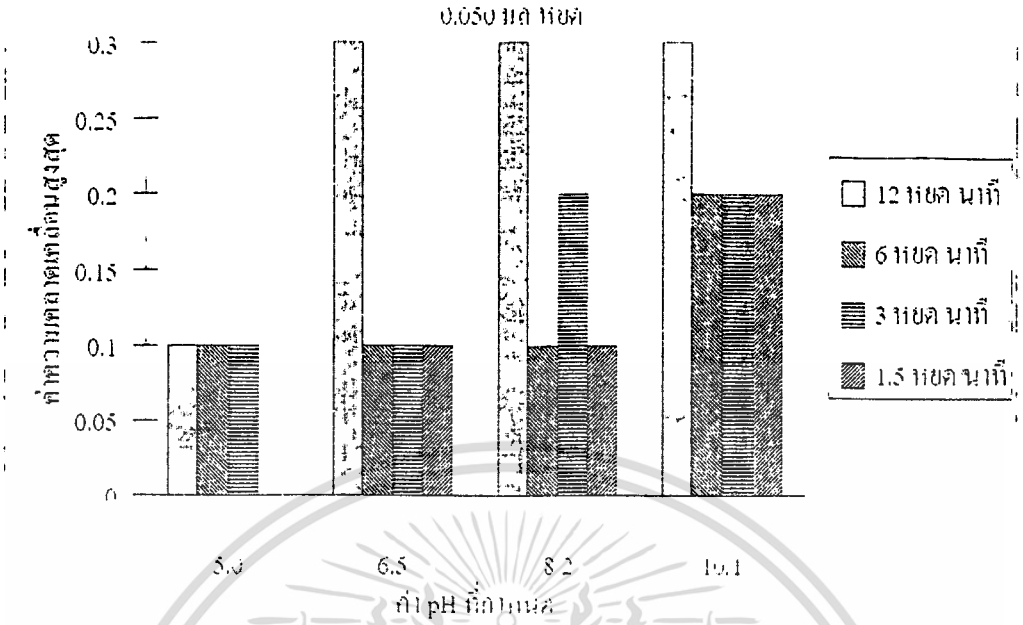


รูปที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 1.5 หยด/นาที

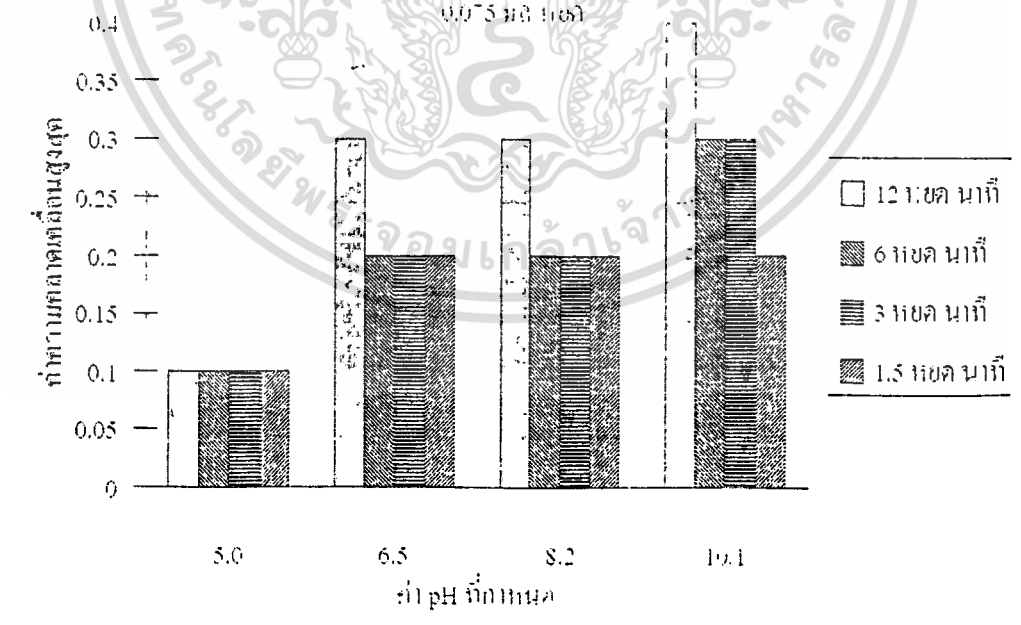


รูปที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

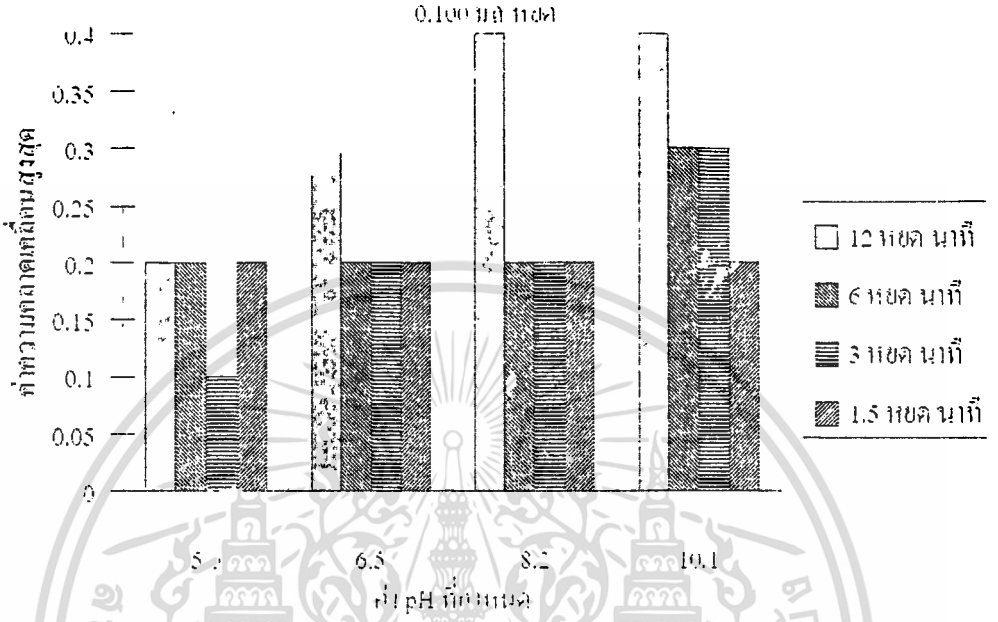


รูปที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด



รูปที่ 4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ตอนที่ 2 ค่าพีเอชที่กำหนดต่ำกว่าค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง

1. เตรียมสารละลาย 0.5 % HCl และ 0.2 M NaOH

2. วัดค่าพีเอชของสารละลายทั้งสอง คือ 0.5 % HCl และ 0.2 M NaOH ซึ่งได้เท่ากับ 3.1 และ 11.5 ตามลำดับ

3. นำสารละลาย HCl ที่เตรียมไว้ใส่ลงในกระบอกฉีดเพื่อใช้เป็นสารไตแตรนท์ปรับค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง (ในที่นี้คือ สารละลาย NaOH)

4. นำสารละลาย NaOH ที่เตรียมไว้แบ่งใส่บีกเกอร์จำนวน 12 ใบ สำหรับทำการทดลอง

5. ตั้งค่าพีเอชที่ต้องการจะควบคุมโดยปรับสวิทช์ของตัวควบคุมไปยังตำแหน่ง Set และปรับหมุนปุ่มเพื่อกำหนดค่าพีเอชที่ต้องการจะควบคุม ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยตั้งค่าไว้ 4 ค่าคือ 9.6, 8.0, 6.8 และ 5.2 ตามลำดับ ตัวเลขที่ตั้งไว้จะสังเกตได้จากจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์

6. เริ่มทำการทดลองโดยปรับอัตราเร็วในการหยดของสารประมาณ 12 หยด/นาที ปรับปริมาตรของสารละลาย HCl ที่เติมให้ได้ประมาณ 0.025 มิลลิลิตร/หยด จากนั้นปรับสวิทช์ของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จุ่ม Probe ลงในสารละลาย NaOH เมื่อค่าพีเอชจากจอของเครื่องพีเอชมิเตอร์วัดได้มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงกดปุ่ม Start เพื่อเริ่มต้นการทำงาน เครื่องจะทำการควบคุมปริมาณการเติมสารละลาย HCl เพื่อปรับค่าพีเอช

8. สังเกตและบันทึกผลเมื่อเครื่องหยุดทำงาน และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

9. ปรับปริมาตรของสารที่เติมให้ได้ประมาณ 0.05, 0.075 และ 0.1 มิลลิลิตร/หยด แล้วทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 7 และ 8

10. กำหนดค่าพีเอชไว้ที่ 8.0, 6.8 และ 5.2 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 6 ถึง 9

