

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายโดยใช้ ISFET



นางสาวปนัดดา วงเวียน
นายปัญญาภัทร น่วมเปี่ยม

รพ.
21/6/7
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **81593**
วัน,เดือน,ปี... **19** ส.ย. 2551

b. **11931785**
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Ion Concentration Measurement by ISFET



Miss Panatda Wongvien

Mr.Panjaphat Nuampien

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

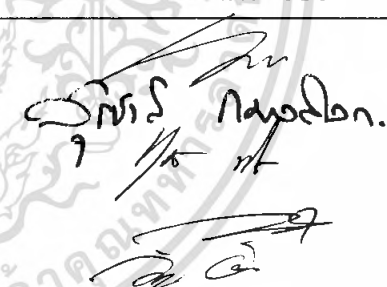
King Mongkut Institute of Technology Lardkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาการวัดความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลายโดยใช้ ISFET
 นักศึกษา นางสาวปนัดดา วงเวียน
 นายปัญญาภัทร น่วมเปี่ยม
 ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
 ปีการศึกษา 2550
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์วิฑูรย์ ยินดีสุข

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อาจารย์เบญจพล ต้นธุ์	
กรรมการ	อาจารย์สุรชาติ กมลติลก	
กรรมการ	อาจารย์หทัยภรณ์ ทิววงศ์	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์วิฑูรย์ ยินดีสุข	



(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายโดยใช้ ISFET
นักศึกษา	นางสาวปนัดดา วงเวียน นายปัญญภัทร น่วมเปี่ยม
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์วิฑูรย์ ยินดีสุข

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน(H^+) ของสารละลายโดยใช้อุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ 5 V ให้แก่อุปกรณ์ ISFET ทำการวัดในสารละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายเบสแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) , สารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) , น้ำกลั่น(H_2O) , สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) , สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) , สารละลายกรดซัลฟิวริก(H_2SO_4) และ สารละลายกรดฟอร์มิก (HCO_2H) แรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่ผ่านวงจรรขยายและแสดงออกมา โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาอยู่ในช่วงระหว่าง 3.38 V ถึง 4.78 V ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด – เบส (pH) และสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน

Special Project Title	A Study of Ion Concentration Measurement by ISFET
Name	Miss Panatda Wongvien Mr.Panjaphat Nuampien
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics-Science and Industry Instrumentation
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa
Special Project Co-Advisor	Witun Yindeesuk

ABSTRACT

The project is set up in order to measure the hydrogen ion concentration using Ion Sensitive Field Effect Transistor device (ISFET). ISFET with 5V-bias voltage was immersed in solution such as NH_4OH , KOH , H_2O , CH_3COOH , HCl , H_2SO_4 and HCO_2H . Output voltage which is depended on hydrogen ion concentration is then amplified and displayed. The output voltage ranging from 3.38 V to 4.78 V exhibits significant relationship to pH value and corresponded hydrogen ion concentration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีได้นั้น ต้องขอกราบพระคุณ อาจารย์ รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและเสนอแนะการทำปริญญาบัตร เป็นผู้มอบโอกาสหลายๆสิ่งที่ดีมากต่อข้าพเจ้าทั้งสองตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

กราบพระคุณ อาจารย์วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาและเสนอแนะการทำปริญญาบัตร

ขอบคุณพี่วิน บรรจงปรุ สำหรับน้ำใจและความช่วยเหลือที่มอบให้

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณมารดาบิดา ผู้ที่ข้าพเจ้าทั้งสองรักที่สุดในชีวิตซึ่งท่านได้เป็นกำลังใจในช่วงที่ใกล้จะสำเร็จการศึกษา ขอสัญญาว่าจะเป็นคนดี ขยัน อดทนเพื่อให้ประสบความสำเร็จต่อไปให้ได้ในการทำงาน หากประสบความสำเร็จจะอุทิศชีวิตเพื่อญาติพี่น้องและสังคมตามที่ได้สัญญากับตัวเองไว้ตลอดหลายปีที่ผ่านมา

น.ส. ปนัดดา วงเวียน

นายปัญญาภัทร น่วมเปี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 บทนำ	3
2.2 ทฤษฎี Voltage Follower Amplifier Circuit	4
2.3 ทฤษฎีและหลักการของอุปกรณ์ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)	5
2.4 ทฤษฎีและหลักการของอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 หลักการของอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)	11
3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย	12
3.3 การวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด	13
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย	16
4.2 ผลการทดลองในการวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด	17
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน ช่วงเวลาการตอบสนองและฮิสเตอร์รีซิสของหัววัดค่าความเป็นกรด-เบสแบบ ISFET เปรียบ เทียบกับหัววัดค่าความเป็นกรด-เบสแบบกระดาษแก้ว	37
ภาคผนวก ข การสร้างและการวัดคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ Hydrogen ion-sensitive field effect transistor Fabrication and electrical characterization Hydrogen ion-sensitive field effect transistor	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติเฉพาะของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่ใช้สร้าง Ion sensing membrane	12
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1	17
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2	18
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3	19
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4	20
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1	21
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2	22
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3	22
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4	23
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1 จำนวน 6 ครั้ง	23
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2 จำนวน 6 ครั้ง	24
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3 จำนวน 6 ครั้ง	25
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4 จำนวน 6 ครั้ง	26
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย H_2O	27
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย NH_4OH	28

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์แบบ ISFET	1
รูปที่ 2.1 วงจรขยายสัญญาณ Voltage Follower	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างสัญลักษณ์วงจรพื้นฐาน	5
รูปที่ 2.3 กราฟลักษณะการ โอนย้ายกราฟลักษณะด้านเดรน	6
รูปที่ 2.4 การทำงานใน Depletion - Mode	6
รูปที่ 2.5 การทำงานใน Enhancement - Mode	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างสัญลักษณ์และวงจรพื้นฐาน	8
รูปที่ 2.7 กราฟลักษณะสมบัติการ โอนย้ายและกราฟลักษณะสมบัติด้านเดรน	8
รูปที่ 2.8 ภาพแถบพลังงาน (ก) MOSFET (ข) ISFET	10
รูปที่ 3.1 ภาพของอุปกรณ์แบบ ISFET	11
รูปที่ 3.2 แสดงถึง โครงสร้างของ silicon nitride gate ISFET ที่ใช้ในการวิจัย	12
รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรอ่านค่าของอุปกรณ์แบบ ISFET	13
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการวัดความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลาย	14
รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลาย	17
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1	18
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2	19
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3	20
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4	21
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของ อุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1 จำนวน 6 ครั้ง	24
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของ อุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2 จำนวน 6 ครั้ง	25
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของ อุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3 จำนวน 6 ครั้ง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCl	28
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย CH_3COOH	29
ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย H_2SO_4	30
ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCO_2H	30
ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายชนิดต่าง ๆ	31
ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรด CH_3COOH ที่ค่า pH ต่าง ๆ	32
ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรด H_2SO_4 ที่ค่า pH ต่าง ๆ	32
ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายเบส NH_4OH ที่ค่า pH ต่าง ๆ	33
ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรดต่างชนิดกันที่ค่า pH เท่ากัน	33
ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET วัดในสารละลายเบสต่างชนิดกันที่ค่า pH เท่ากัน	34

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4 จำนวน 6 ครั้ง	27
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย H_2O	27
รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย NH_4OH	28
รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCl	29
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย CH_3COOH	30
รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย CH_3COOH	30
รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCO_2H	31

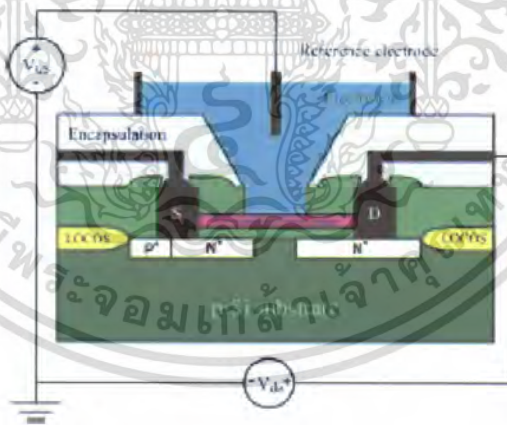
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีเครื่องมือที่นำอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) มาใช้ในการวัดค่าไอออนในสารละลาย ซึ่งมีการพัฒนาเครื่องมือขึ้นอย่างรวดเร็วและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิ อุปกรณ์วัดความเป็นกรด - เบสแบบ ISFET อุปกรณ์ ISFET สำหรับวัดค่าความเป็นกรด - เบสน้ำ ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากมีความแม่นยำสูงและสามารถควบคุมได้ จึงได้มีการนำมาพัฒนาในระบบวัดต่างๆเป็นอย่างมาก

ดังนั้นจึงเกิดความสนใจในการที่จะพัฒนาอุปกรณ์ ISFET มาจัดทำเป็นระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้นกว่าเดิม และสามารถจะนำไปประยุกต์ใช้อธิบายความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิดได้



รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์แบบ ISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. สามารถอธิบายกลไกการทำงานขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ ISFET ได้
2. สามารถอธิบายขั้นตอนและ ปฏิบัติงานระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายได้
3. เพื่อที่จะทำการพัฒนาระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากกว่าเดิม
4. สามารถที่นำระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายไปประยุกต์ใช้อธิบายความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิดได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อที่จะทำการพัฒนาระบบวัดความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลายให้เกิดความแม่นยำในการวัดค่า และสามารถจะนำไปประยุกต์ใช้อธิบายความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิดได้