11. ปรับอัตราเร็วในการหยดเป็น 6, 3 และ 1.5 หยด/นาที ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 6 ถึง 10

ตารางผลการทดลองตอนที่ 2

ตารางที่ 4.2.1 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.7	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.0	-
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	7.1	0.2
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.2	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.1 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.7	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.1	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	7.0	0.2
6.8	11.5	6.9	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1

ตารางที่ 4.2.1 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.5	0.1
9.6	11.5	9.8	0.2
9.6	11.5	9.7	0.1
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.1 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	7.0	0.2
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.4	0.2

ตารางที่ 4.2.1 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 12 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.8	0.2
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.8	0.2
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.2	0.2
6.8	11.5	7.1	0.3
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.4	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.6	-
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.0	-
8.0	11.5	8.1	0.1
6.8	11.5	6.8	-
6.8	11.5	6.8	-
6.8	11.5	6.9	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.2	-

ตารางที่ 4.2.2 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.8	0.2
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.6	-
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.2	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.2	-

ตารางที่ 4.2.2 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.8	0.2
9.6	11.5	9.5	0.1
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.3	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 6 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.8	0.2
8.0	11.5	8.2	0.2
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.2	0.2
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.4	0.2
5.2	11.5	5.2	-

ตารางที่ 4.2.3 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.7	0.1
8.0	11.5	8.0	-
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.3 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
6.8	11.5	6.8	-
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.2	-

ตารางที่ 4.2.3 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.5	0.1
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.6	-
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.0	-
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	6.8	-
6.8	11.5	6.9	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.3	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.3 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.8	0.2
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
6.8	11.5	6.9	0.1
6.8	11.5	7.0	0.2
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.1	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1

ตารางที่ 4.2.3 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.4	0.2
9.6	11.5	9.5	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.3 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 3 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.6	0.2
5.2	11.5	5.1	0.1
5.2	11.5	5.0	0.2
5.2	11.5	5.1	0.1

ตารางที่ 4.2.4 ก ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.6	-
9.6	11.5	9.7	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.0	-
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.1	0.1
5.2	11.5	5.1	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.4 ข ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.7	0.1
9.6	11.5	9.5	0.1
9.6	11.5	9.6	-
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	8.0	-
8.0	11.5	8.0	-
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.7	0.1
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.2	-
5.2	11.5	5.3	0.1

ตารางที่ 4.2.4 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.5	0.1
9.6	11.5	9.4	0.2
9.6	11.5	9.5	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	8.1	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.4 ค ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด (ต่อ)

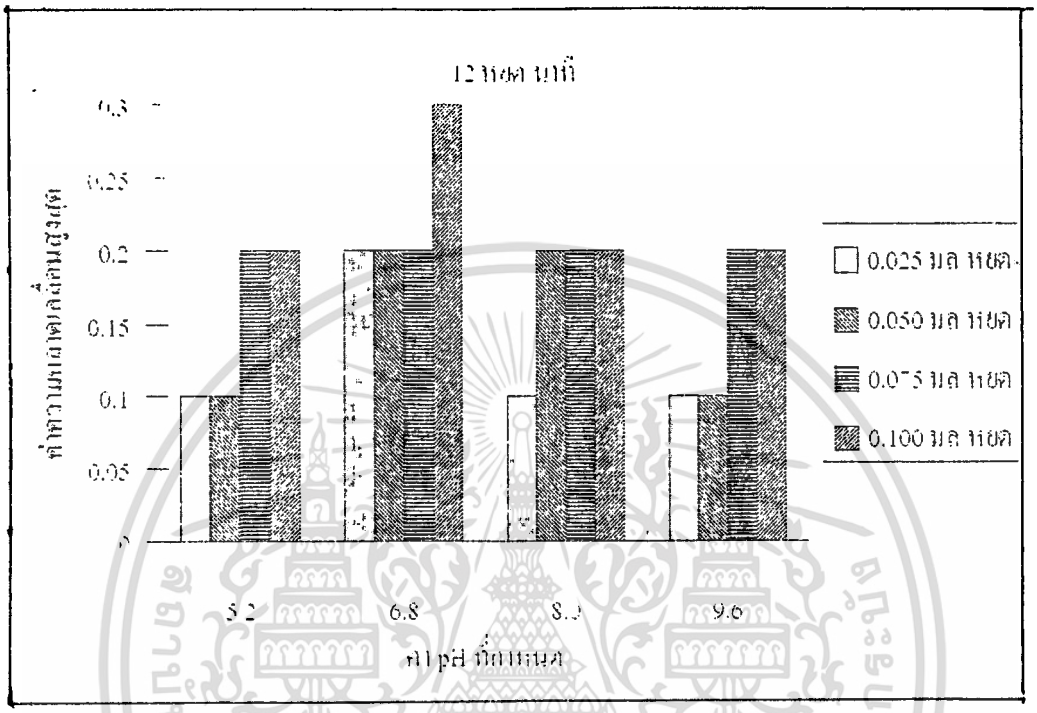
ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.6	0.2
6.8	11.5	6.8	-
5.2	11.5	5.1	0.1
5.2	11.5	5.3	0.1
5.2	11.5	5.1	0.1

ตารางที่ 4.2.4 ง ค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl เท่ากับ 1.5 หยด/นาที และปริมาตรของ HCl/หยด เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

ค่าพีเอชที่กำหนด	ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย HCl	ค่าพีเอชเมื่อเครื่องหยุดทำงาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
9.6	11.5	9.4	0.2
9.6	11.5	9.4	0.2
9.6	11.5	9.5	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	7.9	0.1
8.0	11.5	7.8	0.2
6.8	11.5	6.7	0.1
6.8	11.5	6.6	0.2
6.8	11.5	6.6	0.2
5.2	11.5	5.0	0.2
5.2	11.5	5.0	0.2
5.2	11.5	5.2	-

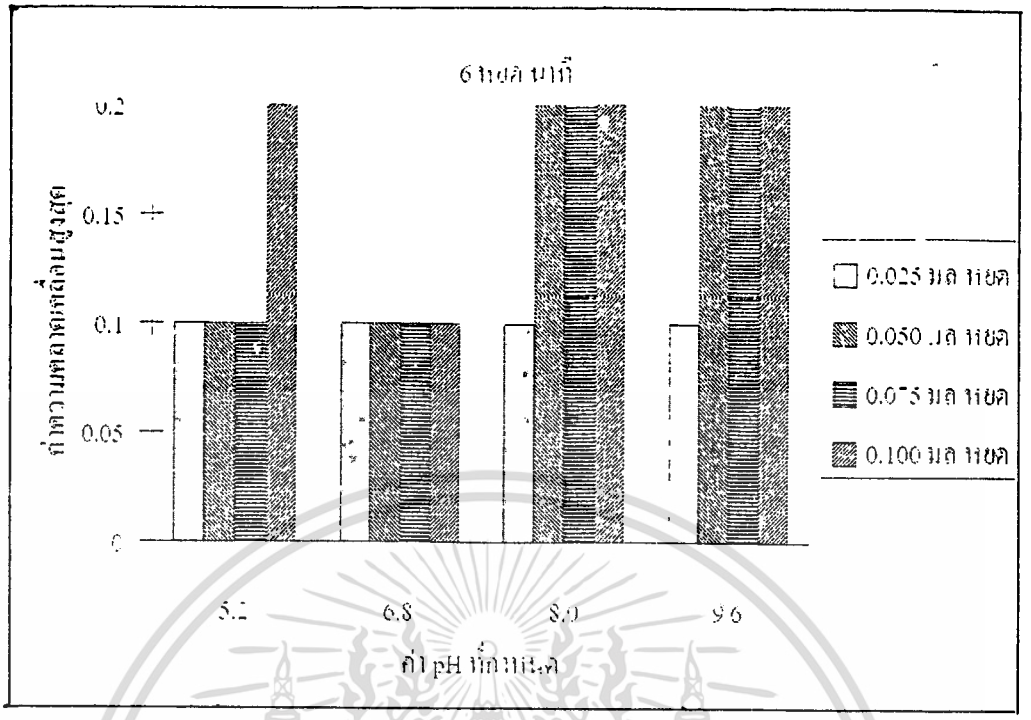
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงผลการทดลองตอนที่ 2