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ ISFET และระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย
2. นำข้อมูลที่ทำการศึกษา มาปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อรับคำแนะนำ และแนวทางในการปฏิบัติ
3. ทำการออกแบบวงจรระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย และทำการประดิษฐ์วงจรออกมาทดสอบผลที่ได้ จากนั้นทำการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
4. ทำการวัดความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลายชนิดต่าง ๆ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกลไกการทำงานขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ ISFET ได้
2. เข้าใจถึงขั้นตอนและ ปฏิบัติงานวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายได้
3. สามารถนำชิ้นงานที่ได้จากการประดิษฐ์มาใช้ประโยชน์ได้โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่และหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการวัดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนของสารละลายนั้นจะสามารถจะบอกระดับความเป็นกรดของสารละลายแต่ละชนิดได้จากสิ่งต่อไปนี้

2.1.1 ความแรงของกรด – เบส

ความแรงของกรดและเบส ขึ้นอยู่กับการแตกตัวเป็นไอออนของกรดและเบสนั้น เมื่อละลายน้ำ ซึ่งเป็นสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แบ่งเป็น

อิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) ในที่นี้ได้แก่ กรดอ่อน เบสอ่อน คือกรดหรือเบสที่แตกตัวได้ไม่ถึง 100% หรือแตกตัวไม่หมด ซึ่งจะเกิดสมดุลของการแตกตัว เป็นไอออนด้วย

อิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) ในที่นี้ได้แก่ กรดแก่ เบสแก่ คือกรดหรือเบสที่สามารถแตกตัวได้หมด 100% ไม่มีการเกิดสมดุลของไอออน โดยทั่วไปสามารถวัดความแรงของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยตรงจากการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นเท่ากัน สารที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าจะเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แรงกว่า

ความหนาแน่นของไอออนไฮโดรเจนหรือไฮโดรเนียมไอออน, H^+ หรือ H_3O^+ (ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวก)

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

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

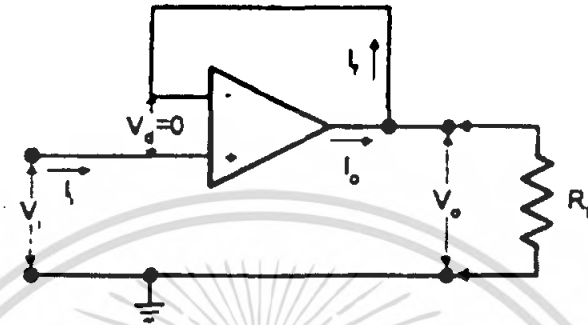
$$pH = \log \left[\frac{1}{(H^+)} \right] = -\log [H^+] \quad (2.1)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎี Voltage Follower Amplifier Circuit

การทำงานของวงจรตามคัตตาสัญญาณ คือสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอินพุตทุกประการ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 วงจรขยายสัญญาณ Voltage Follower

บางครั้งเราอาจเรียกวงจรดังกล่าวนี้เป็นวงจรขยายแบบแยกส่วน (Isolation Amplifier), วงจรขยายแบบอัตรากว้างเท่ากับ 1 (Unity Gain Amplifier) หรือ วงจรขยายแบบบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier)

เนื่องจากแรงดันระหว่างขาอินพุตบวกและลบ จะถือได้ว่าเป็นศูนย์ จากวงจรข้างบนจะเห็นว่าเอาต์พุตของออปแอมป์ได้ต่อกับขาอินพุตลบดังนี้

$$V_o = V_i \quad (2.2)$$

$$V_o / V_i = 1 \quad (2.3)$$

$$A_v = 1 \quad (2.4)$$

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามคัตตาสัญญาณ (Z_i) จะมีค่าสูงมาก

$$Z_i = V_i / I_i \quad (2.5)$$

$$Z_i = A_{OL} = \alpha \quad (2.6)$$

เมื่อ Z_i = อินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์

A_{OL} = อัตราขยายแรงดันเมื่อเปิดลูป

ต่อภาระ R_L ดังนั้นจะได้

$$I_o = I_F + I_L \quad (2.7)$$

แต่

$$I_F = 0 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.9) ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติจากการทดลอง IC 741 I_{Omax} ไม่ควรเกิน 5 mA เพราะว่าถ้า I_O เกิน $\pm 5mA$ แล้วจะเป็นผลทำให้ V_O ลดลงจากแรงดันที่คาดหวังไว้ เมื่อค่า V_O สูงสุดของ IC 741 เท่ากับ $V_{sat} - 14V$ ดังนั้นเราสามารถหาภาระที่มีค่า ค.ต.ท. ต่ำที่สุดที่ไม่ทำให้ V_O ลดลงได้จากสูตร

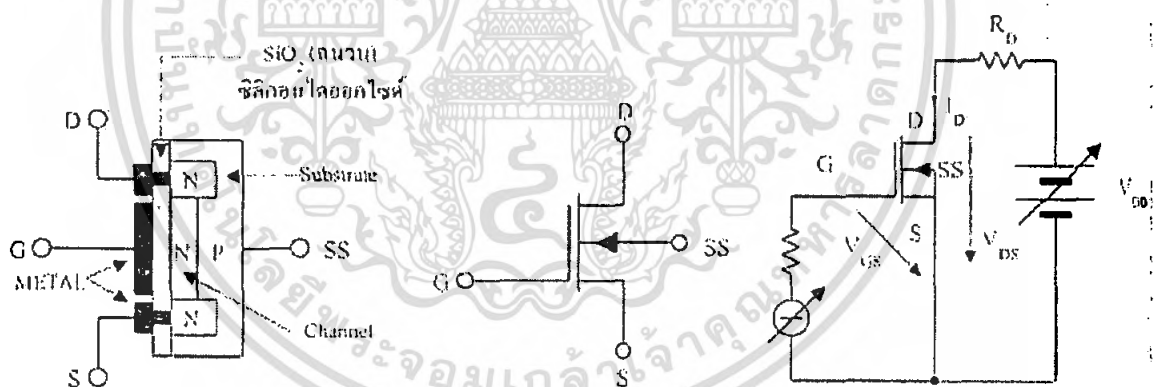
$$R_{L,min} = \frac{V_{sat}}{I_{Omax}} \quad (2.10)$$

2.3 ทฤษฎีและหลักการของอุปกรณ์ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

เนื่องจากมีฉนวน (Insulated) ที่ทำมาจาก SiO_2 กั้นระหว่างเกตกับช่อง (Channel) จึงเรียก MOSFET อีกหนึ่งชื่อ คือ “Insulated Gate FET” (IGFET) และจากฉนวนที่กั้นนี้เองทำให้ไม่มีกระแสไหลที่ขา G (Gate)

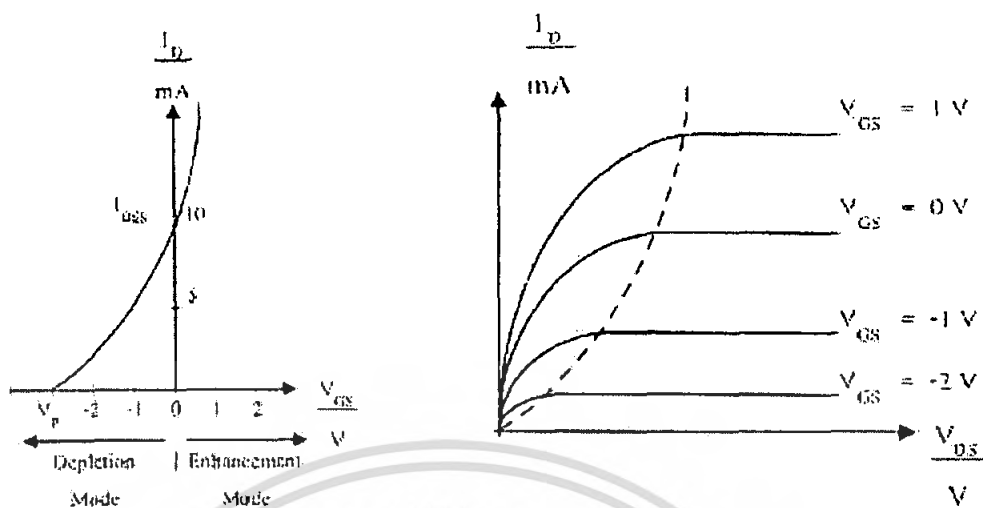
2.3.1 Depletion – Type MOSFET (DMOSFET)

2.3.1.1 DMOSFET N - Channel

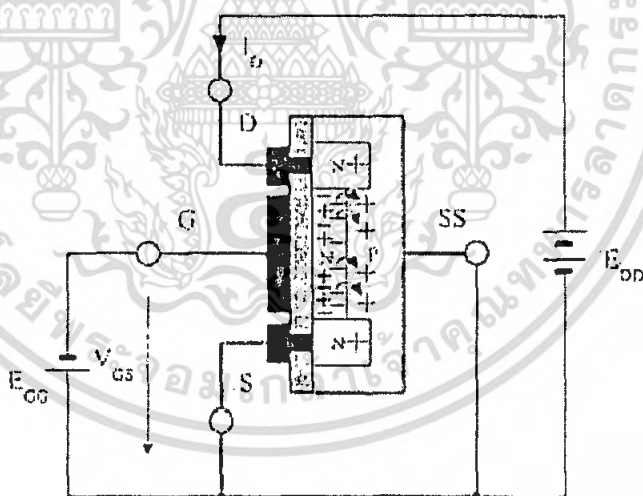


รูปที่ 2.2 โครงสร้างสัญลักษณ์วงจรพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



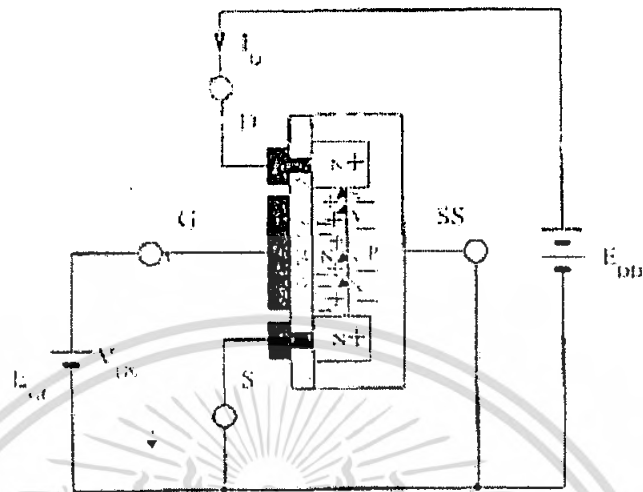
รูปที่ 2.3 กราฟลักษณะการโอนย้ายกราฟลักษณะด้านตรง



รูปที่ 2.4 การทำงานใน Depletion - Mode

จากวงจร รูป ที่ 2.4 เมื่อ V_{GS} เป็นลบ ขั้วบวกของ E_{GG} จะดึงอิเล็กตรอนอิสระของขั้วสเตรทเข้า มา และผลักโฮลของขั้วสเตรทไปอยู่บริเวณรอยต่อของ N - Channel ขณะเดียวกันขั้วลบของ E_{GG} จะสร้างสนามไฟฟ้า ผลักอิเล็กตรอนอิสระของ N - Channel ไปอยู่บริเวณรอยต่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระของ N - Channel ข้ามรอยต่อมารวมตัวกับโฮลของขั้วสเตรท ทำให้อิเล็กตรอนอิสระของ N - Channel มี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนลดลง นั่นคือ ค.ต.ท. ของ N – Channel จะสูงขึ้น กระแสเดรน I_D ก็จะไหลเข้าขา D ผ่าน N – Channel และออกมาที่ขา S ได้น้อยลง



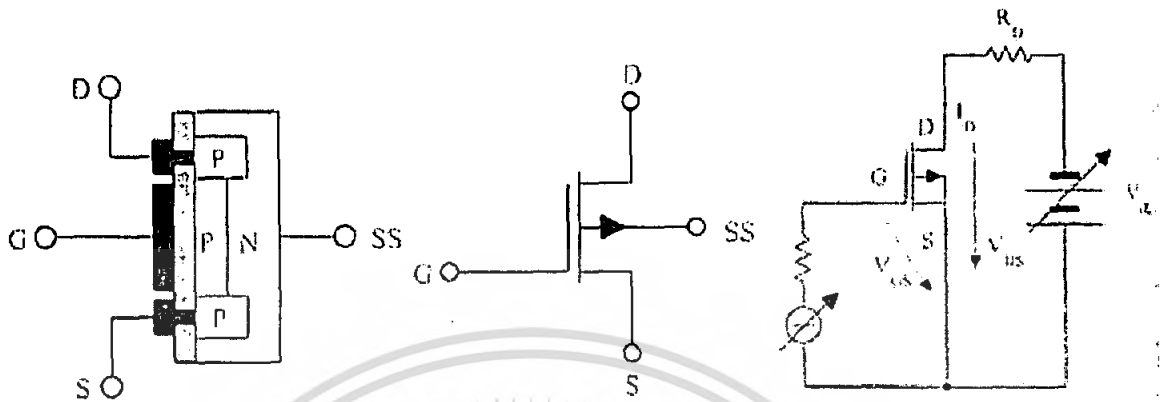
รูปที่ 2.5 การทำงานใน Enhancement - Mode

จากวงจรรูปที่ 2.5 เมื่อ V_{GS} เป็นบวก ขั้วบวกของ E_{GG} จะสร้างสนามไฟฟ้าพลิกโฮล (พาหะส่วนน้อย) ของ N – Channel ไปอยู่บริเวณรอยต่อ และขั้วลบของ E_{GG} จะผลักพาหะส่วนน้อย (อิเล็กตรอนอิสระ) ของสาร P ชั้สเตรท ไปอยู่บริเวณรอยต่อ ทำให้พาหะส่วนน้อยหรืออิเล็กตรอนอิสระของสาร P (ชั้สเตรท) ข้ามรอยต่อไปรวมตัวกับโฮลของ N – Channel ทำให้สภาพความนำของ N – Channel สูงขึ้น (เพราะว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมีค่ามากขึ้น) กระแสเดรน I_D ก็จะไหลเข้าขา D ผ่าน N – Channel และ ออกมาที่ขา S มากขึ้น จากหลักการดังกล่าวแสดงได้ดัง กราฟลักษณะสมบัติไอออนย้าย สมการของกราฟลักษณะสมบัติ ไอออนย้ายจะเหมือนของ JFET คือ

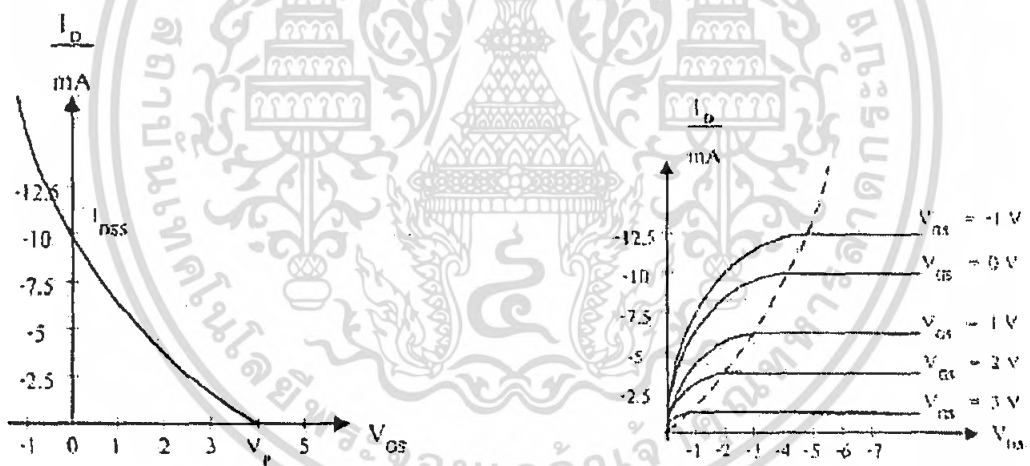
$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2 \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 DMOSFET P - Channel



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสัญลักษณ์และวงจรพื้นฐาน



รูปที่ 2.7 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและกราฟลักษณะสมบัติด้านเดรน

DMOSFET P - Channel จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ DMOSFET N - Channel โดยกาไบอัสจะตรงข้ามกัน กล่าวคือ V_{DS} จะมีค่าเป็นลบ จึงต้องต่อ V_{SS} ดังรูป นั่นคือ เมื่อ DMOSFET P - Channel นำกระแส จากวงจร I_D จะอ่านค่าได้เป็นลบ โดยที่ V_{GS} จะอ่านค่าได้เป็นลบ โดยที่ถ้า V_{GS} มีค่าเป็นลบ จะทำให้กระแสมีประมาณมาก เมื่อ $V_{GS} = 0$ กระแสเดรนจะเท่ากับ I_{DSS} ถ้า V_{GS} เป็นบวก กระแส เดรนก็จะลดลง จากรูปเมื่อ $V_{GS} = V_p = 4 \text{ V}$ ทำให้ $I_D = 0 \text{ mA}$ สำหรับสมการก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันดังสมการที่ (2.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีและหลักการของอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)

ในปี ค.ศ. 1970 Piet Bergveld นำเสนอผลงานเกี่ยวกับการทดลองนำอุปกรณ์ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) ลอกชั้นเกตโลหะออก จากนั้นนำอุปกรณ์แซ่ในสารละลายและวัดสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า pH ของสารละลาย ค่ากระแสในแซนแนล มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า pH ของสารละลาย หรือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น ๆ Piet Bergveld ให้คำอธิบายว่าชั้นออกไซด์บริเวณเกต ทำหน้าที่เป็น ion sensing membrance เขาตั้งชื่ออุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ISFET การใช้งานต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสารละลายที่ต้องการวัดค่า pH เพื่อลดสัญญาณรบกวน

ในปี ค.ศ. 1989 Hon-Sum Wong นำเสนอผลงานเกี่ยวกับเกี่ยวกับแนวโน้มน้ำของ ISFET จะเข้ามาแทนที่ ion-selecting glass electrode ด้วยข้อได้เปรียบหลาย ๆ ข้อคือ ขนาดเล็ก ($1 < \text{mm}^2$), high input impedance, low output impedance, อุปกรณ์ ISFET มีการตอบสนองต่อปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่รวดเร็ว, สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากต่อครั้ง เนื่องจากกระบวนการผลิตใช้กระบวนการผลิตแบบเดียวกับการผลิต MOSFET ปัจจุบันสามารถสร้างเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ พร้อมวงจรรวมสำหรับอ่านค่าลงในชิปเดียว ทำให้ราคาในการผลิตต่อหน่วยถูกลงมาก