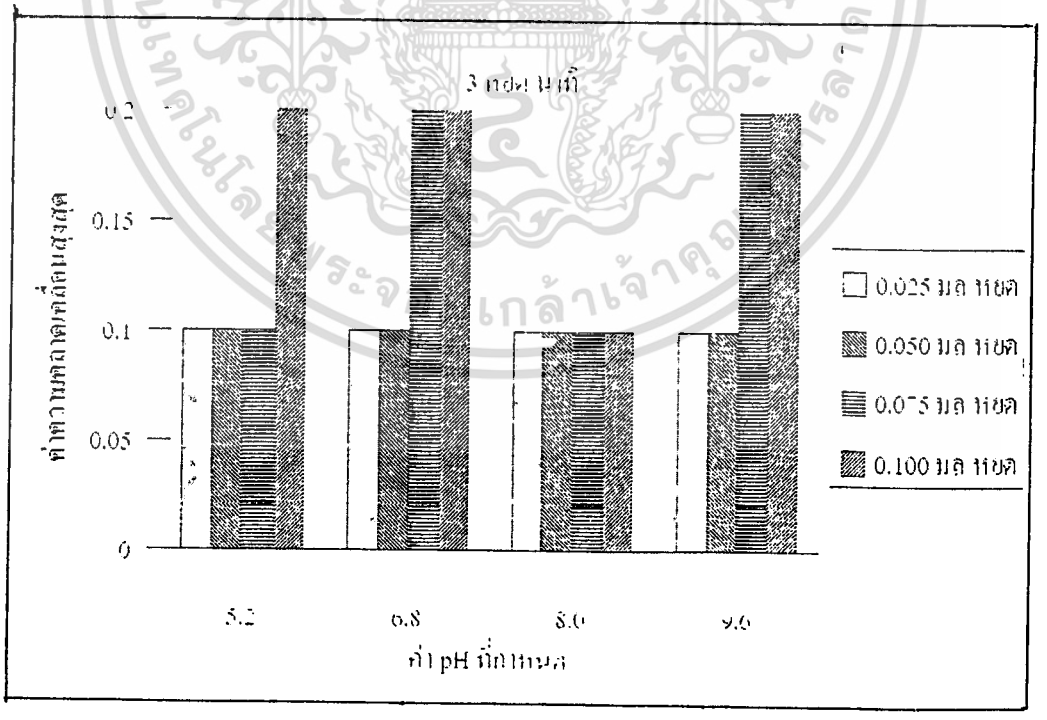


รูปที่ 4.9 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 12 หยด/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

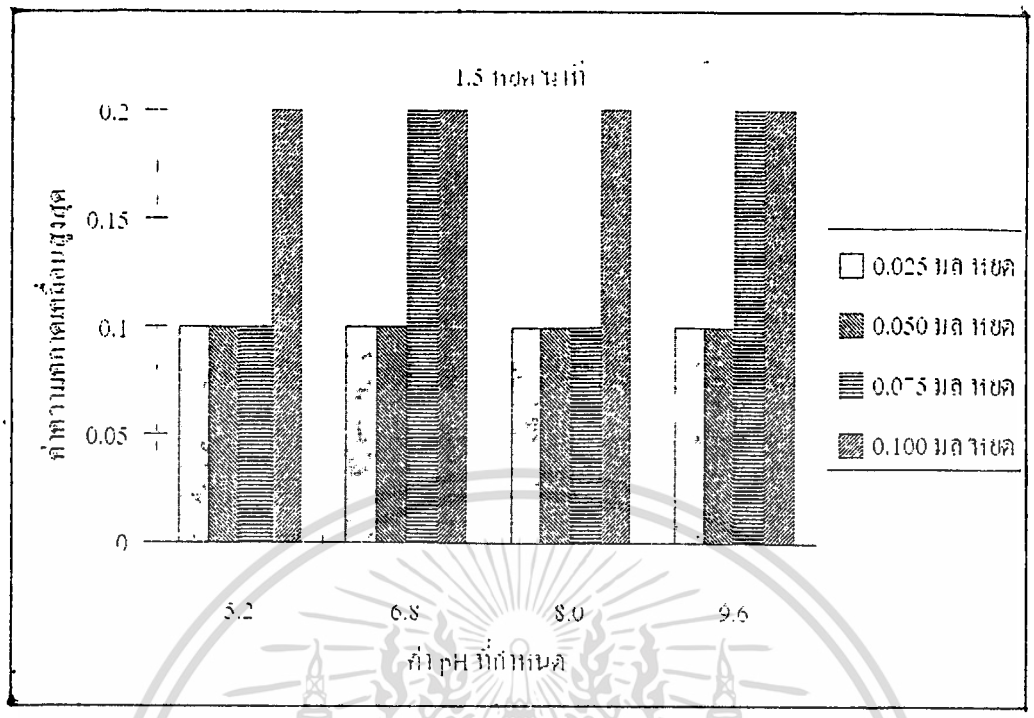


รูปที่ 4.10 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 6 หยด/นาที

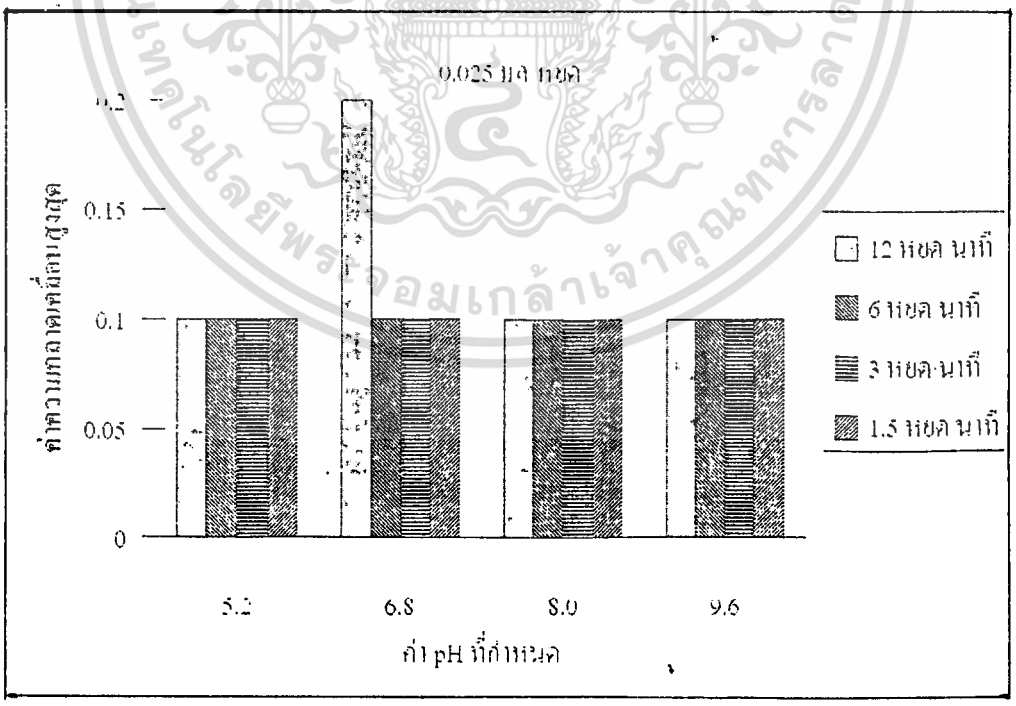


รูปที่ 4.11 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 3 หยด/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

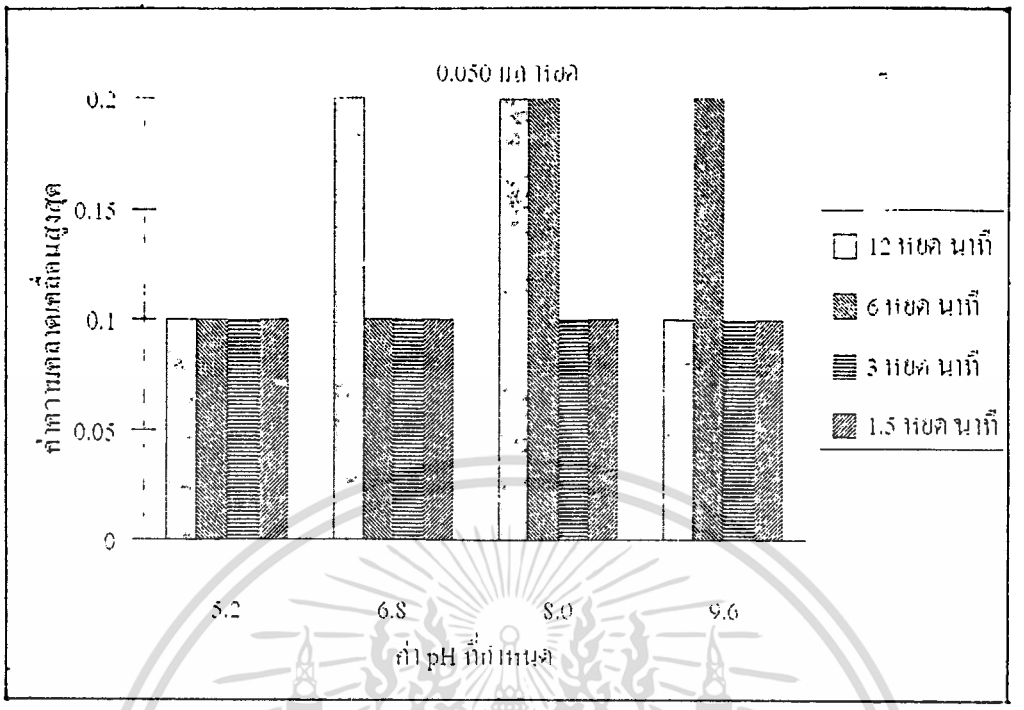


รูปที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่ออัตราเร็วในการหยดสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 1.5 หยด/นาที