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ISFET ใช้พื้นฐานความรู้ของ MOSFET อธิบายคุณสมบัติ I_D - V_D ช่วงเชิงเส้น (Linear region) และช่วงอิ่มตัว (Saturation region) ดังสมการด้านล่าง

$$I_{lin} = \frac{\mu C_i W (V_G - V_T) V_D}{L} \quad (2.12)$$

$$I_{sat} = \frac{\mu C_i W}{2L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.13)$$

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N (2\psi_B)}}{C_i} \quad (2.14)$$

I_{lin} = กระแสเดรนช่วงเชิงเส้น (A), I_{sat} = กระแสเดรนช่วงอิ่มตัว (A)

V_G = แรงดันขั้วเกต (V), V_D = แรงดันขั้วเดรน (V)

W = ความกว้างเกต (μm), L = ความยาวเกต (μm)

μ = สภาพคล่องของประจุพาหะ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)

C_i = ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ (F)

V_T = แรงดันขั้วเริ่ม (V), V_{FB} = แรงดันแถบเรียบ (V)

ψ_B = ศักย์เฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (V)

ϵ_s = permittivity of semiconductor (F/cm)

q = ประจุไฟฟ้า (1.602×10^{-19} C)

N = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ (atom/cm³)

พิจารณารูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงภาพแถบพลังงานเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ MOSFET กับ ISFET พบว่าอุปกรณ์สองชนิดมีค่าแรงดันแถบเรียบ (Flatband voltage: V_{FB}) แตกต่างกันคือ

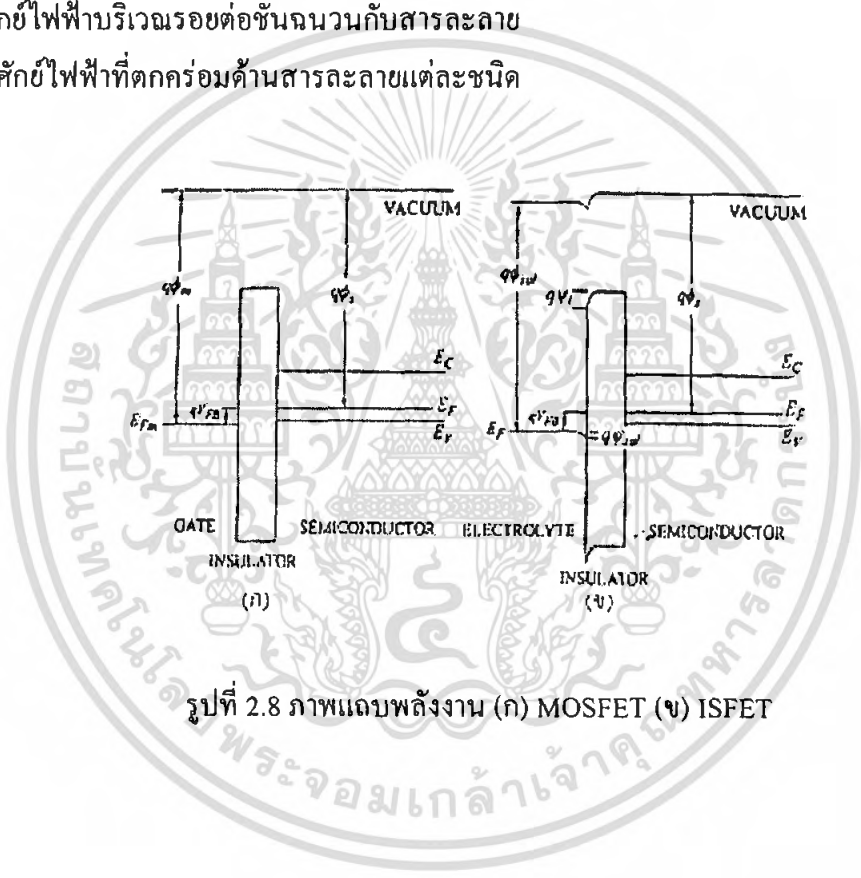
$$V_{FB} (MOSFET) = \phi_m - \phi_s \tag{2.15}$$

$$V_{FB} (ISFET) = \phi_{sol} - \phi_s - \psi_i - \psi_{sol} \tag{2.16}$$

ϕ_m คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ, ϕ_s คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

ψ_i คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย

ψ_{sol} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด



รูปที่ 2.8 ภาพแถบพลังงาน (ก) MOSFET (ข) ISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยของ โครงการการศึกษาระบบวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย โดยใช้ ISFET นี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

- ขั้นตอน 1 หลักการของอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)
- ขั้นตอน 2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย
- ขั้นตอน 3 การวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด โดยจะมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

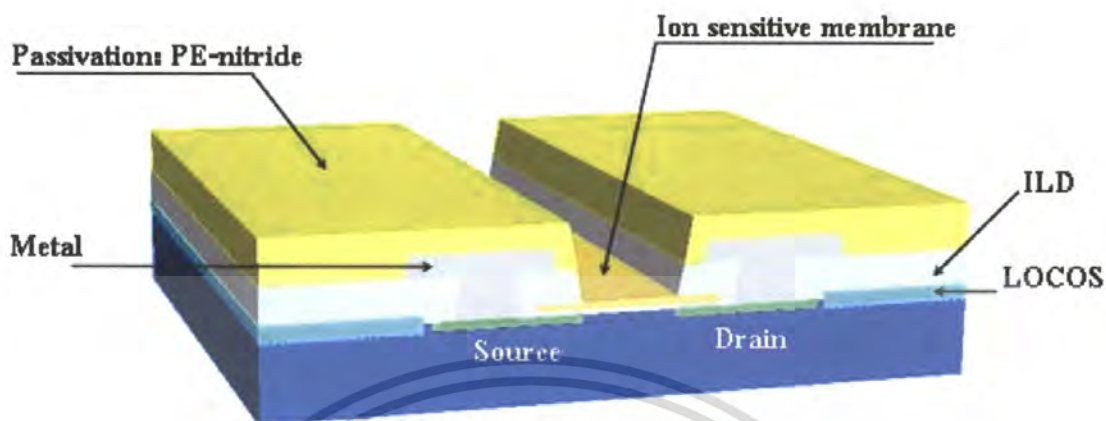
3.1 หลักการของอุปกรณ์ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)



รูปที่ 3.1 ภาพของอุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)

เป็นการทดลองนำอุปกรณ์ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) ลอกชั้นเกตโลหะออก จากนั้นนำอุปกรณ์แช่ในสารละลายและวัดสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ค่ากระแสในเซนแนล มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น ๆ โดยชั้นออกไซด์บริเวณเกต ทำหน้าที่เป็น ion sensing membrane

อุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) มีความสามารถในการตอบสนองต่อชนิด และ ความเข้มข้นของไอออนนั้นขึ้นอยู่กับชนิด Ion sensing membrane ซึ่งสร้างบนเกตออกไซด์ จากข้อมูลใน ตารางที่ 1. อุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) ที่นำมาทำการดำเนินการวิจัยสร้างฟิล์ม Si_3N_4 ทำหน้าที่เป็น Ion sensing membrane เนื่องจากสมบัติที่ดีกว่าทุกด้าน และเป็นชั้นฟิล์มที่มีใช้ในกระบวนการผลิตไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงถึง โครงสร้างของ silicon nitride gate ISFET ที่ใช้ในการวิจัย

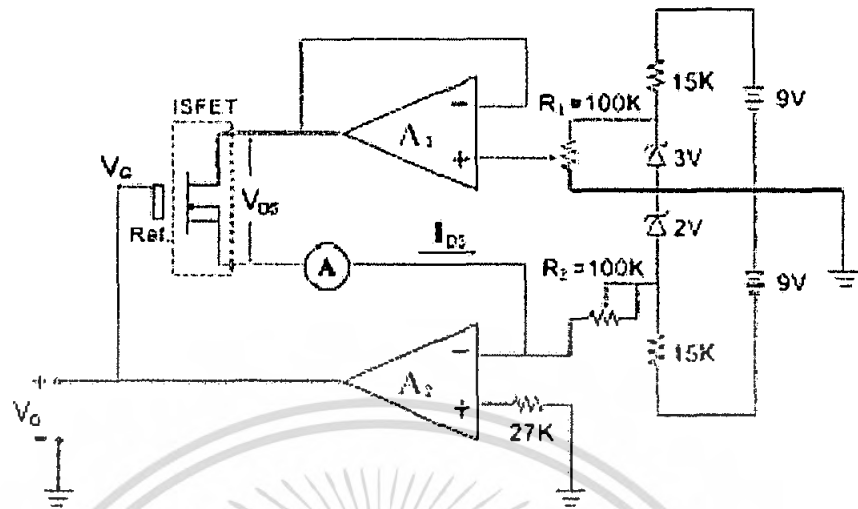
ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติเฉพาะของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่ใช้สร้าง Ion sensing membrane