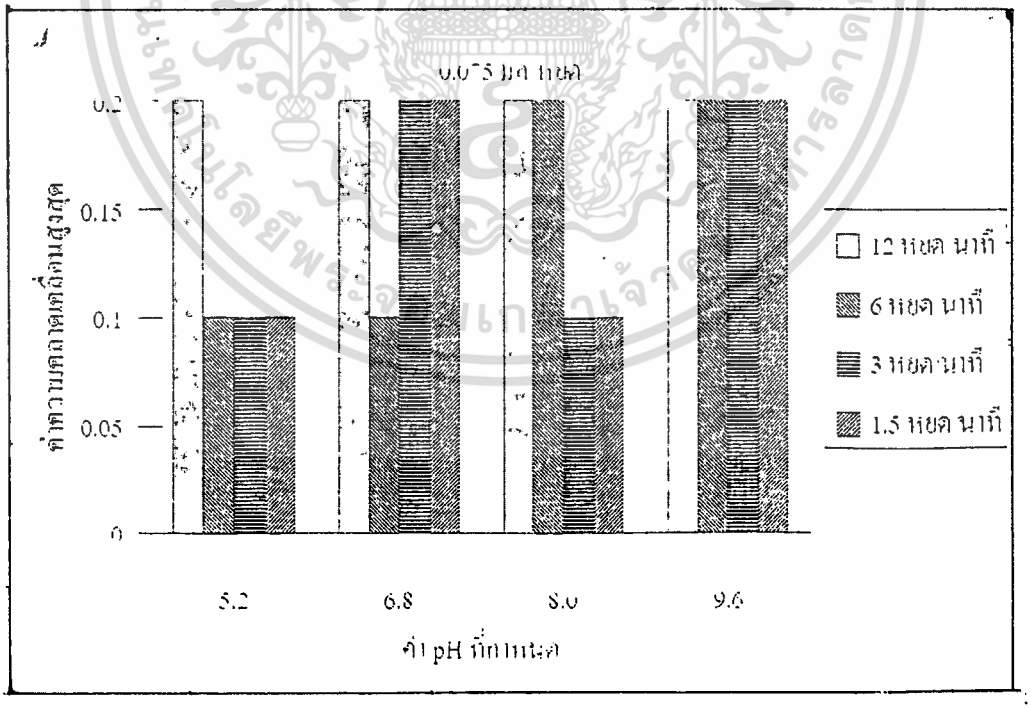


รูปที่ 4.13 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 0.025 มิลลิลิตร/หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

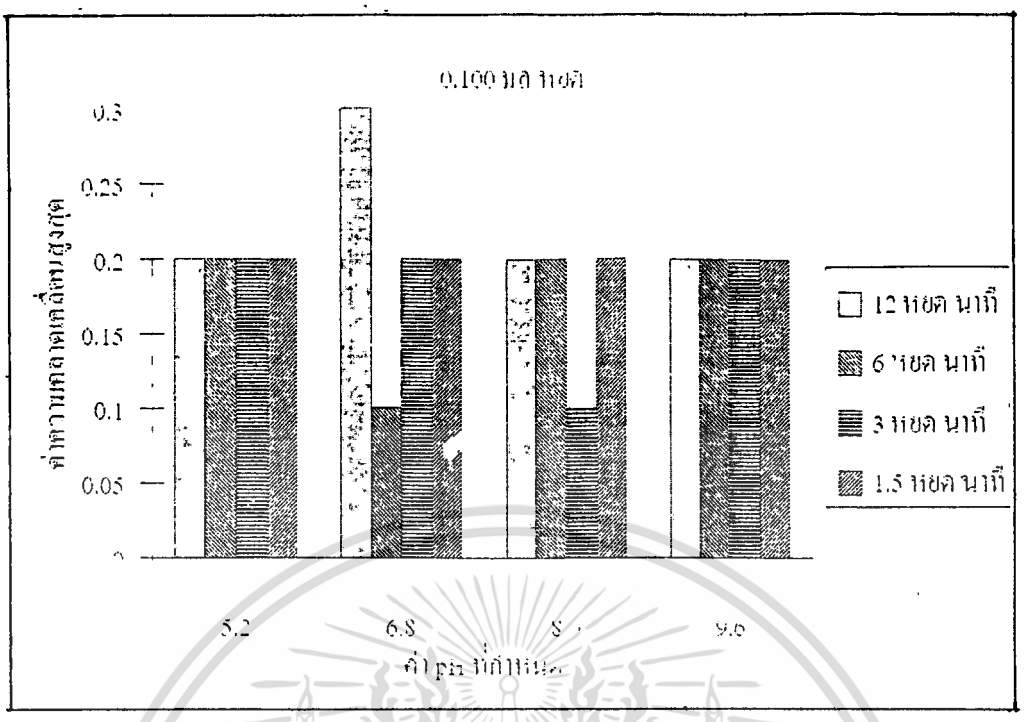


รูปที่ 4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 0.050 มิลลิลิตร/หยด



รูปที่ 4.15 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 0.075 มิลลิลิตร/หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อปริมาตรของสารละลาย HCl คงที่เท่ากับ 0.100 มิลลิลิตร/หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

เครื่องควบคุมพีเอชให้คงที่ที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ ซึ่งจากการผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในการทดลองตอนที่ 1 พบว่าค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.4 และการควบคุมในช่วงค่าพีเอชสูงมีผลทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าช่วงพีเอชต่ำ คือ ที่พีเอชเท่ากับ 10.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 ขณะที่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5.0 ค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2

2. ในการทดลองตอนที่ 2 พบว่าค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงานมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.3 โดยค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละช่วงของค่าพีเอชมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

3. จากผลการทดลอง เครื่องมือนี้สามารถนำไปใช้งานได้โดยมีช่วงการใช้งานที่เหมาะสมที่สุดคือ ในช่วงพีเอช 5.0 ถึง 8.0

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ในการปรับอัตราเร็วของการหยดสารละลาย (ไตแตรนท์) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2 มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเร็วลดลง อาจเนื่องจากเมื่ออัตราเร็วของการหยดสารละลายมีค่าน้อยทำให้มีเวลาเพียงพอในการคนกวนสารละลาย (ด้วยเครื่องคนกวน) ให้เข้ากันมากขึ้น จึงมีผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง

2. ในการปรับปริมาตรของสารละลายที่ใช้เติม พบว่าเมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้นค่าความคลาดเคลื่อนจะมีมากขึ้น อาจเนื่องจากปริมาตรของสารละลายที่มากเกินพอทำให้ค่าพีเอชที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน อาจเนื่องจากเกิดความผิดพลาดในระหว่างขั้นตอนการทำการทดลอง เช่น สารปนเปื้อน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำระบบควบคุมปริมาณการหยดของไตแตรนท์โดยใช้โซลีนอยด์เป็นตัวควบคุมเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว และเพิ่มกระบอกฉีดสำหรับบรรจุไตแตรนท์อีก 1 กระบอก เพื่อสามารถควบคุมค่าพีเอชที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ (ในกรณีที่เกิดการออสซิลเลท)

2. ควรทำการทดลองปรับอัตราเร็วของเครื่องคนกวน เพื่อสังเกตผลของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน ในกรณีที่อัตราเร็วของการกวนสารละลายมีค่าต่าง ๆ กัน

3. ควรทำการทดลองโดยใช้บีกเกอร์ที่มีปริมาตรต่าง ๆ กัน เพื่อสังเกตผลของค่าพีเอชที่วัดได้เมื่อเครื่องหยุดทำงาน เมื่ออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหยดของสารไตแตรนท์กับปริมาตรของบีกเกอร์เปลี่ยนแปลงไป

4. อาจปรับเปลี่ยนปริมาตรของกระบอกฉีดสำหรับบรรจุไตแตรนท์เพิ่มขึ้น เพื่อจะได้นำไปประยุกต์ในระบบอุตสาหกรรมได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอ้างอิง

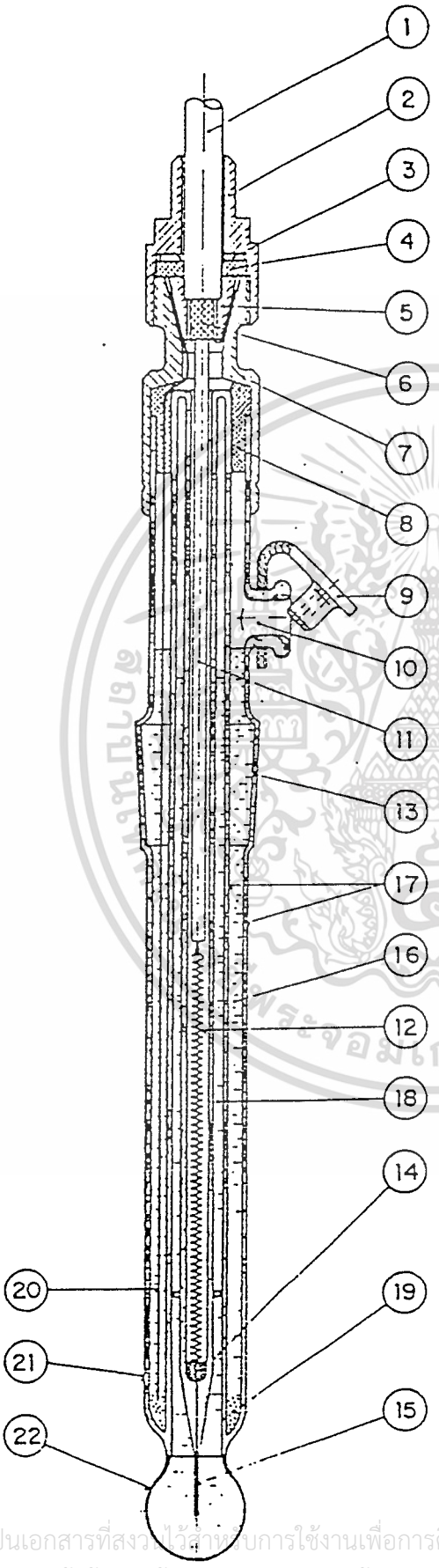
1. รองศาสตราจารย์ ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. *เคมีวิเคราะห์ 2.* 6. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2537.
2. รองศาสตราจารย์ ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. *เคมีวิเคราะห์.* 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
3. ภ.ญ. อ. ลาวัลย์ ศรีพงษ์. *การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.* ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
4. ยืน ภู่วรวรรณ. *เทคนิคการประยุกต์และใช้งานลิเนียร์ไอซี เล่ม 1.* 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์อักษรสัมพันธ์, 2521.
5. นรินทร์ เนาวประทีป. *ออป แอมป์.* 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์.
6. John Kenkel, Lewis Publishers. *Analytical Chemistry Refresher Manual.* ISBN 0-87371-398-2.
7. *Linear Circuits Data Book.* ISBN 0-89512-089-5. Dallas, Texas : Texas Instruments.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของ Probe



1 Abgeschirmtes, hochisoliertes Elektrodenkabel
Câble d'électrode à haut isolement, blindé
Screened, highly insulated electrode cable
2 Ueberwurfmutter
Ecrou de serrage
Pinch nut
3 Scheibe, Rondelle, Washer
4 Dichtung, Joint d'étanchéité, Sealing
5 Klemmkonus, Cone de serrage, Pinch cone
6 Aussenleiter = Abschirmung (Bezugselektrode)
Conducteur extérieur = blindage (électrode de référence)
External conductor = screen (reference electrode)
7 Buchse, Capuchon, Socket
8 Kittstelle und Abdichtung
Joint d'étanchéité à mastic
Mastic sealing
9 Gummiverschlusszäpfchen (beim Messen geöffnet)
Bouchon en caoutchouc (enlevé pour les mesures)
Rubber stopper (opened for measurements)
10 KCl - Einfüllöffnung
Orifice de remplissage de ClK
Orifice for filling with KCl
11 Hochisolierter Innenleiter (Indikatorelektrode)
Conducteur intérieur à haut isolement (électrode indicatrice)
Highly insulated inner conductor (indicator electrode)
12 Kontaktfeder, Ressort de contact
Contact spring
13 Normalschliff, Rodage normalisé
Standard ground joint
14 Lötstelle, Soudure, Solder
15 Innere Ableitelektrode, Electrode de référence intérieure, Internal reference electrode
16 Bezugselektroden-Elektrolyt (gesättigte KCl-Lösung)
Electrolyte de l'électrode de référence (solution de ClK saturée)
Reference electrode electrolyte (saturated KCl solution)
17 Schaft, doppelwandig, Tige, à double paroi
Shaft, double wall
18 Füllflüssigkeit (Puffer)
Liquide de référence intérieur (tampon)
Internal reference liquid (buffer)
19 Silberchloridpulver, Poudre de chlorure d'argent, Silverchloride powder
20 Bezugselektrode (Silberdraht)
Electrode de référence (fil d'argent)
Reference electrode (silver wire)
21 Poröses Keramikdiaphragma
Diaphragme en céramique poreuse
Porous ceramic diaphragm
22 pH-empfindliche Glasmembran
Membrane de verre sensible au pH
pH sensitive glass membrane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

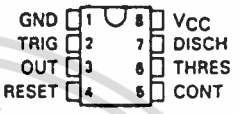
LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

TYPES SE555, SE555C, SA555, NE555 PRECISION TIMERS

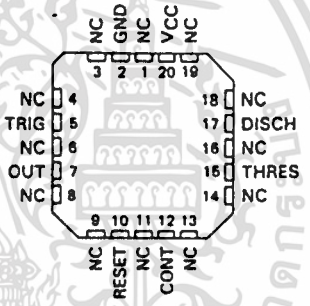
D1869, SEPTEMBER 1973—REVISED OCTOBER 1983

- Timing from Microseconds to Hours
- Astable or Monostable Operation
- Adjustable Duty Cycle
- TTL-Compatible Output Can Sink or Source up to 200 mA
- Functionally Interchangeable with the Signetics SE555, SE555C, SA555, NE555; Have Same Pinout

NE555, SE555, SE555C . . . JG DUAL-IN-LINE PACKAGE
SA555, NE555 . . . D, JG, OR P DUAL-IN-LINE PACKAGE
(TOP VIEW)



SE555, SE555C . . . FH OR FK CHIP CARRIER PACKAGE
(TOP VIEW)



NC—No internal connection

description

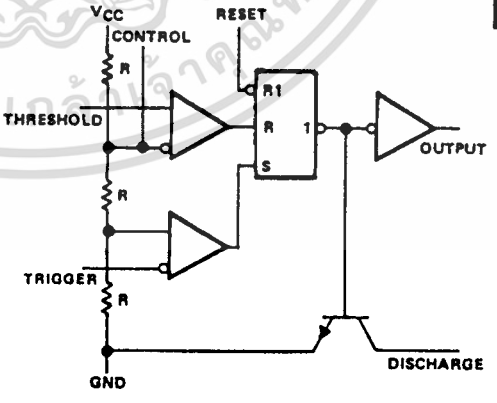
These devices are monolithic timing circuits capable of producing accurate time delays or oscillation. In the time-delay or monostable mode of operation, the timed interval is controlled by a single external resistor and capacitor network. In the astable mode of operation, the frequency and duty cycle may be independently controlled with two external resistors and a single external capacitor.

The threshold and trigger levels are normally two-thirds and one-third, respectively, of V_{CC}. These levels can be altered by use of the control voltage terminal. When the trigger input falls below the trigger level, the flip-flop is set and the output goes high. If the trigger input is above the trigger level and the threshold input is above the threshold level, the flip-flop is reset and the output is low. The reset input can override all other inputs and can be used to initiate a new timing cycle. When the reset input goes low, the flip-flop is reset and the output goes low. Whenever the output is low, a low-impedance path is provided between the discharge terminal and ground.

The output circuit is capable of sinking or sourcing current up to 200 milliamperes. Operation is specified for supplies of 5 to 15 volts. With a 5-volt supply, output levels are compatible with TTL inputs.

The SE555 and SE555C are characterized for operation over the full military range of −55°C to 125°C. The SA555 is characterized for operation from −40°C to 85°C, and the NE555 is characterized for operation from 0°C to 70°C.

functional block diagram



Reset can override Trigger, which can override Threshold.

Copyright © 1983 by Texas Instruments Incorporated

TEXAS INSTRUMENTS
POST OFFICE BOX 225012 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUNCTION TABLE

RESET	TRIGGER VOLTAGE†	THRESHOLD VOLTAGE†	OUTPUT	DISCHARGE SWITCH
Low	Irrelevant	Irrelevant	Low	On
High	< 1/3 V_{DD}	Irrelevant	High	Off
High	> 1/3 V_{DD}	> 2/3 V_{DD}	Low	On
High	> 1/3 V_{DD}	< 2/3 V_{DD}	As previously established	

†Voltage levels shown are nominal.