สมบัติเฉพาะของฟิล์มชนิดต่าง ๆ	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅
Rang of pH meas.	4-10	1-13	1-13	2.5-13
Sensitivity [mV/pH]	25-46	46-56	53-56	55-57
Response time [95%]	<1min	<1s	<1s	<1s
Long-term Stability [mV/h,pH7]	Unstable	1.0	0.8	0.5

3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

ในการดำเนินงานวิจัยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายสร้างขึ้นจากแผนภาพวงจรอ่านค่าในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรอ่านค่าของอุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)

แผนภาพวงจรอ่านค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำหน้าที่จ่ายแรงดัน V_{DS} และกระแส I_{DS} ให้คงที่ โดยการปรับค่า R_1 และ R_2 ตามลำดับ

3.3 การวัดและวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด

ในการวัดและวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนในสารละลายนั้น สารละลายที่นำมาใช้ในการวัดและวิเคราะห์นั้นมีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่

- น้ำกลั่น (H_2O)
- สารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- สารละลายเบสแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
- สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- สารละลายกรดฟอร์มิก (HCO_2H)

ซึ่งสารละลายทั้ง 7 ชนิด ที่นำมาวัดปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้น สามารถแตกตัวให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมาได้ ทำให้อุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) มีความสามารถในการตอบสนองต่อชนิด และ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนนั้นได้



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

ขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายที่ตัวถูกละลายเป็นของแข็ง

1.1 คำนวณหาน้ำหนักของสารที่ต้องการใช้

วิธีทำ

1) ในสารละลาย	1000 mL	มีเนื้อ KOH อยู่	2	mol
“	200 mL	“	= 0.4	mol
2) น้ำหนักโมเลกุลของKOH		= 39 + 1 + 16	= 56	g/mol
3) KOH	1 mol	มีมวล	56	g
KOH	0.4 mol	มีมวล	= 22.4g	

ดังนั้นจะต้องชั่ง KOH มา 22.4 g

นำสารที่คำนวณได้มาทำการเจือจางตามสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

จากนั้นชั่งสารมาตามที่คำนวณได้ใส่บีกเกอร์เติมน้ำประมาณ 50 mL คนด้วยแท่งแก้ว จนละลาย

เอกสารที่แนบเอกสารที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รินสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 200 mL

ล้างภาชนะที่สัมผัสสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรทั้งหมด

เติมน้ำกลั่นลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 200 mL จนถึงขีดบอกระดับ

รินสารจากขวดวัดปริมาตรใส่ขวดสารแล้วเขียนฉลากให้เรียบร้อย

2. การเตรียมสารละลายที่ตัวถูกละลายเป็นของเหลว

2.1 เติมตัวทำละลายจนได้สารละลายในปริมาตรของสารละลายเท่าที่ต้องการ โดยพิจารณาถึงความหนาแน่นของสารละลายที่ใช้

วิธีทำ

สารละลาย HCl เข้มข้น 37 % โดยปริมาตร

- สารละลาย 200 cm³ มี HCl ละลาย อยู่ 37 cm³
- ทำการตวง HCl 37 cm³ เติมน้ำจนได้สารละลาย 200 cm³

2.2 จากนั้น คนด้วยแท่งแก้ว จนสารละลายเข้ากันละลายหมด รินสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 200 mL

2.3 ล้างภาชนะที่สัมผัสสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรทั้งหมด

2.4 เติมน้ำกลั่นลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 200 mL จนถึงขีดบอกระดับ

2.5 รินสารจากขวดวัดปริมาตรใส่ขวดสารแล้วเขียนฉลากให้เรียบร้อย

วิธีการคำนวณทดลอง

1. สร้างแผนวงจรอ่านค่าของอุปกรณ์แบบ Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) ทำการจ่ายแรงดัน V_{DS} และกระแส I_{DS} ให้คงที่โดยการปรับค่า R_1 และ R_2 ตามลำดับ
2. จากนั้นทำการทดสอบ output voltage ในสารละลายทั้ง 7 ชนิด และบันทึกค่าลงในตาราง
3. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

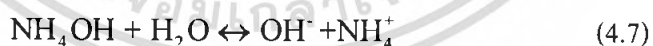
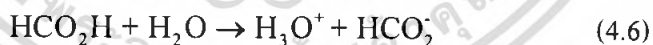
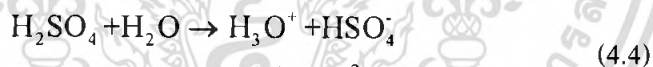
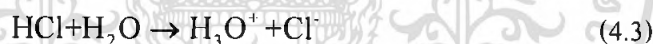
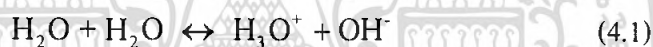
บทที่ 4

ผลการทดลอง

อุปกรณ์แบบ ISFET สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายได้ โดยสารละลายที่นำมาใช้ในการวัดและวิเคราะห์นั้นมีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่

- น้ำกลั่น(H_2O)
- สารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH)
- สารละลายเบสแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
- สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- สารละลายกรดฟอร์มิก (HCO_2H)

ซึ่งสารละลายทั้ง 6 ชนิดเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมาได้ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลายสร้างขึ้นจากแผนภาพวงจรอ่านค่าในรูปที่ 4.1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

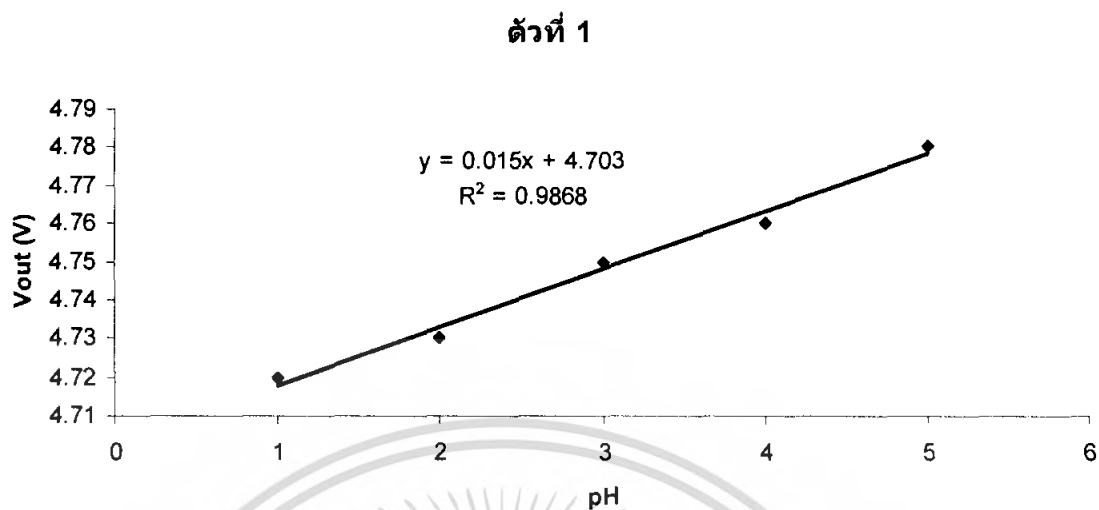


รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

4.2 ผลการทดลองในการวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1

pH	Vout (V)
1	3.22
3	3.39
5	3.59
7	3.67
9	4.11
11	4.39



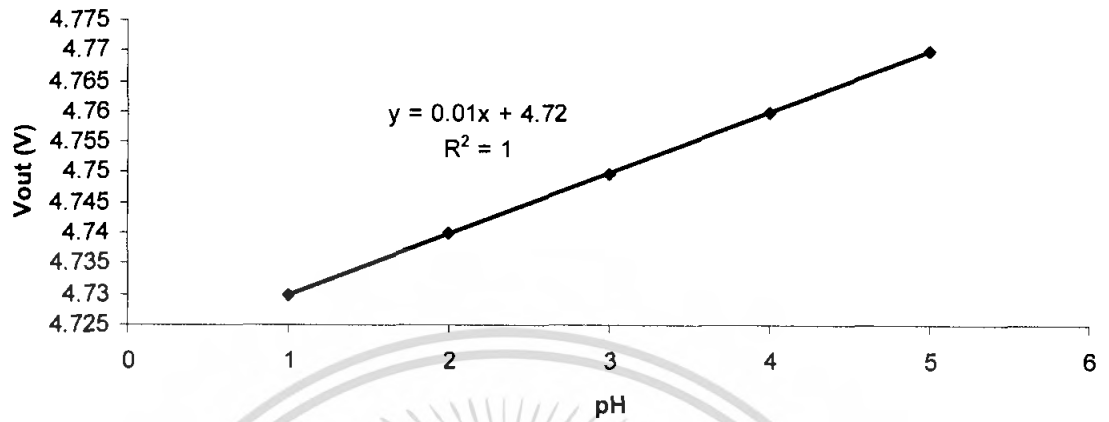
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2

pH	Vout (V)
1	3.35
3	3.48
5	3.61
7	3.72
9	4.13
11	4.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวที่ 2