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1) . . . . . 18 V
Input voltage (control voltage, reset, threshold, trigger) . . . . . V_{CC}
Output current . . . . . ±225 mA
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 2) . . . . . 600 mW
Operating free-air temperature range: SE555, SE555C . . . . . −55°C to 125°C
SA555 . . . . . −40°C to 85°C
NE555 . . . . . 0°C to 70°C
Storage temperature range . . . . . −65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: FH, FK, or JG package . . . 300°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: D or P package . . . . . 260°C

NOTES: 1. All voltage values are with respect to network ground terminal.
2. For operation above 25°C free-air temperature, refer to Dissipation Derating Curves, Section 2. In the JG package, SE555 and SE555C chips are alloy mounted, SA555 and NE555 chips are glass mounted.

recommended operating conditions

	SE555		SE555C		SA555		NE555		UNIT
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	4.5	18	4.5	16	4.5	16	4.5	16	V
Input voltage (control voltage, reset, threshold, trigger)		V_{CC}		V_{CC}		V_{CC}		V_{CC}	V
Output current		±200		±200		±200		±200	mA
Operating free-air temperature, T_A	−55	125	−55	125	−40	85	0	70	°C

Special Functions 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics at 25°C free-air temperature, V_{CC} = 5 V to 15 V (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS		SE555			SE555C, SA555 NE555			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Threshold voltage level	V_{CC} = 15 V		9.4	10	10.6	8.8	10	11.2	V
	V_{CC} = 5 V		2.7	3.3	4	2.4	3.3	4.2	
Threshold current (see Note 3)				30	250		30	250	nA
Trigger voltage level	V_{CC} = 15 V		4.8	5	5.2	4.5	5	5.6	V
	V_{CC} = 5 V		1.45	1.67	1.9	1.1	1.67	2.2	
Trigger current	Trigger at 0 V			0.5	0.9		0.5	2	μA
Reset voltage level			0.4	0.7	1	0.4	0.7	1	V
Reset current	Reset at V_{CC}			0.1	0.4		0.1	0.4	mA
	Reset at 0 V			−0.4	−1		−0.4	−1	
Discharge switch off-state current				20	100		20	100	nA
Control voltage (open circuit)	V_{CC} = 15 V		9.6	10	10.4	9	10	11	V
	V_{CC} = 5 V		2.9	3.3	3.8	2.6	3.3	4	
Low-level output voltage	V_{CC} = 15 V	I_{OL} = 10 mA		0.1	0.15		0.1	0.25	V
		I_{OL} = 50 mA		0.4	0.5		0.4	0.75	
		I_{OL} = 100 mA		2	2.25		2	3.2	
		I_{OL} = 200 mA		2.5			2.5		
	V_{CC} = 5 V	I_{OL} = 5 mA		0.05	0.15		0.05	0.25	
		I_{OL} = 8 mA		0.1	0.2		0.25	0.3	
High-level output voltage	V_{CC} = 15 V	I_{OH} = −100 mA	13	13.3		12.75	13.3		V
		I_{OH} = −200 mA		12.5			12.5		
	V_{CC} = 5 V	I_{OH} = −100 mA	3	3.3		2.75	3.3		
Supply current	Output low, No load	V_{CC} = 15 V		10	12		10	15	mA
		V_{CC} = 5 V		3	5		3	6	
	Output high, No load	V_{CC} = 15 V		9	10		9	13	
		V_{CC} = 5 V		2	4		2	5	

NOTE 3: This parameter influences the maximum value of the timing resistors R_A and R_B in the circuit of Figure 13. For example, when V_{CC} = 5 V the maximum value is $R = R_A + R_B$ = 3.4 MΩ and for V_{CC} = 15 V the maximum value is 10 MΩ.

operating characteristics, V_{CC} = 5 V and 15 V

PARAMETER		TEST CONDITIONS†	SE555			SE555C, SA555 NE555			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Initial error of timing interval‡	Each timer, monostable§	T_A = 25°C		0.5	1.5		1	3	%
	Each timer, astable¶			1.5			2.25		
Temperature coefficient of timing interval	Each timer, monostable§	T_A = MIN to MAX		30	100		50		ppm/°C
	Each timer, astable¶			90			150		
Supply voltage sensitivity of timing interval	Each timer, monostable§	T_A = 25°C		0.05	0.2		0.1	0.5	%/V
	Each timer, astable¶			0.15			0.3		
Output pulse rise time		C_L = 15 pF, T_A = 25°C		100	200		100	300	ns
Output pulse fall time				100	200		100	300	

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ Timing interval error is defined as the difference between the measured value and the nominal value computed by the formula: $t_w = 1.1\ R_A C$.
§ Values specified are for a device in a monostable circuit similar to Figure 10, with component values as follow: R_A = 2 kΩ to 100 kΩ, C = 0.1 μF.
¶ Values specified are for a device in an astable circuit similar to Figure 1, with component values as follow: R_A = 1 kΩ to 100 kΩ, C = 0.1 μF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS†

LOW-LEVEL OUTPUT VOLTAGE vs LOW-LEVEL OUTPUT CURRENT

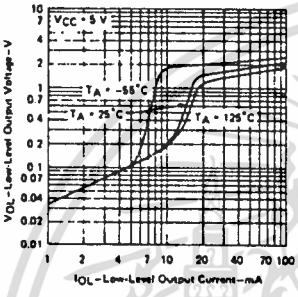


FIGURE 1

LOW-LEVEL OUTPUT VOLTAGE vs LOW-LEVEL OUTPUT CURRENT

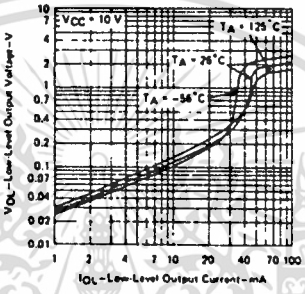


FIGURE 2

LOW-LEVEL OUTPUT VOLTAGE vs LOW-LEVEL OUTPUT CURRENT

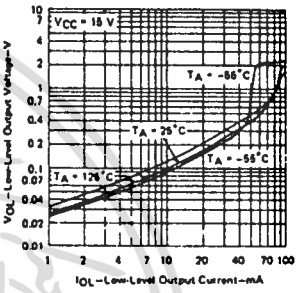


FIGURE 3

DROP BETWEEN SUPPLY VOLTAGE AND OUTPUT vs HIGH-LEVEL OUTPUT CURRENT

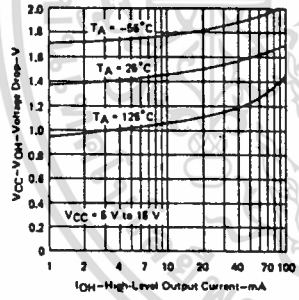


FIGURE 4

SUPPLY CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

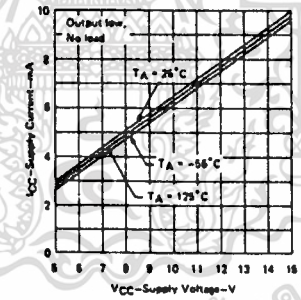


FIGURE 5

MINIMUM PULSE WIDTH REQUIRED FOR TRIGGERING vs LOWEST VOLTAGE LEVEL OF TRIGGER PULSE

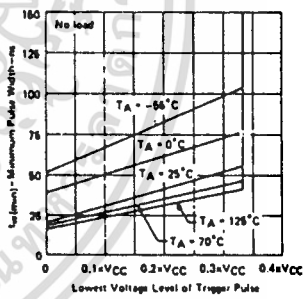


FIGURE 6

NORMALIZED OUTPUT PULSE WIDTH (MONOSTABLE OPERATION) vs SUPPLY VOLTAGE

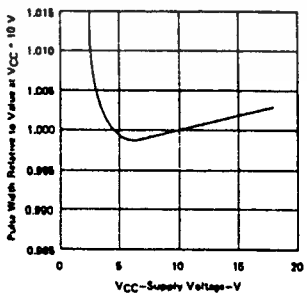


FIGURE 7

NORMALIZED OUTPUT PULSE WIDTH (MONOSTABLE OPERATION) vs FREE-AIR TEMPERATURE

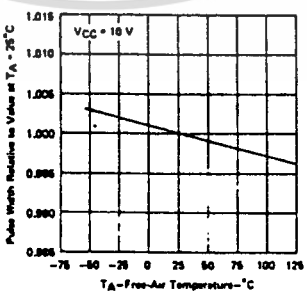


FIGURE 8

PROPAGATION DELAY TIME vs LOWEST VOLTAGE LEVEL OF TRIGGER PULSE

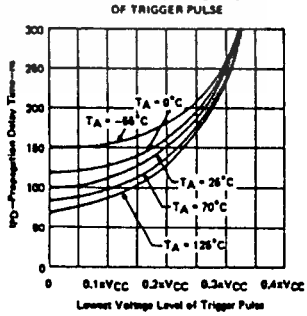


FIGURE 9

†Data for temperatures below 0°C and above 70°C are applicable for SE555 circuits only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