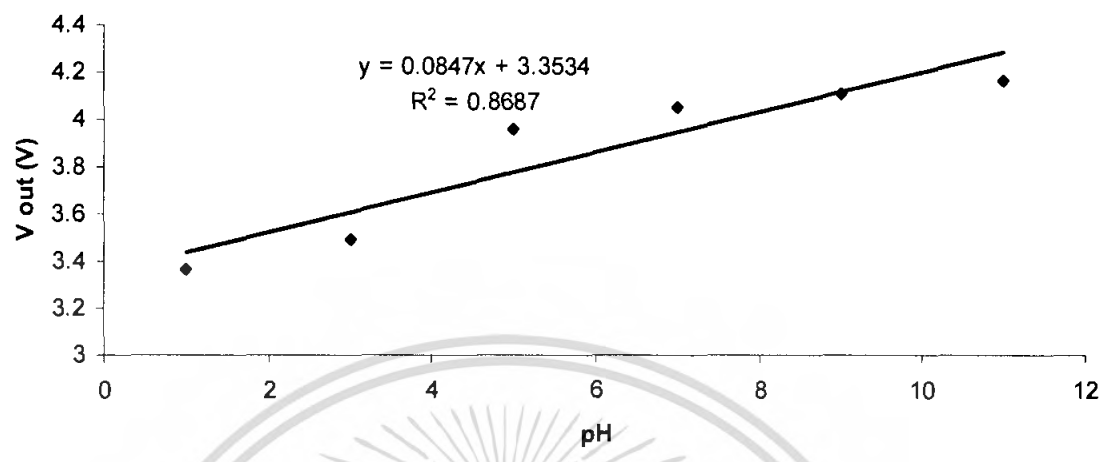
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3

pH	Vout (V)
1	3.37
3	3.50
5	3.96
7	4.06
9	4.11
11	4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวที่ 3

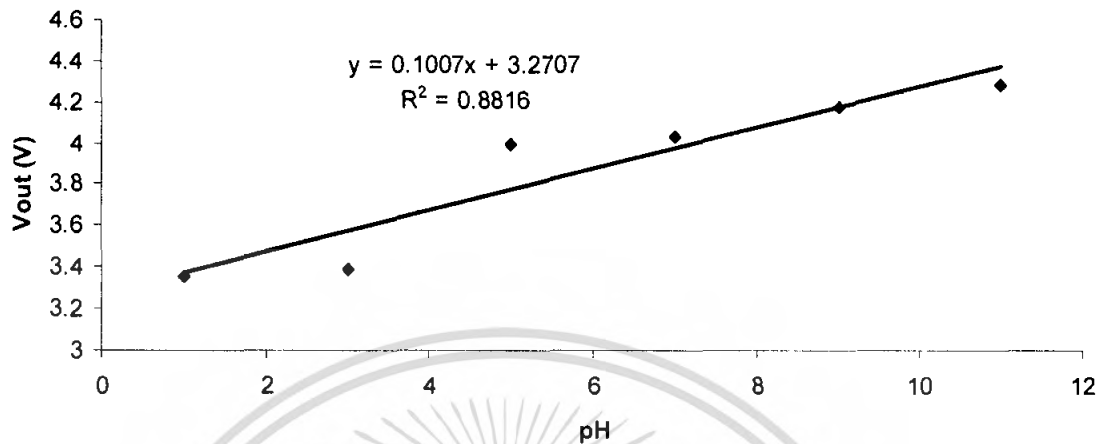


รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H⁺ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H⁺ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4

pH	Vout (V)
1	3.36
3	3.39
5	4.00
7	4.03
9	4.18
11	4.29

ตัวที่ 4



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่างๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1

สารละลาย	V out (V)
1.H ₂ O	3.40
2.NH ₄ OH	3.20
3.HCl	2.70
4.CH ₃ COOH	3.17
5.H ₂ SO ₄	2.81
6.HCO ₂ H	2.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2

สารละลาย	V out (V)
1.H ₂ O	3.25
2.NH ₄ OH	3.11
3.HCl	2.93
4.CH ₃ COOH	3.13
5.H ₂ SO ₄	2.78
6.HCO ₂ H	2.86

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3

สารละลาย	V out (V)
1.H ₂ O	3.19
2.NH ₄ OH	3.11
3.HCl	3.02
4.CH ₃ COOH	3.08
5.H ₂ SO ₄	2.84
6.HCO ₂ H	2.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

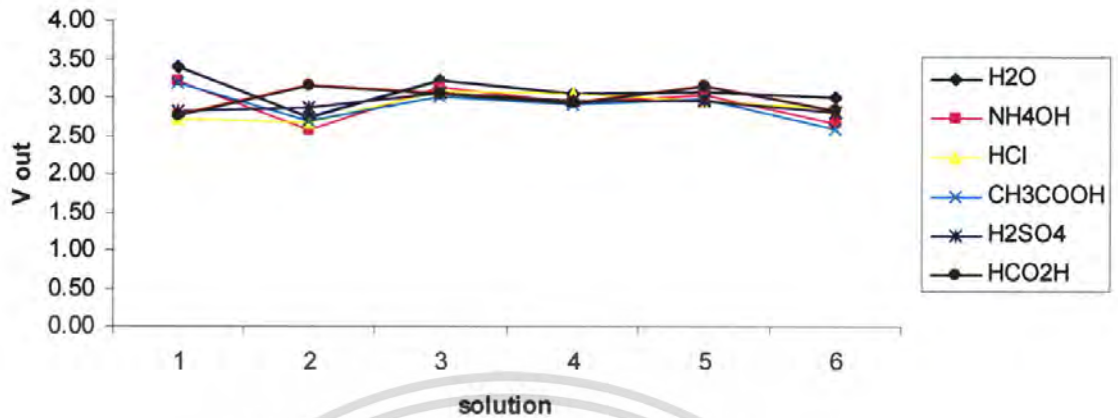
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4

สารละลาย	V out (V)
1.H ₂ O	3.19
2.NH ₄ OH	3.15
3.HCl	3.03
4.CH ₃ COOH	2.98
5.H ₂ SO ₄	2.80
6.HCO ₂ H	2.73

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1 จำนวน 6 ครั้ง

Solution	V out (V)					
1.H ₂ O	3.40	2.73	3.23	3.04	3.08	2.99
2.NH ₄ OH	3.20	2.57	3.12	2.93	3.03	2.67
3.HCl	2.70	2.65	3.07	3.06	2.94	2.85
4.CH ₃ COOH	3.17	2.68	3.00	2.91	2.98	2.58
5.H ₂ SO ₄	2.81	2.86	3.04	2.95	2.96	2.81
6.HCO ₂ H	2.76	3.15	3.06	2.92	3.14	2.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

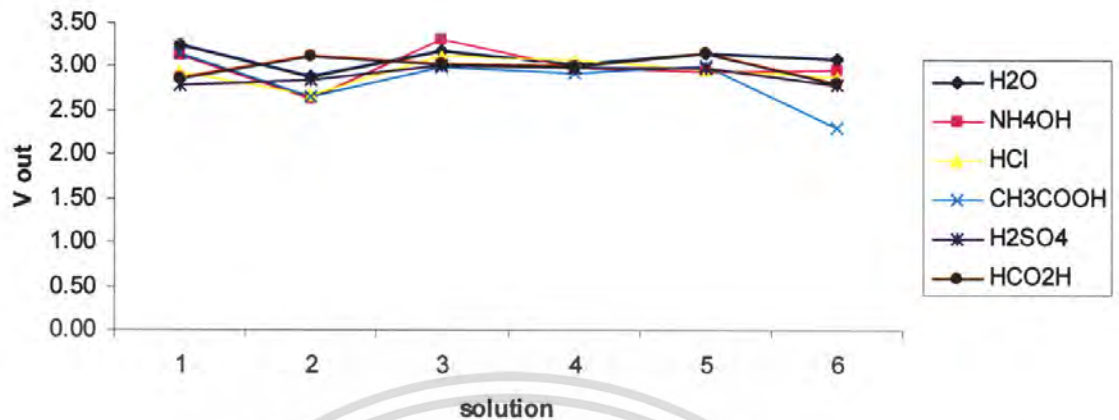


รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 1 จำนวน 6 ครั้ง

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2 จำนวน 6 ครั้ง

Solution	V out (V)					
1.H ₂ O	3.25	2.89	3.19	3.04	3.15	3.10
2.NH ₄ OH	3.11	2.63	3.30	2.98	2.94	2.96
3.HCl	2.93	2.66	3.11	3.08	2.96	2.89
4.CH ₃ COOH	3.13	2.65	2.98	2.92	3.00	2.30
5.H ₂ SO ₄	2.78	2.83	3.00	2.99	2.98	2.79
6.HCO ₂ H	2.86	3.12	3.04	3.01	3.15	2.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

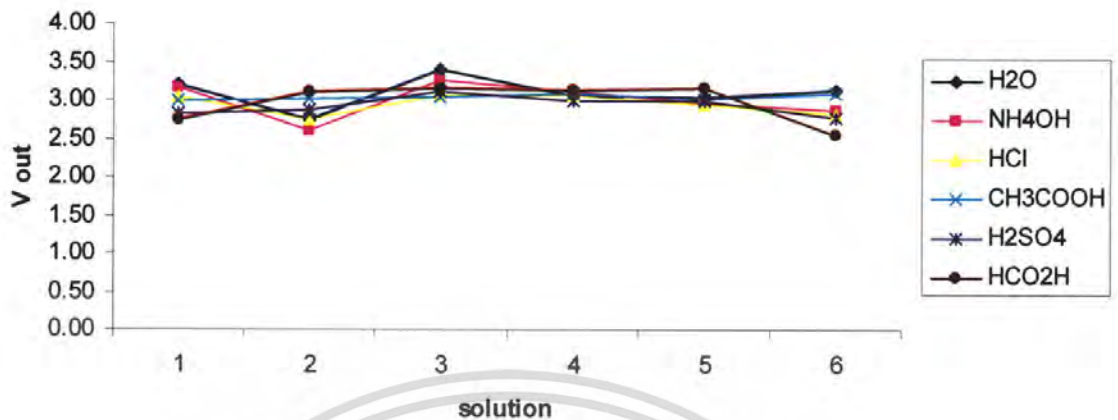


รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 2 จำนวน 6 ครั้ง

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3 จำนวน 6 ครั้ง

Solution	V out (V)					
	1.H ₂ O	3.19	2.70	3.24	3.12	3.00
2.NH ₄ OH	3.11	2.61	3.19	3.08	2.94	2.90
3.HCl	3.02	2.68	3.16	3.05	2.89	2.77
4.CH ₃ COOH	3.08	2.76	3.00	3.08	3.00	3.04
5.H ₂ SO ₄	2.84	2.82	3.08	2.98	2.97	2.75
6.HCO ₂ H	2.74	3.08	3.11	3.00	3.16	2.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