monostable operation

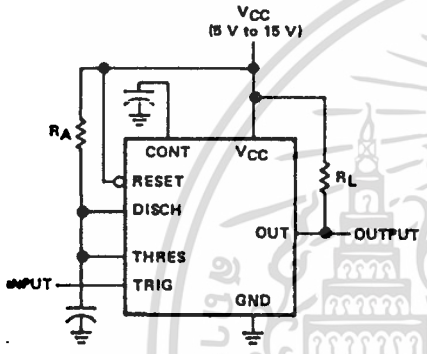


FIGURE 10–CIRCUIT FOR MONOSTABLE OPERATION

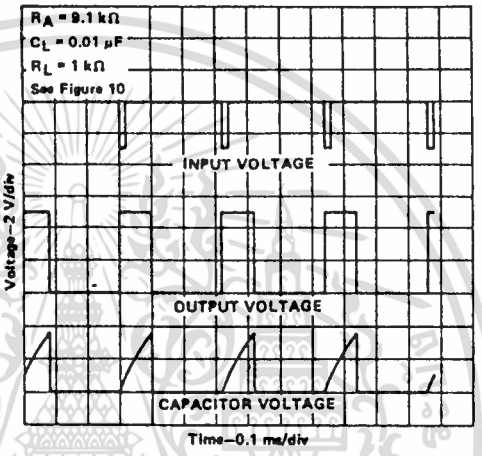


FIGURE 11–TYPICAL MONOSTABLE WAVEFORMS

For monostable operation, any of these timers may be connected as shown in Figure 10. If the output is low, application of a negative-going pulse to the trigger input sets the flip-flop ($\overline{Q}$ goes low), drives the output high, and turns off Q1. Capacitor C is then charged through R_A until the voltage across the capacitor reaches the threshold voltage of the threshold input. If the trigger input has returned to a high level, the output of the threshold comparator will reset the flip-flop ($\overline{Q}$ goes high), drive the output low, and discharge C through Q1.

Monostable operation is initiated when the trigger input voltage falls below the trigger threshold. Once initiated, the sequence will complete only if the trigger input is high at the end of the timing interval. Because of the threshold level and saturation voltage of Q1, the output pulse duration is approximately $t_w = 1.1\ R_AC$. Figure 12 is a plot of the time constant for various values of R_A and C. The threshold levels and charge rates are both directly proportional to the supply voltage, V_{CC}. The timing interval is therefore independent of the supply voltage, so long as the supply voltage is constant during the time interval.

Applying a negative-going trigger pulse simultaneously to the reset and trigger terminals during the timing interval will discharge C and re-initiate the cycle, commencing on the positive edge of the reset pulse. The output is held low as long as the reset pulse is low. When the reset input is not used, it should be connected to V_{CC} to prevent false triggering.

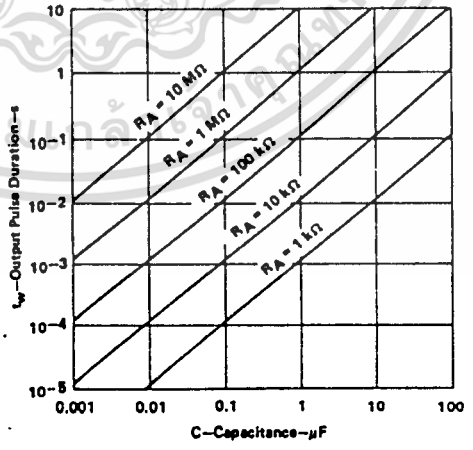
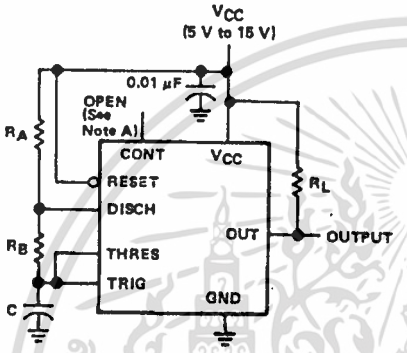


FIGURE 12–OUTPUT PULSE DURATION vs CAPACITANCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

astable operation



NOTE A: Decoupling the control voltage input to ground with a capacitor may improve operation. This should be evaluated for individual applications.

FIGURE 13–CIRCUIT FOR ASTABLE OPERATION

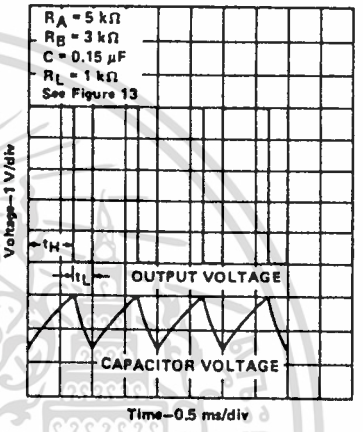


FIGURE 14–TYPICAL ASTABLE WAVEFORMS

Addition of a second resistor, R_B, to the circuit of Figure 10, as shown in Figure 13, and connection of the trigger input to the threshold input will cause the timer to self-trigger and run as a multivibrator. The capacitor C will charge through R_A and R_B then discharge through R_B only. The duty cycle may be controlled, therefore, by the values of R_A and R_B.

This astable connection results in capacitor C charging and discharging between the threshold-voltage level ($\approx 0.67 \cdot V_{CC}$) and the trigger-voltage level ($\approx 0.33 \cdot V_{CC}$). As in the monostable circuit, charge and discharge times (and therefore the frequency and duty cycle) are independent of the supply voltage.

Figure 14 shows typical waveforms generated during astable operation. The output high-level duration t_H and low-level duration t_L may be found by:

$$t_H = 0.693\ (R_A + R_B)\ C$$

$$t_L = 0.693\ (R_B)\ C$$

Other useful relationships are shown below.

$$\text{period} = t_H + t_L = 0.693\ (R_A + 2R_B)\ C$$

$$\text{frequency} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)\ C}$$

$$\text{Output driver duty cycle} = \frac{t_L}{t_H + t_L} = \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$\text{Output waveform duty cycle} = \frac{t_H}{t_H + t_L} = 1 - \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$\text{Low-to-high ratio} = \frac{t_L}{t_H} = \frac{R_B}{R_A + R_B}$$

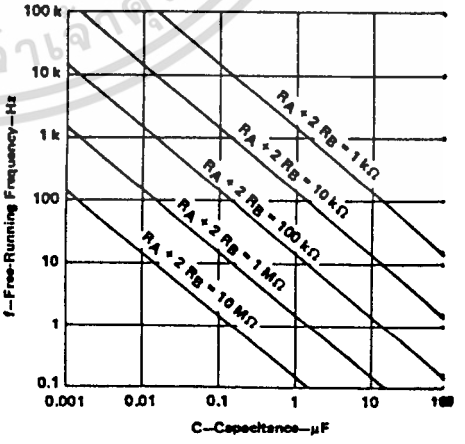


FIGURE 15–FREE-RUNNING FREQUENCY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

missing-pulse detector

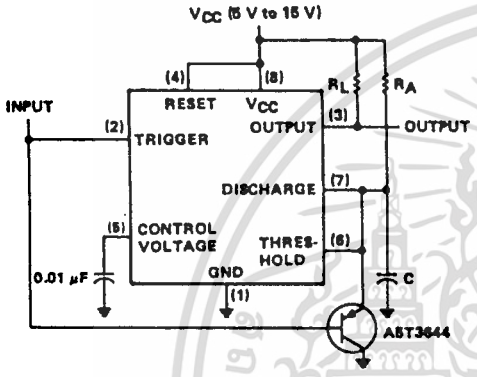


FIGURE 16—CIRCUIT FOR MISSING-PULSE DETECTOR

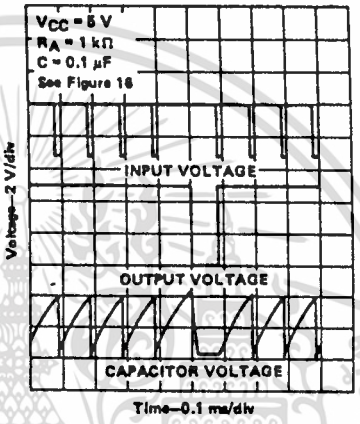


FIGURE 17—MISSING-PULSE DETECTOR WAVEFORMS

The circuit shown in Figure 16 may be utilized to detect a missing pulse or abnormally long spacing between consecutive pulses in a train of pulses. The timing interval of the monostable circuit is continuously retriggered by the input pulse train as long as the pulse spacing is less than the timing interval. A longer pulse spacing, missing pulse, or terminated pulse train will permit the timing interval to be completed, thereby generating an output pulse as illustrated in Figure 17.

frequency divider

By adjusting the length of the timing cycle, the basic circuit of Figure 10 can be made to operate as a frequency divider. Figure 18 illustrates a divide-by-3 circuit that makes use of the fact that retriggering cannot occur during the timing cycle.

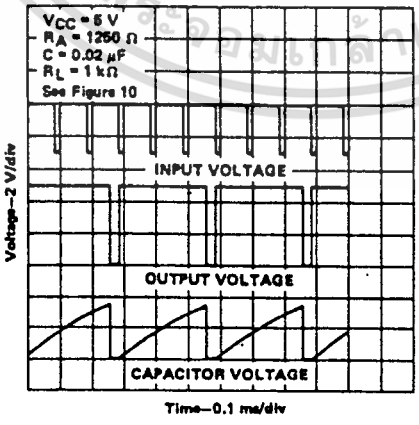
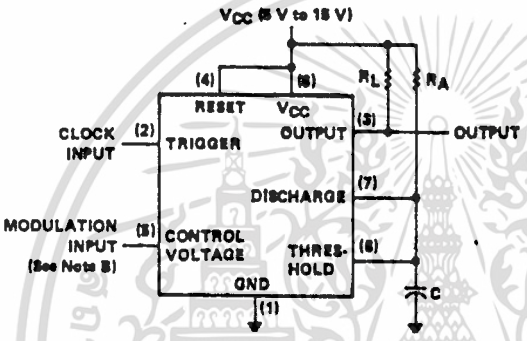


FIGURE 18—DIVIDE-BY-THREE CIRCUIT WAVEFORMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

pulse-width modulation



NOTE B: The modulating signal may be direct or capacitively coupled to the control voltage terminal. For direct coupling, the effects of modulation source voltage and impedance on the bias of the timer should be considered.

FIGURE 19—CIRCUIT FOR PULSE-WIDTH MODULATION

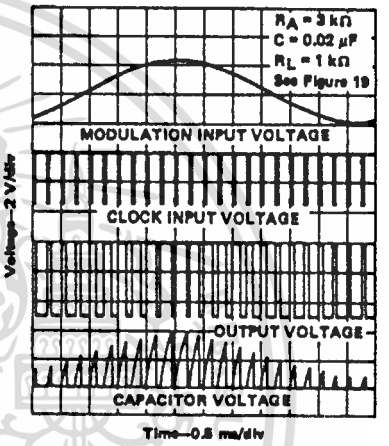


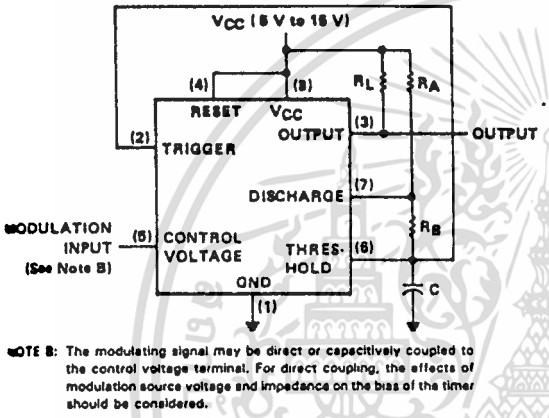
FIGURE 20—PULSE-WIDTH MODULATION WAVEFORMS

The operation of the timer may be modified by modulating the internal threshold and trigger voltages. This is accomplished by applying an external voltage (or current) to the control voltage pin. Figure 19 is a circuit for pulse-width modulation. The monostable circuit is triggered by a continuous input pulse train and the threshold voltage is modulated by a control signal. The resultant effect is a modulation of the output pulse width, as shown in Figure 20. A sine-wave modulation signal is illustrated, but any wave-shape could be used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

pulse-position modulation



NOTE B: The modulating signal may be direct or capacitively coupled to the control voltage terminal. For direct coupling, the effects of modulation source voltage and impedance on the bias of the timer should be considered.

FIGURE 21—CIRCUIT FOR PULSE-POSITION MODULATION

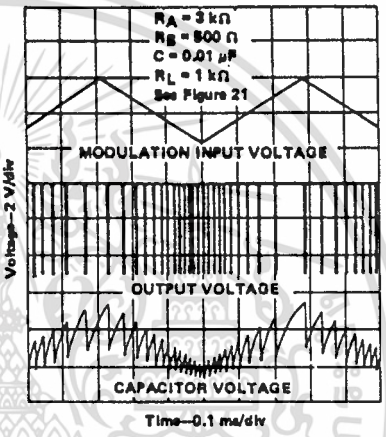


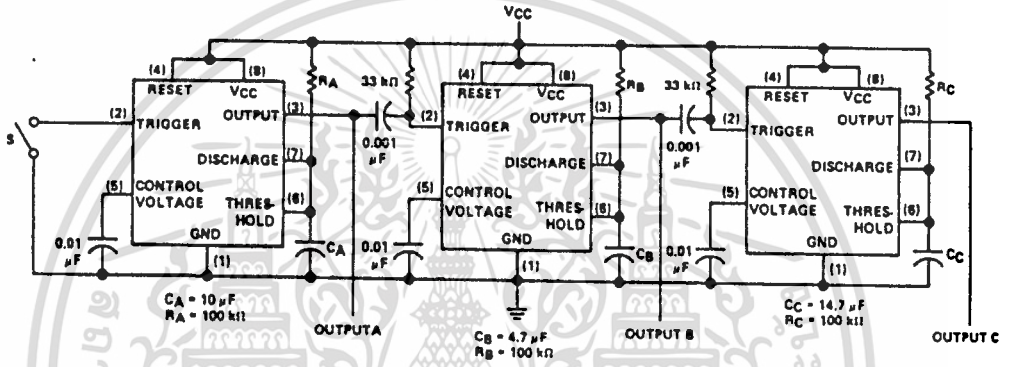
FIGURE 22—PULSE POSITION-MODULATION WAVEFORMS

Any of these timers may be used as a pulse-position modulator as shown in Figure 21. In this application, the threshold voltage, and thereby the time delay, of a free-running oscillator is modulated. Figure 22 shows such a circuit, with a triangular-wave modulation signal, however, any modulating wave-shape could be used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL APPLICATION DATA

sequential timer



S closes momentarily at t = 0.

FIGURE 23—SEQUENTIAL TIMER CIRCUIT

Many applications, such as computers, require signals for initializing conditions during start-up. Other applications such as test equipment require activation of test signals in sequence. These timing circuits may be connected to provide such sequential control. The timers may be used in various combinations of astable or monostable circuit connections, with or without modulation, for extremely flexible waveform control. Figure 23 illustrates a sequencer circuit with possible applications in many systems and Figure 24 shows the output waveforms.

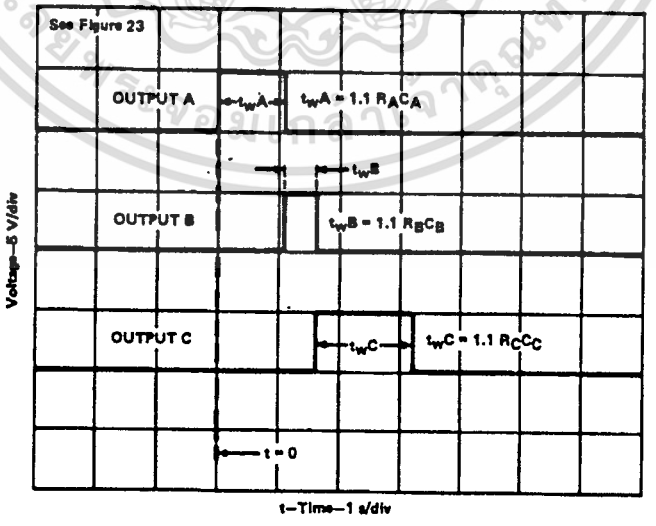


FIGURE 24—SEQUENTIAL TIMER WAVEFORMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. นายณัฐพล วันทะมาตย์ เกิดวันที่ 16 มิถุนายน 2520 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ กรุงเทพมหานคร สาขาวิชา วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ มีประสบการณ์การฝึกงานตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) จังหวัดสมุทรปราการ
2. นางสาววัจนา พิลหาเวสส เกิดวันที่ 16 พฤษภาคม 2519 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร สาขาวิชา วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ มีประสบการณ์การฝึกงานตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากบริษัท ไทยเซลลูโลสโปรดักส์ จำกัด จังหวัดระยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้