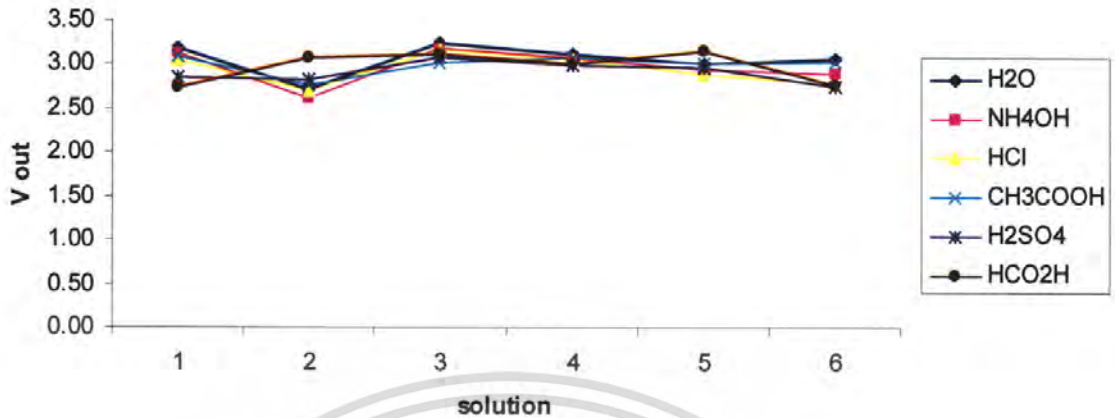


รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของ อุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 3 จำนวน 6 ครั้ง

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของ อุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4 จำนวน 6 ครั้ง

Solution	V out (V)					
1.H ₂ O	3.19	2.74	3.40	3.06	3.03	3.11
2.NH ₄ OH	3.15	2.59	3.25	3.09	2.96	2.85
3.HCl	3.03	2.74	3.06	3.06	2.92	2.80
4.CH ₃ COOH	2.98	2.99	3.02	3.08	3.01	3.08
5.H ₂ SO ₄	2.80	2.85	3.10	2.97	2.97	2.75
6.HCO ₂ H	2.73	3.09	3.14	3.13	3.14	2.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

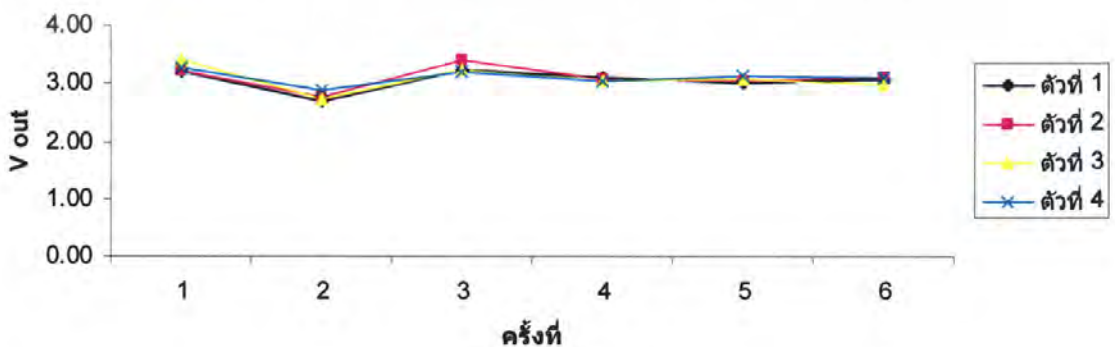


รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H⁺ ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ISFET ตัวที่ 4 จำนวน 6 ครั้ง

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H⁺ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย H₂O

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	3.19	2.70	3.24	3.12	3.00	3.08
ตัวที่ 2	3.19	2.74	3.40	3.06	3.03	3.11
ตัวที่ 3	3.40	2.73	3.23	3.04	3.08	2.99
ตัวที่ 4	3.25	2.89	3.19	3.04	3.15	3.10

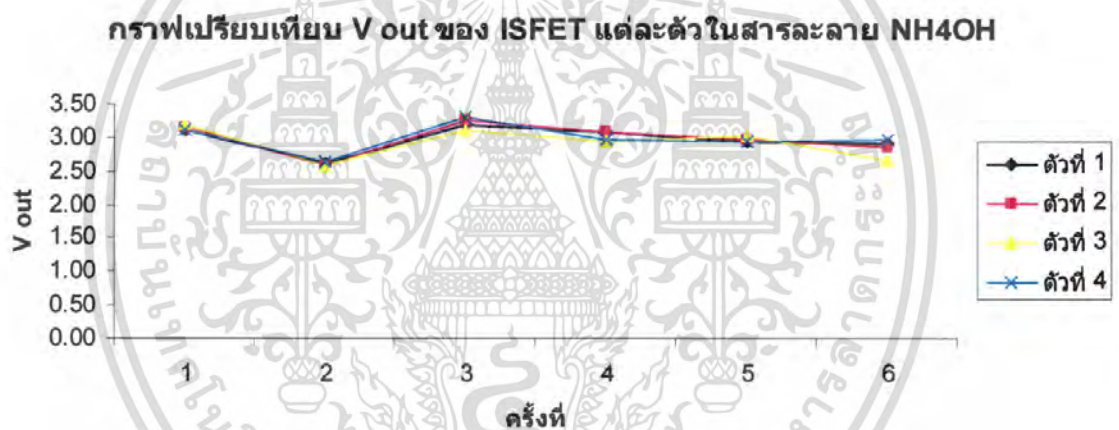
กราฟเปรียบเทียบ V out ของ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย H₂O



รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H⁺ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในสารละลาย H₂O ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย NH_4OH

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	3.11	2.61	3.19	3.08	2.94	2.90
ตัวที่ 2	3.15	2.59	3.25	3.09	2.96	2.85
ตัวที่ 3	3.20	2.57	3.12	2.93	3.03	2.67
ตัวที่ 4	3.11	2.63	3.30	2.98	2.94	2.96



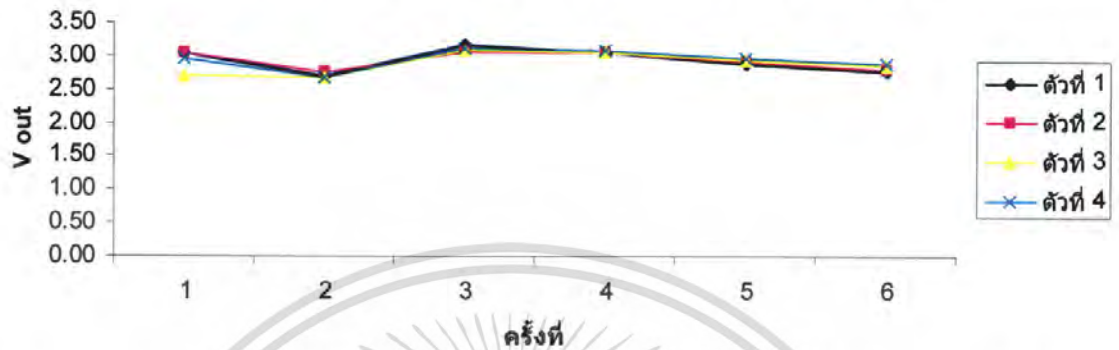
รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย NH_4OH

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย HCl

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	3.02	2.68	3.16	3.05	2.89	2.77
ตัวที่ 2	3.03	2.74	3.06	3.06	2.92	2.80
ตัวที่ 3	2.70	2.65	3.07	3.06	2.94	2.85
ตัวที่ 4	2.93	2.66	3.11	3.08	2.96	2.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบ V out ของ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCl

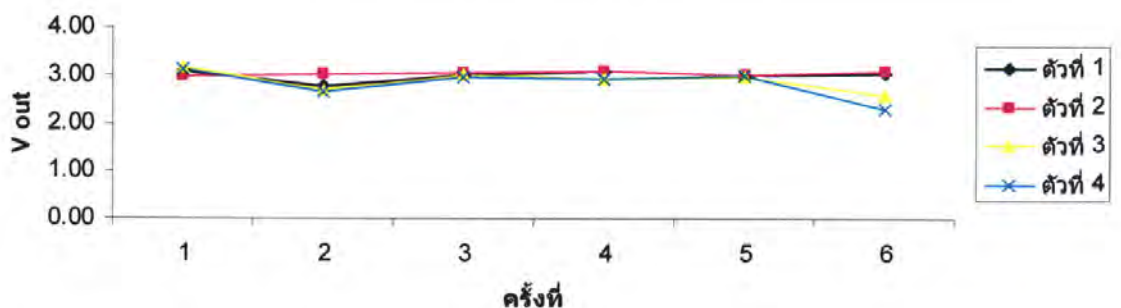


รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCl

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย CH_3COOH

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	3.08	2.76	3.00	3.08	3.00	3.04
ตัวที่ 2	2.98	2.99	3.02	3.08	3.01	3.08
ตัวที่ 3	3.17	2.68	3.00	2.91	2.98	2.58
ตัวที่ 4	3.13	2.65	2.98	2.92	3.00	2.30

กราฟเปรียบเทียบ V out ของ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย CH_3COOH

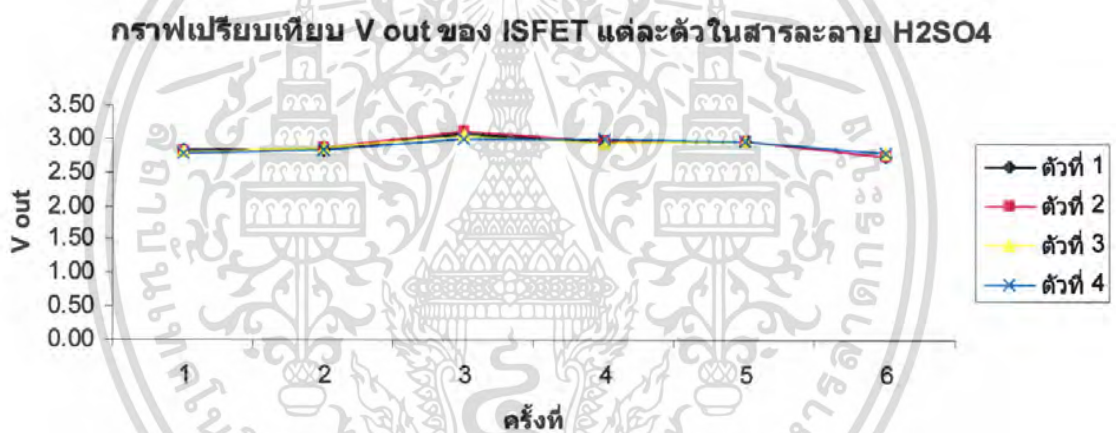


รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย H_2SO_4

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	2.84	2.82	3.08	2.98	2.97	2.75
ตัวที่ 2	2.80	2.85	3.10	2.97	2.97	2.75
ตัวที่ 3	2.81	2.86	3.04	2.95	2.96	2.81
ตัวที่ 4	2.78	2.83	3.00	2.99	2.98	2.79



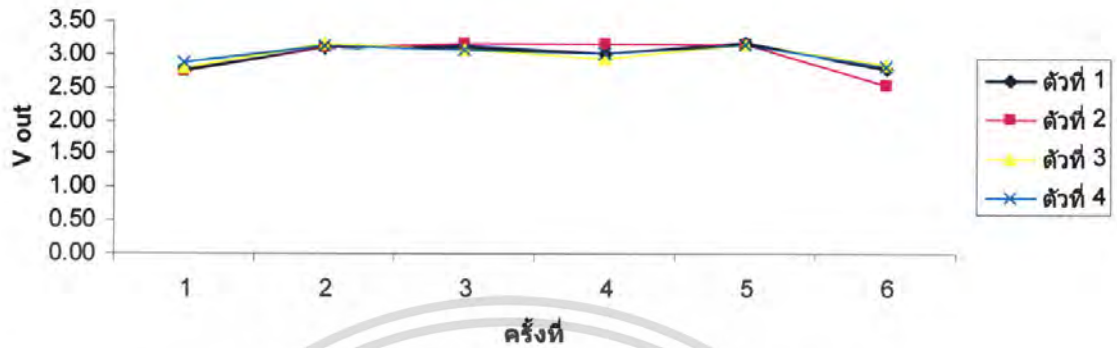
รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย H_2SO_4

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET แต่ละตัว
ในสารละลาย HCO_2H

ISFET	V out (V)					
ตัวที่ 1	2.74	3.08	3.11	3.00	3.16	2.78
ตัวที่ 2	2.73	3.09	3.14	3.13	3.14	2.53
ตัวที่ 3	2.76	3.15	3.06	2.92	3.14	2.82
ตัวที่ 4	2.86	3.12	3.04	3.01	3.15	2.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบ V out ของ ISFET แต่ละตัวในสารละลาย HCO₂H



รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ H⁺ ของอุปกรณ์ ISFET) แต่ละตัว ในสารละลาย HCO₂H

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H⁺ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลาย ชนิดต่างๆ

Solution	Vout (V)	
	ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
HCl	4.61	4.60
CH ₃ COOH	4.73	4.70
H ₂ SO ₄	4.79	4.76
HCO ₂ H	4.77	4.74
H ₂ O	4.73	4.71
KOH	4.18	4.18
NH ₄ OH	4.68	4.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรด CH_3COOH ที่ค่า pH ต่าง ๆ

pH	Vout (V)	
	ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
1	4.67	4.65
2	4.68	4.66
3	4.69	4.67
4	4.70	4.67
5	4.70	4.68

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรด H_2SO_4 ที่ค่า pH ต่าง ๆ

pH	Vout (V)	
	ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
1	4.72	4.73
2	4.73	4.74
3	4.75	4.75
4	4.76	4.76
5	4.78	4.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายเบส NH_4OH ที่ค่า pH ต่าง ๆ

pH	Vout (V)	
	ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
8	4.54	4.57
9	4.65	4.60
10	4.70	4.63
11	4.75	4.69
12	4.75	4.72

ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายกรดต่างชนิดกันที่ค่า pH เท่ากัน

pH	Solution	Vout (V)	
		ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
1	HCl	4.55	4.55
	H_2SO_4	4.60	4.63
	CH_3COOH	4.63	4.66
2	HCl	4.56	4.57
	H_2SO_4	4.65	4.63
	CH_3COOH	4.70	4.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ ของอุปกรณ์ ISFET วัดในสารละลายเบสต่างชนิดกันที่ค่า pH เท่ากัน

pH	Solution	Vout (V)	
		ISFET ตัวที่ 1	ISFET ตัวที่ 2
8	KOH	4.18	4.18
	NH ₄ OH	4.71	4.67
9	KOH	4.71	4.68
	NH ₄ OH	4.75	4.69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพัฒนา

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบวัดความเข้มข้นของไอออนของสารละลายโดยใช้อุปกรณ์ ISFET ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ ตัวที่ 1, ตัวที่ 2, ตัวที่ 3 และตัวที่ 4 สารละลายที่นำมาใช้ในการวัดและวิเคราะห์นั้นมีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่

- น้ำกลั่น (H_2O)
- สารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- สารละลายเบสแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
- สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- สารละลายกรดฟอร์มิก (HCO_2H)

ซึ่งสารละลายทั้ง 7 ชนิด ที่นำมาวัดปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้น สามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมาได้ ทำให้อุปกรณ์แบบ ISFET สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายทั้งหมดได้

จากการดำเนินการวิจัยผลการดำเนินการวิจัยจะพิจารณาปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายจากการแตกตัวเป็นไอออนของสารละลายกรด-เบส เมื่อละลายน้ำ ซึ่งเป็นสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แบ่งเป็น

อิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) ได้แก่สารละลายกรดอ่อน-เบสอ่อน คือ กรดหรือเบสที่แตกตัวได้ไม่ถึง 100% หรือแตกตัวไม่หมด เช่น CH_3COOH , NH_4OH

อิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) ได้แก่สารละลายกรดแก่-เบสแก่ คือ กรดหรือเบสที่แตกตัวได้หมด 100% เช่น HCl, H_2SO_4 ,

โดยจากการนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากัน สารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า จะเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แรงกว่า

เปรียบเทียบปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของสารละลายแต่ละชนิด

สารละลายกรด $H_2SO_4 > CH_3COOH > HCO_2H > HCl$

สารละลายที่เป็นกลาง H_2O

สารละลายเบส $NH_4OH > KOH$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

วิน บรรจงปรุ, วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, กรรณิกา อุปะโคตร, โอภาส ตริทวีศักดิ์, ชาญเดช หรุ
อนันต์ และ อัมพร โพธิ์ไย, การสร้างและการวัดคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์
Hydrogen ion-sensitive field effect transistor, จะเชิงเทรา ศูนย์เทคโนโลยีไม
โครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์
แห่งชาติ

วิน บรรจงปรุ, วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, กรรณิกา อุปะโคตร, โอภาส ตริทวีศักดิ์, ชาญเดช หรุ
อนันต์ และ อัมพร โพธิ์ไย, การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อความเข้มข้นของ
ไอออนไฮโดรเจน ช่วงเวลาการตอบสนองและฮิสเตอร์รีซิสของหัววัดค่าความเป็น
กรด-เบสแบบ ISFET เปรียบเทียบกับหัววัดค่าความเป็นกรด-เบสแบบกระดาษ
แก้ว, จะเชิงเทรา ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยี
อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

P. Bergveld, "Development of an ion-sensitive solid-state device for
neurophysiological measurement", IEEE Transactions on Electron devices,
Vol. BME-17(1), pp. 59-63 (1970)

www.datasheetcatalog.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้